

(12)

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



⁽¹⁾Número de publicación: **2 738 912**

(21) Número de solicitud: 201830758

(51) Int. Cl.:

G01J 3/28	(20
G01N 21/17	(20
H02S 50/00	(20

006.01) 006.01) 014 01)

PATENTE DE INVENCIÓN CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:	73 Titular/es:
25.07.2018	FUNDACIÓN CENER-CIEMAT (100.0%)
43 Fecha de publicación de la solicitud:	31621 Sarriguren (Navarra) ES
27.01.2020	1/2 Inventor/es:
Fecha de modificación de las reivindicaciones: 13.10.2020	FERNÁNDEZ PERUCHENA, Carlos; BERNARDOS GARCÍA, Ana; SÁNCHEZ GONZÁLEZ, Marcelino; HERAS VILA, Carlos;
Fecha de concesión:	SALINA ÁRIZ, Iñigo y ALONSO ESTEBAN, Rafael
23.10.2020	74 Agente/Representante:
(45) Fecha de publicación de la concesión:	ARIZTI ACHA, Monica
30.10.2020	

(54) Título: SISTEMA DE MEDIDA EN TIEMPO REAL DE LA ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA DE UNA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE AL MENOS UNA FUENTE Y METODO DE MEDIDA

(57) Resumen:

La presente invención se refiere a un sistema de medida en tiempo real de la atenuación atmosférica de la radiación electromagnética de una fuente (40), que comprende al menos dos dispositivos ópticos telescópicos de captura de la radiación (10, 20) situados a diferentes distancias de dicha fuente, un dispositivo de detección y medida en tiempo real conectado ópticamente a cada uno de los dispositivos ópticos telescópicos para proporcionar medidas monocromáticas, espectrales y totales simultáneas de la radiación en el rango espectral solar.

La invención también se refiere a un método de medida que proporciona la medida de la atenuación en todo el rango espectral para la mejor evaluación del rendimiento de sistemas energéticos y para conseguir una medida diferenciada de los fenómenos meteorológicos que causan dicha atenuación. proporcionando así información relevante para la predicción meteorológica en este campo específico.



Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015. Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

DESCRIPCIÓN

SISTEMA DE MEDIDA EN TIEMPO REAL DE LA ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA DE UNA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE AL MENOS UNA FUENTE Y METODO DE MEDIDA

OBJETO DE LA INVENCIÓN 5

La presente invención, sistema de medida en tiempo real de la atenuación atmosférica de la radiación electromagnética de los rayos solares a nivel terrestre de al menos una fuente, se refiere a un sistema de medida de la atenuación monocromática para cada longitud de onda del espectro, de la atenuación espectral en el rango espectral de medida, y de la atenuación total. La invención también se refiere a un método de medida.

La invención proporciona una medida de la atenuación en todo el rango espectral para la mejor evaluación del rendimiento de sistemas energéticos y para conseguir una medida diferenciada de los fenómenos meteorológicos que causan dicha atenuación, proporcionando así información relevante para la predicción meteorológica en este campo

15 específico.

10

La invención se enmarca en el sector de generación de energía mediante la captura de la energía solar.

DESCRIPCION DEL ESTADO DE LA TECNICA

20 El rendimiento de las centrales solares de receptor central se ve influenciado por el rendimiento óptico del conjunto de elementos colectores, siendo la atenuación atmosférica de los rayos reflejados por dichos colectores hasta el elemento receptor, uno de los componentes que mayor influencia tienen en el rendimiento de la central en días de baja visibilidad, donde el contenido de aerosoles y gases presentes en la atmosfera a nivel 25 terrestre es mayor.

La atenuación atmosférica de los rayos solares reflejados por los elementos colectores en su camino hacia el elemento receptor está originada por los fenómenos de dispersión (o difusión) y de absorción de las ondas electromagnéticas cuando atraviesan la atmosfera a nivel terrestre. Tanto la dispersión, cambio de dirección de la onda, como el fenómeno de absorción de la energía, esta originado por la interacción con las partículas y aerosoles suspendidas en la atmosfera, así como gases disueltos en la misma. Esta atenuación es función del tipo y número de moléculas presentes en el camino de los rayos

solares.

30

El principal elemento atenuador en la trayectoria de dichos rayos son los aerosoles, 35 pequeñas partículas (sólidas o líquidas) en suspensión. Son difíciles de modelar y predecir,

y provienen de una gran variedad de fuentes (como polvo en suspensión, tormentas de arena, contaminación urbana e industrial, brumas marinas, etc.). El fenómeno atenuante dominante en el caso de los aerosoles es la dispersión, presentando una fuerte dependencia espectral en función de su distribución de tamaños (*Shaw, G. E., Reagan, J. A., & Herman,*

- 5 *B. M.* (1973). Investigations of atmospheric extinction using direct solar radiation measurements made with a multiple wavelength radiometer. Journal of Applied Meteorology, 12(2), 374-380.). Por otra parte, los gases atmosféricos presentes en la trayectoria de dichos rayos producen tanto dispersión como absorción (vapor de agua, ozono, NO₂ y otros gases), siendo en este caso el fenómeno atenuante de mayor peso la absorción. Asimismo, existen
- 10 bandas espectrales asociadas a los distintos gases atmosféricos donde la absorción es más significativa.

