

PROGRAMA ASTURIAS 2016-2017

RESULTADOS DEL PROYECTO:

**CONCENTRADORES SOLARES LUMINISCENTES: DESARROLLO DE UN
DEMOSTRADOR DE VENTANA FOTOELÉCTRICA (SMARTWINDOW)**

REFERENCIA Nº: IDI/2016/000293

Entidad Beneficiaria:



Fecha inicio: 01/10/2016

Fecha fin: 31/12/2017

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto plantea aumentar la eficiencia en el uso de concentradores luminiscentes aplicados a la captación de energía solar. Hasta el momento, los concentradores solares presentan ciertas limitaciones que reducen la capacidad de los sistemas de captación de energía fotovoltaica de ser competitivos ante los recursos fósiles. Una de esas limitaciones se basa en que los concentradores luminiscentes, como las células de silicio, absorben radiación en un ancho de bando reducido.

En este proyecto se pretende aumentar significativamente el rango de captura, que se extenderá de 325 nm a 625 nm. Para ello se depositará sobre vidrio una única capa delgada que combine diferentes especies fluorescentes, cada una de las cuales capturará una zona específica del espectro electromagnético, evitando así la necesidad de usar múltiples concentradores para una única estructura. Es esta combinación de las diferentes moléculas la que posibilitará ampliar el ancho de banda de captura del espectro electromagnético.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de ese proyecto se centra en consolidar el desarrollo de una nueva tecnología que permita aumentar el rendimiento de los sistemas de captación de energía solar a través del uso de concentradores luminiscentes, al mismo tiempo que reducir los costes.

Como objetivos específicos se plantean:

- El desarrollo de concentradores solares luminiscentes con eficiencias finales superiores al 15% y un ancho de banda de captura de 300nm. Para ello se recubrirán vidrios con tintes luminiscentes.
- El desarrollo de un sistema híbrido concentrador solar luminiscente – celdas fotovoltaicas. A la configuración de concentrador solar luminiscente óptimo logrado se le acoplarán celdas fotovoltaicas en diferentes geometrías.
- Desarrollo un demostrador de 50cmx50cm, que incluirá el concentrador solar luminiscente con células acopladas mediante la construcción de una “ventana fotoeléctrica”.

3. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

H1. DESARROLLO DE CONCENTRADORES SOLARES LUMINISCENTES CON ABSORCIÓN EN EL RANGO ULTRAVIOLETA –VISIBLE (325 NM - 475 NM).

T1.1. Concentradores con absorción en el rango UV-visible (325nm-475nm)

- **Selección y diseño de moléculas con absorción en esa zona del espectro**

Se comenzó esta primera tarea llevando a cabo un estudio bibliográfico a través del cual se determinaron las moléculas con propiedades más adecuadas para la captación de la luz en el rango definido. Tras éste, se concluye que las especies que mejor se adaptaban a las necesidades planteadas son las pertenecientes a la familia terphenyl y diaza. En esta familia de moléculas ya se encontraron especies luminiscentes con los requisitos requeridos de absorción, por lo que, en principio, no parece necesario ensayar con nuevas moléculas.

Las especies fluorescentes seleccionadas han sido las recogidas en la siguiente tabla:

Tabla 1. Especies fluorescentes seleccionadas

Molécula
1. dimethyl-Terphenyl
2. p-Terphenil
3. tetramethyl-quaterphenyl
4. methyl-butyl-quaterphenyl
5. Butyl-PBD
6. Quinolón 390
7. Diaza

Una vez realizada la selección previa, se llevaron a cabo pruebas ensayo y error, basadas en las características ópticas, para determinar, entre las definidas anteriormente (en el cuadro anterior), aquellas que se ajustan mejor al rango (325nm-475nm). Para ello se han caracterizado ópticamente diferentes moléculas, en particular la eficiencia cuántica de las mismas, tal y como se describe en una sección posterior.

Para ello, con cada una de estas especies de la tabla anterior fue preparada una disolución a partir de tolueno como disolvente, PMMA como matriz de soporte y como especie luminiscente cada una de las moléculas seleccionadas previamente. El PMMA es un material muy transparente, presenta, además, un índice de refractividad de 1.5, similar al de vidrio sobre el que se deposita la disolución. Estas características lo hacen idóneo para esta aplicación.

Las disoluciones preparadas tenían una concentración del 1%, haciendo este número referencia a la proporción de especie luminiscente utilizada con respecto a la matriz de soporte. Para todas las moléculas se utilizó la misma concentración con el objetivo de compararlas, pues el objetivo era seleccionar la especie más eficiente entre las seleccionadas previamente.

Posteriormente, con estas disoluciones se llevaron a cabo las tareas de comprobación de la eficiencia de los diferentes concentradores luminiscentes obtenidos en las tareas sucesivas (ver detalles en la sección de caracterización óptica).

Durante la anualidad 2017 se investigó también con otras moléculas de naturaleza orgánica con absorción en el rango 325-475 nm que pudiesen presentar una mayor eficiencia cuántica.

Una molécula luminiscente que entra dentro de las especificaciones de absorción requeridos es el derivado de la benzopiróna mostrado en la Figura 1, a la que nos referiremos como P6.

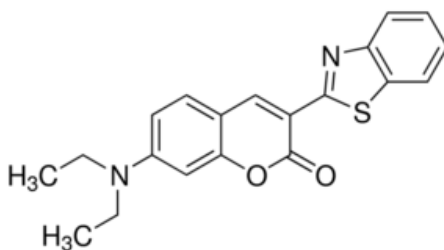


Figura 1. Pigmento luminiscente P6

Para depositar esta molécula sobre el vidrio, como ya se hizo con las anteriores moléculas ensayadas, se preparó una disolución a partir de tolueno como disolvente, PMMA como matriz de soporte y P6 como especie luminiscente.

Se ensayaron diferentes concentraciones de especie luminiscente respecto al PMMA utilizado como soporte, encontrando resultados satisfactorios para concentraciones del 1% en P6. Estas disoluciones fueron depositadas sobre vidrios¹ por la técnica de *spin-coating*, según se describirá en el siguiente apartado.

En determinados casos se ha observado la formación de agregados entre moléculas, que disminuyen la eficiencia del sistema debido a procesos de *scattering*. En el caso del sistema P6 a simple vista no se observa la deposición de partículas, aún así se filtro la disolución empleando un filtro con tamaño de poro menor de 100 nm y se depositó sobre un vidrio, estudiando sus propiedades ópticas, según se describe en los siguientes apartados.

Posteriormente, con las muestras preparadas se llevaron a cabo las tareas de comprobación de la eficiencia óptica cuántica de los diferentes concentradores luminiscentes obtenidos en las tareas sucesivas (ver detalles en la sección de caracterización óptica).

En una parte del proyecto se investigó sobre los *quantum dots* (QDs), en particular “*graphene quantum dots*” (GQDs). Los GQDs son pequeños fragmentos de grafeno donde el transporte de electrones está confinado en las tres dimensiones espaciales, lo que genera un efecto de “*quantum size*”; es decir, en función del tamaño se generan niveles de energía discretos que proporcionan propiedades muy diferentes de las del material a tamaño micro o macro (Figura 2).²

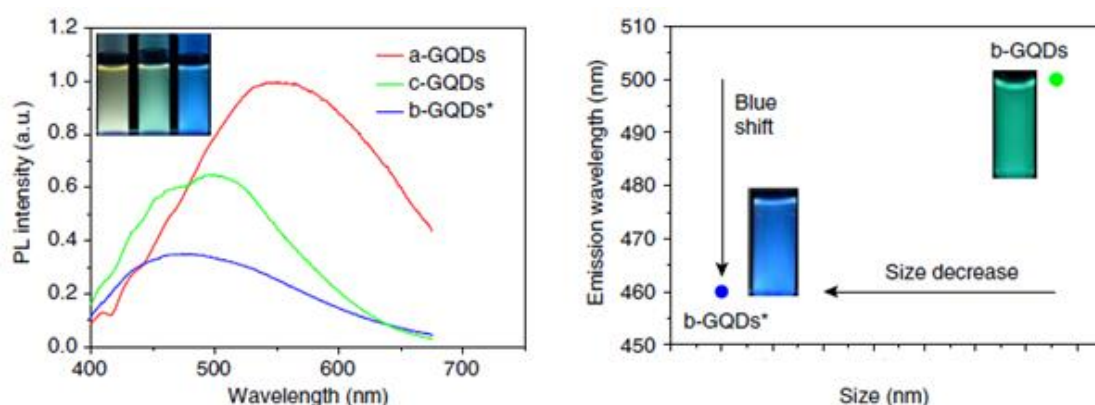


Figura 2. Propiedades ópticas de los GQDs en función de su tamaño.

Los GQDs tienen dimensiones por debajo de los 20 nm,³ aunque hay científicos que consideran GQDs partículas por debajo de 100nm.²

Es posible sintetizar GQDs por métodos *top-down* y *bottom-up* (Figura 3⁴), que pueden ser procesos físicos y químicos. Por citar alguno: apertura de fullerenos, rotura de grafeno (G) u óxido de grafeno (OG) desde tamaño micro a nano por métodos hidrotermales o electroquímicos; fragmentación de nanomateriales derivados de grafito en medio fuertemente ácido, etc. Alguno de estos métodos tiene

¹ Los vidrios deben estar perfectamente limpios y sin trazas de ningún disolvente.

²a) L. Li, G. Wu, Gu. Yang, J. Peng, J. Zhao, J.-J. Zhu *Nanoscale* **2013**, 5, 4015. b) L. A. Ponomarenko, F. Schedin, M. I. Katsnelson, R. Yang, E. W. Hill, K. S. Novoselov and A. K. Geim, *Science* **2008**, 320, 356–358.

³ A) M. Bacon, S. J. Bradley, T. Nann *Part. Part. Syst. Charact.* **2014**, 31, 415–428.

⁴ Esquema extraído de la referencia: Wang, Y.; Hu, A. *J. Mater. Chem. C* **2014**, 2, 6921–6939.

sus limitaciones, ya sea el requerimiento de equipos sofisticados o el empleo de materiales de partida caros, obteniéndose además en determinados casos rendimientos muy bajos.

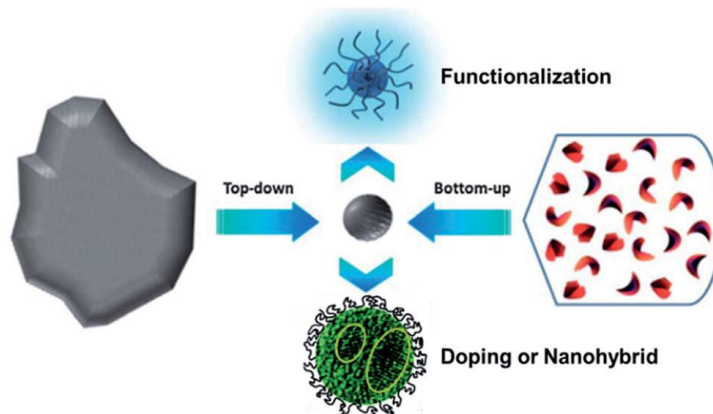


Figura 3. Representación de rutas de síntesis top-down y bottom-up

Comenzamos el estudio empleando un método de síntesis *top-down*, es decir, partimos de un precursor con un tamaño determinado que se fragmenta en pequeñas piezas. Esta técnica presenta ciertas ventajas frente a un método *bottom-up*: proporciona un mejor control del tamaño y, por tanto las propiedades finales del material. Tiene como contrapartida que es un método válido solo para un número determinado de estructuras y no es apto para una producción a gran escala.

Como precursores se emplearon dos derivados de grafeno: óxido de grafeno (OG) y grafeno multicapa,⁵ de tamaño máximo en torno a las 100 micras, al que nos referiremos como GMC (ver caracterización en la subtaska 1.1.3).

En los derivados de grafeno, la energía entre las capas es baja, de manera que es posible su exfoliación en condiciones adecuadas. Sin embargo, para llegar a los QGDs lo que interesa es disminuir el tamaño de partícula al orden de los nanómetros para que se manifiesten las propiedades optoelectrónicas asociadas al confinamiento cuántico. En el caso del OG, una vez reducido su tamaño, el paso siguiente sería la reducción a grafeno.

La fragmentación de los precursores se realizó por sonofragmentación, es decir, rotura de materiales en fragmentos de tamaño nanométrico mediante ultrasonidos. En esta técnica hay una interacción directa partícula–onda de choque. El ultrasonido (gran potencia / baja frecuencia) crea una cavitación y, por lo tanto, intensas fuerzas de corte. Las condiciones extremas del colapso de la burbuja de cavitación y la colisión entre partículas muelen los materiales a un tamaño muy fino.

El esquema del proceso de síntesis de QGDs seguido se muestra en la Figura 4.

⁵ Para que sea considerado grafeno tiene que tener un máximo de diez capas. El material empleado tiene un máximo de 6 capas.

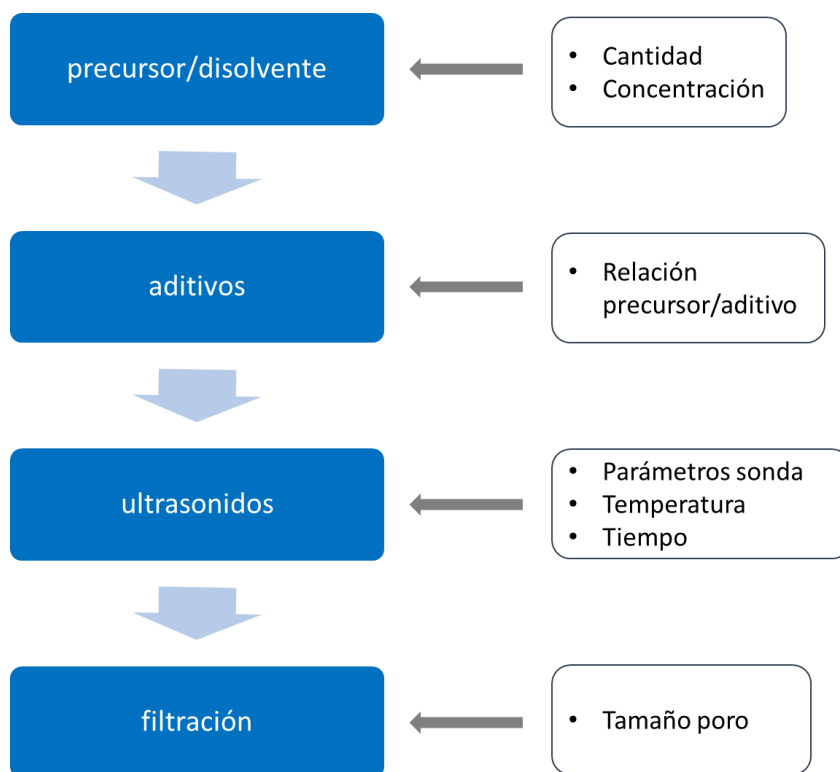


Figura 4. Esquema del proceso de síntesis de GQDs por sonofragmentación

En general, se determinó la cantidad de precursor de GQDs a emplear, así como su concentración en el disolvente de trabajo, encontrando que las condiciones más adecuadas corresponden a una concentración en torno a 0,5 mg/ml.⁶

En el caso del OG se trabajó en medio acuoso⁷ y en disolventes orgánicos (tolueno, dimetilformamida, tetrahidrofurano y triclorobenceno) cuando GMC es el precursor de los GQDs.

