

MEDIDA DE ALTA IRRADIANCIA EN RECEPTORES DE PLANTAS DE TORRE**Casanova M.*, Ballestrín J.*, Monterreal R.*, Fernández-Reche J.***

* Unidad de Sistemas Solares de Concentración, Plataforma Solar de Almería, CIEMAT, Tabernas (Almería), España

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2016>

RESUMEN

En este trabajo se expone un nuevo método de medida de alta irradiancia solar en centrales de torre. El método hace uso exclusivamente de un radiómetro y una cámara digital. Antes de realizar los ensayos, se ha efectuado un test de homogeneidad y difusividad a la superficie del receptor. Este test se divide en dos partes, la primera en la que se estudia la homogeneidad de la superficie mediante una imagen, y la segunda en la cual se realiza un estudio de la luminancia en función de diferentes ángulos. Se han presentado los resultados de ensayos realizados con un receptor de reducido tamaño en uno de los hornos solares de la Plataforma Solar de Almería, y la comparación con el método del blanco lambertiano. Los resultados muestran un alto grado de concordancia entre ambos métodos. Por último, se ha efectuado el test de difusividad y se han presentado los resultados para un nuevo prototipo de receptor volumétrico de mayor tamaño, fabricado con copas de carburo de silicio, obteniendo que su superficie se comporta como una superficie lambertiana.

PALABRAS CLAVE: Energía Solar, Energía solar de concentración, distribución de irradiancia, blanco lambertiano

ABSTRACT

In this work, a new method to measure high solar irradiance in tower plants is presented. The method uses only a radiometer and a digital camera. Before carrying out the tests, a homogeneity and diffusivity test has been carried out on the surface of the receiver. This test is divided in two parts, the first one where the homogeneity of the surface is studied with a picture, and the second one where a study of the luminance is carried out according to different angles. The results of the tests that has been done with a small receiver in one of the solar furnaces of the Plataforma Solar de Almería, and the comparison with the white lambertian method, validate the new method. The results show a high degree of agreement between both methods. Finally, the diffusivity test has been done with a new volumetric receiver prototype, with bigger size, and the results show that the surface of the receiver behaves as a lambertian surface.

KEYWORDS: Solar Energy, Solar concentrated power, irradiance distribution, flux measurement, white lambertian target

INTRODUCCIÓN

En las centrales solares de torre actuales existe una demanda de sistemas de medida de irradiancia en el receptor. Actualmente se obtiene la distribución de irradiancias a partir de medidas de la temperatura con cámaras de infrarrojo. Este método no es el más preciso, debido a que no se tiene en cuenta el retraso en el tiempo que hay entre la irradiancia y la temperatura, que puede llegar a ser de minutos, dependiendo de diversos factores. Otro de los problemas para los sistemas de medida de irradiancia es la limitación que hay en la modificación de la estructura de la torre, ya que podría causar modificaciones durante su operación, causando algunos problemas. Por lo tanto, es necesario un nuevo método no intrusivo de medida de distribución de irradiancia, que provoque los mínimos cambios en las centrales de torre.

El conocimiento de la potencia incidente sobre el receptor en estas centrales es imprescindible para la obtención de la eficiencia del receptor. Esta eficiencia sirve para caracterizar los receptores, y es utilizada en las evaluaciones de nuevos prototipos de receptores.

En la Plataforma Solar de Almería (PSA) se realizan tests para evaluar dichos prototipos, en los que se usa un sistema de medida de irradiancia de referencia consistente en una barra móvil con un blanco lambertiano, un radiómetro y una cámara digital. Este sistema es un sistema indirecto, ampliamente validado, el cual se basa en la captación de la distribución de irradiancia con una cámara digital. Esta irradiancia es reflejada por un blanco lambertiano móvil, que pasa por delante del receptor. El blanco lambertiano es una superficie difusora, que permite reflejar en todas las direcciones la misma cantidad de radiación. Este hecho permite que la influencia de la posición y el ángulo de la cámara, mientras apunta al blanco, sean despreciables. Una vez se capta con la cámara la radiación que concentran los heliostatos, reflejada por el blanco lambertiano, se obtiene un mapa con la distribución de intensidades, en niveles de gris. Para transformar esta distribución de niveles de gris en niveles de irradiancia, se calibra el sistema mediante un radiómetro.

