

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 718 705**

21 Número de solicitud: 201830001

51 Int. Cl.:

**H01L 27/14** (2006.01)

**G02B 5/20** (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

**03.01.2018**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**03.07.2019**

71 Solicitantes:

**CAPARRÓS JIMÉNEZ, Sebastián (100.0%)**  
**C/ Arándano nº 13**  
**41927 Mairena del Aljarafe (Sevilla) ES**

72 Inventor/es:

**CAPARRÓS JIMÉNEZ, Sebastián**

74 Agente/Representante:

**TEMIÑO CENICEROS, Ignacio**

54 Título: **MÉTODO DE CONFIGURACIÓN DE UN FILTRO MULTICAPA DE SEPARACIÓN ESPECTRAL PARA APLICACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS Y TÉRMICAS, FILTRO Y CENTRAL DE GENERACIÓN ASOCIADOS A DICHO MÉTODO**

57 Resumen:

Método de configuración de un filtro multicapa de separación espectral para aplicaciones solares fotovoltaicas y térmicas, filtro y central de generación asociados a dicho método.

La invención se refiere a un método de configuración de un filtro (1) multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, apto para su disposición en placas fotovoltaicas para su uso en centrales de generación de energía, donde el filtro (1) multicapa comprende una pluralidad de capas (2) de diferentes índices de refracción y espesores, caracterizado porque comprende la realización de una serie de etapas para configurar dicho filtro (1) multicapa de forma que maximiza la eficiencia fotovoltaica y térmica. Otro objeto de la invención se refiere a un filtro (1) multicapa configurado a través de dicho método. Otro objeto de la invención se refiere a una central de generación de energía por aprovechamiento de energía solar que comprende el uso de al menos un filtro (1) multicapa configurado a través de dicho método.

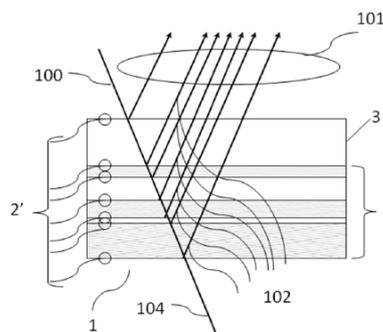


FIG. 3

**DESCRIPCIÓN**

**MÉTODO DE CONFIGURACIÓN DE UN FILTRO MULTICAPA DE SEPARACIÓN ESPECTRAL PARA APLICACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS Y TÉRMICAS, 5 FILTRO Y CENTRAL DE GENERACIÓN ASOCIADOS A DICHO MÉTODO**

**CAMPO DE LA INVENCION**

10 La presente invención se refiere a un método de configuración de un filtro multicapa de separación espectral de la radiación solar para transmitir dicha radiación a una célula fotovoltaica (o PV, del término inglés “photovoltaic”) en los rangos en que es más eficiente que un receptor térmico, como una planta de energía termosolar de concentración (o CSP, de “Concentration Solar Power”), y para reflejar a dicho receptor 15 térmico los rangos de radiación solar en los que es más eficiente que la célula fotovoltaica. El sector principal en el que se encuadra la invención es, por tanto, el de tratamiento selectivo de la radiación solar para ser empleado en sistemas de generación de energía eléctrica y térmica de forma industrializable.

**20 ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

Dentro del campo perteneciente a las tecnologías de generación de energía solar se pueden distinguir dos grupos principales: la tecnología de concentración solar térmica y la tecnología de generación solar fotovoltaica. El principio de funcionamiento de ambas es 25 sustancialmente distinto, teniendo cada una de ellas sus propias ventajas e inconvenientes. La energía termosolar se basa en el uso de medios ópticos, normalmente espejos, para generar luz concentrada que se utiliza para calentar un fluido calo-portador. Dicho fluido sobrecalentado se usa como entrada en un ciclo de turbina tradicional, para calentar otro fluido que es el que entra en el citado ciclo. Por su parte, la energía solar 30 fotovoltaica se caracteriza por el uso de semiconductores, principalmente basados en silicio policristalino, que generan electricidad directa tras incidir sobre ellos la radiación solar, por efecto fotoeléctrico.

La energía termosolar tiene como gran ventaja que, debido a que se basa en fluidos que 35 actúan como medio de calentamiento, éstos pueden almacenarse en tanques e introducirse en el ciclo de una turbina en el momento del día que más interese, o incluso

5 durante la noche. Esto quiere decir que la energía termosolar cuenta con la ventaja competitiva de que es una energía que puede almacenarse para un uso posterior. Como gran inconveniente, dicha energía es significativamente más compleja de manejar que la solar fotovoltaica y otras fuentes convencionales, siendo por ello más caro producir electricidad por este medio que por otras fuentes.

10 La energía solar fotovoltaica es, sin embargo, considerablemente más sencilla y sus costes son inferiores a los de la termosolar, resultando equiparable al de las fuentes convencionales. La gran desventaja que presenta radica en que, al ser una producción directa de electricidad, es inviable su almacenamiento a no ser que se utilicen baterías, lo cual exige altos costes de equipamiento y mantenimiento. Por ello, la energía fotovoltaica no permite, en la práctica, hacer almacenamiento a gran escala en plantas comerciales, lo que implica que la entrega de energía a la red no está sincronizada con la demanda real que pueda existir en dicha red.

15

Dentro del área de los sistemas termosolares, las dos tecnologías que actualmente dominan el mercado son la de cilindro parabólico y la de torre. En las de cilindro parabólico, un conducto o tubo con el fluido que se pretende calentar circula por la región del foco de uno o más espejos parabólicos, que concentran la radiación solar en dicho conducto. En la tecnología de torre, un campo solar de espejos concentra la radiación en una región de concentración ubicada en la torre, donde se instala el receptor por donde circula el fluido caloportador.

20

25 La tecnología de cilindro parabólico es la más madura y ha sido la dominante a lo largo del desarrollo histórico de la energía termosolar. Sin embargo, recientemente las torres termosolares se están imponiendo, ya que presentan entre otras la ventaja de que la concentración de luz es más efectiva que en el cilindro parabólico, y por ello se pueden alcanzar mayores temperaturas e incrementar la eficiencia de los ciclos termodinámicos. Además la circulación de los fluidos caloportadores se limita a la zona central de la planta donde se sitúa la torre, mientras que en el cilindro parabólico, al ser un sistema lineal, los tubos se extienden absolutamente por toda la planta, lo cual aumenta enormemente su complejidad. Por ello, actualmente las torres termosolares tienen costes de generación inferiores a los del cilindro parabólico y son, sin lugar a dudas, la apuesta de futuro dentro de este tipo de tecnologías.

30

35

Con relación a la tecnología fotovoltaica, la tecnología claramente dominante es la del

silicio mono o policristalino. Se trata de sistemas sencillos y con grandes economías de escala, por ello muy baratos, y que pueden competir en coste con fuentes de generación convencionales.

5 Asimismo, es conocido el uso de filtros selectivos de luz para determinadas aplicaciones solares, como las descritas en las solicitudes de patente JP 2009218383 y US 20150083194, en las que se divulgan sistemas de torre termo-solar en la que los heliostatos estarían compuestos por módulos fotovoltaicos. Dichos módulos fotovoltaicos llevan incorporados espejos dieléctricos de tipo “*hot-mirror*” o capas reflectantes  
10 infrarrojas (en inglés, “*infrared reflective films*”) que se utilizan como parte de los elementos destinados a redirigir la luz solar hacia el receptor central de la torre.

Estos sistemas, sin embargo, no tienen actualmente aplicación comercial real porque los *hot-mirrors* o *infrared reflective films*, aun siendo elementos son susceptibles de ser  
15 incluidos en las superficies reflectantes o colectoras, presentan una serie de desventajas e inconvenientes que impiden su uso a gran escala. A continuación se explica detalladamente por qué dichos elementos no son válidos en las citadas aplicaciones comerciales:

20 • Los *infrared reflective films* comprenden una deposición de materiales sobre una capa polimérica que posteriormente se adhiere al vidrio de los módulos fotovoltaicos. Esta configuración de producto no es válida en aplicaciones comerciales, ya que al estar expuesto el film a las condiciones exteriores del ambiente, sufre mucha degradación por efecto de la abrasión de las propias  
25 condiciones ambientales de la zona. Además, dichos films no garantizan reflexión especular que harían que el reflejo encontrase el receptor de la torre.

• Los *hot-mirrors* comprenden una deposición de materiales dieléctricos para reflejar la luz infrarroja y permitir el paso de la luz visible. Suelen diseñarse seleccionando una longitud de onda de corte, normalmente 700-750 nm, e  
30 introduciendo diseños periódicos de materiales para conseguir reflectancias muy altas a partir de esa longitud de onda de corte. Un *hot-mirror* no es una especificación de material óptima para una aplicación fotovoltaica-termosolar, por los siguientes motivos:

35

- 5           ○ La luz infrarroja empieza a partir de los 700-750 nm. En la Figura 1 del presente documento se representa la curva de transmisión típica de un *hot-mirror*. Sin embargo, una célula fotovoltaica de silicio tiene sus máximos picos de eficiencia justamente en ese rango en el cual el *hot-mirror* empezaría a reflejar luz, tal y como se puede observar en la Figura 2, que representa la eficiencia cuántica de células de silicio comerciales, por tanto se estaría sustrayendo una radiación útil muy importante de la celda fotovoltaica que reduce drásticamente su rendimiento.
  