Como aditivos que actúen de plantilla para controlar el tamaño de partícula se emplearon polímeros orgánicos: PMMA y PEG.⁸ El PMMA es la matriz soporte de las especie luminiscentes, es un material muy transparente, presenta, además, un índice de refractividad de 1,5, similar al de vidrio sobre el que se deposita la disolución. El PEG empleado es un co-polímero PEG-PPG-PEG con un 30% de peso en PEG. Es un surfactante no iónico empleado como plantilla para la formación de materiales mesoporosos.⁹

También se adicionaron otros reactivos con el objeto de estudiar su influencia bien como plantilla de GQDs (ácido oleico), o bien como aditivos para anclarse a los bordes de los GQDs de cara a estabilizarlos y modificar su propiedades ópticas (di-tert-butyl ethylphenol, di-tert-butyl hydroxybenzaldehyde), sin embargo los resultados preliminares no fueron muy satisfactorios.

Al igual que ocurre en la síntesis de los puntos cuánticos de carbono (CQDs), en los GQDs se tienden a formar agregados que no presentan fluorescencia. Si se pasiva la superficie con algún polímero, se

⁶ Se produce una suspensión del derivado de grafeno en el disolvente.

⁷ Se empleó agua ultrapura Milli-Q.

⁸ La cantidad optimizada para el PEG fue una proporción en peso 50 veces superior al precursor empleado.

⁹ S. Thomas, N. Kalarikkal, A. M. Stephan, B. Raneesh (2014) “*Advanced Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications*”, Apple Academic Press, Toronto, New Jersey.

evita la formación de agregados y las partículas presentan fluorescencia. Esto es debido a que en la pasivación se activan determinados niveles de energía implicados en este tipo de emisión.

En medio acuoso se empleó también ácido metacrílico con la doble misión de generar un medio ácido, adecuado para la fragmentación del OG, así como plantilla para controlar el tamaño. Se varió su concentración, con el objeto de estudiar la influencia del pH en los GQDs obtenidos.

Para estudiar la influencia de cationes metálicos en la fluorescencia de los GQDs se emplearon sales de plomo y molibdeno, que se añadieron inicialmente al medio de reacción. También se adicionaron otros aditivos (DMSO, DMF) de cara a desplazar el espectro de absorción y emisión de los GQDs.

Una vez preparada la mezcla, se sometió a ultrasonidos, empleando para ello una sonda de energía ultrasónica. Se ajustaron los parámetros de amplitud y pulso para cada una de las reacciones ensayadas.

Los tiempos de reacción variaron desde los 30 min hasta las 5 horas. En cuanto a la temperatura, se comenzó trabajando a 0 °C, pero al no obtener ningún resultado positivo, se realizó a temperatura ambiente. En este proceso hay que tener presente que se genera una cantidad enorme de energía en forma de calor, alcanzándose en muchos casos la temperatura de ebullición del disolvente.

Una vez finalizado el proceso de sonofragmentación, se dejó que la suspensión alcanzase temperatura ambiente y el líquido sobrenadante se filtró, empleando filtros de tamaño de poro 0,1; 0,2 y 0,45 micras.

La fluorescencia de las disoluciones se comprobó irradiando las mismas con una lámpara UV a una longitud de onda de 365 nm. Se observó fluorescencia en la disolución preparada en las condiciones mostradas a continuación, mientras que el resto de disoluciones no presentaban fluorescencia, por lo que nos centramos en ella para los estudios de propiedades ópticas descritas en los siguientes subapartados:

- Precursor/disolvente: GMC/tolueno (0,5 mg/ml)
- Aditivo: PEG (relación GMC/PEG: 1/50)
- Sonda ultrasonidos: 4 h; 70 %A; 0,5 ciclo
- Filtrado: 0,45 μm

Para simplificar, nos referiremos como PEG-GMC

- **Pruebas de deposición de la capa delgada de moléculas luminiscentes mediante técnicas de “spin coating”. Optimización del proceso.**

Una vez seleccionadas las moléculas más eficaces para el rango del espectro seleccionado y haber preparado las disoluciones necesarias con las especies luminiscentes correspondientes, para cada una de ellas se procedió a la deposición de una capa de la misma sobre vidrio mediante técnicas de “spin coating”. En la Figura 5 se muestran dos vidrios recubiertos por *spin-coating* con dos diferentes especies luminiscentes.



Figura 5. Concentradores solares luminiscentes

Este proceso permitió optimizar diferentes parámetros, como se planteaba en la solicitud. En concreto se consideraron el tiempo de deposición y la velocidad de giro. Lo que se buscaban eran los parámetros adecuados para conseguir una elevada absorción, pero sin llegar a saturarla, para así evitar posibles pérdidas por reabsorción.

La siguiente tabla muestra los diferentes parámetros ensayados y las correspondientes absorciones para la especie diaza, que es la que mejores eficiencias ha proporcionado (ver siguiente sección)

Tabla 2. Parámetros ensayados y absorciones para la especie diaza

velocidad de giro (rpm)	tiempo de giro (seg)	Absorción en el pico de 420nm (%)
600	45	18
620	45	17,1
640	45	16,9
660	45	16,6
680	45	16,5
700	45	16,3
600	40	20
600	45	19,8
600	50	19,8

Los parámetros óptimos obtenidos que conducen a la máxima absorción han sido: Velocidad de giro de 600 rpm, tiempo de giro de 40 segundos

En el caso de los GQDs, la deposición de la disolución PEG-GMC se realizó también por *spin-coating*, empleando los parámetros del proceso antes mencionados.

En la Figura 6, a la derecha se muestra el vidrio recubierto con la disolución PEG-GMC e irradiado con luz ultravioleta (UV) a una longitud de onda de 365 nm, comparándolo con un vidrio sin recubrir (a la izquierda).

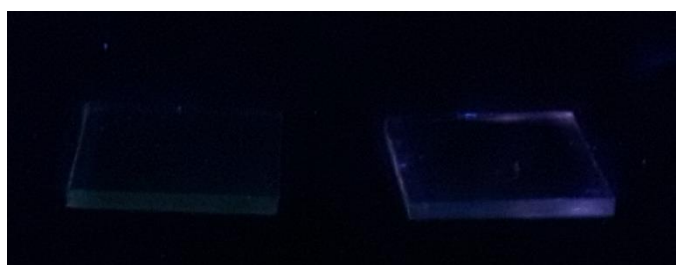


Figura 6. Vidrio recubierto con PEG-GMC irradiado con luz $\lambda=365$ nm

- **Caracterización óptica.**

Paralelamente se llevó a cabo la caracterización óptica de los nuevos concentradores preparados a partir de las especies seleccionadas con el fin de determinar cuáles de estas moléculas se ajustan mejor a las condiciones de absorción definidas.

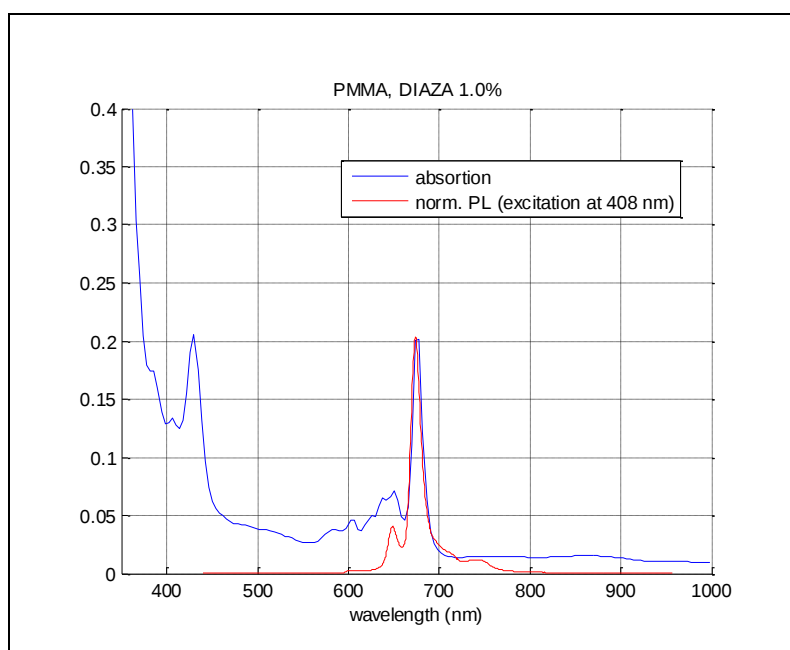
En primer lugar, se llevó a cabo la medida de la eficiencia cuántica mediante el uso de esfera integradora. Se trata de una esfera en cuyo interior se sitúa una muestra sobre la que se hace incidir luz que excita la muestra. Mediante el fenómeno de la fluorescencia, esa luz es re-emitida a diferentes longitudes de onda. La esfera integradora permite recoger la luz procedente de diferentes direcciones, algo que no se podría efectuar con un detector convencional que sólo recogiese la luz de una única dirección.

Las medidas de la eficiencia cuántica para las moléculas seleccionadas inicialmente aparecen reflejadas en la siguiente tabla:

Molécula	Rendimiento
1. dimethyl-Terphenyl	6%
2. p-Terphenil	7,9%
3. tetramethyl-quaterphenyl	11,3%
4. methyl-butyl-quaterphenyl	4,1%
5. Butyl-PBD	8,5%
6. Quinolon 390	7%
7. Diaza	14,2%

Como se desprende de la tabla, los concentradores con mayor eficiencia son los que incorporan a la especie diaza (eficiencia del 14,2%).

Se muestran a continuación los correspondientes espectros de absorción y emisión para el concentrador preparado a partir de la especie diaza.



Espectros de absorción y fotoluminiscencia para el concentrador con especie M7 de familia diaza

La medida de la eficiencia cuántica para P6 fue del 16%, superior al obtenido con las anteriores moléculas.

En la siguiente imagen, Figura 7, aparecen reflejados los espectros de absorción (línea azul) y de emisión (línea roja).

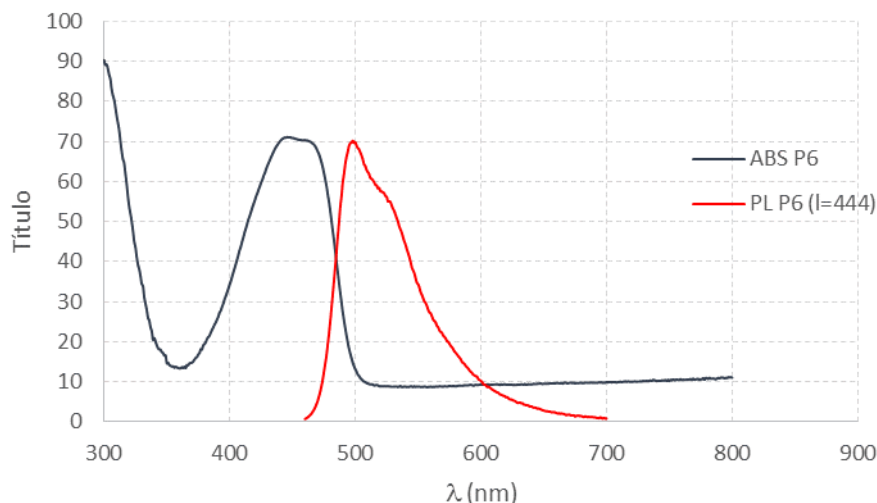


Figura 7. Espectros de absorción y emisión para P6

El desplazamiento de Stokes para la muestra P6 es de 50 nm, un valor relativamente alto, lo que contribuye a disminuir las pérdidas por reabsorción.

Para los GQDs las medidas de absorción se realizaron en disolución de tolueno. El espectro muestra que se produce absorción por debajo de los 500 nm, superando el rango objetivo de esta tarea. Este espectro concuerda con los espectros encontrados en la bibliografía para GQDs.¹⁰ En la parte derecha de la Figura 8 se muestra la disolución PEG-GMC bajo luz UV $\lambda=365$ nm.

¹⁰ Ver referencia 4 y T. Gao , X.Wang, L.-Y. Yang, H. He, X.-X. Ba, J. Zhao, F.-Lei Jiang, Y Liu *ACS Appl. Mat. Interfaces* **2017**, 29, 24846-24856.

Según estos datos, y comparándolos con los de la bibliografía, es de esperar que la emisión se produzca en el rango 590-690 nm y su tamaño sea en torno a 2 nm.

La disolución PEG-GMC es estable durante largos períodos de tiempo, sin embargo, una vez depositada sobre vidrio pierde la fluorescencia. En la Figura 9 se recogen las muestras de la Figura 6 transcurridas unas horas tras la deposición.



Figura 8. Espectro de absorción de PEG-GMC y disolución bajo luz UV

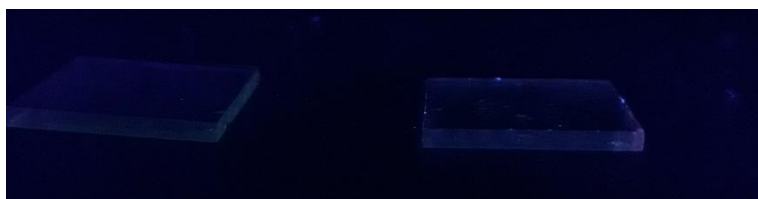


Figura 9. Vidrio recubierto con PEG-GMC irradiado con luz $\lambda=365$ nm

La fluorescencia depende de la transferencia de carga. La pérdida de fluorescencia en estado sólido podría deberse al sistema creado: al depositar una película y eliminar el disolvente, las partículas de GQDs están conectadas y por tanto el par fotoexcitado electrón-hueco se relajará preferiblemente a través de estas estructuras acopladas, experimentando una radiación no radiactiva, sino de recombinación a través de los niveles de energía de banda media que surgen debido a la presencia de la funcionalización de la superficie en estado sólido.

En cuanto a la caracterización físico-química, en la Figura 10 se muestra el análisis morfológico obtenido por microscopía SEM de una fina película de PEG-GMC depositada sobre vidrio. Como puede observarse el recubrimiento es bastante uniforme.

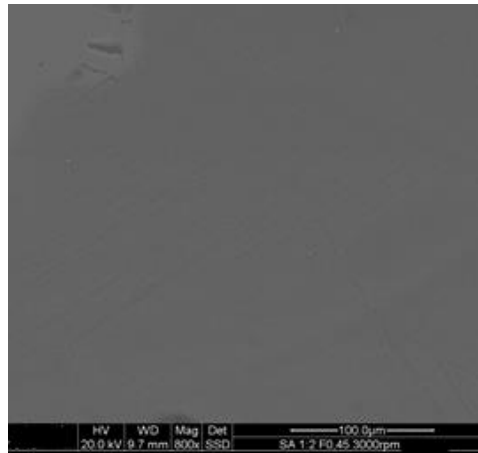


Figura 10. Morfología de PEG-GMC depositado sobre vidrio

En la Figura 11 se recogen los espectros de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) de los precursores (GMC en verde y PEG en azul) y el de PEG-GMC (en rojo). En éste último se observan como determinadas bandas del PEG se han modificado debido a su interacción con los GQDs.

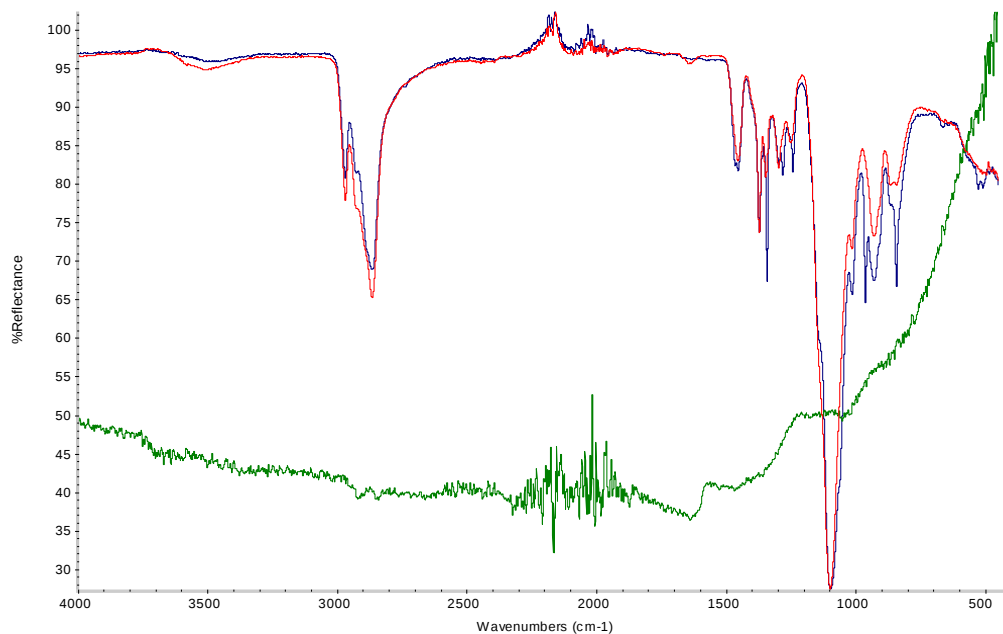


Figura 11. FT-IR de PEG (azul), GMC (verde) y PEG-GMC (rojo)

En la Figura 12 se recoge el análisis granulométrico del precursor GMC y el difractograma obtenido por difracción de rayos X (DRX).