Hay distintos sistemas de medida de irradiancia, que se pueden clasificar en sistemas directos e indirectos. Entre los sistemas directos, se encuentra un método que consiste en la distribución de radiómetros estacionarios en la superficie del receptor. Este método se utilizó en la planta solar PS-10, en Sevilla. Otro sistema de medida directo consiste en una barra móvil sobre la cual se instalan radiómetros de respuesta rápida (Ballestrín, 2001), que se desplaza por la apertura del receptor. Estos sensores proporcionan la distribución de irradiancias sobre el receptor. Por otro lado, entre los sistemas de medida indirectos está el método del blanco lambertiano móvil (Ballestrín y Monterreal, 2004), mencionado anteriormente, y el método PHLUX. El método PHLUX fue desarrollado por el laboratorio Sandia, de EEUU, el cual usa una imagen del Sol, medidas de radiación directa, y la reflectividad del receptor. Este método trata de calibrar la distribución de brillo captada por una cámara mediante la imagen del Sol y el valor de radiación directa, obteniendo unos resultados con un error de entre un 20-40%.

En el trabajo de Ballestrín y Casanova, 2018, se presenta un nuevo método para medir la distribución de irradiancias. Este método consiste en caracterizar la superficie del receptor, cuantificando su grado de homogeneidad y difusividad. Una vez se ha caracterizado la superficie del receptor, se necesitan solamente un radiómetro y una cámara digital para obtener las medidas de irradiancia sobre el receptor. Para validar este método, se presentan los resultados de los tests realizados con un receptor de tamaño reducido en un horno solar de la PSA. Los resultados muestran un alto grado de concordancia entre las medidas de este sistema, y las medidas realizadas con el sistema del blanco lambertiano. Además, se presenta el estudio de difusividad realizado a un nuevo prototipo de receptor de mayor tamaño, desarrollado en el marco del proyecto Capture, con el que se realizarán futuros ensayos.

MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA MEDIDA DE IRRADIANCIA SOLAR

Los ensayos han sido realizados en el horno solar SF60 de la PSA. En este horno solar se puede obtener un amplio rango de irradiancias, lo que permite alcanzar los niveles en los que se trabaja en las centrales de torre comerciales, incluso superarlos.

(1) Horno solar SF60

Los hornos solares son instalaciones que cuentan con un heliostato plano, de gran tamaño, que sigue al Sol, un concentrador parabólico, un atenuador y una zona donde se realizan los test, situada en el foco del concentrador. En un horno solar, se pueden alcanzar concentraciones mayores a 10000. El heliostato refleja la radiación directa hacia el concentrador, que a su vez focaliza toda la radiación en una zona focal donde se sitúa la mesa de ensayos.

En la Fig. 1 se pueden apreciar todos los componentes. El horno solar SF60 de la PSA dispone de un heliostato de gran tamaño, 120 m², una reflectancia del 93% y un sistema de seguimiento del Sol. El atenuador consta de 30 lamas

colocadas en dos columnas, de 11.5 m de ancho por 11.2 m de alto. El concentrador parabólico tiene un área de 98.5 m², compuesto por 89 facetas de 1.21 m de ancho por 0.91 m de alto. Por último, el banco de ensayos es una mesa móvil, capaz de moverse en las tres direcciones en el espacio. La irradiancia pico, en condiciones de radiación directa de 1000 W m⁻², es de 3034 kW m⁻², con una potencia total de 69 kW. (Fernández-Reche, 2006)