- 10           ○ Como se ha comentado, un *hot-mirror* persigue una máxima reflectancia del espectro a partir de unos 700-750 nm, lo cual se consigue haciendo diseños periódicos basados en espesores de óxidos del cuarto de longitud de onda del rango que se quiere reflejar, lo implica un número elevado de capas. Un alto número de capas eleva enormemente el precio, la dificultad  
15           y el tiempo de la deposición y hace inviable su uso en estas aplicaciones en los que el coste y el número de capas es un factor limitante fundamental.
  
- 20           ○ En aplicaciones solares que hacen uso del espectro solar, hay zonas del infrarrojo en las cuales no se recibe radiación ya que existen picos de absorción del vapor de agua. Un *hot-mirror* estaría reflejando indiscriminadamente en esos rangos de longitud de onda, lo cual no tiene sentido ya que no se recibe radiación, por tanto se estaría reflejando un 100% de nada. Esas zonas de reflectancia en el infrarrojo que no se recibe  
25           radiación añade un coste innecesario al sistema y es una prueba más de que no son soluciones pensadas para aplicaciones solares.
  
- 30           ○ Un *hot-mirror* transmite toda la zona visible, incluyendo la zona del azul, siendo a efectos del ojo humano transparente. Una aplicación óptima fotovoltaica-termosolar debería tener un material que reflejara el azul ya que en esas longitudes de onda la eficiencia cuántica de las células de silicio decrece y es más eficiente reflejar la radiación al receptor térmico.

35           Relacionado con estas necesidades planteadas, se conocen solicitudes de patente como la solicitud WO 2015117134 A1 en las que se proponen sistemas de colector cilindro parabólico con sistemas de separación espectral en los que se vuelve a adolecer

nuevamente de falta de detalle en la reivindicación de diseño de los filtros selectivos y se especifica de manera genérica cuestiones obvias relativas a la separación espectral de la luz.

- 5 En general, el criterio tradicional para diseñar filtros se ha basado fundamentalmente en introducir espesores del cuarto de la longitud de onda que se quiere reflejar. Básicamente, el método habitual es seleccionar la longitud de onda que se quiere reflejar y calcular el espesor de los materiales de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$T_H = \frac{\lambda_0}{4n_H} \quad (\text{Eq. a})$$

10

$$T_L = \frac{\lambda_0}{4n_L} \quad (\text{Eq. b})$$

Siendo T los espesores,  $\lambda_0$  la longitud de onda que se quiere tener un máximo pico de reflectancia y n los índices de refracción. El ancho de reflectancia lo marca el contraste de índices y la intensidad de la reflexión se controla añadiendo el par con los mismos espesores n veces hasta conseguir el pico deseado. Para ampliar el rango de reflexión, habría que coger otro par de espesores y volverlo a repetir n veces.

Este criterio de diseño de filtros interferenciales son los que se utilizan en la óptica tradicional y son los que, aun sin detallar específicamente en las patentes relacionadas con plantas solares, se deduce que utilizan, al nombrar conceptos como *hot-mirrors* o *heat-reflective films*, ya que estos componentes se basan en estos diseños y además presentan curvas de transmisión idénticas a las que se pueden conseguir con diseños periódicos.

25

Por tanto, debido principalmente a que el estado de la técnica de filtros interferenciales basados en la óptica tradicional no está ajustado a aplicaciones solares y se basa en diseños periódicos, se obtienen soluciones muy poco eficientes y muy caras y que presentan cierta dificultad en su fabricación. Por tanto, no es de extrañar que ninguno de los sistemas reivindicados en las patentes antes mencionadas haya encontrado aplicación comercial.

Como alternativa a las soluciones anteriormente detalladas, son también conocidos los filtros selectivos de luz solar depositados sobre un vidrio como sustrato, tal y como los descritos en la solicitud de patente ES 2636800 A1. En este tipo de filtros, que

35

comprenden capas periódicamente alternadas de alto y bajo índice de refracción, la luz incidente sufre una reflexión selectiva para dejar pasar una mayoría de longitudes de onda hacia una célula fotovoltaica, y reflejar una mayoría de longitudes de onda hacia un receptor térmico. Sin embargo, dichos filtros distan de ser una solución óptima para su aplicación comercial, pues hay longitudes de onda que se reflejan hacia el receptor térmico donde los semiconductores de las células fotovoltaicas aún son altamente eficientes, no siendo, por tanto, la solución más eficiente de manera global para un filtro selectivo que se sitúa en un campo solar híbrido formado por módulos fotovoltaicos (PV) y por una central termosolar de receptor central (CPS). Este conjunto de longitudes de onda que se dejan de aprovechar en estos filtros periódicos, está bloqueado por la dificultad en la configuración de un filtro adecuado, más eficiente.

Por todo lo anterior, sigue existiendo una necesidad de proporcionar un filtro selectivo de luz que sea sencillo de configurar y fabricar, con un bajo número de capas, que permita ajustar la selección de longitudes de onda de la luz solar incidente con una alta eficiencia, superando las soluciones conocidas del estado de la técnica; y que, como valor añadido, sea poco complejo y de bajo coste. El hecho de conseguir un filtro solar altamente eficiente, sencillo con un bajo número de capas permitiría reducir la complejidad de fabricación y de reparación de los filtros en plantas solares, puesto que se requeriría menos tiempo para la deposición de las capas y, adicionalmente, a menor cantidad de material, más sencilla y barata sería su sustitución o reparación.

La presente invención propone una solución a este problema técnico planteado a través de un método de configuración de un filtro selectivo de luz multicapa que permite superar las dificultades anteriormente detalladas, a través de la configuración de un filtro multicapa aperiódico altamente eficiente en un rango de longitudes de onda deseado con un número bajo de capas.

## **DESCRIPCIÓN BREVE DE LA INVENCION**

Un objeto de la presente invención se refiere, aunque sin limitación, al desarrollo de un método de configuración de un filtro multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, apto para su disposición en placas fotovoltaicas para su uso en centrales de generación de energía por aprovechamiento de energía solar, donde el filtro multicapa comprende una pluralidad de capas de diferentes índices de refracción y espesores. Ventajosamente, dicho método comprende la realización de las siguientes etapas para

configurar dicho filtro multicapa en términos de una transmitancia y reflectancia deseadas en un rango de longitudes de onda:

- 5
- a) se define un primer filtro inicial con un número de capas e índices de refracción de capas conocidos, con un espesor de cada capa aleatorio;
- 10
- b) se calcula la respuesta en transmitancia y reflectancia de dicho filtro inicial en el rango de longitudes de onda deseado en función de la admitancia óptica del filtro inicial y de la admitancia óptica del medio;
- 15
- c) se calcula la eficiencia fotovoltaica de dicho filtro inicial en función de la transmitancia y reflectancia halladas en la etapa b) en el rango de longitudes de onda deseado; donde:
- la eficiencia fotovoltaica se calcula multiplicando el *performance ratio* o ratio de rendimiento estándar de una planta fotovoltaica por la eficiencia de la célula fotovoltaica de acuerdo a su respuesta espectral; y
  - la eficiencia de la célula fotovoltaica se define en términos de la densidad de corriente de la célula, la radiación global, la tensión a circuito abierto de la
- 20
- célula y el factor de llenado;
- d) se calcula la eficiencia térmica de dicho filtro inicial en función de la transmitancia y reflectancia halladas en la etapa b) en el rango de longitudes de onda deseado; donde:
- 25
- la eficiencia térmica se calcula multiplicando la eficiencia promedio anual de una planta de energía termosolar de concentración por el ratio entre la radiación directa versus la radiación directa sumada a la radiación difusa, por la reflectancia integrada del filtro inicial para el rango de longitudes de onda
- 30
- la eficiencia promedio anual de una planta de energía termosolar de concentración se calcula multiplicando los factores: eficiencia del campo solar, eficiencia del ciclo de potencia de la turbina y la pérdida de eficiencia de la planta por autoconsumos de equipos;
- 35

e) se calcula y se registra una función de mérito, calculada como la suma de las eficiencias fotovoltaica y térmica halladas en las etapas c) y d);

5 f) se define un conjunto de filtros iniciales con el mismo número de capas que el primer filtro inicial pero con distintos espesores para las capas de cada uno de dichos filtros con respecto al primer filtro inicial, y se repiten las etapas b) a e) para cada uno de dichos filtros;

10 g) se escoge el filtro multicapa óptimo, perteneciente al conjunto de filtros de la etapa f) más el primer filtro inicial, donde dicho filtro multicapa óptimo comprende la combinación de espesores que maximiza la función de mérito para un número dado de capas, de entre todas las funciones de mérito calculadas en la etapa e).