Cabe destacar, por tanto, que la masa de aire atmosférico, incluyendo sus partículas en suspensión, presente entre el recorrido de los rayos solares reflejados por los elementos colectores en su camino hacia el elemento receptor constituye un filtro espectral que puede

- 15 variar a lo largo del día, en función de la variación de aerosoles, composición química del aire e incluso parámetros meteorológicos (*Rahoma, U. A., & Hassan, A. H. (2012*). Determination of atmospheric turbidity and its correlation with climatologically parameters. *Am. J. Environ. Sci, 8, 597-604*; y Wen, C. C., & Yeh, H. H. (2010). Comparative influences of airborne pollutants and meteorological parameters on atmospheric visibility and turbidity.
- 20 Atmospheric Research, 96(4), 496-509). Asimismo, la atmósfera terrestre también constituye un filtro espectral variable de la radiación solar procedente del sol, que depende tanto de su composición (aerosoles y vapor de agua principalmente) como de la longitud recorrida a través de ella (que depende tanto de la época del año como de la hora del día), lo que provoca que el espectro de radiación solar que llega al suelo sea variable a lo largo del año,
- e incluso a lo largo del día (Iqbal, M. (2012). An introduction to solar radiation. Elsevier).

Es, por lo tanto, necesario un análisis espectral del fenómeno de atenuación de la radiación solar a nivel terrestre para su adecuada caracterización y modelado en función de los componentes atmosféricos (incluyendo aerosoles) a nivel terrestre. Es decir, una medida simultánea de la atenuación atmosférica espectral de los rayos reflejados así como de otras

30 variables meteorológicas nos permitirá modelar dicha atenuación en función de variables comunes en meteorología. Asimismo, dicho modelado permite estimar la atenuación para diferentes ubicaciones en base a los históricos de dichos valores meteorológicos y hacer una mejor selección de la ubicación de centrales solares.

Es importante destacar que los todos los fenómenos causantes de la atenuación 35 atmosférica producen variaciones diferenciadas de la radiación solar a lo largo de su rango

espectral, variando la forma de manera específica y singular, lo que finalmente incide en la variación de su intensidad integrada. Así por ejemplo el vapor de agua tiene unas bandas específicas de absorción en la región de Infrarrojo (940, 1100, 1380 y 1870 nm, entre otras), mientras que la dispersión producida por partículas tiene una mayor incidencia en la zona

5 ultravioleta y visible del espectro. La figura 1 muestra el espectro de la radiación solar extraterrestre (curva superior, línea continua) junto a dos espectros de radiación directa normal a nivel terrestre, tanto a baja (curva intermedia, línea continua) como a alta (curva inferior, línea de puntos) concentración de vapor de agua atmosférico. En la Figura 1 se muestra a su vez una gráfica con la transmitancia espectral del vapor de agua.

10 Por lo tanto, la medida de la atenuación atmosférica diferenciada a cada longitud de onda permite distinguir los diferentes fenómenos físicos causantes de la misma, así como cuantificar cada uno de ellos, lo que en definitiva tiene una incidencia muy importante por una parte en la medida precisa de la atenuación atmosférica total, sino también su predicción a partir de la información disponible de los diferentes fenómenos atmosféricos y 15 meteorológicos.

En la actualidad no son conocidos sistemas para la medida espectral de la atenuación atmosférica monocromática a nivel terrestre, lo que limita la precisión final alcanzable en la medida y/o estimación de la atenuación atmosférica total, así como su cuantificación a partir de otras variables meteorológicas.

20

En el estado de la técnica existen propuestas experimentales para la medida de la atenuación total, es decir, sin tener en cuenta la frecuencia dentro del espectro. Una de estas propuestas está basada en la utilización de un heliostato, colector utilizado en las plantas de tecnología central, y varios pirheliómetros alineados con el objetivo de medir la radiación directa proveniente del sol y reflejada por el heliostato a diferentes posiciones

25 (Goebel O. Luque F., Alobaidli Salbidoigeta I. 2011. Beam atenuation test for central power plants in high density aaerosols atmosphere . setup methodology. Solarpaces Granada Spain; y Tahboub Z. Al Alobaidli A. Luque F, Salbidoigeta I., Farges O., Hassar X., Oumbe A., Geuder N., Goebel O., 2012. Solar beam attenuation experimets in Abu Dhabi, Solar Marrakech , Morocco)

30 Mediante este sistema basado en la diferencia de la radiación medida en los diferentes pirheliómetros se difiere la medida de la atenuación solar terrestre total, pero no espectral. Además, esta experiencia ha demostrado tener grandes incertidumbres debido fundamentalmente a la precisión de los pirheliómetros así como incertidumbre en la geometría del heliostato y en el trazado de rayos utilizado.

Existen igualmente otras propuestas basadas en el empleo de cámaras digitales (*Ballestrin J., Monterreal R., Carra M. Fernández-Reche J., Barbero J., Marzo A., 2016. Measurement on solar extinction in tower plants with digital cameras. AIP Conference Proceedings 1734, 13002*), en concreto en la toma simultanea de fotografías con cámaras digitales de una pantalla a diferentes distancias. Del mismo modo, dicha medida no es espectral, y además no dispone de los sistemas de captación selectiva de la radiación propuestos en la presente invención lo que provoca que la precisión de dicho sistema esté limitada. Específicamente, en este artículo se cuantifica y limita la capacidad de medida del equipo a una zona donde aproximadamente se da únicamente el 73% de la extinción.