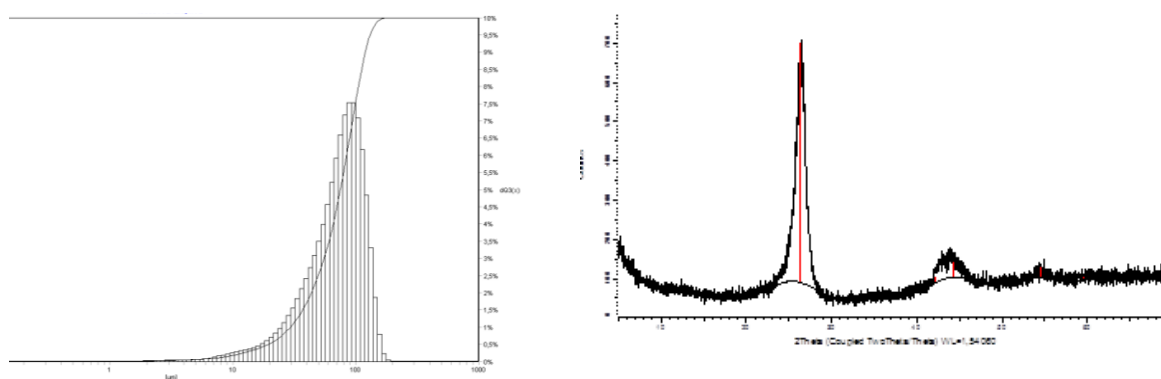


Figura 12. Distribución granulométrica y DRX de la muestra GMC

El precursor presenta una distribución homogénea de tamaño de partícula en torno a las 100 micras. En el difractograma, el pico que aparece en torno a $2\theta = 26^\circ$ (correspondiente a los índices de Miller 002) es típico de los derivados de grafeno. Aplicando la ley de Debye-Sherrer con la intensidad y anchura de dicho pico se puede obtener información del número de capas.

En el caso de los GQDs preparados, no dispusimos de suficiente cantidad de muestra para realizar su análisis estructural.

Se continuará trabajando en esta línea de cara a obtener resultados satisfactorios.

En lo que respecta a la caracterización físico-química de los graphene quantum dots, estos estudios no son realizados para las moléculas orgánicas luminiscentes seleccionadas (P6) puesto que estas técnicas no aportan información complementaria en el caso que nos ocupa. En las técnicas de microscopía electrónica los recubrimientos orgánicos pueden no sobrevivir a las condiciones que existen en la cámara (alto vacío e impacto de electrones de alta energía). En estas condiciones muchas muestras pueden reaccionar, transformándose en especies no deseadas, o bien volatilizarse.

T1.2. Desarrollo de concentradores solares luminiscentes con absorción en el rango visible (475 nm -625 nm).

- Selección y diseño de moléculas con absorción en esa zona del espectro**

Para este nuevo rango de longitud de onda se estudiaron otras moléculas. En este caso las especies fluorescentes seleccionadas entre las revisadas en la bibliografía han sido:

Tabla 3. Especies fluorescentes seleccionadas

Molécula
1. 2H-pyrano-naphthyridin
2. (6-amino-3-imino-3H-xanthen-9-yl) perchlorate
3. [6-(ethylamino-3H-xanthen-9-yl)] perchlorate
4. N-ethyl-ethanaminium perchlorate
5. isoquinoline-1,3(2H)-dione
6. PtTPBP

Como en el caso anterior, fue comprobada la eficiencia de los diferentes concentradores utilizando cada una de esas moléculas como especie fluorescente, para así seleccionar el dispositivo con mayor eficiencia, llevando a cabo la deposición previa (tareas posteriores).

Como en el caso anterior, para llevar a cabo las pruebas de caracterización, en la fase previa a la deposición, con cada una de estas especies fue preparada una disolución de concentración 1% a partir de tolueno como disolvente, PMMA como matriz de soporte y como especie luminiscente cada una de las moléculas bajo estudio.

Igualmente, se estudiaron otras moléculas de naturaleza orgánica que cumplieran los requisitos de absorción. Se encontró que ciertas moléculas de tipo perileno presentaban fuerte absorción en el rango buscado. Estos pigmentos contienen anillos aromáticos conjugados, que les confiere buena habilidad para la absorción de la luz. En Figura 13 se muestra un pigmento comercial de este tipo con la parte perileno enmarcada en rojo.

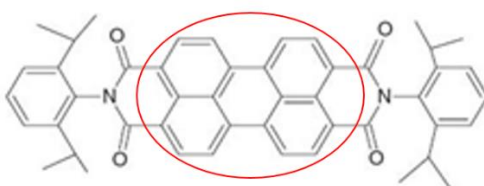


Figura 13. Pigmento fluorescente comercial de tipo perileno.

En este caso finalmente las especies fluorescentes seleccionadas han sido las recogidas en la Tabla 4, en la que se muestra también la concentración óptima a emplear de cada una de ellas:

Tabla 4. Especies con absorción en el rango 475-625 nm

Molécula	%
P1	5
P2	4
P3	5
P4	5
P5	3

Las pruebas con las partículas *graphene quantum dots* (GQDs), así como su deposición sobre un sustrato de vidrio y la caracterización óptica y físico-química se describió en la Tarea 1.1. En los ensayos realizados se comprobó que el espectro de absorción de las partículas sintetizadas abarca hasta los 500 nm, cubriendo parte del rango objetivo de esta tarea. Sin embargo, los resultados obtenidos con estas partículas muestran que es necesario abordar estudios adicionales de cara a su estabilización y optimización de los resultados finales. Por tanto, se optó por centrarse en las especies seleccionadas en la Tabla 1 anterior.

Así, como en el caso anterior, fue comprobada la eficiencia de los diferentes concentradores utilizando cada una de esas moléculas como especie fluorescente, para así seleccionar el dispositivo con mayor eficiencia, llevando a cabo la deposición previa (tareas posteriores).

Como ya comentamos, para llevar a cabo las pruebas de caracterización, en la fase previa a la deposición, con cada una de estas especies fue preparada una disolución a partir de tolueno como

disolvente, PMMA como matriz de soporte y como especie luminiscente cada una de las moléculas bajo estudio. Los tiempos necesarios para la disolución de las especies variaron desde una hora hasta veinticuatro, según la solubilidad de la especie en el sistema de trabajo.

Se optimizó la concentración a emplear de cada una, en función de su intensidad de absorción. Las concentraciones óptimas empleadas para cada una de ellas se recogen en la Tabla 4.

- **Pruebas de deposición de la capa delgada mediante técnicas de spin coating y/o evaporación molecular. Optimización del proceso.**

Como en el rango de longitudes anterior, las disoluciones preparadas fueron depositadas mediante “spin coating”. Para llevar a cabo este proceso nuevamente fueron optimizados el tiempo de deposición y la velocidad de giro.

La siguiente tabla muestra los diferentes parámetros ensayados y las correspondientes absorciones correspondientes a la especie PtTPBP, que es la que mejores resultados ha proporcionado:

Tabla 5. Parámetros ensayados y absorciones correspondientes a la especie PtTPBP

velocidad de giro (rpm)	tiempo de giro (seg)	absorción en el pico de 615 nm (%)
430	20	52
410	20	52,4
390	20	53,9
370	20	54,3
350	15	55
350	20	54,8
350	25	54,6
350	30	54,5
350	35	54,5

Finalmente, los parámetros óptimos obtenidos han sido: Velocidad de giro de 350 rpm, tiempo de giro de 15 segundos.

Nos encontramos en una situación semejante que en rango (325nm-475nm), pues con una especie molecular se cubre el rango propuesto, en este caso la PtTPBP, por lo que no fueron llevadas a cabo pruebas de combinación entre alguna de las moléculas previamente seleccionadas.

Para el caso de las moléculas P1-P5, las condiciones más adecuadas de deposición han sido: primera fase de 0 a 500 rpm en 3 segundos; una vez alcanzada la velocidad, permanecer rotando durante 30 s.

En la Figura 14 se muestra los concentradores solares P1-P5 depositados por *spin-coating* sobre vidrio.

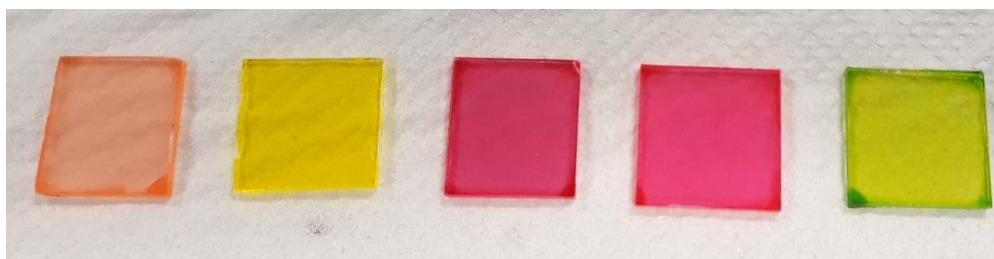


Figura 14. Concentradores solares P1-P5 (de izquierda a derecha)

• Caracterización óptica

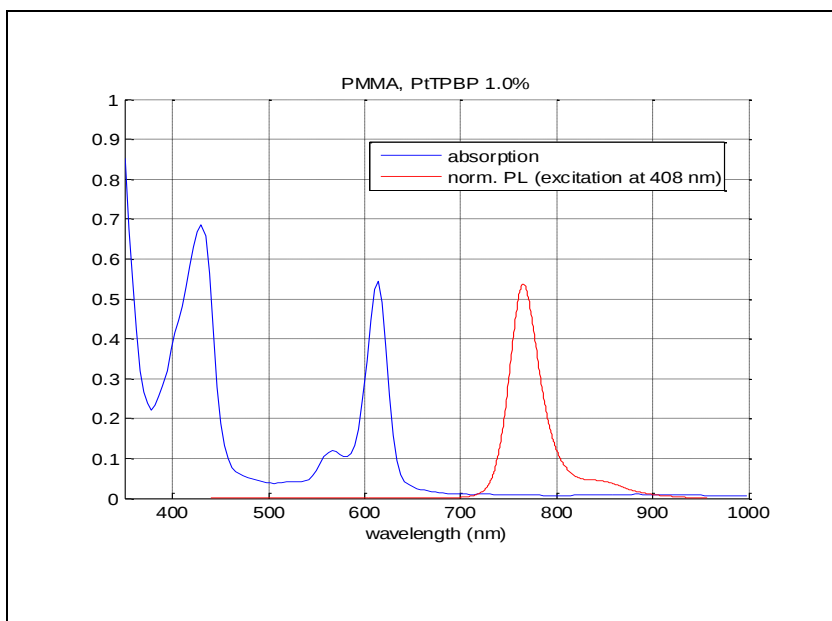
Al igual que en la tarea anterior se estudiaron los espectros de absorción, fotoluminiscencia y eficiencia cuántica. Los resultados de la eficiencia cuántica son los recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 6. Resultados de la eficiencia cuántica

Molécula	Rendimiento
1. 2H-pyrano-naphthyridin	7,8
2. (6-amino-3-imino-3H-xanthen-9-yl) perchlorate	9,9
3. [6-(ethylamino-3H-xanthen-9-yl)] perchlorate	10,5
4. N-ethyl-ethanaminium perchlorate	14,1
5. isoquinoline-1,3(2H)-dione	12,7
6. PtTPBP	15,3%

En este caso, los dispositivos con mayor eficiencia son los que incorporan la especie PtTPBP, correspondiente a la familia de compuestos de Pt (eficiencia del 15,3%).

Se muestran a continuación los correspondientes espectros de absorción y emisión para el concentrador preparado a partir de esta especie PtTPBP.



Como se puede apreciar en la gráfica, el espectro de absorción se extiende de 300 nm a 700 nm –con picos en 425 nm y 615 nm - y la emisión va desde 700 nm a 900 nm, por encima de lo requerido en el hito.

Para el caso de las especies P1-P5 los resultados se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 7. Valores de eficiencia cuántica óptica para P1-P4

Molécula	Rendimiento
P1	31%
P2	45%
P3	24%
P4	17%
P5	20%

En este caso, los dispositivos con mayor eficiencia son los que incorporan las especies P1y P2 (eficiencias del 31% y 45% respectivamente). Cabe mencionar que los valores obtenidos son inferiores a los reales. Esto es debido a que el equipo no permite hacer correcciones que permitan optimizar los valores de eficiencia.

Se muestran a continuación los correspondientes espectros de absorción y emisión para los concentradores preparados a partir de las especies P1-P5.