15 Se consigue con ello proporcionar una herramienta para configurar un filtro multicapa aperiódico que sea altamente eficiente en el rango de longitudes de onda que se desea. Se consigue especialmente poder configurar un filtro solar que refleje las longitudes de onda menos eficientes a nivel fotovoltaico, y que transmita las longitudes de onda más eficientes, teniendo maximizada la eficiencia, y, más aún, según el tipo de semiconductor que se use para la conversión fotovoltaica, se puede rediseñar el filtro. Adicionalmente,  
20 se puede rediseñar bajo otros criterios técnicos, siempre maximizando la eficiencia.

En una realización preferente de la invención, el método de configuración de un filtro multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, comprende además una etapa adicional donde se define un conjunto de filtros secundario, cada uno de esos filtros  
25 con un número de capas distinto entre ellos así como distinto del número de capas del primer filtro inicial, con índices de refracción conocidos y con un espesor de cada capa aleatorio; se repiten las etapas b) a g) para obtener un filtro multicapa óptimo del conjunto de filtros secundario para cada número de capas dado.

30 Se consigue con ello proporcionar un conjunto de soluciones óptimas para filtros para cada número dado de capas de filtro.

Preferentemente, el método de la invención además incluye una etapa adicional donde:

- se establece una función de mérito crítica deseada;
- 35 - se establece un número crítico de capas deseado;
- se selecciona un filtro óptimo final de entre todos los filtros óptimos registrados de tal

manera que dicho filtro óptimo final es el que más se acerca a los criterios establecidos de dicha función de mérito crítica y dicho número crítico de capas.

5 Se consigue con ello poder escoger un filtro óptimo que posea un número determinado de capas, por ejemplo, un número bajo de capas, para simplificar la fabricación. Se consigue con ello además poder escoger unos criterios mínimos de eficiencia total del filtro, o llegar a un compromiso entre el número de capas y la eficiencia total. Opcionalmente, estos criterios pueden modificarse y establecer unos nuevos criterios, según las necesidades del filtro en concreto.

10

En una realización preferente de la invención, en la etapa b) del método de la invención se calcula la respuesta en transmitancia y reflectancia de dicho filtro inicial en el rango de longitudes de onda deseado a través del cálculo de al menos los siguientes parámetros:

- la matriz característica de un sistema multicapa;
- 15 - el término de fase en función de la longitud de onda, del espesor de la capa y del ángulo de incidencia;
- el índice de refracción complejo de un sistema multicapa;
- la admitancia óptica de un sustrato en el que se realiza una deposición multicapa para construir el filtro multicapa.

20

En una realización preferente de la invención, en la etapa c) del método de la invención, la densidad de corriente se calcula a partir de la longitud de onda, la eficiencia cuántica de la célula, la carga del electrón, la constante de Planck y la velocidad de la luz.

25 Otro objeto de la invención se refiere a un filtro multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, apto para maximizar la eficiencia de un sistema fotovoltaico y de energía de concentración termosolar, configurado a través de un método de configuración según cualquiera de las realizaciones anteriores. Preferentemente, dicho filtro multicapa comprende capas en estructura aperiódica. Más preferentemente,  
30 dicho filtro multicapa es dicróico.

Se consigue con ello ampliar enormemente el rango de configuraciones de los filtros selectivos de luz respecto al estado de la técnica, pues no se restringe su configuración a un diseño periódico. Se consigue, por tanto, con un filtro aperiódico, el ocasionar  
35 reflexiones de longitudes de onda diferentes en cada capa, que aumentan las combinaciones posibles resultantes en las reflexiones, no estando restringidas a las

reflexiones de tipo Fabry-Pérot o a aquéllas reflexiones resultantes de la suma de reflexiones de una estructura periódica de capas conocidas.

5 La invención permite además proporcionar un filtro ad-hoc según las necesidades específicas que se requieran para seleccionar ciertos rangos de longitudes de onda y transmitir o reflejar en un subconjunto de esas longitudes de onda, ofreciendo además un abanico de soluciones para unas mismas condiciones.

10 Más preferentemente, el filtro multicapa comprende óxidos transparentes de alto y bajo índice de refracción. Aún más preferentemente, el filtro multicapa comprende óxido de titanio y óxido de silicio o cualquier compuesto derivado de los mismos. Aún más preferentemente, las capas de óxido de silicio y de óxido de titanio tienen espesores comprendidos entre 5 y 500 nm.

15 En una realización preferente del filtro multicapa, éste está configurado de manera que los rangos de longitud de onda con reflexión mínima en dicha estructura aperiódica corresponden a rangos de longitud de onda con absorción máxima en el espectro solar terrestre. Se consigue con ello proporcionar un filtro ideado para su uso en plantas solares que comprenden células fotovoltaicas y que comprenden un receptor térmico.

20

En una realización preferente del filtro multicapa, el filtro comprende un sustrato de vidrio. Preferentemente la deposición de las capas en el sustrato de vidrio se realiza mediante la técnica de *sputtering* o pulverización catódica.

25 En una realización preferente del filtro multicapa, el filtro comprende un número de capas comprendido entre 3 y 20. Preferentemente, el filtro comprende un número de capas comprendido entre 3 y 10. Más preferentemente, el filtro comprende un número de capas comprendido entre 5 y 7.

30 Otro objeto de la invención se refiere a una central de generación de energía por aprovechamiento de energía solar que comprende el uso de al menos un filtro multicapa configurado a través de un método de configuración según las realizaciones anteriores, donde el al menos un filtro multicapa está configurado para dejar pasar la radiación solar de longitudes de onda visibles hacia una célula fotovoltaica correspondiente, y reflejar la  
35 radiación solar de longitudes de onda más cortas y largas respecto a la radiación visible hacia un receptor central.

De esta forma, la presente invención proporciona una solución que supera los problemas del estado de la técnica, permitiendo configurar un filtro multicapa específicamente diseñado para tener una alta eficiencia y un número bajo de capas, lo cual simplifica en gran medida el proceso de fabricación y abre una puerta a la fabricación industrial y comercialización de dichos filtros selectivos de luz solar para su implantación en plantas solares híbridas fotovoltaicas y térmicas.

**DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS**

10 La Figura 1 muestra la curva de transmisión de un *hot-mirror* estándar.

La Figura 2 muestra la eficiencia cuántica típica de las células fotovoltaicas de silicio.

15 La Figura 3 muestra un esquema de una sección longitudinal de un filtro aperiódico y un esquema de su funcionamiento óptico, según una realización preferente de la invención.

La Figura 4 muestra tanto la curva de transmitancia como la curva de reflectancia de un filtro selectivo de luz con una estructura aperiódica de 7 capas que maximiza la eficiencia fotovoltaica y de concentración termosolar (PV-CSP), configurado por el método de la invención, según una realización preferente de la misma.

La Figura 5 muestra esquemáticamente una central de generación de energía por aprovechamiento de energía solar que comprende una célula fotovoltaica y un receptor central térmico, según lo descrito en la presente invención.

25

**REFERENCIAS NUMÉRICAS UTILIZADAS EN LAS FIGURAS**

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características técnicas de la invención, las Figuras se acompañan de una serie de referencias numéricas donde, con carácter ilustrativo y no limitativo, se representa lo siguiente:

30

(1)	Filtro multicapa
(2)	Capas del filtro
(2')	Intercaras
(3)	Sustrato del filtro

(4)	Célula fotovoltaica o célula PV
(5)	Receptor central térmico o receptor de planta de energía termosolar de concentración CSP
100	Rayo de luz incidente
101	Haz reflejado resultante
102	Partes reflejadas en las intercaras
104	Parte de luz transmitida a través del filtro

### DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

- 5 Se expone, a continuación, una descripción detallada del método y filtro de la invención referida a una realización preferente de la misma, basada en las Figuras 3-5 del presente documento. Dicha realización se aporta con fines ilustrativos, pero no limitativos, de la invención reivindicada.
- 10 Un objeto de la invención se refiere a un método de configuración de un filtro (1) multicapa selectivo de luz solar (Figura 3), que comprende preferentemente óxidos transparentes (en un rango de longitud de onda de interés), de alto y bajo índice de refracción, alternados, en configuración aperiódica en cuanto a su espesor en la estructura de capas (2), y depositados directamente sobre un sustrato (3) de vidrio. El
- 15 método de la invención se centra pues en configurar un filtro (1) que comprenda un número bajo de capas (2) y que sea óptimo para:
- transmitir la luz solar a su paso hacia una célula fotovoltaica (4) (PV), situada de manera adyacente al filtro (1), en las longitudes de onda en las que la célula
  - 20 fotovoltaica (4) es más eficiente en cuanto a absorción de energía solar para transformarla en energía eléctrica;
  - reflejar la luz solar que llega al filtro (1) en las longitudes de onda en las que la célula fotovoltaica (4) es menos eficiente en cuanto a absorción de energía solar
  - 25 para transformarla en eléctrica; y, al mismo tiempo, recoger la luz solar reflejada en un receptor térmico (5) como, por ejemplo, una planta de energía termosolar de concentración (CSP) (5).