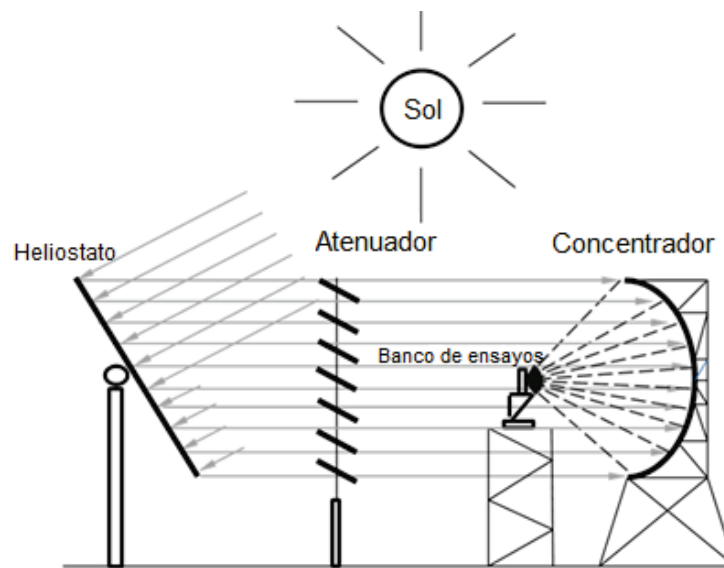


Fig. 1. Esquema del horno solar

El horno solar tiene un blanco lambertiano destinado a la medida de distribución de irradiancia. El blanco lambertiano es una superficie pintada con Amercoat®741, y está refrigerado por agua. El radiómetro necesario que se ha utilizado es un radiómetro tipo Gardon, de 15.9 mm de diámetro, suministrado por la empresa Vatell, cuya superficie ha sido pintada con Zynolyte®, y también se encuentra refrigerado por agua. La cámara digital disponible en el horno solar es la Hamamatsu®, modelo ORCA-flash4.0 v2 CMOS, de 16 bit, con un rango espectral entre 400 y 1000 nm.

(2) Test de difusividad

Para la validación del método de medida de distribución de irradiancia, se ha construido un receptor de pequeño tamaño, de acero inoxidable, refrigerado por agua, cuya superficie se ha pintado con Pyromark®2500. Este recubrimiento es el utilizado más comúnmente para los receptores comerciales. El receptor es circular, con un tamaño de 25 cm de diámetro.

En la PSA se desarrolló un método de caracterización de superficies lambertianas (Ballestrín, 2018). Es necesario que la superficie del receptor se comporte como una superficie lambertiana, para poder eliminar la componente direccional de la radiación que refleja el receptor, que posteriormente es captada con la cámara digital. Este método consiste en dos partes. En la primera parte, se estudia la homogeneidad de la superficie del receptor, tomando una imagen de la misma con una cámara. En el caso del receptor construido, la dispersión de su superficie es menor del 0.3%. La segunda parte consiste en estudiar la luminancia en la superficie del receptor en función del ángulo. Para esta segunda parte se ha utilizado el luminancímetro MAVO-SPOT 2, que tiene una incertidumbre en su medida del 3%. Se ha medido la luminancia en 15 posiciones angulares diferentes entre -70° y +70°, pasando por la posición perpendicular al receptor en 0°.

Los resultados de las medidas de luminancia en los diferentes ángulos se aprecian en la Fig. 2. La toma de medidas se ha realizado en muy pocos minutos, dentro de una habitación con iluminación tenue, con el fin de eliminar variaciones en la luminosidad del ambiente externo, que podrían perturbar las medidas. Al observar la Fig. 2, se puede observar que la superficie del receptor se comporta como una superficie lambertiana dentro del ángulo del horno, correspondiente con 50.5°. Es decir, la irradiancia medida por la cámara digital será constante mientras se sitúe la cámara dentro del ángulo del concentrador.