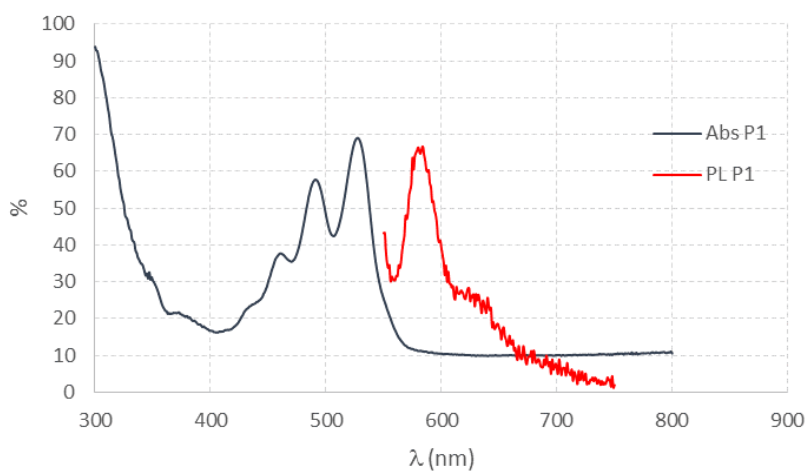


Figura 15. Espectros de absorción y emisión para P1

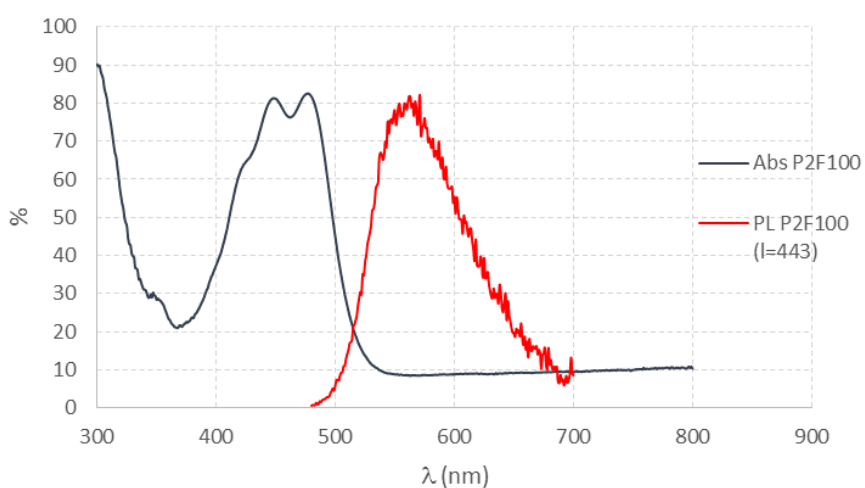


Figura 16. Espectros de absorción y emisión para P2

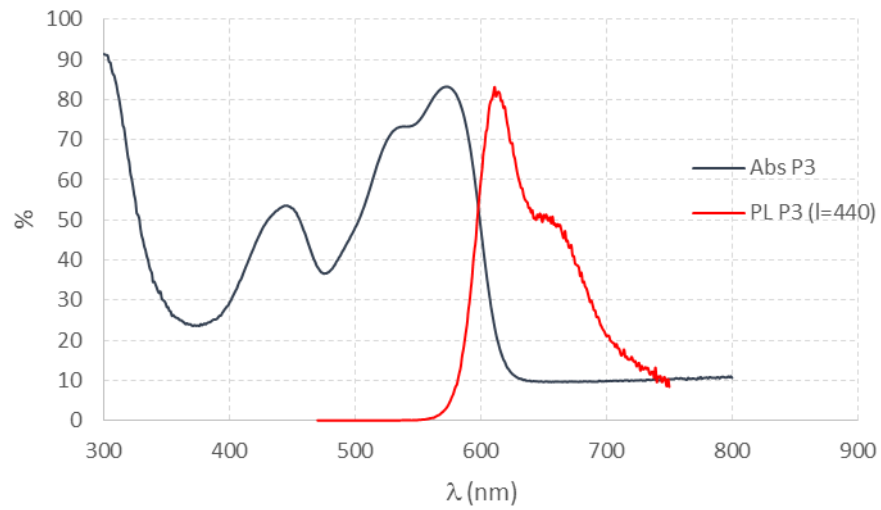


Figura 17. Espectros de absorción y emisión para P3

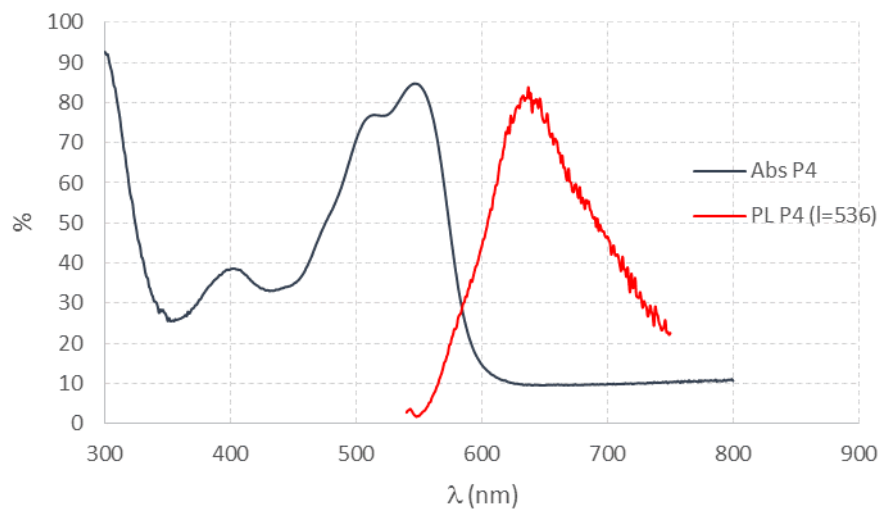


Figura 18. Espectros de absorción y emisión para P4

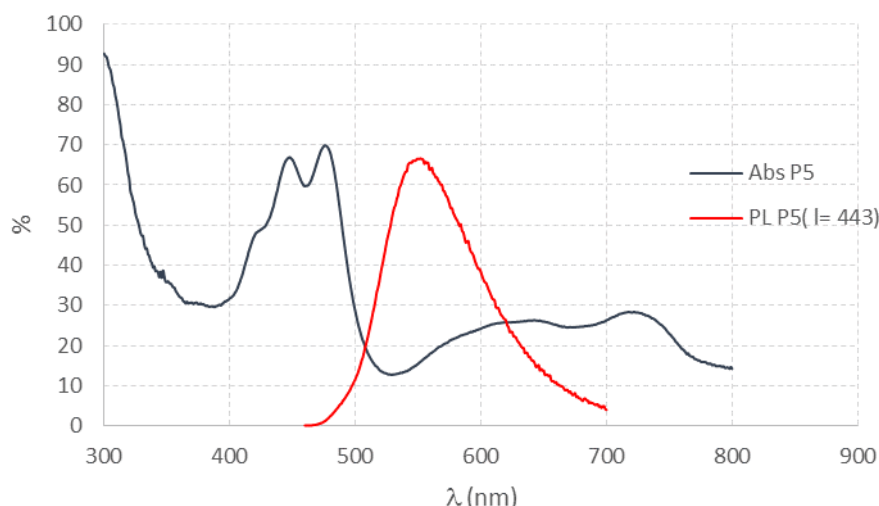


Figura 19. Espectros de absorción y emisión para P5

Como se puede apreciar en la gráfica, los espectros de absorción se extienden de 400 nm a 600 nm y la emisión va desde 450 nm hasta 750 nm.

En la Tabla 8 se muestran los máximos de absorción y emisión para cada una de las especies seleccionadas, así como el desplazamiento de Stokes para cada sistema.

Tabla 8. Desplazamiento de Stokes para los concentradores P1-P5

muestra	Abs (λ =nm)	PL (λ =nm)	Stokes (λ =nm)
P1	531	586	55
P2	483	568	85
P3	580	617	37
P4	554	638	84
P5	480	557	77

En lo que respecta a la caracterización físico-química, tal y como se comentó en la Tarea 1.1, estos estudios no son realizados para las moléculas orgánicas luminiscentes seleccionadas puesto que estas técnicas no aportan información complementaria. En las técnicas de microscopia electrónica los recubrimientos orgánicos pueden no sobrevivir a las condiciones que existen en la cámara (alto vacío e impacto de electrones de alta energía). En estas condiciones muchas muestras pueden reaccionar, transformándose en especies no deseadas, o bien volatilizarse.

T1.3. Desarrollo de concentradores solares luminiscentes monocapa con absorción en el ultravioleta-visible (325 nm -625 nm).

El nuevo rango de absorción requerido (325 nm – 625 nm) es una combinación de los dos anteriores abordados en la tarea 1.1 – rango (325 nm – 475 nm) - y tarea 1.2 - rango (475 nm – 625 nm). Por ello se ha ensayado una combinación de las especies que mejores resultados proporcionaban en cada una de las tareas. Es decir, se ha tratado de crear una capa luminiscente que incorporase a las especies M7 y M16.

Para ello se ha preparado disoluciones empleado de nuevo PMMA como matriz soporte y una combinación de ambas moléculas en diferentes concentraciones (respecto al PMMA) tal y como se recoge en la tabla mostrada a continuación.

Sin embargo parece ser que no existe demasiada compatibilidad de las mismas, en lo que se refiere a la luminiscencia. Al combinarse las diferentes moléculas forman agregados que apenas muestran luminiscencia en el estado líquido y que se destruye por completo en el estado sólido durante la formación de la película delgada. Se ha jugado con diferentes concentraciones de las mismas para tratar de evitar la formación de agregados y evitar la aniquilación de la luminiscencia. En la siguiente tabla mostramos las diferentes concentraciones probadas:

Tabla 9. Diferentes concentraciones diaza+PtTPBP

Sistema molecular diaza + PtTPBP	Eficiencia
diaza 0,5%, PtTPBP 1,2%	---
diaza 0,6%, PtTPBP 1,2%	---
diaza 0,6%, PtTPBP 1,0%	---
diaza 0,6%, PtTPBP 0,8%	---
diaza 0,8%, PtTPBP 1,2%	---
diaza 0,8%, PtTPBP 1,0%	---
diaza 0,8%, PtTPBP 0,8%	---
diaza 0,9%, PtTPBP 0,9%	---
diaza 1,0%, PtTPBP 1,0%	---

En ninguno de los casos se ha conseguido preservar la luminiscencia, es decir, ambas especies presentan fluorescencia por separado, pero juntas forman agregados que destruyen la luminiscencia. Cabe señalar, no obstante, que cualquiera de las especies por separado ya cubre el rango de absorción ampliado requerido en la memoria, aunque la intensidad en determinadas zonas del espectro no sea óptima.

Esta tarea se continuó con el estudio de otras combinaciones de moléculas (P11-P16) que resultaron ser más adecuadas, proporcionando eficiencias cuánticas superiores, cubriendo incluso alguna de ellas el rango de longitudes de onda seleccionado.

Para ello se han preparado disoluciones empleado de nuevo PMMA como matriz soporte y una combinación de moléculas en diferentes concentraciones (respecto al PMMA). Se ensayaron diferentes concentraciones entre las moléculas, hasta conseguir la concentración óptima que proporcionó unas excelentes propiedades de absorción y emisión, tal y como se recoge en la Tabla 10 mostrada a continuación.

Tabla 10. Combinación de moléculas en sistema luminiscente

Sistema molecular		
P11	5% P1	5% P3
P12	4% P2	5% P3
P13	3% P5	5% P3
P14	5% P1	5% P4
P15	4% P2	5% P4
P16	3% P5	5% P4

P1, P2 y P5 son las moléculas donoras, P3 y P4 son las receptoras, que absorben los fotones reemitidos por las donoras y reemiten a mayor longitud de onda.

Con estos sistemas, también se ensayó una combinación triple de moléculas, con el objeto de aumentar aún más el rango de absorción. Una de las combinaciones ensayadas es la recogida en la Tabla 11.

Tabla 11. Combinación de moléculas

Sistema			
P17	5% P1	4% P2	3% P5

Sin embargo en este sistema se forman aglomerados entre P5 y P2 que disminuyen drásticamente la fluorescencia, al tiempo que dan lugar a un recubrimiento con total falta de homogeneidad, como se mostrará en la siguiente subtarea. Se ensayaron diferentes concentraciones de cada una de las *dyes*, y se variaron los tiempos y la temperatura de reacción, sin que en ningún caso se obtuvieran resultados adecuados al objetivo planteado.

Se continuó el estudio con la combinación de otras tres moléculas, incluyendo ahora dos nuevas moléculas (P7 y P8) que contienen el fragmento naftalimida. En la Figura 20 se muestra el derivado 1,8-naftalimida.

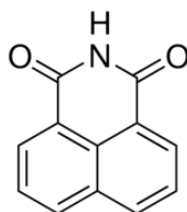


Figura 20. 1,8-naftalimida

Moléculas de este tipo presentan una amplia variedad de propiedades que las hacen buenos candidatos para actuar como concentradores solares: excelentes propiedades de fluorescencia y rendimiento cuántico, coeficientes de absorción elevados, largos desplazamientos de Stokes y una buena estabilidad física y química.

Las moléculas empleadas, etiquetadas como P7 y P8, presentan intensa absorción en el rango violeta azul 300-450 nm. Adicionalmente P7 presenta una banda de absorción más débil, que cubre prácticamente todo el rango 300-700 nm.

En la siguiente tabla se muestran los sistemas ensayados.

Tabla 12. Combinación de moléculas

Sistema molecular			
P21	4% P7	5% P1	5% P3
P22	4% P7	4% P2	5% P3
P23	4% P7	3% P5	5% P3
P24	4% P8	5% P1	5% P3
P25	4% P8	4% P2	5% P3
P26	4% P8	3% P5	5% P3

- **Pruebas de deposición de la capa delgada mediante técnicas de spin coating y/o evaporación molecular. Optimización del proceso.**

Como en las tareas anteriores, las disoluciones preparadas fueron depositadas mediante “*spin coating*”. Se variaron diferentes parámetros de deposición, encontrando que los más adecuados son los optimizados previamente: primera fase de 0 a 500 rpm en 3 segundos; una vez alcanzada la velocidad, permanecer rotando durante 30 s.

En las Figura 21-Figura 22 se muestran los concentradores solares depositados por *spin-coating* sobre vidrio.

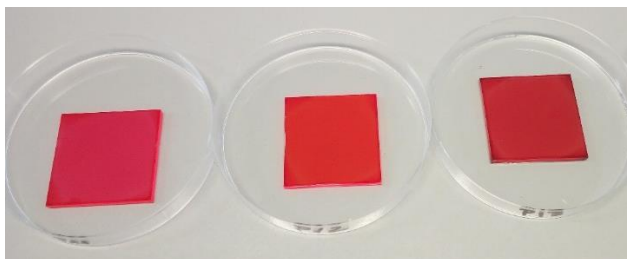


Figura 21. Concentradores solares P11-P13 (de izquierda a derecha)



Figura 22. Concentradores solares P14-P16 (de izquierda a derecha)

La Figura 23 corresponde al sistema P17 donde se observa claramente la formación de aglomerados macroscópicos sobre la superficie. La filtración de la suspensión, empleando un filtro de 100 nm da lugar a un sistema diferente que requiere un estudio adicional.

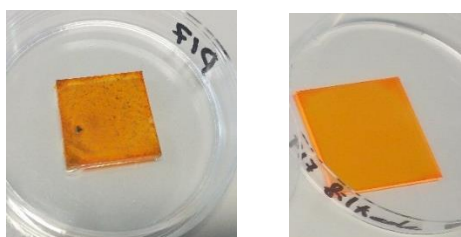


Figura 23. Concentrador P17 sin filtrar (izquierda) y filtrado (derecha)

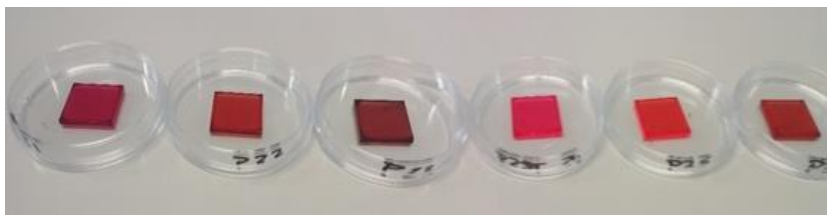


Figura 24. De izquierda a derecha concentradores P21-P26

- **Caracterización óptica**

Al igual que en las tareas anteriores se estudiaron los espectros de absorción, fotoluminiscencia y eficiencia cuántica.

Para los sistemas combinación de dos moléculas, los espectros de absorción y fotoluminiscencia se encuentran recogidos en las Figura 28-Figura 30.