En el método de configuración del filtro (1) multicapa de la invención, se usa la teoría

electromagnética y conocimientos generales de física de estado sólido conocidos, aplicada a sistemas multicapa como lo es el filtro (1), a células fotovoltaicas (4) PV adyacentes a dichos sistemas multicapa, así como a plantas solares de células fotovoltaicas (4) y a plantas de concentración termosolar CPS (5).

5

El método de la invención comprende cuatro etapas fundamentales: definición de un filtro inicial; cálculo de la respuesta del filtro; optimización de los espesores de las capas (2) para un número determinado de capas (2) y optimización del número de capas (2). A continuación se describen en detalle cada una de las etapas.

10

1.- Definición de un filtro inicial.

El método requiere unos datos base, previos a la optimización del filtro (1) multicapa. En primer lugar, se define un filtro inicial, j. Se supone que dicho filtro inicial, j, está fabricado mediante la deposición capa a capa (2) sobre un sustrato (3) conocido, para lo cual se necesita escoger un número L de capas (2) de espesor aleatorio conocido:

15

$$t_{ij}=\{t_{ij}\}=\{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{Lj}\} \quad (\text{Eq.1.1})$$

Donde  $i=1, \dots, L$  y  $t_{ij}$  es el espesor inicial aleatorio de la capa (2) i del filtro inicial j. Cada capa (2) tiene un índice de refracción complejo  $N_i$  conocido en un rango de longitudes de onda determinado:

20

$$N_i=\{N_{ij}\}=\{N_{1j}, N_{2j}, \dots, N_{Lj}\} \quad (\text{Eq.1.2})$$

2.- Cálculo de la respuesta del filtro inicial.

En segundo lugar, se ha de calcular la respuesta del filtro inicial, j, cuando le llega radiación solar. Para ello, se define un rango de longitudes de onda,  $\lambda$ , en el que se va a optimizar el filtro (1) multicapa.

25

A continuación, se calcula la respuesta del filtro inicial, j, selectivo de luz, definido por las siguientes ecuaciones:

30

$$\delta_L = \frac{2\pi N_L t_L}{\lambda} \cos(\theta_L) \quad (\text{Eq.2.1})$$

$$N_L = n_L - ik_L \quad (\text{Eq.2.2})$$

35

$$\eta_S = \frac{H_S}{E_S} \quad (\text{Eq.2.3})$$

$$\begin{pmatrix} E_A \\ H_A \end{pmatrix} = \left\{ \prod_{L=1}^n \begin{pmatrix} \cos \delta_L & (i \sin \delta_L) / \eta_L \\ i \eta_L \sin \delta_L & \cos \delta_L \end{pmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.2.4})$$

donde:

5

- la Eq. 2.4 es la matriz característica de un sistema multicapa que define la respuesta óptica del filtro inicial j, en donde L hace referencia al número de capa (2);

-  $\delta_L$  es el término de fase de la capa L,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $t_L$  es el espesor de la capa L del filtro inicial j y  $\theta_L$  el ángulo de incidencia de la radiación respecto al sistema multicapa;

10

-  $N_L$  es el índice de refracción complejo, donde  $n_L$  es el índice de refracción y  $k_L$  es el coeficiente de extinción; ambos conocidos previamente.

-  $\eta_s$  es la admitancia óptica del sustrato (3) en el que se realiza la deposición de las capas (2), que es conocido.

15

-  $E_A$  es la intensidad del campo eléctrico.

-  $H_A$  es la intensidad del campo magnético.

Resolviendo la Eq. 2.4 a través de todos los parámetros conocidos, se llega a una los coeficientes de resolución  $p_{11}$ ,  $p_{12}$ ,  $p_{21}$ ,  $p_{22}$ , de la matriz característica:

20

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.2.5})$$

Dado que la admitancia óptica de la multicapa viene definida por:

$$Y = \frac{H_A}{E_A} = \frac{p_{21} + p_{22} \eta_s}{p_{11} + p_{12} \eta_s} \quad (\text{Eq.2.6})$$

25

A continuación, se puede calcular el coeficiente complejo de reflexión, según las siguientes ecuaciones,

$$r = \frac{\eta_A - Y}{\eta_A + Y} \quad (\text{Eq.2.7})$$

30

$$\eta_A(\text{polarización } s) = N_A \cos(\theta_A) \quad (\text{Eq.2.8})$$

$$\eta_A(\text{polarización } p) = N_A / \cos(\theta_A) \quad (\text{Eq.2.9})$$

Donde  $\eta_A$  es la admitancia óptica del medio (aire en este caso) y viene definida por las Eq.2.8 y 2.9, según la polarización de la luz sea s o p.

35

Por último, se calcula la transmitancia y la reflectancia totales de la multicapa o filtro inicial j en función de la longitud de onda:

5 
$$R(\lambda) = r \times r \quad (\text{Eq.2.10})$$

$$T(\lambda) = 1 - R(\lambda) \quad (\text{Eq.2.11})$$

De esta manera, para el filtro inicial j de parámetros conocidos, se caracteriza para una longitud de onda determinada su respuesta espectral. Se puede así aplicar este cálculo a un rango de interés de longitudes de onda discretizado. En concreto, para todas las longitudes de onda del espectro solar, se puede calcular la respuesta del filtro inicial j.

Una vez caracterizada la respuesta espectral del filtro inicial j para todas las longitudes de onda se puede calcular la eficiencia total del filtro inicial j,  $Ef_{total j}$ , en términos de una función de mérito con una componente de eficiencia fotovoltaica (PV),  $Ef_{PV}$ , y otra componente de eficiencia térmica (CSP),  $Ef_{CSP}$ :

15 
$$(Ef_{total j} = Ef_{PV j} + Ef_{CSP j} \rightarrow) Ef_{total} = Ef_{PV} + Ef_{CSP} \quad (\text{Eq.2.12})$$

20 Para calcular la eficiencia fotovoltaica,  $Ef_{PV}$ , del filtro inicial j, se emplean las siguientes expresiones:

25 
$$Ef_{PV} = Ef_{cel} \times PR \quad (\text{Eq.2.13})$$

Donde:

30 - *PR* es el *performance ratio* típico de plantas fotovoltaicas (PV) o ratio de rendimiento, que de manera típica posee un valor alrededor de 0.8; donde se tienen en cuenta las pérdidas de eficiencia por factor coseno (desapuntamiento con respecto a la normal del sol); pérdidas por sombreado; pérdidas espectrales; pérdidas por irradiación; pérdidas por temperatura; pérdidas por “mismatch”; pérdidas de cableado; pérdidas por la operación del inversor; pérdidas de eficiencia del inversor por operar fuera del punto nominal; pérdidas del inversor por recibir potencia fuera de su límite de trabajo; pérdidas del inversor por voltaje dentro de su rango de operación; pérdidas del inversor por recibir voltaje fuera de su límite de operación; pérdidas por consumos de equipos durante la noche;

pérdidas por autoconsumo de equipos auxiliares; pérdidas en AC y pérdidas por la estación transformadora:

$$\begin{aligned}
 PR = & \eta_{cos} \times \eta_{sombra} \times \eta_{IAM} \times \eta_{suciedad} \times \eta_{irrad} \times \eta_T \times \\
 & \times \eta_{mismatch} \times \eta_{cableado} \times \eta_{inversor\_op} \times \eta_{inversor\_nominal} \times \\
 & \times \eta_{inversor\_limite} \times \eta_{inversor\_voltaje} \times \eta_{Inversor\_limite\_voltaje} \times \\
 & \times \eta_{consumo\_noche} \times \eta_{equipos\_auxiliares} \times \eta_{AC\_Ohmic} \times \eta_{Trafo} \quad (Eq.2.14)
 \end{aligned}$$

-  $Ef_{cel}$  es la eficiencia de la célula fotovoltaica de acuerdo a su respuesta espectral que, en modelos simples, suele estar definida por la siguiente expresión:

$$Ef_{cel} = \frac{J_{sc} \times V_{OC} \times FF}{GNI} \quad (Eq.2.15)$$

Siendo  $J_{sc}$  la densidad de corriente de la célula fotovoltaica, GNI la radiación global (radiación directa más la radiación difusa),  $V_{oc}$  la tensión a circuito abierto de la célula y FF el factor de llenado o filling factor característico.  $J_{sc}$ , la densidad de corriente de la célula fotovoltaica, depende del espectro, y viene definida a su vez por las siguientes expresiones en modelos simples:

$$J_{sc} = \sum_{\lambda} J_{sc}(\lambda) \quad (Eq. 2.16)$$

$$J_{sc}(\lambda) = \lambda \times GNI(\lambda) \times EQE \times Transmision_{filtro}(\lambda) \times \frac{q}{h \times c} \quad (Eq.2.17)$$

Siendo  $\lambda$  la longitud de onda, GNI la radiación global, EQE la eficiencia cuántica de la célula fotovoltaica,  $q$  la carga del electrón,  $h$  la constante de Planck y  $c$  la velocidad de la luz, y  $Transmision_{filtro}$  es la transmisión integrada del filtro para el espectro solar que se quiere optimizar.

Integrando  $J_{sc}$  en todo el espectro solar con ayuda de las Eq. 2.16 y 2.17 y calculando el  $PR$  típico de una planta fotovoltaica como en la Eq. 2.14, se termina de calcular la eficiencia fotovoltaica del filtro inicial  $j$  a través de la Eq. 2.13:  $Ef_{PVj}$ .