10

5

Por lo tanto, en las soluciones del estado de la técnica se identifican los siguientes problemas:

- A distancias mayores de aproximadamente 800 metros es posible que la luz capturada no proceda exclusivamente de la fuente útil, fuente cuya luz se quiere medir, por ello se propone el uso de un sistema telescópico
- Existe aberración cromática en las medidas de aquellos sistemas que utilicen lentes, y por lo tanto no se puede asegurar que todas las longitudes de onda forman imagen en el mismo plano de imagen,

- La medida no tiene en cuenta la diferencia existente entre la luz reflejada por la fuente útil y la luz difusa que es reflejada por la atmósfera que se encuentra entre dicha fuente y el sistema de medida,

- La medida no incluye todo el rango espectral del sol, preferiblemente entre 300 nm y 1650 nm, es decir, el rango visible y el rango infrarrojo cercano, de manera que se dan errores significativos al tener que asumir la forma espectral de la atenuación atmosférica del rango infrarrojo (no medido por los sistemas conocidos) a partir de la atenuación atmosférica en el rango visible.
- Existen errores en la medida derivados de que la respuesta de los sensores de medida son dependientes de la longitud de onda, y por lo tanto otorgan diferente peso a las distintas componentes espectrales de la luz, y
- Ninguno de los sistemas del estado de la técnica realiza un estudio y diagnóstico de la causa de la atenuación atmosférica.
- Ninguno de los sistemas del estado de la técnica realiza medidas de la atenuación atmosférica monocromática, atenuación espectral y atenuación total de manera diferenciada.

25

30

A la vista de lo anterior la presente invención propone un sistema y método de medida de la atenuación espectral atmosférica que permiten obtener una mayor precisión en la medida de dicha atenuación.

5 **DESCRIPCION DE LA INVENCIÓN**

La presente invención, sistema de medida en tiempo real de la atenuación atmosférica de una radiación electromagnética de al menos una fuente, tiene como primer objeto un sistema según la reivindicación 1. Dicho sistema sirve para caracterizar en tiempo real las causas de la atenuación atmosférica de la radiación electromagnética en el espectro solar mediante la medida espectral de la radiación solar a nivel terrestre. En concreto, se

refiere a un sistema de medida de:

- la atenuación monocromática para cada longitud de onda del espectro entendiendo como tal la atenuación a una longitud de onda del espectro con la anchura espectral que proporciona el equipo de medida,
- 15 la atenuación espectral en el rango espectral de medida, entendiendo como tal el conjunto de atenuaciones monocromáticas en todas las longitudes de onda a lo largo del rango espectral de medida, y

 la atenuación total, entendiendo como tal la atenuación que se calcula mediante la integración de la atenuación espectral en el rango espectral de medida ponderada con el espectro solar.

El sistema está basado en la disposición separada de al menos dos dispositivos captadores de la luz, asociados a dispositivos de medida, y alineados con una fuente de luz o fuente útil, para inferir la atenuación de la energía solar en la distancia que separa dichos dispositivos captadores de la luz por medio de diferencia en tiempo real de la energía espectral que incide en ellos.

En concreto, el sistema objeto de la invención para la medida en tiempo real de la atenuación atmosférica de una radiación electromagnética de al menos una fuente, preferiblemente una pantalla de reflectancia hemisférica para reflejar la radiación solar incidente, y que presenta al menos los siguientes elementos:

Al menos dos dispositivos ópticos telescópicos de captura de un haz de la radiación de únicamente dicha fuente útil y situados a diferentes distancias de dicha fuente, que aseguran que únicamente se captura la radiación proveniente de la fuente de luz

- Al menos un dispositivo de detección y medida en tiempo real, preferiblemente un espectrofotómetro de array de fotodiodos, conectado ópticamente,

35

10

20

25

preferiblemente mediante fibra óptica, a cada uno de los dispositivos ópticos telescópicos para proporcionar medidas espectrales monocromáticas simultáneas de la radiación al menos en el rango espectral solar comprendido entre 300 nm y 1650 nm, incluyendo los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo.

- Al menos un procesador para realizar las medidas a partir de las señales detectadas por los dispositivos de detección y medida y asociado a estos dispositivos,
 - Al menos un procesador general para comunicación entre los dispositivos de detección y medida con base en los datos de cada procesador de cada dispositivo de detección y medida para, a partir de la información registrada y comparando dicha información en tiempo real, calcular los valores de atenuación monocromática, de atenuación espectral y de atenuación global
 - Al menos un sistema de alineación del dispositivo telescópico con la fuente, preferiblemente mediante la visualización mediante una cámara digital (preferiblemente CCD) de la imagen capturada.

Cuando el haz es capturado por el dispositivo óptico telescópico el mismo es dividido en tantos haces como dispositivos de detección y medida asociados a cada dispositivo óptico existan, de manera que los haces divididos son guiados y focalizados a dichos dispositivos de medida abarcando cada dispositivo de medida una región diferente del rango 20 espectral a medir. La conexión entre el dispositivo óptico y el/los dispositivos de medida se realiza preferiblemente mediante fibra óptica. Esta división se puede hacer bien mediante divisores ópticos de haz o mediante multifibras, entendiendo como multifibras un cable de dos o más fibras ópticas en el que en el extremo de entrada de luz todas las fibras están juntas de forma que cada fibra recoge una parte del haz de luz y en el otro extremo cada 25 fibra está separada y permite llevar su parte de luz guiada a puntos diferentes. Asimismo, los dispositivos de medida pueden ser espectrómetros de array de fotodiodos o equipos

monocromadores.
Un segundo objeto de la invención es un procedimiento para medida en tiempo real de la atenuación atmosférica de una radiación electromagnética de una fuente con un
30 sistema como el descrito anteriormente. En particular, el procedimiento de medida comprende las siguientes etapas:

- a) Alinear al menos dos dispositivos ópticos telescópicos, situados a diferentes distancias de la fuente, hacia la fuente de radiación electromagnética,
- b) Captar un haz de radiación electromagnética reflejado en la fuente por medio de cada uno de los dispositivos ópticos telescópicos,

10

5

15

35

 c) Detectar y realizar medidas monocromáticas en las distintas regiones espectrales cubiertas por los dispositivos de detección y realizar medida de la radiación capturada, y

5

 d) Calcular en tiempo real la atenuación atmosférica monocromática, la atenuación espectral y la atenuación total mediante comparación de las medidas espectrales monocromáticas.

El método contempla la opción de que previamente a la alineación hacia la fuente útil de radiación electromagnética de los dispositivos, estos se alineen con una diana negra o pantalla absorbedora para medir el fondo de luz y posteriormente considerar el descuento del fondo de luz en la medida de la atenuación, de manera que toda la luz que hay dispersa en la trayectoria que va desde la pantalla al dispositivo óptico y que no procede del haz que viaja desde la pantalla hasta dicho dispositivo (que es el que se quiere medir) no influya en la medida final.

15 Por otro lado, el procedimiento permite que tras el cálculo de la atenuación atmosférica se apliquen técnicas espectroscópicas y un análisis espectral, para identificar y discernir los fenómenos causantes de la atenuación atmosférica previamente calculada.

Asimismo, para realizar el calibrado del sistema de medida, previamente a la alineación de los dispositivos ópticos telescópicos es conveniente realizar un proceso de 20 calibración de los dispositivos de detección y medida situando los dispositivos ópticos telescópicos a la misma distancia de la fuente de radiación electromagnética.

A partir del sistema y método objeto de la presente invención se consigue aumentar la precisión de las medidas de la atenuación respecto a los sistemas del estado de la técnica.

La invención permite captar la luz procedente de la fuente útil, con un ángulo de aceptancia (máximo ángulo en el cual el rayo de luz incidente es capturado y medido por el dispositivo de medida) del orden de 1 a 3 mrad para asegurar que a una distancia de 1 km únicamente se capture luz procedente de dicha fuente del sistema. Esto es así debido a que el dispositivo óptico telescópico comprende un sistema óptico que hace de objetivo con una

- 30 focal grande y un diafragma de entrada muy pequeño, de forma que el ángulo de aceptancia del sistema óptico, definido como el cociente entre el diafragma de entrada y la focal del objetivo, es muy pequeño, del orden de 1 mrad. De esta manera, un dispositivo óptico telescópico dispuesto a una distancia de 1 km de la fuente útil solo captura la luz reflejada por un objeto de un tamaño de 1 metro [1mradx1km=1m]. Si no se limita el ángulo de
- 35 aceptancia, el sistema capturaría luz que procede de fuera de la fuente útil del sistema, lo

que puede dar lugar a errores de medida. En el caso de los sistemas del estado de la técnica que usan cámaras como sensores, estos limitan el ángulo de aceptancia con los pixeles de la cámara que utilizan para calcular la potencia de luz. Esto da lugar a problemas si hay aberración cromática, puesto que cada longitud de onda puede ir a pixeles diferentes

5 de la cámara digital.

10

El sistema objeto de la invención está preferiblemente basado en reflectores como elementos ópticos de formación de imagen para asegurar que no existe aberración cromática y por tanto asegurar que todas las longitudes de onda forman imagen en el mismo plano imagen. Al emplear reflectores, o espejos, como elementos ópticos, no se da el problema de aberración cromática. La aberración cromática puede dar lugar a errores en el caso del uso de cámaras digitales como sensores, ya que cada longitud de onda puede formar imagen en pixeles diferentes de la cámara, por lo que habrá pixeles en los que se

- detecte luz procedente de la fuente de luz útil o diana y luz procedente de fuera de la fuente de luz útil. 15 La invención contempla la posibilidad de emplear preferentemente dos dianas como
- fuente de luz, una diana altamente reflectora o blanca utilizada como fuente de luz útil para la medida de la atenuación atmosférica y una diana de reflexión nula o negra, como se ha mencionado anteriormente, utilizada como medida de fondo de luz en el sistema de medida de atenuación atmosférica. En los sistemas de medida del estado de la técnica basados en
- 20 cámaras digitales se usa solo una fuente de luz útil que es una diana que refleja de la luz del sol. Esto puede tener un problema ya que al sistema de medida no llega únicamente la luz procedente de la diana, sino también parte de la luz difusa que refleja la atmósfera que se encuentra en el camino directo desde la cámara hasta la diana, y que forma un fondo de luz que es variable con las condiciones de la atmósfera y que se suma a la luz procedente de la
- 25 diana. En el sistema de medida objeto de la presente invención sucede lo mismo, es decir, se detecta la luz de la diana y parte de la luz difusa que haya en el camino directo desde la diana hasta el sistema de medida, y por esta razón, para eliminar el fondo de luz difusa, el sistema propone utilizar una diana oscura que no refleje nada de luz del sol. Así, cuando el sistema de medida se dirige a la diana oscura, solo se mide la luz difusa, que es el fondo
- 30 que se descuenta en la medida. En la realización preferible del sistema, se dispondría una diana blanca como fuente y al lado de esta, preferiblemente debajo, una diana negra. De esta manera, para realizar la medida, habría que orientar en primer lugar el dispositivo óptico telescópico a la diana negra para medir el fondo de luz difusa, y posteriormente orientar el dispositivo óptico telescópico a la diana blanca para medir la fuente de luz útil
- descontando la medida de la diana negra. 35

Como se ha mencionado, la realización de la medida de la atenuación en todo el rango espectral del sol, esto es, en el rango visible e infrarrojo cercano, evita errores significativos que si se dan en el estado de la técnica puesto que no hay que asumir la forma espectral de la atenuación atmosférica del infrarrojo a partir de la atenuación atmosférica en

- 5 el visible. El hecho de medir la potencia exclusivamente en el espectro visible, debido a la utilización de exclusivamente sensores de silicio o cámaras digitales cuyos elementos sensores son de Silicio, limitan la detección de un rango espectral de hasta los 1050nm. Sin embargo, una parte importante de la radiación solar se tiene en el espectro infrarrojo, es decir, hasta los 1600nm aproximadamente, y la atenuación atmosférica no tiene el mismo
- 10 peso en el visible que en el infrarrojo. Mediante la medida en todo el espectro solar se evitan los errores significativos en la medida que se dan en los sistemas del estado de la técnica. Así, la presente invención propone la utilización de sensores de silicio para la medida del espectro desde 300 nm hasta 1050nm y sensores de arseniuro de indio y galio (InGaAs) para la medida del espectro desde 900nm hasta 2600nm para así cubrir todo el espectro
- 15 solar para conseguir una medida más precisa. No obstante, para la realización preferente de esta invención, se propone la medida del espectro hasta 1650nm por motivos técnicoeconómicos.

Asimismo, el sistema objeto de la presente invención realiza una medida del espectro óptico de la luz detectada, a diferencia de los sistemas conocidos que realizan una medida

- 20 integrada de la potencia del espectro de la luz medida, evitando así errores en la medida. Estos errores son debidos a que los sensores de Silicio y de InGaAs tienen una respuesta fuertemente dependiente de la longitud de onda. Por ejemplo, en el silicio la respuesta en 600nm es la mitad que en 800nm, por lo que si no se hace una medida de espectro óptico, no se puede descontar esta dependencia. Todos los sistemas del estado de la técnica
- 25 hacen una medida con un sensor o una cámara digital, y por lo tanto es una medida que integra todo el espectro de la luz medida, ya sea de un LED o lámpara o del sol, en la que se multiplica el espectro de la fuente con la respuesta del detector. Por lo tanto, no se puede descontar la respuesta del detector. Si la atenuación atmosférica varía en las diferentes longitudes de onda, como sucede realmente, en los sistemas del estado de la técnica se
- 30 puede tener un error en la medida de la atenuación atmosférica ya que una variación por ejemplo en 800nm tendrá un peso en la medida que será el doble que una variación en 600nm. Para poder evitar esto, es necesario tener una medida del espectro, que es lo que hace el sistema de la presente invención, de manera que permite descontar la respuesta del Silicio y del InGaAs para cada longitud de onda, obteniendo una medida de la atenuación
- 35 atmosférica más precisa.

Debido a lo anterior, es decir, al hecho de que se realice una medida del espectro óptico de la luz medida se posibilita la realización de un estudio y diagnóstico de la causa de la atenuación atmosférica al tener la medida de la atenuación espectral de la atmósfera ya que es la única forma de poder identificar las causas de la atenuación. Además, por ello, el sistema objeto de la invención es el único que podrá establecer correlaciones entre las condiciones atmosféricas que se puedan medir con otros dispositivos de medida tipo humedad, partículas, polución, etc... y la atenuación atmosférica.

10

15

5

DESCRIPCION DE LAS FIGURAS

Se acompañan a la presente descripción las siguientes figuras que muestran un ejemplo preferente de realización de la invención con carácter ilustrativo y no limitativo:

La figura 1 muestra un espectro de radiación solar extraterrestre (curva superior) junto a espectros a nivel terrestre para distintas concentraciones de vapor de agua atmosférico. Asimismo se muestra también, en el extremo superior derecho, la transmitancia del vapor de agua.

La figura 2 muestra un esquema preferido de realización del sistema de medida de atenuación de la radiación solar objeto de la invención.

La figura 3 muestra un segundo esquema preferido de realización del sistema de medida de atenuación de la radiación solar objeto de la invención en el que se incluye una 20 pantalla absorbedora.

La figura 4 muestra un esquema preferido de un dispositivo óptico telescópico para la captación de un haz de luz.

La figura 5 muestra un esquema preferido del dispositivo de detección y medida dotado de divisores.

25

La figura 6 muestra un esquema preferido del dispositivo de detección y medida dotado de multifibra.

La figura 7 muestra las medidas espectroscópicas realizadas por el dispositivo de referencia y el dispositivo de medida para el cálculo de la atenuación espectral (Intensidad en unidades arbitrarias, u.a., respecto a la longitud de onda).

30

La figura 8 muestra la variación entre las dos medidas anteriores que da como resultado la atenuación espectral existente (Variación en % respecto a la longitud de onda).

FORMA PREFERENTE DE REALIZACION

Como ya se ha mencionado, la presente invención se refiere a un sistema y método 35 de medida de la atenuación atmosférica de la radiación electromagnética, de manera

diferenciada y precisa en cada longitud de onda, es decir, de manera espectral, permitiendo la caracterización de los fenómenos causantes de la misma, en el espacio comprendido entre distintos puntos.

- El sistema propuesto (figuras 2 y 3) se compone preferentemente de una fuente útil de emisión 40, de radiación electromagnética y al menos dos dispositivos 10, 20 para la captura de la radiación emitida por dicha fuente situados separados entre sí y a diferentes distancias de la citada fuente 40. La fuente útil de emisión de radiación electromagnética puede ser tanto artificial como natural (el sol tanto como fuente directa como reflejada). Los dispositivos ópticos 10, 20 de captura de radiación electromagnética han de ser telescópicos
- 10 y deben asegurar una captura de radiación electromagnética únicamente procedente de la citada fuente 40, lo cual se consigue adaptando el ángulo de aceptancia (máximo ángulo en el cual el rayo de luz incidente es atrapado) a las consideraciones geométricas del sistema (tamaño de la fuente, y distancia entre la fuente 40 y los dispositivos detectores 10, 20). Preferiblemente la fuente útil será una pantalla 40 que refleja el haz de luz solar directo
- 15 desde el sol 60 o un haz de luz previamente reflejado por al menos un heliostato 50. Por ejemplo, el ángulo de aceptancia (α) es de 1 mrad, siendo el ángulo de aceptancia (α) como ya se ha definido anteriormente, el mayor ángulo con el que inciden los rayos desde un objeto o fuente sobre el sistema de detección y que son detectados por dicho sistema de detección.
- Los dispositivos ópticos telescópicos de referencia 10 y de medida 20, dispuesto cada uno a una distancia D diferente de la fuente 40, preferiblemente presentan un objetivo telescópico 11, seguido de un diafragma de campo 12 que determinan la distancia focal 1 del dispositivo 10, 20, seguidos de un ocular 13 para ampliar la señal (figura 4). Tras el ocular 13 se puede emplear bien un divisor de haz 15 (figura 5) bien multifibras 25 (figura 6), para dividir y dirigir la señal captada hacia cada dispositivo de detección y medida 23, 24.

Cabe destacar el uso de telescopios reflectores (que hace uso de espejos en lugar de lentes para enfocar la luz y formar imágenes), los cuales evitan que el ángulo de aceptancia (α) cambie con la longitud de onda. Los dispositivos ópticos telescópicos 10, 20 podrían emplear un telescopio del tipo refractor.

- 30 La radiación electromagnética procedente de la fuente 40 capturada por los dispositivos ópticos telescópicos 10, 20 será conducida a al menos un dispositivo de detección y medida 23, 24 en tiempo real, asociado a cada dispositivo óptico telescópico 10, 20 (figuras 2 a 6), que proporcionará medidas simultáneas de su espectro en tiempo real y en un rango espectral que sea suficientemente amplio para la aplicación considerada,
- 35 preferiblemente entre 300 nm y 1650 nm (ver figura 7). La comparación de las curvas

espectrales obtenidas a partir de las medidas de cada dispositivo de detección y medida 23, 24 proporcionará como resultado la atenuación atmosférica espectral relativa de la radiación electromagnética considerada (ver figura 8). La realización de una calibración previa entre ambos dispositivo ópticos 10, 20 permite obtener la medida absoluta de atenuación espectral.

5

25

Según una realización preferente (figura 2), y como se ha comentado, como fuente de emisión de radiación electromagnética se propone la propia luz del sol 60 reflejada de forma hemisférica por una pantalla 40 blanca difusora de luz situada a la altura máxima a la que se va a realizar la medida de la atenuación junto a un dispositivo óptico telescópico de

- 10 luz 10 cercano a la fuente y que actúa como medida de referencia de la señal luminosa situado a nivel del suelo y a un dispositivo óptico telescópico 20 situado más lejos de la fuente y que actúa como medida de la señal luminosa atenuada por la atmósfera también situado a nivel del suelo. Adicionalmente, se puede incrementar la energía que refleja dicha pantalla 40 haciendo incidir sobre ella energía solar reflejada por uno o más heliostatos 50.
- 15 Según dicha realización preferente, la pantalla 40 se sitúa en la altura del receptor de una planta solar de concentración de receptor central (o de torre 30), y los dispositivos ópticos telescópicos 10, 20 asociados a sus dispositivos de detección y medida 23, 24 de la señal luminosa atenuada se sitúan a dos distancias respecto al receptor central dentro del campo solar, por ejemplo a 300 metros (dispositivo de referencia 10) y a 1600 metros (dispositivo
- 20 de medida 20) de la fuente 40. Estas distancias pueden variar en función del tamaño del campo solar o de otros condicionantes.

El hecho de utilizar el sol 60 como fuente de luz simplifica el sistema óptico y asegura un rango, y distribución espectral, adecuado para un modelado del fenómeno de atenuación en el propio emplazamiento (o cualquier otro emplazamiento), tanto a efectos de predicción, como de estimación de recurso en ausencia de datos registrados.

Cabe destacar que la pantalla 40, preferiblemente circular o rectangular, aunque otras formas geométricas son posibles, debe poseer una reflectancia hemisférica para evitar la presencia de direcciones privilegiadas en la reflexión y disponer de ese modo de una fuente uniforme espacialmente. Asimismo, esta pantalla 40 ha de tener un tamaño suficientemente grande para asegurar que el dispositivo óptico telescópico 20 de la señal luminosa atenuada, el más lejano, únicamente capture luz procedente de la pantalla 40 y evitar, de este modo, señales de fondo variables que conllevarían incertidumbres en la medida. El tamaño de la pantalla (T) debe estar relacionado con el ángulo de aceptancia (α) o apertura de entrada del sistema óptico de medida 20 de la señal luminosa y la distancia

35 (*D*) existente entre dicho sistema 20 y la pantalla 40, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$T \ge D * \tan(\alpha)$

Concretamente, para una distancia de 1600 m y una apertura de 1 mrad, el tamaño de la fuente tiene que ser mayor que un círculo de un diámetro de aproximadamente 1,6 metros. El valor de la apertura de entrada del sistema óptico de medida de la señal luminosa lo determina la distancia focal del objetivo 11 y el diafragma de campo 12. La realización preferente propone que, una vez capturada la señal luminosa por el dispositivo óptico

- 5 preferente propone que, una vez capturada la señal luminosa por el dispositivo óptico referencia 10 y por el dispositivo óptico de medida 20 de la señal luminosa atenuada, se transmitan por medios ópticos, preferiblemente fibra óptica 21, 22 hasta un equipo espectrómetro de array de fotodiodos 23, 24 para la medida de su espectro en tiempo real de forma simultánea por ambos dispositivos telescópicos10, 20.
- 10 Para cubrir un rango espectral suficiente en el caso de la luz solar, dicha realización preferente propone el uso como dispositivos de detección y medida 23, 24 de dos equipos espectrómetros de array de fotodiodos: uno, preferiblemente un array de detectores de silicio 23, en el rango de 300 nm a 1050 nm, y el otro, preferiblemente un array de detectores de lnGaAs 24, en el rango de 900 nm a 1650 nm. Para posibilitar la medida en 15 tiempo real de ambos rangos espectrales, el haz capturado por cada dispositivo óptico telescópico 10, 20 debe dividirse, preferiblemente con un divisor de haz 15, aunque también
- es posible mediante multifibras 25, y ser focalizado sobre los medios ópticos 23, 24, preferiblemente la fibra óptica 21, 22, 25, mediante lentes de focalización 16, 18.
- Además, se hace necesario un sistema que permita la alineación de los sistemas 20 telescópicos con la pantalla, incluyendo dicho sistema tanto componentes ópticos como mecánicos. Esta alineación requiere una división 14 del haz, anterior a la descrita, para poder visualizar la imagen capturada en una cámara digital 17 (preferiblemente CCD). En una realización preferente, se propone que los sistemas telescópicos 10, 20 se alineen hacia la pantalla de forma manual.
- Los esquemas descritos, tanto el dispositivo óptico telescópico 10, 20 como el dispositivo de detección y medida 23, 24, forman en su conjunto los sistemas de referencia y de medida de la señal luminosa atenuada. Cada uno de dichos dispositivos proporciona una medida de la curva espectral de la luz solar reflejada por la pantalla en el rango de 300 nm a 1650 nm, con una resolución en anchura espectral de por ejemplo 0,5 nm.
- 30

Como se ha mencionado, un posible dispositivo de medida 23, 24 lo constituyen los equipos espectrómetros de array de fotodiodos en los cuales los sensores están agrupados en una matriz, o bien equipos monocromadores, los cuales, a partir del fenómeno de refracción o difracción, separan espacialmente las diferentes longitudes de onda presentes en la señal. De este modo, el sistema proporcionará medidas de la señal luminosa para

cada longitud de onda del rango espectral especificado, esto es, curvas espectrales de la intensidad de la señal luminosa (figura 7).

Mediante la comparación directa de dichas curvas se obtiene la atenuación atmosférica monocromática (figura 8) para cada longitud de onda entre 300 nm y 1650 nm
con la resolución espectral de 0,5 nm de la radiación electromagnética considerada desde la pantalla hasta el sistema de medida. El conjunto de todas las atenuaciones monocromáticas proporcionan los valores de la curva de la atenuación espectral de la radiación electromagnética considerada entre 300 nm y 1650 nm. Los valores de la curva de dicha atenuación espectral, ponderados con el espectro de la radiación electromagnética, proporcionan el valor de la atenuación global en el rango de 300 nm a 1650 nm.

Para obtener una medida absoluta, se debe asegurar la calibración previa entre las medidas obtenidas por los sistemas de referencia y de medida, y se debe considerar la diferencia de recorrido entre los sistemas de referencia y la pantalla.

Cabe destacar que las señales, tanto de referencia como medida, pueden estar 15 contaminadas por la luz dispersada por los componentes atmosféricos presentes entre la pantalla y los sistemas telescópicos (por ejemplo, aerosoles), lo que definiremos como luz de fondo.

Para caracterizar dicha luz de fondo, en otra realización preferida (figura 3), el sistema objeto de la invención contempla que los dispositivos ópticos telescópicos puedan alinearse hacia una pantalla absorbedora 45, es decir, que posea una reflectividad muy baja (lo más próximo posible al 0%), y en particular, mucho más baja que la de la pantalla con reflectancia hemisférica 40 descrita anteriormente (con una reflectividad lo más próxima posible al 100%) y usada para proporcionar radiación reflejada hacia los dispositivos ópticos telescópicos. De este modo, la señal medida por los sistemas telescópicos alineados hacia
25 la pantalla absorbedora 45 puede ser tenida en cuenta para cuantificar y modelar el fenómeno de atenuación.

El método de funcionamiento de los sistemas anteriores presenta las siguientes etapas:

30

 Alineación de al menos dos dispositivos ópticos telescópicos10, 20, situados a diferentes distancias de la fuente 40, hacia la fuente de radiación electromagnética 40,

 Captación de un haz de radiación electromagnética reflejado en la fuente 40 por medio de cada uno de los dispositivos ópticos telescópicos 10, 20,

 Detección y medidas monocromáticas en las distintas regiones espectrales cubiertas por los dispositivos de detección y medida 23, 24 de la radiación capturada (figura 7), y

 Cálculo en tiempo real de la atenuación atmosférica mediante comparación de las medidas espectrales monocromáticas (figura 8).

El método, preferiblemente comprende una etapa previa, anterior a la alineación hacia la fuente de radiación electromagnética de los dispositivos 10, 20, en la que los dispositivo 10, 20 se alinean con una pantalla absorbedora (figura 3) para medir el fondo de luz y posteriormente considerar el descuento del fondo de luz en la medida.

10

5

Asimismo, tras el cálculo de la atenuación atmosférica el procedimiento comprende una etapa de aplicación de técnicas espectroscópicas y análisis espectral para identificar y discernir los fenómenos causantes de la atenuación atmosférica previamente calculada. Preferentemente también, antes de la alineación de los dispositivos ópticos telescópicos 10, 20 se realiza un proceso de calibración de los dispositivos de detección y medida 23, 24

15 situando los dispositivos ópticos telescópicos 10, 20 a la misma distancia de la fuente 40 de radiación electromagnética.

REIVINDICACIONES

- Sistema de medida de alta resolución espectral en tiempo real del espectro de atenuación atmosférica de la radiación electromagnética de al menos una fuente de radiación electromagnética, en el rango espectral solar comprendido entre 300 nm y 2600 nm, caracterizada porque comprende:
 - Al menos dos telescopios de captura de un haz de la radiación de únicamente dicha fuente y que están situados a diferentes distancias de dicha fuente, comprendiendo cada telescopio un diafragma entre el objetivo telescópico y el ocular para limitar el ángulo de aceptancia del telescopio a un valor igual o inferior al ángulo subtendido por la fuente sobre dicho dispositivo y evitar la captura de luz que procede de fuera de la fuente de radiación del sistema,
 - Un sistema de alineación óptica de cada telescopio con la fuente,
- Dos espectrómetros de array de fotodiodos, un array de detectores de silicio y un array de detectores de InGaAs, conectados ópticamente a cada uno de los telescopios para proporcionar medidas del espectro de la radiación que alcanza a cada telescopio, es decir, proporcionar las medidas monocromáticas, espectrales y totales simultáneas de la radiación en el rango espectral solar,
 - Tantos divisores de haz como espectrómetros de array de fotodiodos estén conectados al dispositivo óptico, siendo dichos haces guiados y focalizados a dichos espectrómetros, abarcando cada uno una región diferente del rango espectral a medir, y
 - Un procesador para la comunicación entre los espectrómetros y analizar las citadas medidas a partir de las señales detectadas por los espectrómetros, así como para inferir el espectro de la atenuación de la energía solar en la distancia que separa los telescopios por medio de diferencia en tiempo real de la energía espectral que incide en ellos, y a partir de este espectro de atenuación calcular la atenuación total.
- 2. Sistema, según reivindicación 1, caracterizado porque el haz es dividido mediante divisores ópticos de haz.
- Sistema, según reivindicación 1, caracterizado porque el haz es dividido mediante multifibras.
 - 4. Sistema, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el sistema de alineación comprende una cámara digital para poder visualizar la imagen capturada de la fuente.

5

10

15

25

- Sistema, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la fuente de radiación es una pantalla reflectante que refleja la luz del sol hacia los dispositivos ópticos telescópicos de captura.
- Sistema, según reivindicación 5, caracterizado porque comprende una pantalla absorbedora, situada próxima a la pantalla reflectante, para descontar la luz de fondo en la medida.
 - 7. Sistema, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el dispositivo óptico telescópico es de tipo telescopio reflector.
- 8. Método de medida en tiempo real de la atenuación atmosférica de una radiación
 electromagnética, en el rango espectral solar comprendido entre 300 nm y 2600 nm, de una fuente mediante un sistema de medida según las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque comprende las siguientes etapas:
 - a) Calibrar los dispositivos de detección y medida situando los dispositivos ópticos telescópicos a la misma distancia de la fuente de radiación electromagnética,
- 15

5

- b) Alinear al menos dos telescopios, situados a diferentes distancias de la fuente, hacia la fuente de radiación electromagnética,
 - c) Captar un haz de radiación electromagnética por medio de cada uno de los telescopios,
 - d) Detectar y realizar medidas monocromáticas en las distintas regiones espectrales cubiertas por los dispositivos de detección y medida de la radiación capturada, y
 - e) Calcular en tiempo real la atenuación atmosférica mediante comparación de las medidas espectrales monocromáticas y a partir del mismo calcular el valor de la atenuación total.
- 9. Método, según reivindicación 8, caracterizado porque previamente a la alineación hacia la

25

20

fuente de radiación electromagnética de los dispositivos, estos se alinean con una pantalla absorbedora para medir el fondo de luz y posteriormente considerar el descuento del fondo de luz en la medida.



FIG. 1



FIG. 2



FIG. 3



FIG. 4



FIG. 5



FIG. 6



FIG. 8