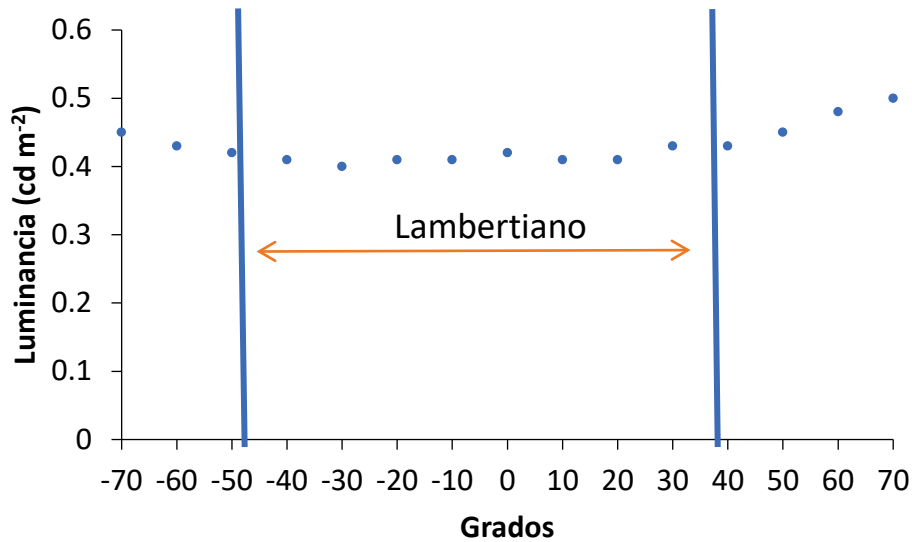


Fig. 2. Medidas de luminancia sobre la superficie del receptor

ENSAYO EXPERIMENTAL Y MEDIDAS

Los ensayos en el horno solar SF60 se prepararon para realizarse el día 20 de junio de 2018. El montaje del dispositivo experimental es el que puede apreciarse en la Fig. 3, consistente en el receptor construido para esta ocasión, con una protección de alúmina, el blanco lambertiano y el radiómetro.

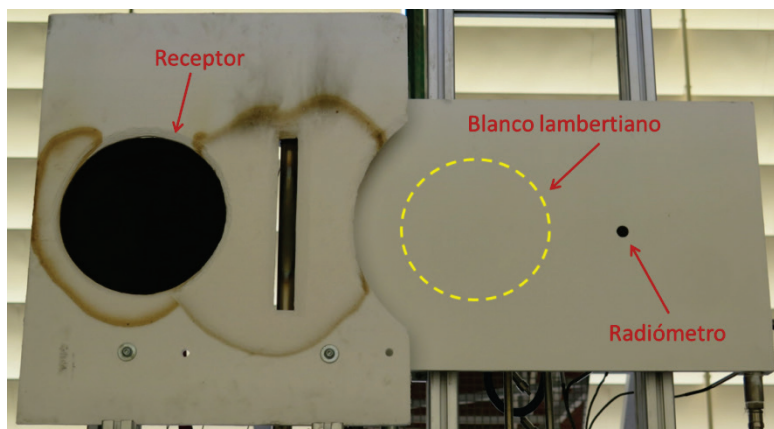


Fig. 3. Montaje experimental

El método empleado en el ensayo ha sido el de ir situando en el foco del concentrador el receptor, el blanco lambertiano y por último el radiómetro, gracias a que la mesa donde están montados es móvil. Se ha ido variando los niveles de irradiancia mediante el atenuador, hasta alcanzar 20 niveles distintos comprendidos en el rango 0-1000 kW m⁻². Cuando cada componente se encontraba en el foco, se tomaba una imagen con la cámara digital. Además, se guardaban los datos meteorológicos, así como la señal del radiómetro y la temperatura de entrada y salida del agua de refrigeración del receptor.

De los 20 niveles alcanzados, 2 de ellos tuvieron que ser descartados debido a ráfagas de viento que produjeron cambios bruscos en el heliostato. Los tiempos de exposición de la cámara digital fueron 50 ms para el blanco lambertiano, y 500 ms para el receptor y radiómetro. En la Fig. 4 se pueden apreciar las 3 imágenes sucesivas tomadas durante el ensayo, para un nivel de intensidad de 700 kW m⁻² aproximadamente.

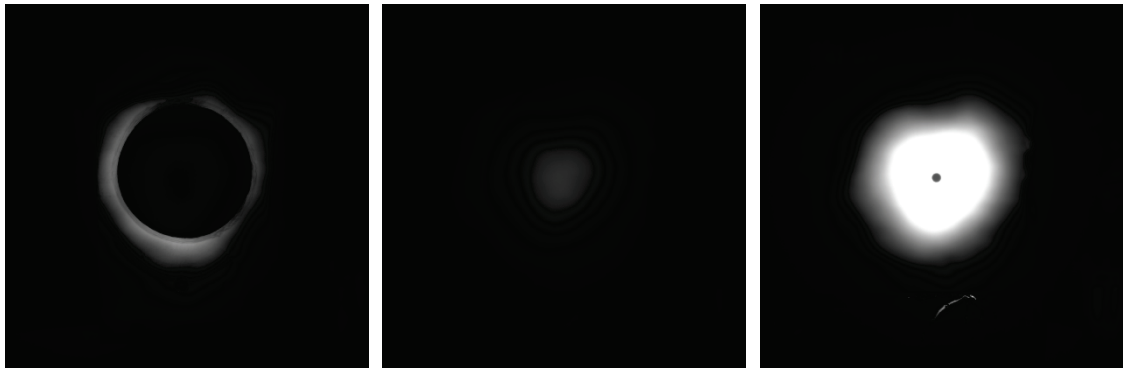


Fig. 4. Imágenes del ensayo. De izquierda a derecha: Receptor, Blanco lambertiano, Radiómetro.