De forma similar, para calcular la eficiencia termosolar del filtro inicial  $j$ ,  $Ef_{CSPj}$ , se emplea la siguiente expresión:

35

$$Ef_{CSP} = Ef_{Av} \times \frac{DNI}{GNI} \times Reflectancia_{filtro} \quad (Eq.2.18)$$

donde:

-  $Ef_{Av}$  es la eficiencia promedio anual de una planta de energía de concentración termosolar CSP, normalmente entre un 15-20% según la tipología de planta; y que se calcula típicamente a través de la siguiente expresión (Eq. 2.19) en la que los factores que se multiplican para el cálculo son la eficiencia del campo solar; la eficiencia del ciclo de potencia de la turbina y la pérdida de eficiencia de la planta por autoconsumos de equipos:

$$Ef_{av} = \eta_{campo\ solar} \times \eta_{ciclo\ potencia} \times \eta_{autoconsumos} \quad (Eq.2.19)$$

La eficiencia del campo solar se calcularía de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\eta_{campo\ solar} = \eta_{cos} \times \eta_{sombras} \times \eta_{atenuacion} \times \eta_{bloqueos} \times \eta_{desbordamiento} \times \eta_{receptor\ térmico} \times \eta_{dumping} \quad (Eq.2.20)$$

Donde los factores multiplicativos de la Eq. 2.20 representan los siguientes conceptos: eficiencia por factor coseno (desapuntamiento con respecto a la normal del sol); sombras entre colectores adyacentes; pérdidas de energía por atenuación atmosférica; bloqueos (energía reflejada que no llega al receptor térmico por incidir en colectores adyacentes); perdidas por desbordamiento (la luz reflejada que no queda bloqueada no incide en el receptor térmico porque los captadores están desalineados o trabajando fuera de su rango de tolerancia admisible); pérdida de conversión luz-energía térmica en el receptor y, por último, energía que no se introduce en el receptor porque no acepta mas carga térmica y los colectores se desapuntan completamente.

- DNI/GNI es el ratio de la radiación directa vs. la radiación global.

-  $Reflectancia_{filtro}$  es la reflectancia integrada del filtro multicapa para el espectro solar que se quiere optimizar, que se calcula típicamente a través de la siguiente expresión:

$$Reflectancia_{filtro} = \frac{\sum_{\lambda} \lambda \times DNI(\lambda) \times R(\lambda)}{DNI} \quad (Eq.2.20)$$

De esta manera, para el filtro inicial j, se puede obtener una función de mérito  $Ef_{total\ j}$  de

acuerdo a la Eq. 2.12 y con la ayuda del conjunto de expresiones Eq. 2.1-2.11 y Eq. 2.13-2.20. Esta función de mérito calculada para el filtro inicial  $j$  se registra en esta etapa.

5 3.- Optimización de los espesores de las capas (2) para un número determinado de capas (2).

En el siguiente paso, se define un conjunto de filtros iniciales  $j=2, \dots, J$  con el mismo número  $L$  de capas (2) que el primer filtro inicial,  $j=1$ , pero con distintos espesores aleatorios para las  $L$  capas (2):

10

$$\mathbf{t}_{ij} = \{t_{ij}\} = \{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{Lj}\} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

15

De esta forma, cada  $\{t_{ij}\}$  es un conjunto de espesores aleatorios distinto para un número  $L$  dado de capas (2), donde hay  $J$  conjuntos de espesores aleatorios, uno para cada filtro inicial  $j$ :  $\{t_{1j}\}, \{t_{2j}\}, \dots, \{t_{Lj}\}$ .

20

Para cada uno de estos filtros iniciales  $j$ , con sus espesores  $\{t_{ij}\}$ , se repiten todos los cálculos del paso anterior; es decir, se realiza el cálculo de la respuesta del filtro inicial a través de las ecuaciones Eq. 2.1-2.20, registrando todas las funciones de mérito resultantes, obteniendo un conjunto de  $J$  funciones de mérito:  $\{E_{f_{total\ j}}\}$  con  $j=1, \dots, J$ .

25

A continuación se escoge el filtro (1) óptimo  $j=M$ , perteneciente al conjunto de filtros anterior, de tal forma que dicho filtro (1) óptimo  $M$  comprende la combinación de espesores  $\{t_{iM}\}$  que maximiza la función de mérito  $E_{f_{total\ M}}$  para un número  $L$  dado de capas (2), de entre todas las funciones de mérito calculadas en la etapa anterior.

30

El método de configuración del filtro (1) multicapa es capaz, por tanto, de cuantificar la función de mérito hasta encontrar el filtro (1) óptimo para un número definido  $L$  de capas (2).

35 4.- Optimización del número de capas (2).

El método de la invención puede incluir una última etapa en la que se calcula un filtro (1) óptimo para varias cantidades de capas distintas; es decir, variando el parámetro  $L$ , para después escoger uno de dichos filtros (1) óptimos.

Para ello, se define un conjunto secundario  $\mathbf{s}=\{L_1, \dots, L_s\}$  de filtros iniciales, cada uno de esos filtros con un número  $L_s$  de capas (2) distinto entre ellos, así como distinto del número  $L$  de capas (2) del primer filtro inicial  $j$ , con índices de refracción conocidos y con un espesor de cada capa (2) aleatorio:

5

$$\mathbf{s}=\{s\}=\{L_1, \dots, L_s\} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$\mathbf{t}_{ij}=\{t_{ij}\}=\{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{L_s j}\} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$\mathbf{N}_i=\{N_i\}=\{N_1, N_2, \dots, N_{L_s}\} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

10 Donde  $i=1, \dots, L_s$  es la capa (2) en cuestión, y  $t_{ij}$  es el espesor inicial aleatorio de la capa (2)  $i$  del filtro inicial  $j$  perteneciente ahora al conjunto  $\mathbf{s}$ . Cada capa (2) tiene asimismo un índice de refracción complejo  $N_i$  conocido en un rango de longitudes de onda determinado.

15 Se repiten los cálculos de los pasos 2 y 3 para cada uno de estos filtros iniciales  $j$  del conjunto secundario  $\mathbf{s}=\{L_1, \dots, L_s\}$  para obtener un filtro (1) óptimo del conjunto de filtros secundario para cada número  $L_s$  de capas (2) dado y se registran dichos resultados.

20 Por último, se escoge un filtro final de todo el conjunto de filtros (1) óptimos, que se adecúe a otros criterios técnicos, como por ejemplo, la cantidad de material disponible para su fabricación, la precisión posible en el espesor de las capas a la hora de depositarlas o la eficiencia mínima deseada. Así, no todos los filtros (1) óptimos han de ser igual de eficientes para distinto número de capas  $L_s$ . Por ejemplo, un filtro (1) óptimo con  $L_s = 20$  capas puede tener una alta eficiencia, y un filtro (1) óptimo con  $L_s = 5$  capas, puede tener una eficiencia tan solo un pequeño porcentaje por debajo del anterior. En  
25 este caso, se puede escoger el filtro (1) óptimo con menor número de capas como filtro final, por su sencillez a la hora de fabricarlo. Alternativamente, se pueden establecer otros criterios de selección de un filtro final, según las necesidades técnicas.

30 El método de configuración de un filtro (1) multicapa óptimo que maximiza la función de mérito definida en la Eq. 2.12 descrito, trata, por tanto, de la resolución de un problema complejo matemático en el que se incluyen campos de óptica, semiconductores, energía solar PV y solar CSP. Con el método de la invención se proporciona una forma de encontrar soluciones altamente eficientes, factibles técnicamente y económicamente para configurar un filtro (1) selectivo de luz solar. Abordar este problema mediante los diseños  
35 convencionales, aplicando la teoría del cuarto de longitud de onda del estado de la técnica, no permite llegar a una solución tan precisa y eficiente como con el método que

se ha descrito en los párrafos anteriores.