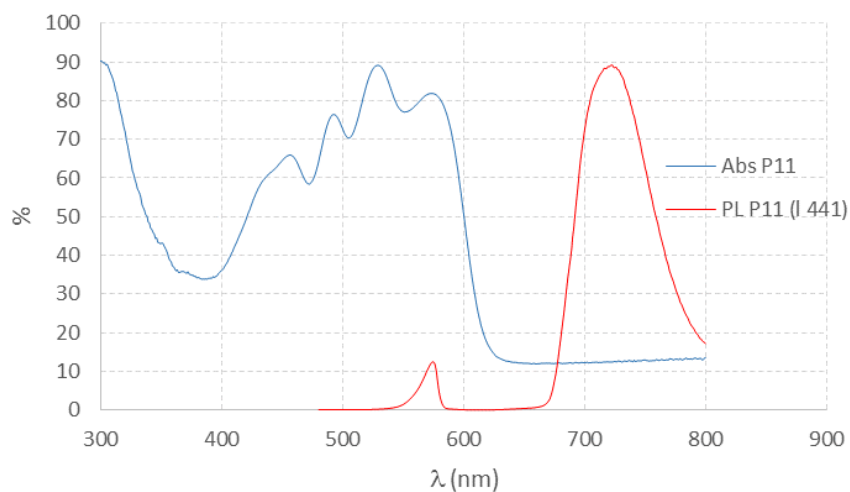


Figura 25. Espectros de absorción y emisión para P11

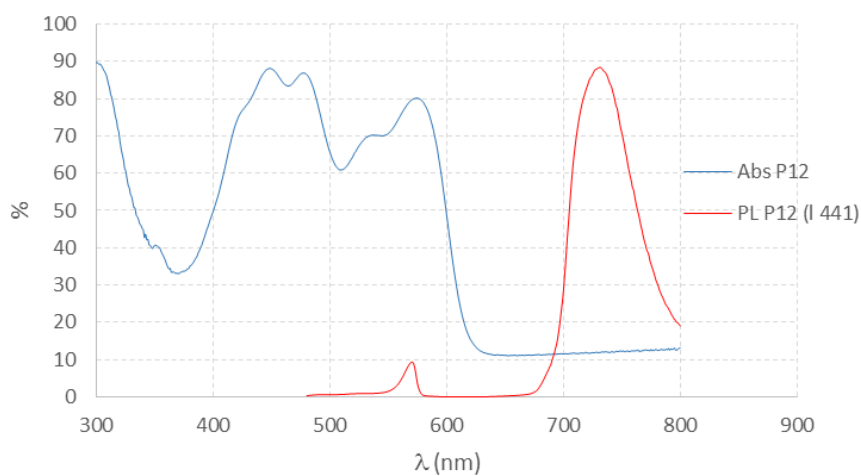


Figura 26. Espectros de absorción y emisión para P12

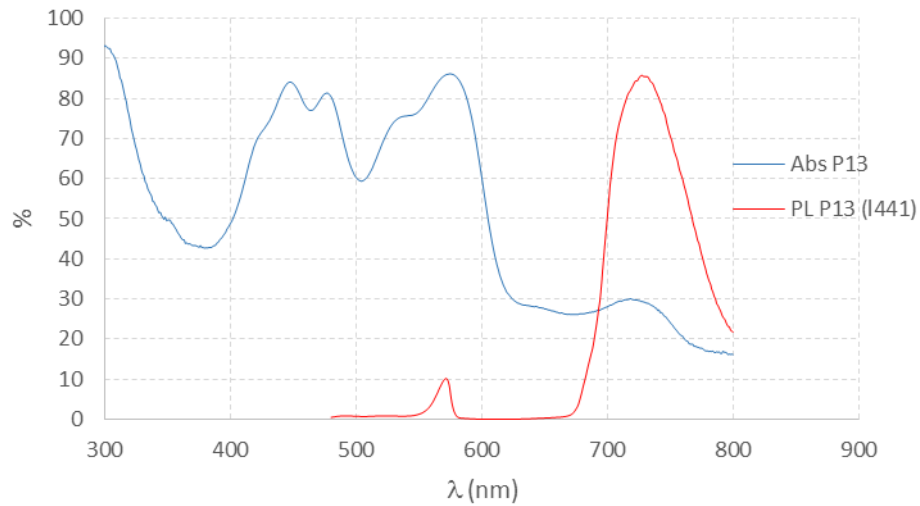


Figura 27. Espectros de absorción y emisión para P13

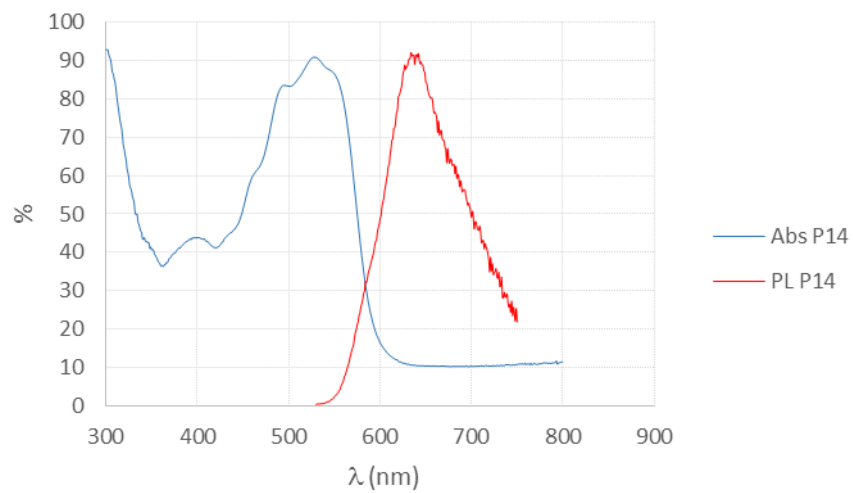


Figura 28. Espectros de absorción y emisión para P14

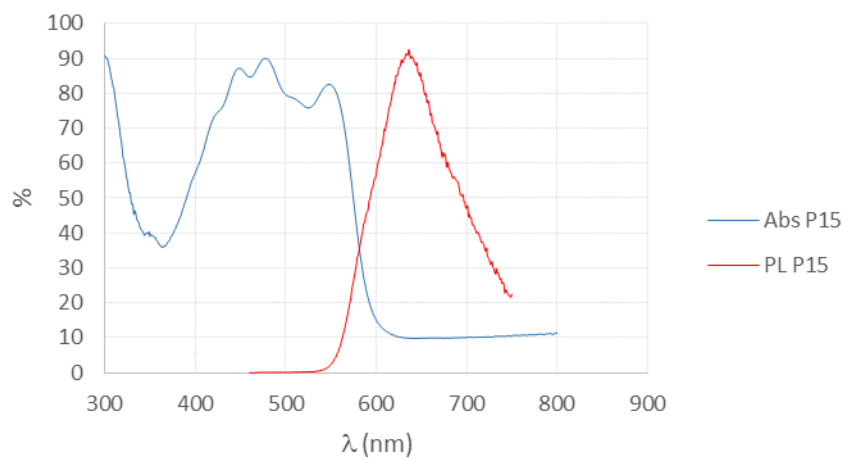


Figura 29. Espectros de absorción y emisión para P15

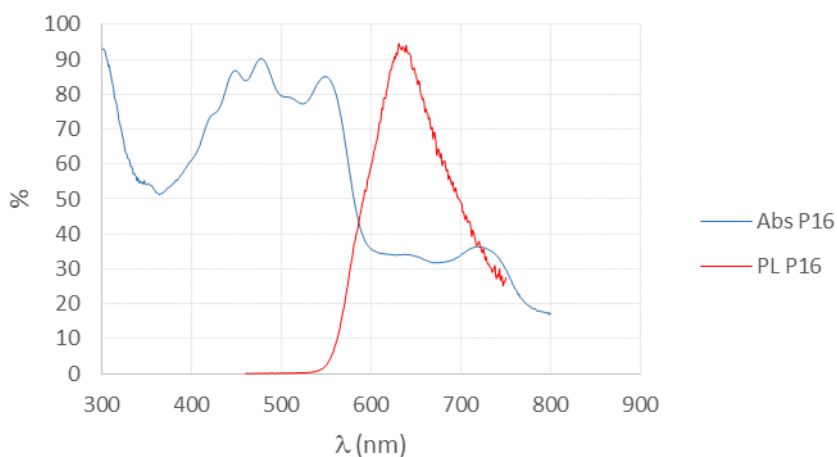


Figura 30. Espectros de absorción y emisión para P16

Puede observarse que hay transferencia Förster casi total. Hay emisión entre 600-800 nm y emisión residual hacia 585 nm.

Para los sistemas en cascada P21-P26, combinación de tres moléculas, se recogen los espectros de absorción y emisión en las

Figura 31-Figura 36.

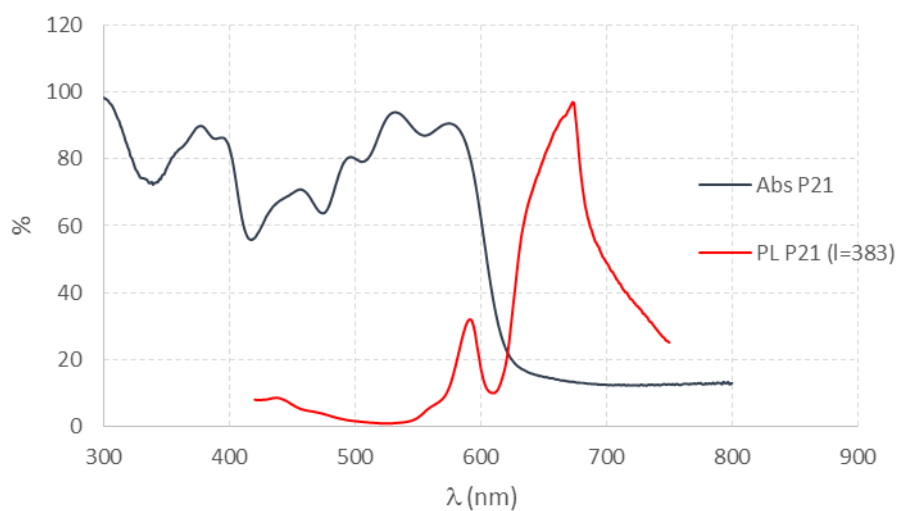


Figura 31. Espectros de absorción y emisión para P21

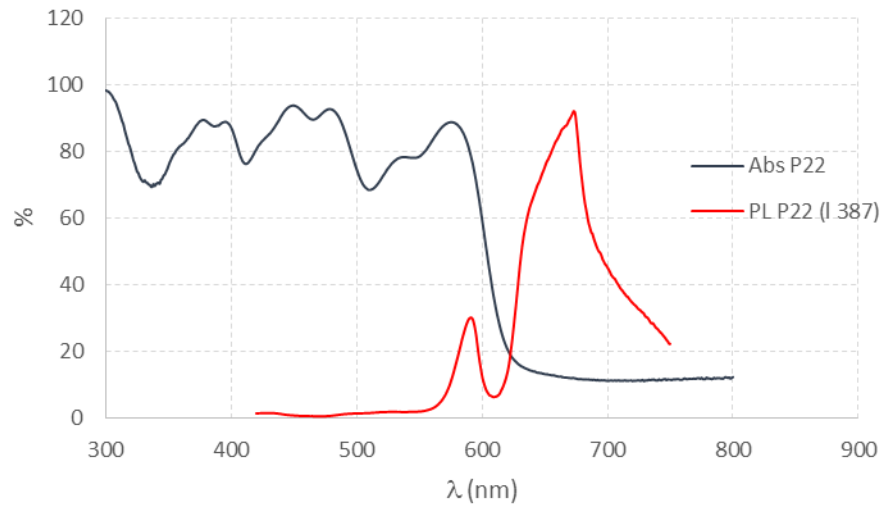


Figura 32. Espectros de absorción y emisión para P22

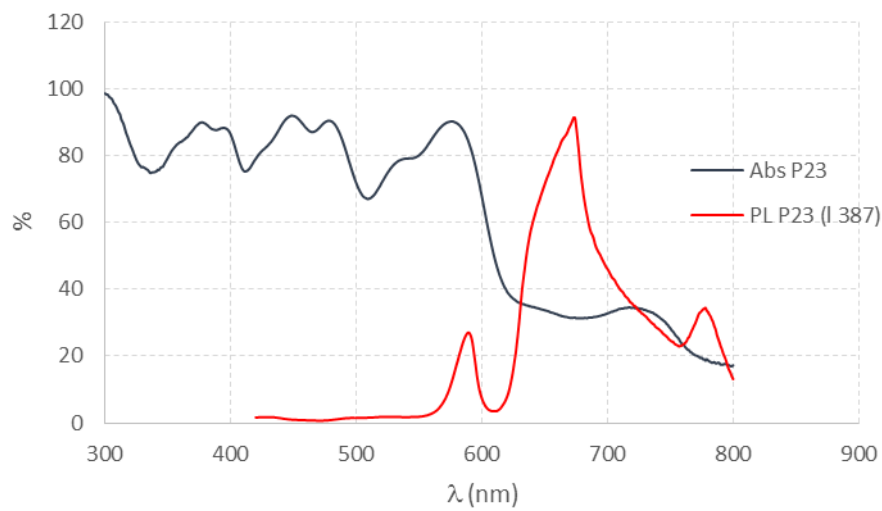


Figura 33. Espectros de absorción y emisión para P23

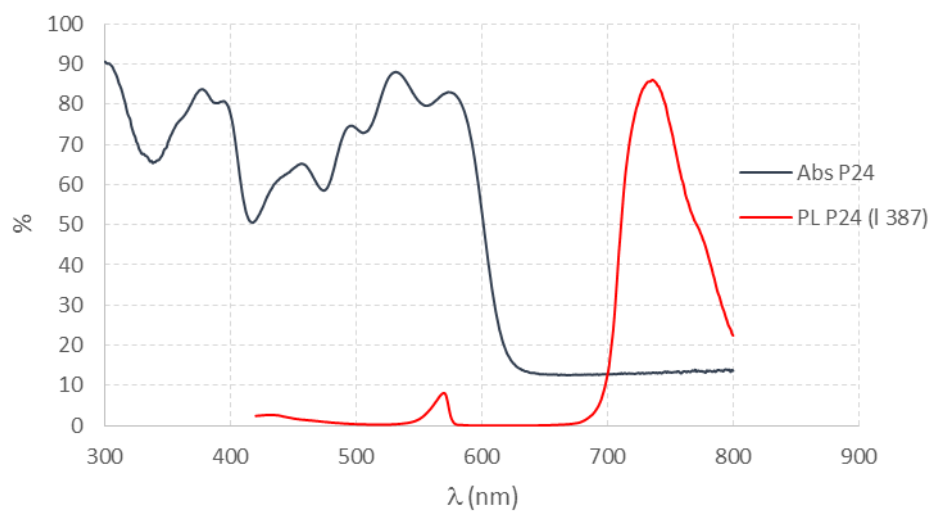


Figura 34. Espectros de absorción y emisión para P24

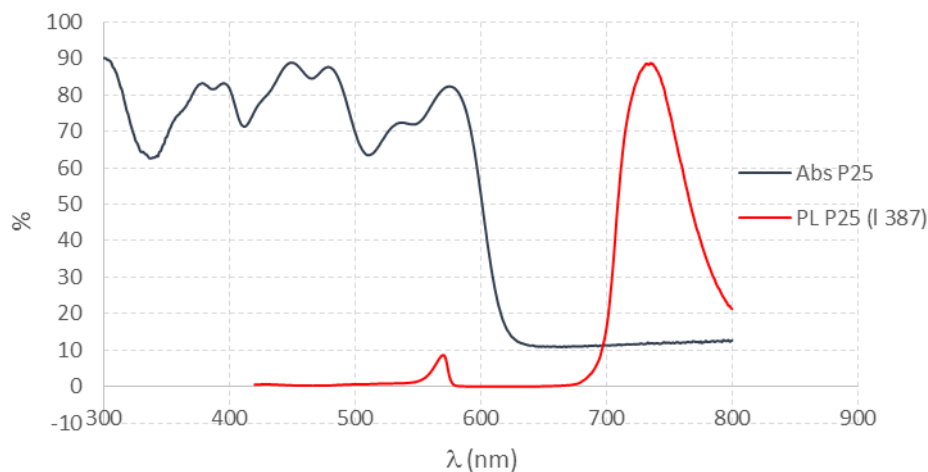


Figura 35. Espectros de absorción y emisión para P25

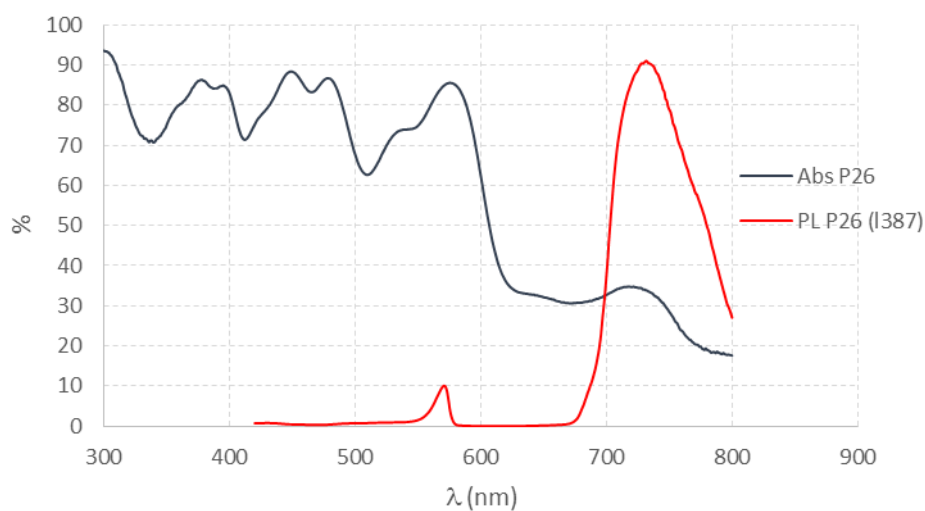


Figura 36. Espectros de absorción y emisión para P26

Estas gráficas nos indican que hay transferencia Förster casi total. Hay emisión entre 600-800 nm y emisión residual hacia 585 nm, menos intensa en P24-P26 que en los tres sistemas precedentes P21-P23.