Para analizar estas imágenes, se ha tomado un área circular de 8.9 mm de diámetro de la imagen del radiómetro, que contiene la parte frontal del radiómetro, dónde se sitúa la zona de contacto entre el disco de constantan y el de cobre. Esta misma área se toma de las otras imágenes del receptor y del blanco lambertiano, para cada nivel de irradiancia, mientras que se registra el valor de irradiancia proporcionado por el radiómetro. Del área circular se obtienen los valores medios de los niveles de gris, así como su desviación estándar. A partir de estos valores medios para el nivel de gris, y de la irradiancia proporcionada por el radiómetro, es posible obtener una función lineal entre ellas. Esta función lineal es la curva de calibración. Se obtienen dos calibraciones, una para el receptor y otra para el blanco lambertiano (Fig. 5).

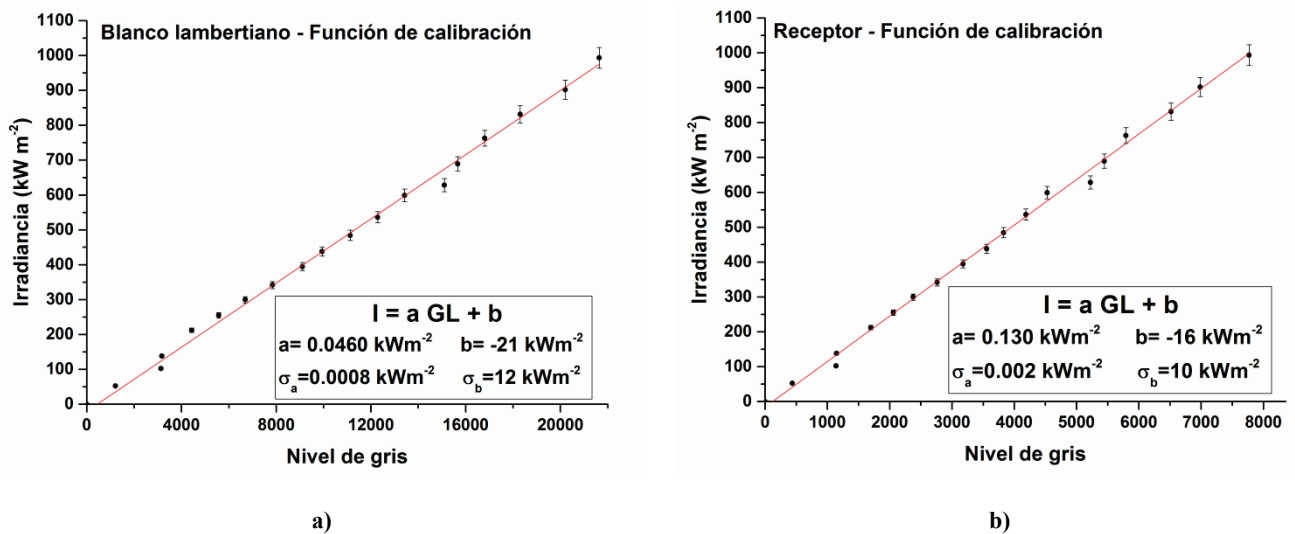


Fig. 5. Funciones de calibración del blanco lambertiano (a) y del receptor (b).