De acuerdo con el método de la invención, el filtro (1) selectivo de luz típicamente poseerá un diseño aperiódico (puesto que no tiene por qué ser más eficiente uno  
5 periódico), formado por un par de óxidos transparentes de alto-bajo índice de refracción, que solventa las carencias del estado de la técnica y presenta una serie de ventajas:

- Al ser un diseño aperiódico, se simplifica en gran manera el número de capas (2) necesarias para la optimización, lo cual redundará en una sencillez y coste de  
10 fabricación muy bajo. La Figura 4 muestra la curva de reflectancia y la de transmitancia para una configuración del filtro (1) de tan sólo 7 capas, que mejora la eficiencia, simplifica la fabricación y, adicionalmente, reduce los costes, pues se necesita menos deposiciones encima del sustrato (3) y menos material.
- Es un diseño mucho más eficiente que *heat-films* o *hot mirrors* ya que selecciona  
15 espectralmente qué rango o rangos de longitudes de onda interesa transmitir o reflejar con objeto de maximizar la eficiencia conjunta del sistema. Los rangos de longitudes de onda de los *hot mirrors* o *heat reflective films* no están ajustados para maximizar la eficiencia del sistema fotovoltaico y termosolar (PV+CSP).
- El diseño aperiódico permite discernir las zonas del espectro solar en las que la  
20 célula fotovoltaica (4) recibe radiación, pudiendo no reflejar la radiación en zonas de infrarrojo que no se recibe radiación solar por los picos de absorción del vapor de agua.
- Permite tener mayor sensibilidad espectral con menor número de capas (2) a la  
25 hora de transmitir o reflejar la luz, lo cual repercute nuevamente en mejor ratio eficiencia/coste. Tal y como se observa en la Figura 4, la reflectancia/transmitancia de estos filtros (1) difiere a la de un *heat film* o *hot-mirror*. En primer lugar, la transmitancia es muy alta, hasta aproximadamente  
30 1000 nm, puesto que hasta esa longitud de onda, la energía que se obtendría a través de una transformación fotovoltaica es más eficiente que la termosolar. Además se observa un pico de reflexión muy pronunciado entre 400-500 nm, lo cual le confiere un tono azulado muy distintivo con respecto a un *heat-film*, y que  
35 además maximiza la eficiencia total del sistema ya que en esos rangos la célula fotovoltaica (4) no es muy eficiente.

Otro objeto de la invención se refiere a un filtro (1) multicapa configurado mediante el método anteriormente descrito. Preferentemente, las capas (2) que comprende el filtro (1) son un par de óxidos transparentes de alto/bajo índice de refracción y pueden depositarse directamente sobre un vidrio de un módulo fotovoltaico, más preferentemente en su cara interna para que quede protegido de las condiciones exteriores.

A continuación se describen genéricamente las características de un filtro (1) multicapa selectivo de radiación solar, apto para maximizar la eficiencia integrada de una planta PV-CSP según una realización preferente de la invención:

En una realización preferente del filtro (1) selectivo de luz de la invención, dicho filtro (1) es dicroico. Con dicho filtro (1) dicroico se logra un tratamiento diferenciado de la luz solar según la longitud de onda, de manera que una fracción del espectro sea reflejada selectivamente, mientras que la otra sea transmitida a su través; es decir, se trata de un filtro (1) óptico utilizado para reflejar o transmitir la luz selectivamente según su longitud de onda. La longitud de onda de corte se elige a voluntad en función de las necesidades.

De forma genérica, el filtro (1) dicroico comprende un apilamiento de capas (2) de dos materiales transparentes (en el visible o en un rango de longitudes de onda) de distinto índice de refracción. El conjunto capa de bajo índice/capa de alto índice puede tener una secuencia periódica o aperiódica, dependiendo de las características de los espectros de reflexión y transmisión deseados.

Aún más preferentemente, el filtro (1) dicroico de la invención se fabrica por técnicas de sputtering y su diseño vendrá definido por la siguiente fórmula o expresión:

$$\text{Sustrato} / (a_1A) / (b_1B) / (a_2A) / (b_2B) / \dots / (a_nA) / (b_nB) \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Donde la barra “/” representa una intercara entre capas (2), donde A es el material de alto índice y B el de bajo índice de refracción, y donde  $a_i$  y  $b_i$  son los espesores concretos de las capas (2). En el caso de diseños periódicos,  $a_1=a_2=\dots=a_n$  y  $b_1=b_2=\dots=b_n$ , mientras que en el caso de los diseños aperiódicos, los espesores poseerán valores distintos, siendo estos últimos los óptimos para aplicaciones solares, debido a que generan reflexiones no solo interferenciales ocasionadas por un diseño periódico, sino que permiten obtener reflexiones diferentes en cada capa y aumentar el número de

combinaciones. Esta complejidad puede parecer a priori una desventaja, aunque es justamente lo que permite configurar el filtro (1) según los requisitos deseados, a través de una herramienta potente de cálculo.

- 5 En otra realización preferente de la invención, el filtro (1) se encuentra configurado para dejar pasar la radiación solar de longitudes de onda visibles hacia la célula fotovoltaica (4) correspondiente, y reflejar la radiación solar de longitudes de onda en la región del azul y a partir de 950-1000 nm hacia el receptor central (5).
- 10 Una gráfica espectral de las longitudes de onda reflejadas por el filtro (1) de la invención, es la mostrada en la Figura 4, según una realización preferente de la misma.

Más preferentemente, el filtro (1) dicróico comprende capas de óxidos transparentes (en un rango de longitud de onda como el visible) de alto/bajo índice de refracción laminadas  
15 sobre la célula fotovoltaicas (4). Dichas capas de óxidos transparentes se depositan en substratos de vidrio mediante sputtering que idealmente queda laminado sobre las células fotovoltaicas (3). Aún más preferentemente, dichos óxidos son óxido de silicio como elemento de bajo índice de refracción y óxido de titanio como elemento de alto índice de refracción.

20

Aún más preferentemente los espesores tanto del óxido de silicio como el óxido de titanio estarán comprendidos entre 5 y 500 nm.

El funcionamiento de la reflexión y transmisión de la luz solar en un filtro (1) multicapa  
25 como el de la invención, se asemeja al de la Figura 3, donde se muestra una posible sección longitudinal de un filtro (1) aperiódico bajo la cubierta transparente de una célula fotovoltaica (4). En una estructura multicapa de este tipo, el rayo de luz incidente (100) sufre procesos de reflexión y refracción en todas las intercaras (2') que existen entre las diferentes capas (2) y entre la última capa (2) y el aire interior y la primera capa (2) y el  
30 sustrato (3) que configura la cubierta transparente, de forma que las partes reflejadas (102) en las distintas intercaras (2') salen del filtro (1) formando un haz reflejado (101) en el cual, dado que cada parte reflejada (102) recorre diferentes caminos ópticos, ha generado procesos de interferencia óptica que anulan ciertos rangos de longitudes de onda en el haz reflejado (101) resultante. Precisamente ese rango de longitudes de onda  
35 no reflejado será la parte de luz transmitida (104) hacia la célula fotovoltaica (4).

Preferentemente el número de capas (2) es de 1 a 20. Más preferentemente el número de capas (2) es de 3 a 10 y, aún más preferentemente, de 5 a 7.

5 Otro objeto de la invención (Figura 5) se refiere a la inclusión de este tipo de filtros (1) en plantas solares híbridas formada por módulos o células fotovoltaicas (4), que absorben parte de la luz solar inyectándola en la red del mismo modo que una central fotovoltaica convencional; y, por otro lado, reflejan los rayos infrarrojos y otros dentro del espectro visible a una central termosolar de receptor central (5) (planta solar PV-CSP), lo cual añade una nueva dimensión a la tecnología y resuelve los problemas derivados del estado de la técnica actual.

10 Por tanto, como se ha descrito, estos filtros (1) se diseñan con complejos algoritmos genéticos que seleccionan la combinación óptima de espesores para las capas (2) de entre millones de combinaciones posibles para maximizar la suma de la eficiencia en la transformación de la radiación solar en el rango fotovoltaico (el rango de longitudes de onda donde el semiconductor de silicio típicamente absorbe los fotones para convertirlos en energía eléctrica) y la eficiencia en la transformación de la radiación solar en el rango de concentración termosolar (PV+CSP). Ninguna de las soluciones óptimas se basa en un diseño periódico, el cual limita en gran medida las opciones de configuración del filtro

15 (1) multicapa. De esta forma, la invención propone una solución que supera los problemas técnicos planteados al proporcionar un filtro (1) ad-hoc aperiódico para reflejar y transmitir selectivamente la luz solar. Adicionalmente, no son necesarias muchas capas (2) para encontrar soluciones óptimas a nivel de rendimiento global PV+CSP, lo que le da viabilidad al producto para aplicaciones solares a nivel industrial debido a la gran

20 eficiencia conseguida a través de la configuración obtenida por el método de la invención. Este tipo de solución se basa en unos sistemas de computación muy potentes para optimizar la función de mérito descrita, que se aleja de la teoría y métodos de diseño tradicionales de los filtros interferenciales, superando las dificultades del estado de la técnica.