Los sistemas P24-P26 son los que mejor FRET presentan. Dos de las moléculas transfieren completamente la energía a la molécula terminal puesto que la emisión hacia 580 nm es prácticamente despreciable. Los desplazamientos de Stokes, recogidos en la Tabla 13, son muy elevados, lo que contribuye a que no haya pérdidas de eficiencia por reabsorción. Adicionalmente, estos sistemas cubren todo el rango de absorción objetivo del proyecto.

Tabla 13. Desplazamiento de Stokes para los concentradores P21-P26

muestra	Abs (λ =nm)	PL (λ =nm)	Stokes (λ =nm)
P21	582	675	93
P22	581	669	88
P23	581	675	94
P24	581	740	159
P25	581	738	157
P26	584	737	153

Los valores de eficiencia cuántica en P24-P26 se recogen en la Tabla 14. Los valores obtenidos son ligeramente inferiores a los de la especie P3 (ver Tabla 7), sin embargo ancho de banda espectral es mucho mayor. Al igual que se comentó en el correspondiente apartado, los valores obtenidos son inferiores a los reales. Esto es debido a que el equipo no permite hacer correcciones que permitan optimizar los valores de eficiencia.

Tabla 14. Valores de eficiencia cuántica óptica para P24-P26

Molécula	Rendimiento
P24	22%
P25	22%
P26	20%

Cabe esperar que cuando a estos concentradores se les acoplen celdas con el *band-gap* en el rojo IR cercano sean los que mejores resultados proporcionen.

En lo que respecta a la caracterización físico-química, tal y como se comentó en las Tareas 1.1 y 1.2, estos estudios no son realizados para las moléculas orgánicas luminiscentes seleccionadas puesto que estas técnicas no aportan información complementaria. En las técnicas de microscopia electrónica los recubrimientos orgánicos pueden no sobrevivir a las condiciones que existen en la cámara (alto vacío e impacto de electrones de alta energía). En estas condiciones muchas muestras pueden reaccionar, transformándose en especies no deseadas, o bien volatilizarse.

HITO 2. ESCALADO DIMENSIONES CONCENTRADOR: BÚSQUEDA DE LAS TÉCNICAS MÁS ADECUADAS Y OPTIMIZACIÓN PARÁMETROS

T.2.1. Concentradores de dimensiones 10 cm x 10 cm. Optimización técnicas *spray-coating* vs. *spin-coating*

En todos los casos aquí ensayados, las moléculas con propiedades luminiscentes se dispersan en una matriz polimérica en disolución que posteriormente es depositada sobre el vidrio y se estudian sus propiedades, enfocadas a obtener una alta eficiencia.

Como ya mencionamos, cuando las moléculas luminiscentes están inmersas en una matriz polimérica en disolución es necesario depositarlas sobre un sustrato adecuado, vidrio en este caso. Posteriormente, tras la eliminación del disolvente, quedará una película recubriendo la superficie del vidrio. A la hora de aplicar un recubrimiento, es primordial que la capa sea precisa y uniforme para poder conseguir una mayor uniformidad en las propiedades ópticas, así como en determinadas propiedades físicas, tales como durabilidad, resistencia al rayado, flexibilidad, etc.

Hay varias técnicas de aplicación de recubrimientos a nivel de laboratorio: *spin-coating*, *dip-coating*, *spray*, etc. En el caso de los recubrimientos luminiscentes, cuando se trata de sustratos planos de pequeñas dimensiones (2 cm x 2 cm, 5 cm x 5cm, ...) el método de deposición que mejores resultados ha proporcionado es el *spin-coating*.

El *dip-coating* o recubrimiento por inmersión es una técnica de deposición de capas delgadas de un recubrimiento sobre un sustrato. El *dip-coating* se puede describir como un proceso en el que el sustrato a recubrir se sumerge en un líquido y luego se retira con una velocidad bien definida bajo condiciones atmosféricas. El espesor del recubrimiento lo definen principalmente la velocidad de retirada (una velocidad de extracción mayor produce una capa de recubrimiento más gruesa), el contenido de sólidos y la viscosidad del líquido.

En el recubrimiento por pulverización o *spray*, la pintura es atomizada en una pistola depositando una capa de recubrimiento sobre el sustrato. Este proceso, de gran aplicación industrial, tiene la ventaja de ser válido para un amplio abanico de tamaños. Ajustando diferentes parámetros (condiciones de las suspensiones, velocidad y tiempo del proceso, etc.) se pueden obtener recubrimientos uniformes de espesores controlados.

Para la aplicación del pigmento luminiscente por *spray* se empleó una pistola de alto volumen- baja presión HVLP (del inglés High Volume Low Pressure), que consiguen reducir en gran parte la niebla de pulverización. Esta tecnología utiliza un gran volumen de aire medido en pies cúbicos por minuto, el cual se libera a una presión de 2,5-3,5 bares o menos, para atomizar el material en forma suave y a baja velocidad. Esta presión, comparada con la producida en un sistema convencional, provoca un rociado más controlado, con menor aspersion y rebote de pintura, así como un incremento en la eficacia (en relación a la cantidad de pintura depositada en la pieza comparada con la cantidad total consumida o utilizada).

Para las diferentes pruebas llevadas a cabo en la optimización de las variables del proceso de deposición sobre sustratos de mayores dimensiones, se realizaron empleando sistemas de un solo componente; atendiendo fundamentalmente a razones económicas. Una vez optimizadas las condiciones, para la valoración de las propiedades ópticas se emplearon los sistemas P24-P26, que fueron los que mejores resultados proporcionaron en el Hito 1.

Al aplicar el recubrimiento por *spray*, empleando las disoluciones de las especies luminiscentes preparadas en las condiciones mencionadas en los hitos anteriores, encontramos que se generaba una nube de material sólido, debido posiblemente a la evaporación rápida del disolvente orgánico¹¹ antes de su deposición sobre el vidrio. Se variaron las concentraciones y se emplearon diferentes disolventes¹², sin embargo no se llegó a obtener un recubrimiento homogéneo.

Se empleó entonces una pistola de aerografía, instrumento que sirve para rociar la pintura a presión, mediante el empleo de aire comprimido. El sistema empleado, mostrado en la Figura 37 es de doble acción, es decir, se puede regular la mezcla de aire/pintura que se necesita; y de succión: el depósito de pintura está situado en la parte inferior del aerógrafo y es desmontable lo que permite mayor facilidad de limpieza

¹¹ El empleado para preparar la disolución PMMA/especie luminiscente.

¹² Disolventes orgánicos compatibles con el PMMA y la especie luminiscente



Figura 37. Pistola de aerografía

Al igual que ocurría en el caso anterior con el sistema HVLP, para poder aplicar las disoluciones de luminiscentes sobre el vidrio por el método de *spray*, es necesario reducir la concentración PMMA/tolueno a prácticamente un tercio respecto a la inicial, manteniendo la misma relación PMMA/pigmento luminiscente. Sin embargo, el tamaño del PMMA no es lo suficientemente fino y coagula en la boquilla, generando una nube de pulverización. El recubrimiento que se obtiene no es uniforme, como puede verse en la Figura 38.



Figura 38. Aplicación de recubrimiento luminiscente P3 sobre vidrio 10 x10 por spray

No se obtiene el mismo espesor de recubrimiento sobre toda la superficie y por otro lado se obtiene una superficie irregular debido a partículas sólidas PMMA/pigmento luminiscente depositadas, que se aprecian a simple vista. La adición de agente estabilizante del recubrimiento, tal como peróxido de benzoilo,¹³ tampoco mejora el resultado.

Se ha encontrado que para vidrios de dimensiones 10 cm x 10 cm el equipo de *spin-coating* proporciona mejor recubrimiento (en cuestión de homogeneidad, propiedades ópticas, estabilidad, adherencia, etc.) que por *spray*; siendo 10 x 10 cm el tamaño límite superior para el equipo disponible en Fundación ITMA.

La disolución de luminiscente empleada fue de las mismas características que las preparadas para las probetas de 2 cm x 2cm descritas en el Hito 1. Las disoluciones a emplear se preparan justo antes de cada recubrimiento para evitar la pérdida de actividad luminiscente por fenómenos de degradación, que suelen ser más acusados en fase líquida que en sólido.¹⁴ En la Figura 39 se muestra un vidrio de 10 x10 cm recubierto por *spin-coating* con la disolución P22 (ver Tarea 1.3 en el anterior Hito).

¹³ Este compuesto se emplea también como agente de curado, para favorecer el entrecruzamiento entre cadenas poliméricas.

¹⁴ Las disoluciones empleadas son estables durante largos períodos de tiempo herméticamente cerradas a temperatura ambiente y protegidas de la luz. Se preparan disoluciones frescas para cada recubrimiento para un control estricto de las propiedades luminiscentes.

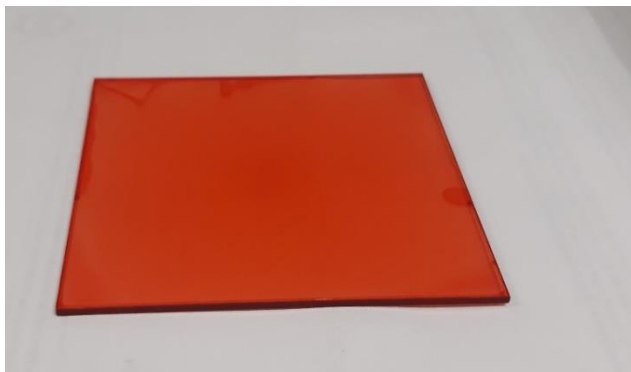


Figura 39. Vidrio de 10 x 10 cm recubierto con el sistema P22

La caracterización óptica de estos concentradores permitió comprobar que se mantienen las mismas propiedades que en los prototipos de dimensiones 2 cm x 2cm.

Por otro lado, se consideró la laminación de algunos concentradores con EVA con dos objetivos: evitar la degradación de los recubrimientos y la preparación de las celdas que se verán en las tareas siguientes. Las pruebas preliminares se realizaron sobre prototipos de 10 cm x 10 cm.

Se preparó un sándwich vidrio-luminiscente-EVA¹⁵-vidrio, en el que la cara con el pigmento luminiscente está en contacto con la lámina de EVA. Este sistema se laminó en un laminador disponible en Fundación ITMA. El fundamento del proceso es compactar todos los materiales, sin que quede nada de aire en su interior, dando lugar a la adherencia de todas las capas de los distintos materiales entre sí. Para ello hay que emplear ciclos de vacío, presión y temperatura que dependerán tanto de los sustratos a emplear, como de la aplicación final del prototipo. En la Figura 40 se muestra uno de los prototipos preparados, en este caso empleando el pigmento luminiscente P1 (ver Tarea 2 del Hito anterior).



Figura 40. Vidrio recubierto con P1 y laminado con EVA.

- **Caracterización óptica**

Las medidas de fotoluminiscencia y eficiencia cuántica no se pueden realizar en probetas mayores de 2 cm x 2 cm, debido a las características intrínsecas de los equipos de medida. La caracterización óptica de los prototipos 10 cm x 10 cm se realizó mediante las correspondientes curvas de absorción, medidas

¹⁵ EVA es un copolímero de acetato de vinilo y polietileno. Entre otras aplicaciones cabe señalar su uso en vidrios laminados y células fotovoltaicas

realizadas en un espectrofotómetro con esfera integradora. Se comprobó que las curvas obtenidas prácticamente se superponían con las de los prototipos 2 cm x 2 cm (Figura 41), pudiéndose extrapolar que la eficiencia cuántica y fotoluminiscencia de los sistemas escalados a mayores dimensiones sigan la misma tendencia.

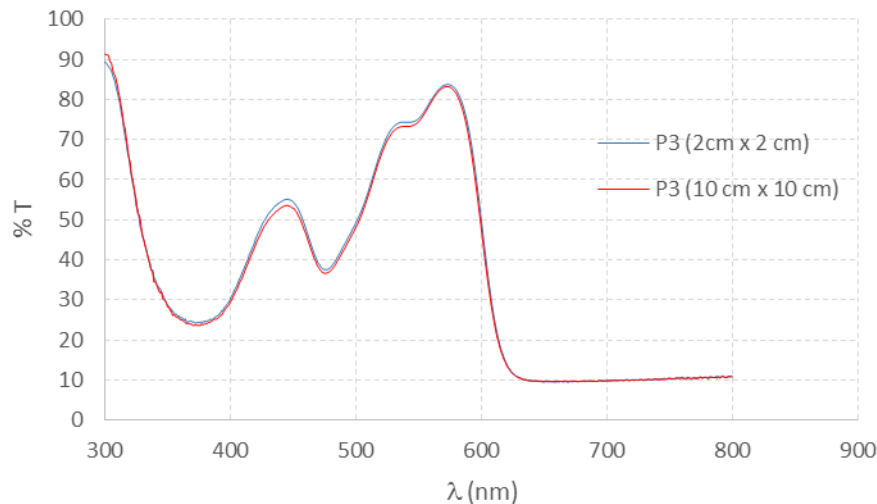


Figura 41. Superposición curvas de absorción del sistema P3 sobre vidrio de diferentes tamaños.

Tarea 2.2. Concentradores de dimensiones 50 cm x 50 cm. Optimización parámetros *spray-coating*

Mencionamos en la Tarea 2.1 que con el tipo de sistemas luminiscentes empleados el *spray* no funcionó como técnica de recubrimiento. El *spin-coating* se descarta, ya que el equipo disponible en Fundación Itma no permite trabajar con tamaños mayores de 10 x 10 cm. El doctor Blade es el adecuado para el recubrimiento de sustratos de mayores dimensiones.

Los sustratos a emplear continúan siendo vidrio, por lo que servirán las condiciones de las disoluciones luminiscentes optimizadas, descritas en los apartados precedentes.



Figura 42. Concentrador recubierto con el sistema P3

En cuanto a la laminación con EVA, las pruebas realizadas dieron los mismos resultados que cuando el recubrimiento con el sistema luminiscente se realiza por *spin-coating*, comentado en el anterior apartado.

En cuanto a la caracterización óptica, el espectrofotómetro visible-ultravioleta disponible en Fundación ITMA no permite medir sobre muestras mayores de 10 cmx10 cm. Los resultados obtenidos

en la caracterización óptica cuando se pasa de tamaño 2x2 cm a 10x10cm son prácticamente similares, por lo que podríamos extrapolar estos resultados a probetas de mayores dimensiones sin cometer un error excesivo.

En la Figura 43 se muestra el espectro de absorción del sistema P3 depositado sobre vidrio por la técnica del doctor Blade.

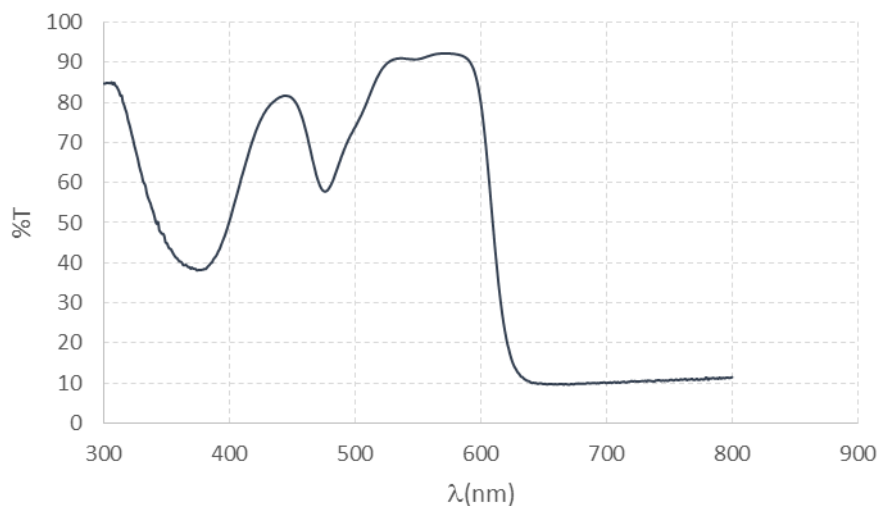


Figura 43. Espectro de absorción de P3 depositado sobre vidrio con el doctor Blade

Si se compara este espectro con los mostrados en la Figura 42 puede observarse que el patrón de absorción es el mismo. Lo que varía es la intensidad absorción, mayor en este caso. Esto es lógico ya que a igualdad de parámetros de la disolución y sustratos, la absorción viene determinada por el espesor de la capa, que es mayor en este caso.

HITO 3. INTEGRACIÓN DE CELDAS FOTOVOLTAICAS EN EL CONCENTRADOR

En este estudio hemos seleccionada las celdas fotovoltaicas más adecuadas para que la emisión del concentrador coincida con el *bandgap* de la celda solar, sin descuidar otros aspectos como el precio, el factor estético o su adecuación para una correcta integración arquitectónica. Asimismo hemos seleccionado y ensayado adhesivos ópticos de alta transmitancia para acoplar las correspondientes celdas fotovoltaicas al correspondientes concentrador solar. La alta transmitancia o transparencia óptica es un factor muy importante a considerar en estos adhesivos ópticos para lograr así que la mayor fracción de luz emitida por el concentrador llegue a las celdas fotovoltaicas y no quede atrapada en el adhesivo.

Tarea 3.1. Selección de celdas fotovoltaicas y adhesivos ópticos

Celdas fotovoltaicas

Como celdas fotovoltaicas hemos seleccionado y ensayado por dos tipos de celdas: celdas de Silicio cristalino (Si) y celdas de colorante (también conocidas como celdas de Grätzel, en honor a su inventor). Ambas células presentan un buen solapamiento entre su *bandgap* o espectro de absorción y el espectro de emisión de los concentradores solares desarrollados. Por otra parte, las celdas de Silicio son de las más estándar en el mercado debido a su reducción de precio en los últimos tiempos. En el caso de las que nos ocupa, hemos utilizado celdas de Silicio cristalino con una eficiencia del 17,5%. En lo que respecta a las celdas de colorante, la eficiencia es más baja, en torno al 7%. Presentan, no

obstante, la ventaja de una mejor integración arquitectónica, al tratarse de un colorante que se funde con el propio concentrador solar. Presentan también la ventaja adicional frente a las de Si de que funcionan mejor en interiores.

Adhesivos ópticos

Los adhesivos son un componente esencial en cualquier proceso de manufactura. En particular, en el mundo de la óptica, son usados para ensamblar diferentes componentes como lentes, fibras ópticas, vidrios, celdas fotovoltaicas, etc. Un requisito bastante frecuente cuando se enlazan estos componentes ópticos es que los adhesivos deben ser ópticamente transparentes (alta transmitancia), con un índice de refractividad similar a las partes que están siendo enlazadas para evitar cambios indeseados en la trayectoria de la luz.

En esta tarea se ensayaron diferentes adhesivos ópticos con un alto nivel de transmitancia. Los adhesivos ópticos pueden ser materiales de un solo componente que curan cuando son expuestos a luz UV o azul, o sistemas de varios componentes que al ser mezclados se produce una reacción química fruto de la cual se endurece la mezcla resultante. Muchos de ellos están libres de disolventes lo que hace de ellos productos ecológicos. Hemos ensayado ambos tipos de productos: sistemas monocomponente y multicomponente.

Tras una búsqueda bibliográfica, a continuación describiremos los adhesivos ensayados. Todos ellos tienen unos valores de índice de refractividad próximos a 1.5, lo que les convierte en idóneos para esta aplicación, pues así no hay diferencias en los índices de refractividad entre los adhesivos y los vidrios.

a) *Acrilato*, adhesivo fotoiniciado, monocomponente).

Este adhesivo es monocomponente. Se trata de un acrilato que se cura mediante la aplicación de radiación ultravioleta, con longitudes de onda comprendidas entre 320 y 420 nm. La temperatura no es un factor a considerar, ya que con la incidencia de cantidades adecuadas de luz UV, el adhesivo puede curar en temperaturas comprendidas entre -40°C y 120°C. Hemos utilizado una lámpara UV con pico de emisión en 370 nm y con intensidad de 60 mW / cm² durante 60 segundos, logrando una buena adhesividad. La transmitancia medida de la muestra curada y obtenida según este procedimiento es del 95%.

b) Silicona transparente, bicomponente, curada por calor o temperatura ambiente

Se trata de un elastómero de silicona bicomponente. Es un adhesivo óptico altamente transparente. No se amarillea bajo luz ultravioleta. Uno de los componentes es un prepolímero y el otro el agente de curado (un catalizador de platino). Para su utilización deben mezclarse bien los dos componentes hasta que el color sea bien uniforme. La proporción estándar de los componentes es de 10:1 (prepolímero: agente de curado). Una vez conseguida una mezcla uniforme se puede dejar a temperatura ambiente durante un día o bien someterla a una temperatura de 100°C durante 1 hora. En una primera prueba se curó a temperatura ambiente durante un día. Una vez curado, la transmitancia del adhesivo óptico formado es del 97%.

c) Resina óptica de poliuretano, bicomponente, curada a T^a ambiente.

Se trata de una resina de poliuretano de dos componentes. Se utiliza mucho en la industria de la iluminación, como recubrimiento de luminarias LED. La mezcla de los dos componentes se efectúa en una proporción 1:1, momento en el que se inicia una relación de polimerización. Hemos seguido este procedimiento. Una vez realizada la mezcla, la mantuvimos a temperatura ambiente durante 1 hora.

Medimos entonces la transmitancia del correspondiente adhesivo óptico generado, obteniendo un valor de 94%.

Comparación de los tres adhesivos ópticos y mejora de propiedades ópticas

Los tres adhesivos ópticos proporcionan una buena adherencia entre el vidrio y las celdas solares. Por lo tanto, hemos escogido la transmitancia como el parámetro clave a la hora de decantarnos por un determinado tipo de adhesivo. Como decíamos, la alta transmitancia del adhesivo óptico es un valor clave, ya que así aseguramos que el mismo no roba la luz que se propaga del concentrador solar luminiscente a la correspondiente celda solar. Por ello, la silicona es el adhesivo seleccionado al proporcionarnos el más alto valor de transmitancia (97%), superando a los valores de transmitancia proporcionados por el acrilato (95%) y la resina de poliuretano (94%).

Una vez comprobado que la silicona bicomponente es el adhesivo óptico que proporciona mejores valores de transmitancia, hemos investigado sobre el mismo para ver si aún se puede mejorar el valor obtenido del 97%. Para ellos variamos las condiciones de curado. En lugar de curarlo a temperatura ambiente, lo que hicimos fue someterlo a 100°C, no obteniendo variaciones apreciables en la transmitancia. Lo que hicimos entonces fue variar la *ratio* del prepolímero:agente de curado. Es bien conocido que en algunas siliconas el cambio de *ratio* conlleva un cambio en el grado de elasticidad. Quisimos probar si la transmitancia también podría verse afectada por las alteraciones de esta *ratio*. Para ello hicimos una batería de experimentos en los que variamos la proporción relativa de los componentes de mezcla. El proceso de curado se realizaba a temperatura ambiente durante 24 horas. Sobre los adhesivos ópticos obtenidos se medía la correspondiente transmitancia. La Tabla 15 resume las proporciones ensayadas y los correspondientes valores de transmitancia.

Tabla 15. Adhesivos ensayados y valores de transmitancia

(prepolímero : agente de curado)	transmitancia
5:1	96,3%
6:1	96,4%
7:1	96,6%
8:1	96,8%
9:1	96,9%
10:1	97,0%
11:1	97,3%
12:1	97,5%
13:1	97,4%
14:1	97,4%
15:1	97,4%

Como podemos observar en la tabla, la *ratio* (prepolímero: agente de curado) influye ligeramente en los valores de transmitancia, alcanzando los mejores valores para la proporción (12:1), para la cual la transmitancia es del 97,5%. Como consecuencia, el adhesivo óptico seleccionado para la fijación de los concentradores solares a las celdas fotovoltaicas cuando sea preciso será la silicona bicomponente, con una proporción de sus componentes de (12:1).

Tarea 3.2. Ensayo diferentes geometrías celda fotovoltaica – concentrador

Se han ensayado dos tipos de geometrías. Una de ellas las celdas solares se incorporan en los bordes del concentrador solar luminiscente (ver Figura 44).

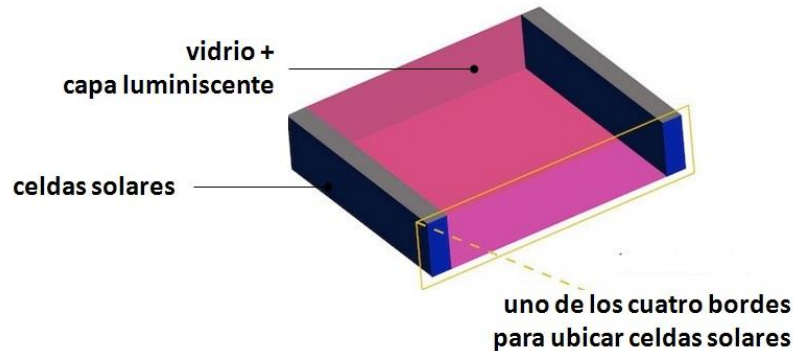


Figura 44. Concentrador solar luminiscente con celdas fotovoltaicas en los bordes

En otra de ellas las celdas solares se incorporan en una configuración frontal, tal como se muestra en la Figura 45.

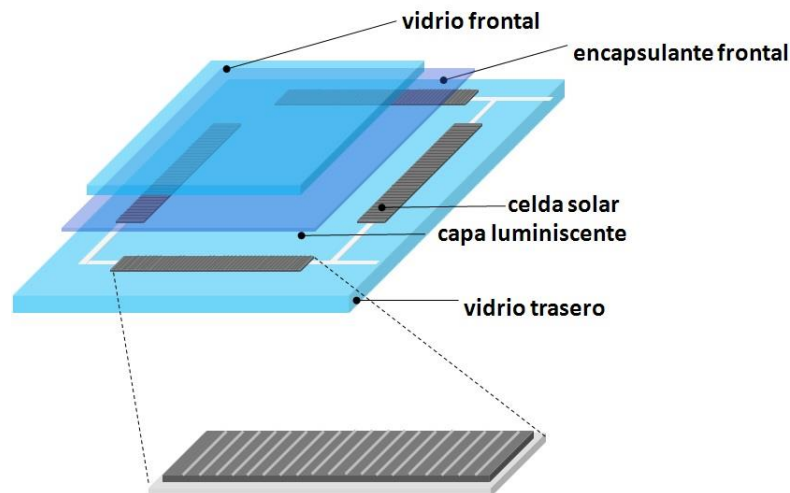


Figura 45. Concentrador solar luminiscente con celdas fotovoltaicas en configuración frontal

En algunos casos se ha probado a recubrir la capa de material luminiscente con un encapsulante como EVA para evitar su degradación. Se ha podido comprobar que la eficiencia de los dispositivos apenas se ve afectada. Para medir la bondad de los diferentes concentradores solares con diferentes celdas fotovoltaicas y bajo diferentes condiciones de iluminación hemos recurrido a un parámetro denominado “ganancia eléctrica”. La ganancia eléctrica representa la cantidad de energía extra suministrada por el concentrador solar a las celdas solares a las que está acoplado, tomando como referencia la energía que recibirían las celdas solares sin la ayuda de un concentrador solar luminiscente.

En las siguientes tablas resumimos los experimentos realizados, correspondientes a fabricación de diferentes dispositivos que fueron testados bajo diferentes condiciones. Se analizan los concentradores solares que mejores propiedades ópticas nos habían proporcionado en hitos anteriores (configuración P21 a P26), a los cuales se les acoplan celdas de silicio o de colorante, bajo dos diferentes configuraciones (frontal y en los bordes) y son expuestos a radiación proveniente de un simulador solar (1000 W / m^2) o a una luminaria LED convencional de interiores. Con la medida de las ganancias eléctricas bajo dos tipos de radiación (simulador solar o luminaria LED), queremos dar cuenta de la ganancia eléctrica de los mismos en exteriores e interiores respectivamente.

En la Tabla 16 se muestra la ganancia eléctrica del sistema híbrido que incorpora concentradores a los que acoplan celdas de Si. Se mide la ganancia eléctrica bajo un simulador solar. Cuando observamos la tabla podemos comprobar que la ganancia eléctrica es significativamente mayor cuando las celdas están en la configuración frontal que en los bordes. Esto es en cierto modo lógico, ya que en la disposición frontal las celdas solares reciben directamente la luz solar. Por lo tanto a éstas células les llega la luz que ellas captan más la cantidad de luz adicional que le llega del guiado de la luz captada por el concentrador solar luminiscente. En el caso de la configuración de las celdas en los bordes, la luz es reenviada a las celdas únicamente por los concentradores solares. Las pérdidas que sufren los mismos (pérdidas de emisión por las caras en vez de los bordes, pérdidas de fotones absorbidos en forma de calor en vez de ser reemitidos por fotones) disminuyen la cantidad de luz que recibe la celda solar con respecto a la que recibiría si estuviese directamente expuesta al Sol. En la Tabla 4Tabla 16 podemos observar también que la mayor ganancia eléctrica se produce para el concentrador P25. Éste es un resultado que cabría esperar ya que es uno de los concentradores con mejores propiedades ópticas, tal como ha sido expuesto en hitos anteriores.

Tabla 16. Concentradores solares con celdas de Si en simulador solar bajo radiación de 1000 W/m^2

Concentrador solar	Ganancia eléctrica (GE) configuración: celdas en bordes	Ganancia eléctrica (GE) Configuración: celdas frontales
P21	17,2%	24,7% (6)
P22	17,3%	25,1% (5)
P23	18,1%	25,7 % (3)
P24	17,9%	25,2% (4)
P25	19%	27% (1)
P26	18,4%	26,5% (2)

En la Tabla 17 se muestra la ganancia eléctrica del sistema híbrido que incorpora concentradores a los que acoplan celdas de colorante. Se mide la ganancia eléctrica bajo un simulador solar. La tendencia es la misma que en la Tabla 16. La configuración de celdas frontales proporciona mejores valores de ganancia eléctrica que la configuración con celdas en los bordes. Los mejores valores se obtienen también para el dispositivo que incorpora el concentrador solar luminiscente P25.

Tabla 17 Concentradores solares con celdas de colorante (celdas de Graetzel) en simulador solar bajo radiación de 1000 W/m²

Concentrador solar	Ganancia eléctrica (GE) configuración: celdas en bordes	Ganancia eléctrica (GE) Configuración: celdas frontales
P21	17,6%	27,6%
P22	18,2%	28,1%
P23	18,8%	28,7 %
P24	18,5%	28,2%
P25	20,1%	30%
P26	19,3%	29,5% (2)

En las Tabla 18 y Tabla 19 se muestra la ganancia eléctrica de los mismos dispositivos y configuraciones examinados en las Tabla 16 y Tabla 17, pero ahora bajo los efectos de iluminación interior, una luminaria tipo LED convencional. Nuevamente, la configuración de celdas frontales proporciona mejores valores de ganancia eléctrica que la configuración con celdas en los bordes. Los mejores valores se obtienen también para el dispositivo que incorpora el concentrador solar luminiscente P25.

Tabla 18. Concentradores solares con celdas de Si bajo iluminación artificial

Concentrador solar	Ganancia eléctrica (GE) configuración: celdas en bordes	Ganancia eléctrica (GE) Configuración: celdas frontales
P21	14,1%	21,7%
P22	14,2%	22,1%
P23	15,2%	22,7 %
P24	14,8%	22,2%
P25	15,9%	24%
P26	15,3%	23,5%

Tabla 19. Concentradores solares con celdas de colorante (celdas de Graetzel) bajo iluminación artificial.

Concentrador solar	Ganancia eléctrica (GE) configuración: celdas en bordes	Ganancia eléctrica (GE) Configuración: celdas frontales
P21	18,4%	28,5%
P22	19,0%	29,0%
P23	19,6%	29,5 %
P24	19,3%	29,0%

P25	18,9%	31,2%
P26	20,1%	30,6%

Del análisis de los resultados mostrados en las Tabla 16- Tabla 19 se puede concluir que el concentrador solar luminiscente que mejores valores de ganancia eléctrica proporciona es el P25. Esta tendencia se mantiene al incorporar diferentes celdas solares y bajo diferentes condiciones de iluminación.

Seleccionamos entonces el concentrador solar luminiscente P25. En las siguientes tablas (Tabla 20 y Tabla 21) agrupamos los diferentes valores de ganancia eléctrica de este concentrador para poder compararlos entre sí. En la Tabla 20 se muestran los resultados para la configuración en la que las celdas solares se ubican en los bordes. Podemos ver como la celda de colorante proporciona mejores valores de ganancia eléctrica que la de Si, tanto si la radiación proviene del simulador solar (que reproduce condiciones externas) como si proviene de luminaria LED (que reproduce interiores). En todo caso, la diferencia de ganancia eléctrica de la celda de colorante con respecto a la de Si se hace mayor en interiores. Esto refleja la realidad que las celdas de colorantes funcionan mejor bajo condiciones de luz artificial que las del Silicio. Esta tendencia se mantiene en la Tabla 21, en la que las celdas se ubican en configuración frontal.

Tabla 20. Comparación de la ganancia eléctrica en diferentes condiciones para el concentrador solar P25 con celdas solares incorporadas en los bordes

tipo radiación	simulador solar		luminaria LED	
tipo celda PV	Si	colorante	Si	colorante
ganancia eléctrica	19%	20,1%	15,9%	18,9%

Tabla 21. Comparación de la ganancia eléctrica en diferentes condiciones para el concentrador solar P25 con celdas solares incorporadas en las caras (configuración frontal)

tipo radiación	simulador solar		luminaria LED	
tipo celda PV	Si	colorante	Si	colorante
ganancia eléctrica	27%	30%	24,1%	31,2%

En definitiva, el concentrador solar luminiscente P25 con las celdas incorporadas en configuración frontal es el que mejores resultados proporciona. También parece funcionar mejor con celdas de colorante que con las de Si. En la siguiente Figura 46 mostramos una fotografía de algunos de los concentradores ensayados.

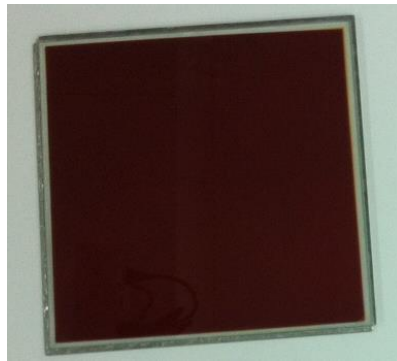


Figura 46. Concentrador solar luminiscente P25 con celdas solares luminiscentes en configuración frontal

HITO 4. INTEGRACIÓN CELDAS-CONCENTRADOR EN DEMOSTRADOR FINAL.

Partimos en este caso del sistema óptimo: el concentrador solar luminiscente P25 con celdas fotovoltaicas de colorante en configuración frontal. Se realizó un análisis espectral sobre las muestras de grandes dimensiones para obtener información sobre la fluorescencia inducida por láser,¹⁶ comprobando que se mantienen las propiedades ópticas obtenidas sobre los prototipos de pequeñas dimensiones (2 cm x 2 cm y 5 cm x 5 cm).

Adicionalmente, sobre el concentrador solar luminiscente P25 con celdas fotovoltaicas de colorante en configuración frontal efectuamos medida de las curvas I-V y factor de forma en un simulador solar (ver Figura 47 y Tabla 22).

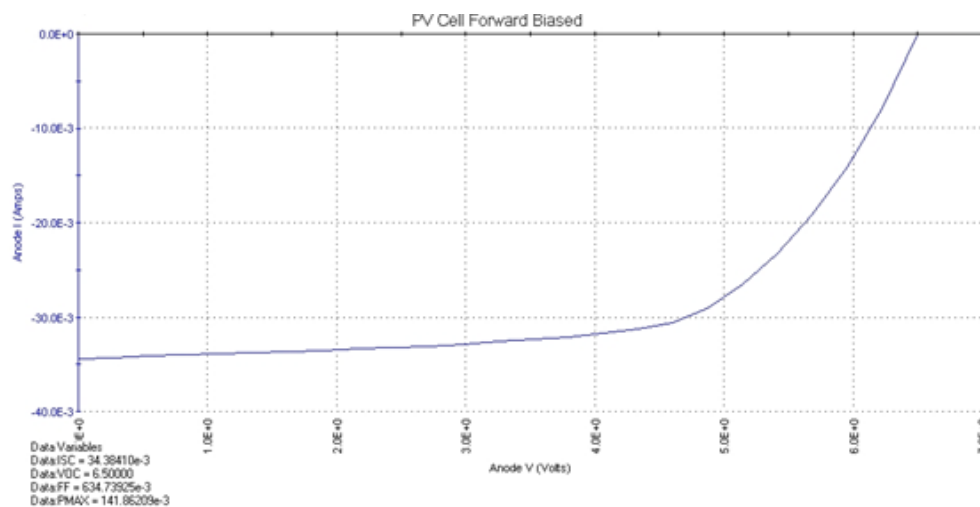


Figura 47. Curvas I-V para el sistema P51 + celdas colorante en configuración frontal

¹⁶ Se realizaron con un diodo laser, variando parámetros con la ayuda de lentes.

Tabla 22. Parámetros eléctricos para el sistema P51 + celdas colorante en configuración frontal

MUESTRA	Isc (mA)	Voc (V)	FF (%)	Pmax (mW)
Sistema P25 + celdas colorante (configuración frontal)	34,8	6,5	63,7	144,4

El objetivo es buscar un parámetro adecuado para estimar la bondad de los dispositivos híbridos concentrador solar –celda fotovoltaica. No hay un estándar en la literatura, pero la medida de las curvas I-V, factores de forma y eficiencias eléctricas como se haría en una celda solar convencional no resultan muy adecuadas, pues conjugan varios sistemas (concentrador, celdas solares, etc), unos con funciones ópticas (concentrador solar, que actúa de guía de luz) y otros con funciones optoelectrónicas (celdas solares, conversión de luz a electricidad). Por ello creemos que la mejor medida es la ganancia eléctrica anteriormente mencionada, pues es la que da cuenta de cantidad de energía extra proporcionada por el concentrador a la celda solar. Por ello será la medida a considerar también en esta sección. Las medidas fueron realizadas con un polímetro y una pinza amperimétrica.

Partiendo del concentrador solar luminiscente P25, vamos a tratar de optimizarlo aún más, teniendo en cuenta que proviene de la incorporación de tres especies luminiscentes al polímero PMMA que actúa de matriz de soporte. Vamos a jugar ligeramente con la concentración de estas tres especies. Puesto que las especies luminiscentes – dependiendo de su concentración -pueden robar algo de luz solar a la celda; una ligera re-optimización de las mismas podría proporcionar una ligera mejoría de ganancia eléctrica. El sistema P25 tiene la siguiente configuración de especies luminiscentes: PMMA P8 4% P2 4% P3 5%.

En las siguientes tablas iremos variando concentraciones de especies y estudiando la correspondiente ganancia eléctrica al acoplarla el concentrador correspondiente a células. Comencemos variando la concentración de la especie P8 (la que presenta la absorción más a la izquierda en el rango de longitudes de onda) y manteniendo constantes el resto de especies (P2 y P3) (ver Tabla 23). La ganancia eléctrica será la medida en condiciones de luz natural. Como puede verse, la configuración PMMA P8 3% P2 4% P3 5% es la que mejores valores de ganancia eléctrica proporciona, tomando el valor de 30,2%.

Tabla 23. Ganancia eléctrica para diferentes concentraciones de P8, manteniendo constante P2 y P3

Concentración P8	Concentración P2	Concentración P3	Ganancia eléctrica
1	4	5	30,0%
2	4	5	30,1%
3	4	5	30,2%
4	4	5	30%
5	4	5	29,8%
6	4	5	29,7%
7	4	5	29,6%

En la Tabla 24 mantendremos constante las concentraciones de P8, tomando el valor optimizado (3%), y mantendremos constante la concentración de P3 (5%), mientras variamos la concentración de P2. Como puede verse, la configuración PMMA P8 3% P2 3% P3 5% es la que mejores valores de ganancia eléctrica proporciona, tomando el valor de 30,4%.

Tabla 24. Ganancia eléctrica para diferentes concentraciones de P2, manteniendo constante P8 y P3

Concentración P8	Concentración P2	Concentración P3	Ganancia eléctrica
3	1	5	30,2%
3	2	5	30,3%
3	3	5	30,4%
3	4	5	30,2%
3	5	5	29,9%
3	6	5	29,8%
3	7	5	29,7%

A continuación, en la Tabla 25 mantendremos constante las concentraciones de P8, tomando el valor optimizado (3%), y mantendremos constante la concentración de P2, tomando también el valor optimizado (3%), mientras variamos la concentración de P3. Como puede verse, la configuración PMMA P8 3% P2 3% P3 4% es la que mejores valores de ganancia eléctrica proporciona, tomando el valor de 30,7%.

Tabla 25. Ganancia eléctrica para diferentes concentraciones de P3, manteniendo constante P8 y P2

Concentración P8	Concentración P2	Concentración P3	Ganancia eléctrica
3	3	2	30,4%
3	3	3	30,6%
3	3	4	30,7%
3	3	5	30,4%
3	3	6	30,2%
3	3	7	29,9%
3	3	8	29,8%

Por lo tanto, fruto de esta re-optimización hemos conseguido pasar de una ganancia eléctrica del 30% al 30,7%, cuando hacemos uso de la configuración PMMA P8 3% P2 3% P3 4%. Podemos por lo tanto concluir que este sistema molecular, con celdas solares de colorante en la configuración frontal, es el valor óptimo obtenido a lo largo de este proyecto. Repetimos valores del mismo bajo diferentes condiciones de iluminación (día soleado, día nublado, iluminación artificial), obteniendo las siguientes ganancias eléctricas promedio (ver Tabla 26).

Tabla 26. Ganancia eléctrica del sistema optimizado bajo diferentes condiciones lumínicas

ganancia eléctrica (exteriores, día soleado)	ganancia eléctrica (exteriores, día nublado)	ganancia eléctrica (interiores, iluminación artificial)
30,7%	31,3%	30,6%

Como podemos ver la ganancia eléctrica se sitúa en valores próximos al 31% para diferentes valores de iluminación. Puede sorprender que la ganancia eléctrica sea incluso un poco mayor (porcentualmente) en condiciones nubladas. Como hemos mencionado, lo que se mide con la ganancia eléctrica es el aporte extra de energía solar que proporciona el concentrador. Los concentradores solares trabajan tanto en condiciones de radiación directa como difusa, mientras que la mayoría de las celdas solares funcionan mucho mejor en condiciones de radiación directa. Por ello, en días nublados (radiación difusa), los concentradores solares son capaces de “ayudar” más a las celdas solares y de ahí la mayor ganancia eléctrica.

4. CONCLUSIONES

Una celda fotovoltaica convencional debe realizar dos funciones. Por una parte debe captar la energía solar (función óptica) y por otra parte debe convertir la radiación captada en electricidad (función optoelectrónica). Con el concentrador solar luminiscente es posible ayudar a la celda solar en la parte óptica (captación de energía solar), proporcionando así cantidad extra de radiación a la celda solar, al tiempo que permite reducir el tamaño de la celda y por lo tanto abaratar costes.

Uno de los inconvenientes de la primera generación de concentradores solares luminiscentes es que sólo captaban una banda limitada del espectro electromagnético. Mediante una combinación adecuada de especies luminiscentes es posible captura una zona más amplia del espectro electromagnético. Ése era uno de los grandes objetivos de este proyecto y se ha conseguido. Se ha logrado un rango de absorción de (300 nm – 625 nm), lo que implica un ancho de banda espectral de 325 nm (por encima de los 300 nm que nos habíamos marcado como objetivo). Por otra parte la eficiencia cuántica óptica ha sido del 22%, por encima también de la planteada (15%). Estos valores se han mantenido durante el escalado de dimensiones de los dispositivos planteado en el proyecto.

Los concentradores solares luminiscentes desarrollados captan la energía en diferentes partes del espectro y la convierten espectralmente al rojo-IR cercano, tal como había sido planteado en el proyecto. De esta manera el espectro de emisión del concentrador solapa con el *bandap* o espectro de absorción de las celdas solares, optimizando así la eficiencia del sistema híbrido. Como celdas solares hemos utilizado celda de Si y celdas de colorante. También hemos ensayado dos geometrías diferentes: celdas solares en los bordes o cantos del concentrador y celdas solares en las caras (configuración frontal). Los mejores resultados, tanto desde el punto de vista de la eficiencia como del de la integración arquitectónica, se consiguen con celdas de colorante y configuración frontal, llegando a valores de ganancia eléctrica del 30,7%. Este sistema optimizado ha sido integrado en un demostrador final.

En definitiva, los diferentes objetivos planteados en el proyecto han sido alcanzados de forma satisfactoria, disponiendo así de un sistema eficiente para la captura de energía solar y que además

admite integración arquitectónica. Creemos por ello que la tecnología aquí desarrollada puede ser una valiosa ayuda para los tan ansiados edificios de consumo nulo.

5. REFERENCIAS

1. W. H. Weber and J. Lambe, Appl Optics, 1976, 15, 2299-2300.
2. C. L. Mulder, P. D. Reusswig, A. M. Velazquez, H. Kim, C. Rotschild and M. A. Baldo, Opt Express, 2010, 18, A79-A90.
3. C. L. Mulder, P. D. Reusswig, A. P. Beyler, H. Kim, C. Rotschild and M. A. Baldo, Opt Express, 2010, 18, A91-A99.
4. M. J. Currie, J. K. Mapel, T. D. Heidel, S. Goffri and M. A. Baldo, Science, 2008, 321, 226-228.
5. C. L. Mulder, L. Theogarajan, M. Currie, J. K. Mapel, M. A. Baldo, M. Vaughn, P. Willard, B. D. Bruce, M. W. Moss, C. E. McLain and J. P. Morseman, Adv Mater, 2009, 21, 3181.
6. V. Fattori, M. Melucci, L. Ferrante, M. Zambianchi, I. Manet, W. Oberhauser, G. Giambastiani, M. Frediani, G. Giachi and N. Camaioni, Energ Environ Sci, 2011, 4, 2849-2853.
7. M. G. a. V. Debije, P.P.C., Advanced Energy Materials, 2012, 12-35.