Las funciones de calibración obtenidas son:

- Blanco lambertiano: $I = 0.0460 \text{ GL} - 21$
- Receptor: $I = 0.130 \text{ GL} - 16$

Estas calibraciones permiten transformar imágenes tomadas con la cámara digital, con unidades de niveles de gris, a imágenes con unidades de irradiancia (kW m^{-2}). Al aplicar la función a las imágenes, se obtiene la distribución de irradiancias, tal como puede apreciarse en la Fig. 6. Tal como se predijo, ambas distribuciones de irradiancia son muy similares, ya que ambas superficies son buenas difusoras, teniendo en cuenta la posición de la cámara. Las incertidumbres asociadas a las medidas, se obtienen a partir de la Ec. (1):

$$\sigma_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial \text{GL}}\right)^2 \sigma_{\text{GL}}^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial b}\right)^2 \sigma_b^2} = \sqrt{\text{GL}^2 \sigma_a^2 + a^2 \sigma_{\text{GL}}^2 + \sigma_b^2} \quad (1)$$

Por lo tanto, los errores cometidos en estas medidas, entre 150 y 900 kW m^{-2} , se encuentran entre:

- Blanco lambertiano (150-900) kW m⁻²: (±9.7%, ±2.5%)
- Receptor (150-900) kW m⁻²: (±16.7%, ±2.8%)

Los errores son mayores para el receptor que para el blanco lambertiano, debido a que hay una gran diferencia entre la reflectancia del blanco lambertiano, el cual está pintado con Amercoat® y tiene una reflectancia del 80%, y la reflectancia del receptor, pintado con Pyromark® 2500 con una reflectancia del 4%. Además, se puede apreciar que cuanto mayor es el nivel de irradiancia, menor es la incertidumbre.

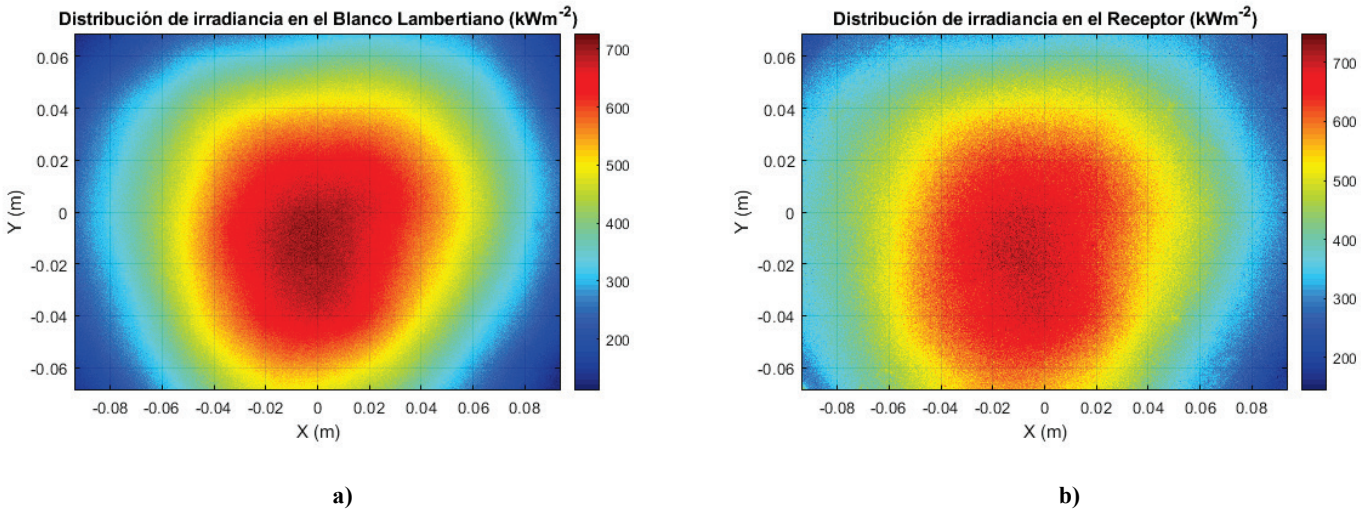


Fig. 6. Distribuciones de irradiancia para el blanco lambertiano (a) y para el receptor (b)

Para cuantificar la diferencia entre ambas distribuciones, se ha tomado un corte en horizontal y otro en vertical. Se ha comparado el blanco lambertiano frente al receptor en cada uno de estos perfiles (horizontal y vertical), y se han representado en la Fig. 7. Con ello, se ha podido comprobar que hay una discrepancia menor del 2% entre los perfiles de irradiancia para el nivel de 700 kW m⁻².

Estos resultados muestran un alto grado de concordancia entre las distribuciones de irradiancias del blanco lambertiano y del receptor. Además, validan el método propuesto de medida de irradiancias. Los resultados en los demás niveles de irradiancia son similares, obteniendo menores incertidumbres cuanto mayores son los niveles de irradiancia, ya que la relación ruido/señal disminuye al aumentar la irradiancia.

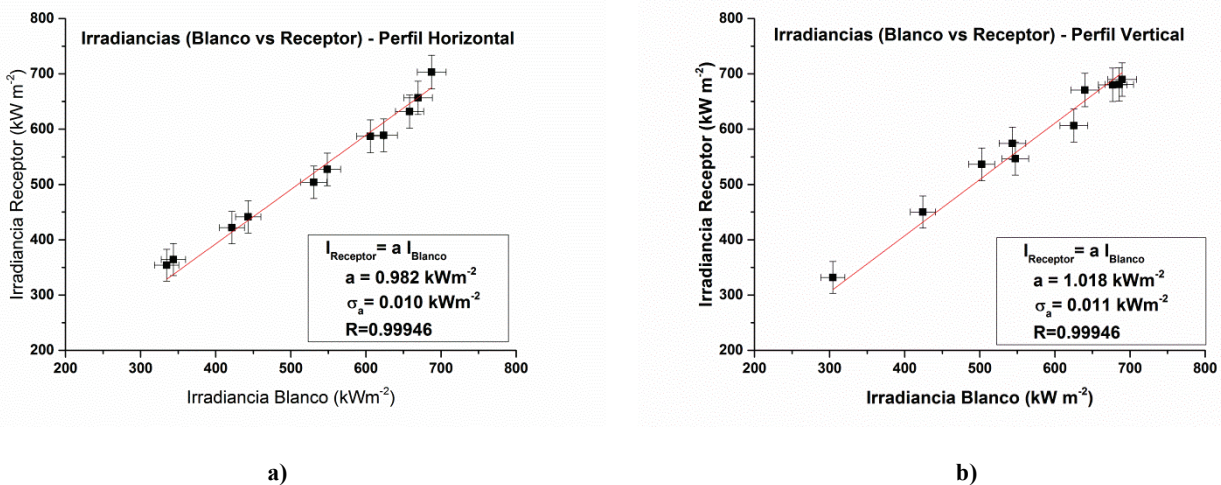


Fig. 7. Perfiles horizontal (a) y vertical (b) para el nivel de 700 kW m⁻²

La potencia obtenida para este mismo nivel corresponde con:

- Blanco lambertiano: P = (11.3 ± 0.6) kW
- Receptor: P = (12.3 ± 0.7) kW

Estas potencias vuelven a mostrar la validación del nuevo método propuesto.

TEST DE DIFUSIVIDAD EN NUEVO RECEPTOR

En el marco del proyecto Capture, se van a realizar unos ensayos en la PSA con un nuevo prototipo de receptor de mayor tamaño. Este nuevo receptor es un receptor volumétrico abierto, con estructura cerámica basada en copas de carburo de silicio, que permite operar con temperaturas por encima de 1200 °C. Las dimensiones totales del receptor son de 980 mm de ancho y 700 mm de alto, formado por 35 copas cuadradas de 140 mm de lado.

Antes de proceder a los ensayos, se ha realizado un test de difusividad con el fin de obtener el grado de difusividad y homogeneidad del receptor. El test se ha hecho de la misma manera que se ha explicado anteriormente, utilizando el mismo luminancímetro, y midiendo desde los mismos ángulos.

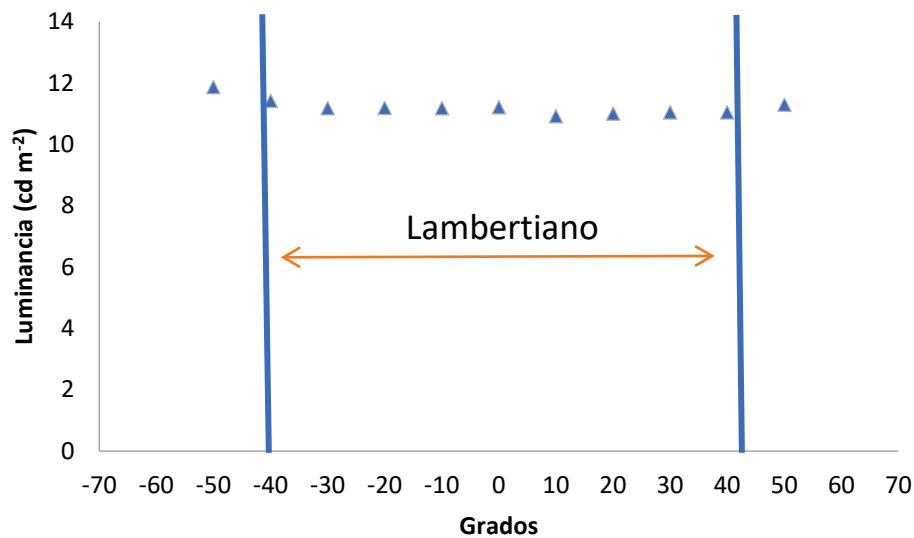


Fig. 8. Medidas de luminancia del receptor del proyecto Capture

La dispersión en la homogeneidad del receptor en este caso es algo mayor, del 5% aproximadamente. Sin embargo, como podemos observar en la Fig. 8, el receptor se comporta como una superficie lambertiana dentro del ángulo de incidencia de la radiación solar concentrada $\pm 45^\circ$.

Dado que la dispersión en el receptor es mayor en el receptor del Capture, se procederá a efectuar una homogeneización de las imágenes del receptor.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un método de medida de distribución de irradiancias sobre receptores. El método hace uso de una cámara y un radiómetro únicamente. Al utilizar sólo estos dos componentes, la planta de torre y su operación no se verían afectadas, pudiendo usarse dicho método en cualquier planta de torre en operación, e incluso en cualquier horno solar.

Los resultados obtenidos en un receptor de tamaño reducido con el método nuevo se han comparado con el método de medida del blanco lambertiano, método ampliamente validado y fiable. Se ha comparado tanto las distribuciones de irradiancia obtenidas con ambos métodos, como la potencia total sobre el receptor. En ambos casos, los resultados muestran concordancia, quedando validado el método.

Por último, se ha presentado el estudio de difusividad del nuevo prototipo de receptor volumétrico de mayor tamaño desarrollado en el proyecto Capture. En este caso, la dispersión en su homogeneidad es del 5%. Sin embargo, con el estudio de la luminancia en función del ángulo, se ha demostrado que la superficie de este receptor de carburo de silicio se comporta como una superficie lambertiana. Con este estudio se confirma que la cámara digital usada, puede situarse en cualquier punto entre $\pm 45^\circ$, y los resultados obtenidos no se verán afectados por componentes direccionales.

REFERENCIAS

Informe Ciemat:

J. Ballestrín (2001), Direct heat-flux measurement system (MDF) for solar central receiver evaluation

Artículo de Revista:

J. Ballestrín, R. Monterreal (2004), Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation, J. Energy 29. 915–924. doi:10.1016/S0360-5442(03)00196-8.

Artículo de Revista:

J. Ballestrín, M.E. Carra, R. Enrique, R. Monterreal, J. Fernández-Reche, J. Polo, M. Casanova, F.J. Barbero A. Marzo (2018), Diagnosis of a Lambertian target in solar context, J. Measurement 119, 265–269. doi:10.1016/j.measurement.2018.01.046.

Artículo de Revista:

J. Ballestrín, M. Casanova, R. Monterreal, J. Fernández-Reche, E. Setien, J. Rodríguez, J. Galindo, F.J. Barbero, F.J. Batlles (2019), Simplifying the measurement of high solar irradiance on receivers. Application to solar tower plants, J. Renewable Energy 138, 551–561. doi:10.1016/j.renene.2019.01.131.

Artículo de Revista:

J. Fernández-Reche, I. Cañadas, M. Sánchez, J. Ballestrín, L. Yebra, R. Monterreal, J. Rodríguez, G. García, M. Alonso, F. Chenlo (2006), PSA Solar furnace: A facility for testing PV cells under concentrated solar radiation, J. Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 90, 2480–2488. doi:10.1016/j.solmat.2006.03.030.