30

## REIVINDICACIONES

1.- Método de configuración de un filtro (1) multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, apto para su disposición en placas fotovoltaicas para su uso en centrales de generación de energía por aprovechamiento de energía solar, donde el filtro (1) multicapa comprende una pluralidad de capas (2) de diferentes índices de refracción y espesores,

donde dicho método está **caracterizado por que** comprende la realización de las siguientes etapas para configurar dicho filtro (1) multicapa en términos de una transmitancia y reflectancia deseadas en un rango de longitudes de onda:

a) se define un primer filtro inicial con un número de capas (2) e índices de refracción de capas (2) conocidos, con un espesor de cada capa (2) aleatorio;

b) se calcula la respuesta en transmitancia y reflectancia de dicho filtro inicial en el rango de longitudes de onda deseado en función de la admitancia óptica del filtro inicial y de la admitancia óptica del medio;

c) se calcula la eficiencia fotovoltaica de dicho filtro inicial en función de la transmitancia y reflectancia halladas en la etapa b) en el rango de longitudes de onda deseado; donde:

- la eficiencia fotovoltaica se calcula multiplicando el ratio de rendimiento estándar de una planta fotovoltaica por la eficiencia de la célula fotovoltaica de acuerdo a su respuesta espectral; y

- la eficiencia de la célula fotovoltaica se define en términos de la densidad de corriente de la célula, la radiación global, la tensión a circuito abierto de la célula y el factor de llenado;

d) se calcula la eficiencia térmica de dicho filtro inicial en función de la transmitancia y reflectancia halladas en la etapa b) en el rango de longitudes de onda deseado; donde:

- la eficiencia térmica se calcula multiplicando la eficiencia promedio anual de una planta de energía termosolar de concentración por el ratio entre la radiación directa versus la radiación directa sumada a la radiación difusa, por

la reflectancia integrada del filtro inicial para el rango de longitudes de onda deseado; y

- 5
- la eficiencia promedio anual de una planta de energía termosolar de concentración se calcula multiplicando los factores: eficiencia del campo solar, eficiencia del ciclo de potencia de la turbina y la pérdida de eficiencia de la planta por autoconsumos de equipos;
- 10
- e) se calcula y se registra una función de mérito, calculada como la suma de las eficiencias fotovoltaica y térmica halladas en las etapas c) y d);
  - f) se define un conjunto de filtros iniciales con el mismo número de capas (2) que el primer filtro inicial pero con distintos espesores para las capas (2) de cada uno de dichos filtros con respecto al primer filtro inicial, y se repiten las etapas b) a e) para cada uno de dichos filtros;
- 15
- g) se escoge el filtro (1) multicapa óptimo, perteneciente al conjunto de filtros de la etapa f) más el primer filtro inicial, donde dicho filtro (1) multicapa óptimo comprende la combinación de espesores que maximiza la función de mérito para un número dado de capas (2), de entre todas las funciones de mérito calculadas en la etapa e).
- 20

2.- Método de configuración de un filtro (1) multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, según la reivindicación anterior, que además comprende una etapa adicional donde:

- 25
- se define un conjunto de filtros secundario, cada uno de esos filtros con un número de capas (2) distinto entre ellos así como distinto del número de capas (2) del primer filtro inicial, con índices de refracción conocidos y con un espesor de cada capa (2) aleatorio;
- 30
- se repiten las etapas b) a g) para obtener un filtro (1) multicapa óptimo del conjunto de filtros secundario para cada número de capas (2) dado.

3.- Método de configuración de un filtro (1) multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, según la reivindicación anterior, que además incluye una etapa adicional donde:

- 35
- se establece una función de mérito crítica deseada;

- se establece un número crítico de capas (2) deseado;
- se selecciona un filtro (1) óptimo final de entre todos los filtros (1) óptimos registrados de tal manera que dicho filtro (1) óptimo final es el que más se acerca a los criterios establecidos de dicha función de mérito crítica y dicho número crítico de capas (2).

5

4.- Método de configuración de un filtro (1) multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde en la etapa b) se calcula la respuesta en transmitancia y reflectancia de dicho filtro inicial en el rango de longitudes de onda deseado a través del cálculo de al menos los siguientes parámetros:

10

- la matriz característica de un sistema multicapa;
- el término de fase en función de la longitud de onda, del espesor de la capa (2) y del ángulo de incidencia;
- el índice de refracción complejo de un sistema multicapa;
- la admitancia óptica de un sustrato (3) en el que se realiza una deposición multicapa para construir el filtro (1) multicapa.

15

5.- Método de configuración de un filtro (1) multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde: en la etapa c), la densidad de corriente se calcula a partir de la longitud de onda y de la eficiencia cuántica de la célula.

20

6.- Filtro (1) multicapa selectivo de separación espectral de la radiación solar, apto para maximizar la eficiencia de un sistema fotovoltaico y de energía de concentración termosolar, configurado a través de un método de configuración según cualquiera de las reivindicaciones 1-5, que comprende capas (2) en estructura aperiódica.

25

7.- Filtro (1) multicapa según la reivindicación anterior que comprende óxidos transparentes de alto y bajo índice de refracción.

30

8.- Filtro (1) multicapa según la reivindicación anterior que comprende óxido de titanio y óxido de silicio o cualquier compuesto derivado de los mismos.

35

9.- Filtro (1) multicapa según la reivindicación anterior, donde las capas de óxido de silicio y de óxido de titanio tienen espesores comprendidos entre 5 y 500 nm.

10.- Filtro (1) multicapa según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 6-9, configurado de manera que los rangos de longitud de onda con reflexión mínima en dicha estructura aperiódica corresponden a rangos de longitud de onda con absorción máxima en el espectro solar terrestre.

5

11.- Filtro (1) multicapa según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 6-10 que comprende un sustrato (3) de vidrio.

12.- Filtro (1) multicapa según la reivindicación anterior, donde la deposición de las capas (2) en el sustrato (3) de vidrio se realiza mediante la técnica de *sputtering* o pulverización catódica.

10

13.- Filtro (1) multicapa según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 6-12, que comprende un número de capas comprendido entre 3 y 20.

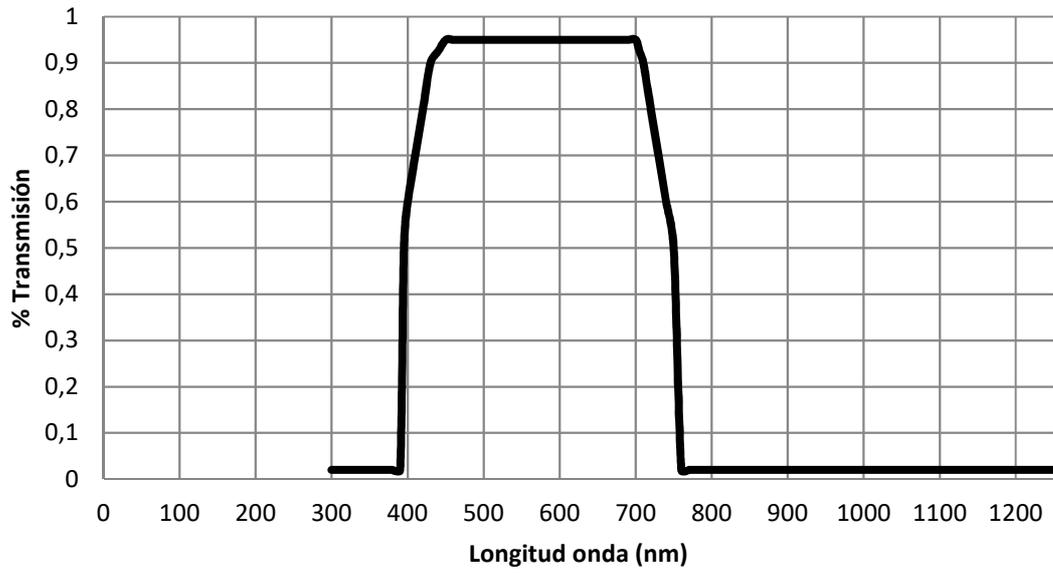
15

14.- Filtro (1) multicapa según la reivindicación anterior, que comprende un número de capas comprendido entre 3 y 10, o entre 5 y 7.

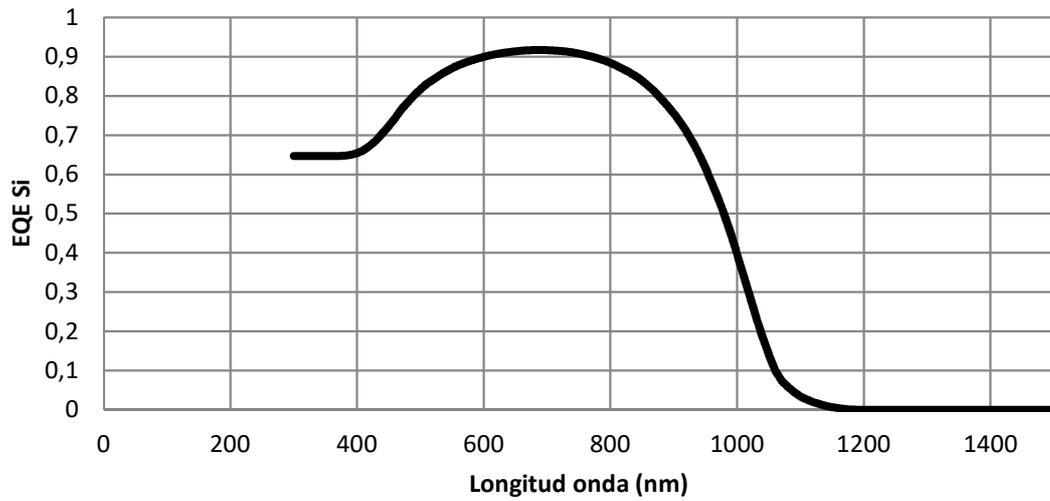
15.- Central de generación de energía por aprovechamiento de energía solar que comprende el uso de al menos un filtro (1) multicapa configurado a través de un método de configuración según cualquiera de las reivindicaciones 1-5, donde el al menos un filtro (1) multicapa está configurado para dejar pasar la radiación solar de longitudes de onda visibles hacia una célula fotovoltaica (4) correspondiente, y reflejar la radiación solar de longitudes de onda más cortas y largas respecto a la radiación visible hacia un receptor central (5).

20

25



**FIG. 1**



**FIG. 2**

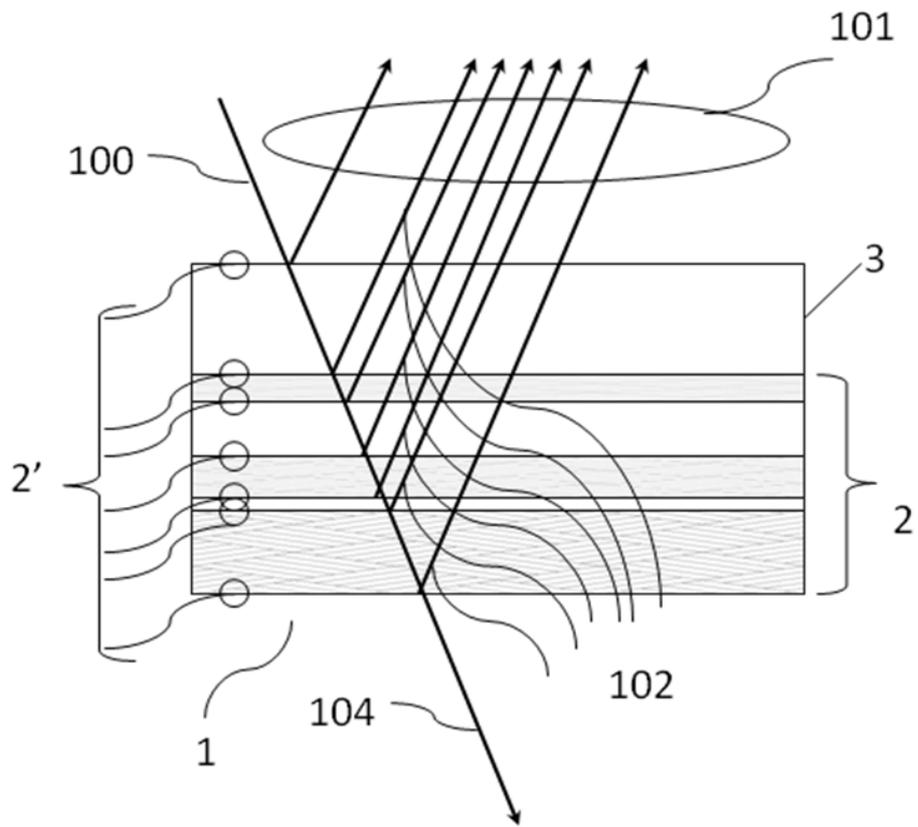


FIG. 3

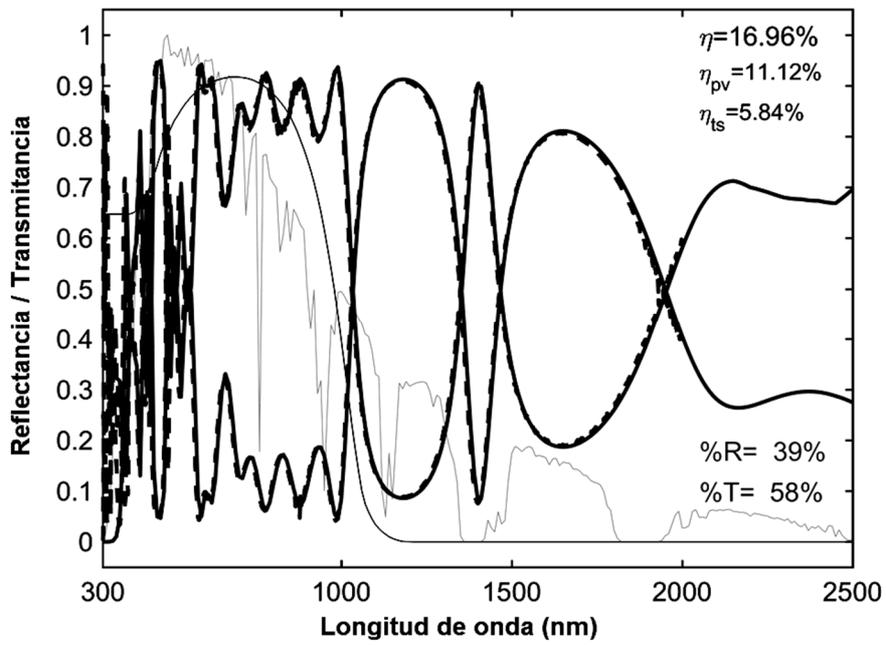
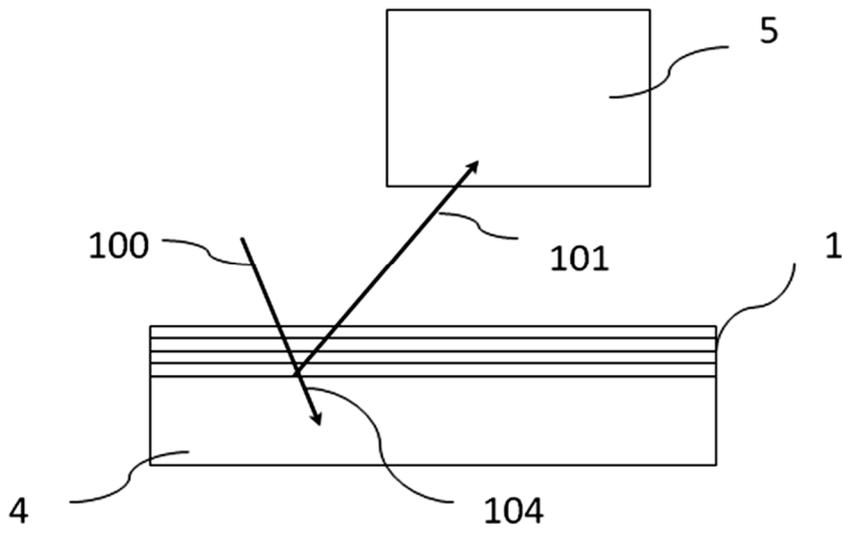


FIG. 4



**FIG. 5**



21 N.º solicitud: 201830001

22 Fecha de presentación de la solicitud: 03.01.2018

32 Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

51 Int. Cl.: **H01L27/14** (2006.01)  
**G02B5/20** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	56 Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A X	CHUNHUI SHOU; ZHONGYANG LUO; TAO WANG; WEIDONG SHEN; GARY ROSENGARTEN; WEI WEI; CHENG WANG; MINGJIANG NI; KEFA CEN. Investigation of a broadband TiO/SiOptical thin-film filter for hybrid solar power systems . APPLIED ENERGY, 17/09/2011, Vol. 92, Páginas 298 - 306 , ISSN 0306-2619 , <DOI: doi:10.1016/j.apenergy.2011.09.028>. &#160;	1-5 6-15
A X	SHOU CHUN-HUI; LUO ZHONG-YANG; WANG TAO; SHEN WEI-DONG; GARY R; WANG CHENG; NI MING-JIANG; CEN KE-FA . A Dielectric Multilayer Filter for Combining Photovoltaics with a Stirling Engine for Improvement of the Efficiency of Solar Electricity Generation . Chinese Physics Letters , 00/12/2011, Vol. 28, Páginas 128402 (4 pp.) , ISSN 0256-307X, <DOI: doi:10.1088/0256-307X/28/12/128402>	1-5 6-15
A X	ES 2636800 A1 (GHENOVA INGENIERIA S L U) 09/10/2017, <p>Página 13, línea 4- página 14, línea 5</p>	1-5 6-15
A X	BABIKER SAMAH G; SHUAI YONG; SID-AHMED MOHAMED OSMAN; XIE MING . Design of a one - Dimensional Si/SiO2 photonic crystals filter for thermophotovoltaic applications . INMIC, IEEE, 19/12/2013, Páginas 177 - 181 , <DOI: doi:10.1109/INMIC.2013.6731346>	1-5 6-15
A X	IMENES A G; BUIE D; MCKENZIE D . The design of broadband, wide-angle interference filters for solar concentrating systems . SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS, AMSTERDAM, NL , 06/07/2006, Vol. 90, Páginas 1579 - 1606 , ISSN 0927-0248 , <DOI: doi:10.1016/j.solmat.2005.08.007>	1-5 6-15
A X	SIBIN K P; SELVAKUMAR N; KUMAR A; DEY ARJUN; SRIDHARA N; SHASHIKALA H D; SHARMA ANAND KUMAR; BARSHILIA HARISH C . Design and development of ITO/Ag/ITO spectral beam splitter coating for photovoltaic-thermoelectric hybrid systems . SOLAR ENERGY, PERGAMON PRESS. OXFORD, GB , 22/11/2016, Vol. 141, Páginas 118 - 126 , ISSN 0038-092X , <DOI: doi:10.1016/j.solener.2016.11.027>	1-5 6-15

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
20.07.2018

Examinador  
L. J. García Aparicio

Página  
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

H01L, G02B

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC