

MEDIDA DE IRRADIANCIA SOLAR DIRECTA MEDIANTE CAPTADOR DE FIBRA ÓPTICA Y FOTODIODO SEMICONDUCTOR

Manuel Jerez*, Alejandro Carballar**, y Joaquín Granado***

Departamento de Ingeniería Electrónica – E.T.S. de Ingeniería – Universidad de Sevilla;

C/ Camino de los Descubrimientos, s/n, Sevilla, 41092 (España)

*mjerez@us.es, ** carballar@us.es, *** j_granado@us.es

RESUMEN/RESUMO

Se propone el diseño de un nuevo pirheliómetro para la medida de la irradiancia solar normal directa (DNI), describiéndose su construcción, así como pruebas de campo realizadas. El sistema está constituido por una fibra óptica como elemento captador de la luz solar, un fotodiodo de silicio y un medidor de potencia óptica; junto con un algoritmo de calibración para el procesado de los datos y la obtención de la medida de irradiancia. El nuevo dispositivo destaca por su estructura simple y bajo coste, su reducido tiempo de respuesta y alta sensibilidad, así como mayor fiabilidad y flexibilidad, permitiendo el uso de distintos tipos de fibras y fotodiodos. El dispositivo puede ser empleado en aplicaciones de meteorología, agricultura o generación de energía fotovoltaica y termosolar.

PALABRAS CLAVE: Pirheliómetro, irradiancia solar, fibra óptica, fotodiodo, irradiancia espectral, radiómetro, cono de aceptación.

ABSTRACT

The design of a new pyrliometer for the measurement of Direct Normal Irradiance (DNI) is proposed, along with its construction and conducted tests. The system comprises an optical fiber as the solar light collector, a silicon photodiode, and an optical power meter, combined with a calibration algorithm for data processing and irradiance measurement acquisition. It stands out for its reduced response time and high sensitivity, as well as greater reliability and flexibility, allowing the use of different types of fibers and photodiodes, featuring a simple structure and low cost. The device can be employed in fields such as meteorology, agriculture, or photovoltaic and concentrating solar power generation.

KEYWORDS: Pyrliometer, solar irradiance, optical fiber, photodiode, spectral irradiance, radiometer, acceptance cone.

INTRODUCCIÓN

La preocupación por buscar fuentes de energías renovables lleva experimentando un gran crecimiento en los últimos años, quedando constatada como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, que en su objetivo número 7 indica que se debe “garantizar el acceso a la energía asequible, segura, sostenible y moderna”. Además de este hecho, la generación de energía sostenible se relaciona con otros objetivos también enunciados en el mismo documento, como la erradicación de la pobreza, la sostenibilidad de las ciudades o el consumo de recursos de forma sostenible. En este contexto, la energía solar destaca como un recurso energético renovable, limpio e infinito en todo el mundo; y su correcto aprovechamiento en zonas con muchas horas de sol a lo largo del año es clave para garantizar la transición energética. Por otro lado, la reducción de los costes de producción de este tipo de energía se hace necesario para el impulso de la infraestructura eléctrica en zonas menos desarrolladas, donde viven la mayoría de las personas sin acceso a electricidad en el mundo; que cuenta con un gran potencial en lo que a la energía solar se refiere. (Organización de las Naciones Unidas, 2015)

La radiación solar es la energía liberada por el sol, propagada en todas las direcciones del espacio en forma de onda electromagnética. Esta, al llegar y atravesar la atmósfera sufre difusión, reflexión y absorción debido a la interacción con los distintos tipos de partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfera alrededor del planeta. Estas interacciones hacen que la luz llegue a la superficie de la Tierra muy atenuada con respecto a la radiación recibida sobre la atmósfera; y ésta llega desde todas las direcciones del espacio y no sólo desde el círculo solar. La medida de radiación solar recibida por unidad de superficie en la tierra se denomina irradiancia, y se mide en vatios por metro cuadrado. La irradiancia total medida en un punto de la tierra GHI (Global Horizontal Irradiance), puede descomponerse en dos partes: la irradiancia normal directa (DNI, Direct Normal Irradiance) e irradiancia horizontal difusa (DHI, Diffuse Horizontal Irradiance). (Organización Internacional para la Normalización, 2022)

La Organización Mundial de Meteorología (WMO – wmo.int) define la DNI como el flujo solar proveniente de un pequeño ángulo sólido (de apertura total 5°) centrado en la circunferencia solar radiante en un plano perpendicular al ángulo sólido dividido entre el área de esta superficie. De la misma forma, la WMO y la Organización Internacional para la Normalización (ISO – iso.org) definen que el instrumento para medir la DNI es el pirheliómetro, “cuyas superficies receptoras están dispuestas de manera normal a la dirección solar. Mediante la apertura, solo se mide la radiación proveniente del sol y un estrecho anillo de cielo, esta última componente de radiación a veces se denomina radiación circunsolar o aureolar”, así como sus especificaciones. Este pirheliómetro necesita estar montado en un sistema de seguimiento solar para garantizar que siempre se encuentra dispuesto en la dirección indicada. (P. Blanc, 2014)

La medición de irradiancia se hace importante en muchos contextos diferentes en distintos ámbitos de la ciencia y la tecnología. De todos esos ámbitos, el más evidente es el de la meteorología, donde la luz solar juega un papel fundamental en los distintos procesos que condicionan el clima, por lo que conocerla es necesario para realizar pronósticos. En otras ciencias, como la arquitectura, la agricultura o la medicina, el estudio de la radiación solar

se utiliza para el estudio de la eficiencia energética de los edificios, la monitorización de procesos como la fotosíntesis o el estudio de enfermedades y tratamientos relacionados con la piel; respectivamente. Por último, en el campo de las energías renovables, la medida de la radiación en centrales de producción fotovoltaica y de concentración solar permite conocer el estado de generación y condiciones en las que se encuentra la planta o la eficiencia a la que los paneles fotovoltaicos están convirtiendo la radiación solar en energía eléctrica. (O. Abeidina, 2019)

Este trabajo presenta una nueva configuración de pirheliómetro utilizando una fibra óptica como captador de radiación y un fotodiodo semiconductor para medir la potencia óptica incidente. En la siguiente sección se presenta el principio de operación de los pirheliómetros tradicionales y el del pirheliómetro propuesto; posteriormente, el procedimiento de medida y calibración; a continuación, el montaje y los resultados de medida obtenidos, y, por último, las conclusiones.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, el pirheliómetro es un instrumento que permite medir la DNI. Su comportamiento y la capacidad de proporcionar medidas exactas están condicionados por distintos requerimientos, características y especificaciones. En primer lugar, su rango espectral, que debe garantizar que cubra la mayor parte (si es posible, la totalidad) del espectro solar, e, idealmente, con una curva de respuesta lo más plana posible y una capacidad de absorción cercana a 1. En segundo lugar, la sensibilidad, que se refiere al mínimo nivel de señal que es capaz de detectar el pirheliómetro. En tercer lugar, el tiempo de respuesta, que se define como el tiempo necesario que tarda el pirheliómetro en reaccionar, alcanzando un 95% de la salida ante el cambio en la magnitud de entrada. Por último, el campo de visión, que es el ángulo sólido en el cual el pirheliómetro es capaz de captar la radiación. Además de estos parámetros, el espectro solar recibido en la superficie terrestre está caracterizado por su irradiancia espectral, y esta varía según las masas de aire que la luz del sol debe atravesar hasta llegar al dispositivo medidor; por lo que la localización geográfica, la época del año, la hora del día, la meteorología, altitud y el entorno donde se encuentre el instrumento influyen también en las medidas que realiza el pirheliómetro. (Organización Internacional para la Normalización, 2018).

Los pirheliómetros tradicionales emplean principalmente sensores termoelectricos o fotoelectricos pasivos para convertir la irradiancia solar (en vatios por metro cuadrado) en una señal eléctrica proporcional. Estos sensores termoelectricos están recubiertos con un material ópticamente negro y presentan una respuesta espectral amplia y uniforme a todas las longitudes de onda de la radiación solar, generalmente entre las longitudes de onda de 300 y 3000 nm. La termopila es el sensor termoelectrico más comúnmente utilizado en radiómetros. A diferencia de las termopilas, los fotodiodos suelen responder a un intervalo más reducido del espectro, que en general no suele ser superior a los 1100nm y con una curva de respuesta (responsividad) que no suele ser plana en estas longitudes de onda; y además son muy sensibles a cambios en la temperatura de operación, por lo que suelen requerir de elementos de refrigeración que hacen que su uso en los pirheliómetros esté menos extendido que los sensores térmicos. (J. Cwirko, 2015).

La propuesta de pirheliómetro que se describe en este trabajo consiste en el uso de una fibra óptica como elemento captador de la radiación solar. Este haz de luz acoplado a la fibra viaja por el interior de ésta hasta un fotodetector (un fotodiodo de semiconductor) que convierte la potencia óptica captada por la fibra en una corriente eléctrica que será detectada por el medidor de potencia óptica. El medidor, controlado por un software de adquisición de datos, generará una traza de la potencia óptica equivalente a la fotocorriente eléctrica generada; de forma que los datos medidos puedan ser procesados para obtener una estimación de la DNI.

La configuración para el nuevo pirheliómetro ofrece varias ventajas: al separar el captador de radiación solar del dispositivo de medición de potencia óptica, se permiten mediciones más estables y controladas en temperatura, al no incidir la luz directamente en el dispositivo detector. Además, la posibilidad de modificar la fibra óptica empleada permite ajustar la magnitud de potencia óptica capturada y el cono de aceptación de la radiación solar incidente, garantizando que recibe únicamente la radiación proveniente del disco solar. Por último, el uso de un fotodiodo semiconductor como detector ofrece alta sensibilidad y tiempos de respuesta muy rápidos. Además de los beneficios técnicos que ofrece, el coste del dispositivo es mucho menor que el de un pirheliómetro comercial. Sin embargo, el principal desafío tecnológico es obtener mediciones cuantitativas de irradiancia precisas, dado que la respuesta del fotodiodo semiconductor varía con la componente espectral, y es, en general, más estrecha que la irradiancia espectral del sol; lo que motiva la necesidad de un algoritmo de compensación o calibración de las medidas brutas para obtener una buena estimación de la irradiancia normal directa.

PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Los valores almacenados en la traza de potencia óptica generados por el medidor de potencia óptica responden a la expresión (1), que depende de la responsividad del fotodiodo $\mathfrak{R}(\lambda)$, la irradiancia espectral de la luz solar $E(\lambda)$ y una longitud de onda λ_i de referencia entre las longitudes de onda mínima y máxima de la curva de responsividad del fotodiodo, λ_{min} y λ_{max} , respectivamente. La atenuación de la fibra también interviene en la expresión, pero esta puede tener un valor despreciable en el caso de que L sea lo suficientemente pequeño.

$$P_{0,\lambda_i} = \frac{1}{\mathfrak{R}(\lambda_i)} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot L} \cdot \mathfrak{R}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

El algoritmo de calibración tiene tres etapas diferenciadas. En primer lugar, a partir de la potencia óptica medida se obtendrá la irradiancia solar bruta, definida como el cociente entre esa potencia y el área del núcleo de la fibra óptica empleada como elemento captador de la radiación solar. El resultado de este cálculo tendrá unidades de potencia por unidad de superficie, es decir, vatios por metro cuadrado; siendo una primera aproximación para el valor de la medida de DNI.

$$\Phi_{bruta,\lambda_i} = \frac{P_{0,\lambda_i}}{A_{nucleo}} \quad (2)$$

Este valor de irradiancia bruta es, sin embargo, lejano al valor de irradiancia normal directa perseguido, debido a dos razones fundamentales. En primer lugar, debido a la respuesta espectral del fotodiodo, que no abarca todo el espectro de radiación solar, sino que está restringida o limitada en longitudes de onda. En segundo lugar, la sensibilidad de los fotodiodos no es uniforme en el espectro que cubren, de forma que el comportamiento será distinto según el semiconductor empleado en el detector, el modelo de fotodiodo o el fabricante de este. Una tercera causa que justifica la diferencia entre los valores de irradiancia bruta y DNI tiene que ver con las pérdidas que sufre la potencia óptica captada al propagarse desde el extremo captador de radiación hasta el detector por la fibra óptica; pero este efecto puede ser despreciable si la longitud de fibra óptica no es excesivamente larga. Estos motivos hacen necesario el uso de un factor de corrección o calibración de la medida, que compense el efecto de estos fenómenos y permita realizar una medida cuantitativa de la DNI lo suficientemente precisa.

El factor de calibración se calcula a partir de la expresión (3), donde intervienen los factores detallados previamente en el cálculo de la potencia óptica. Como ya se ha comentado, si el producto $\alpha \cdot L$ es lo suficientemente pequeño, podrá ser despreciado. La longitud de onda de referencia, λ_i , empleada en el medidor de potencia óptica ha de tenerse en cuenta al realizar el cálculo del factor de calibración. Haciendo uso del valor de responsividad para la longitud de onda seleccionada en el medidor de potencia óptica, se obtiene el factor de calibración, FC:

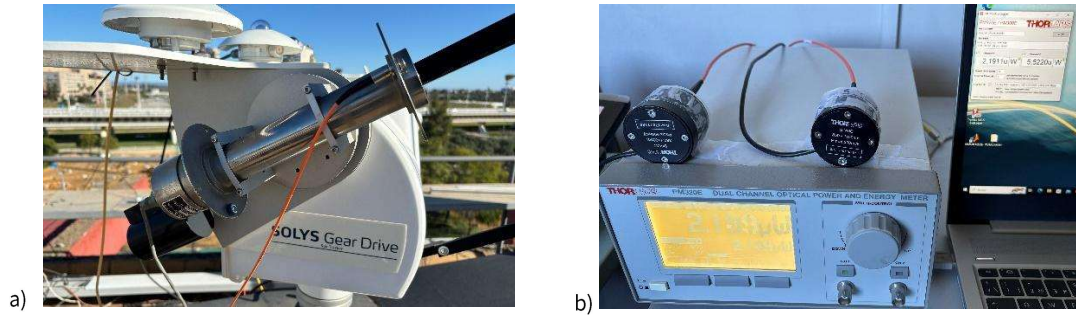
$$FC_{\lambda_i} = \Re(\lambda_i) * \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E(\lambda) * d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E(\lambda) * e^{-\alpha(\lambda) * L} * \Re(\lambda) * d\lambda} \quad (3)$$

Una vez obtenido el factor de calibración, obtener la medida definitiva de la irradiancia solar directa es inmediato a partir de la expresión (4):

$$\Phi_{medida} = \Phi_{bruta, \lambda_i} \cdot FC_{\lambda_i} \quad (4)$$

MONTAJE Y RESULTADOS

Para realizar las pruebas de concepto del nuevo pirheliómetro propuesto se han utilizado las fibras FG050LGA, FG105LCA y FG200LEA, todas fabricadas por THORLABS, y cuyas características se comentarán posteriormente. Los extremos de las fibras expuestos a la radiación solar han sido colocados en un seguidor solar KIPP & ZONEN SOLYS Gear Drive junto con un pirheliómetro comercial KIPP & ZONEN CHP1 para validar las medidas realizadas, tal y como se muestra en la Figura 1. El otro extremo de las fibras ópticas se ha conectado a distintos fotodetectores del fabricante THORLABS, y estos fotodetectores a su vez al medidor de potencia óptica THORLABS PM320. Las trazas generadas han sido procesadas mediante el software de simulación numérica MATLAB.



Los primeros resultados presentados en la Figura 2 se corresponden con la medida de la irradiancia solar directa en el mismo día con dos fibras multimodo distintas, las THORLABS FG050LGA y THORLABS FG105LCA, de 50 μm y 105 μm de diámetro respectivamente; y ambas con una apertura numérica de 0.22, resultando en un medio ángulo de visión de en torno a 12°. Los resultados propuestos ilustran cómo el factor de calibración se hace absolutamente necesario, dada la gran diferencia entre la irradiancia bruta calculada y la medida proporcionada por el pirheliómetro comercial. En el día que se hicieron las medidas se observa cómo el cielo estaba nublado, destacando el rápido tiempo de respuesta del fotodiodo de silicio, con una variación muy rápida ante el paso de nubes, y que replica perfectamente el comportamiento del dispositivo comercial. Es importante mencionar que las longitudes de onda de calibración seleccionadas fueron 635nm y 400nm respectivamente; mientras que los factores de calibración asociados calculados han sido de 1.3 y 0.26 para cada una de ellas.

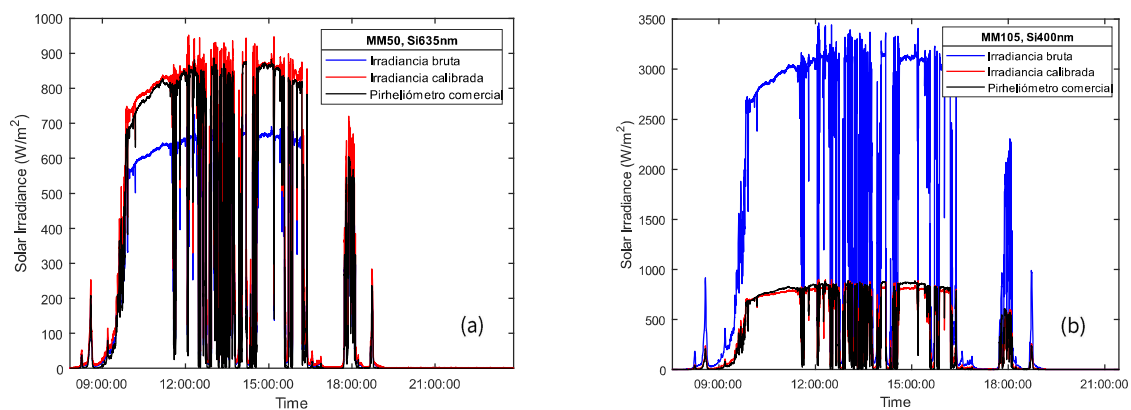


Fig. 2. Medida de la DNI mediante la nueva configuración de pirheliómetro y comparación con medida de DNI proporcionada por pirheliómetro de investigación: a) con fibra THORLABS FG050LGA; y b) con fibra THORLABS FG105LCA.

De los resultados presentados, además del tiempo de respuesta, se desprenden algunas conclusiones relativas a su precisión y el rizado de las medidas. De la comparación entre las curvas de las medidas realizadas por las fibras y las medidas del pirheliómetro comercial, se observa cómo la fibra de 50 μm de diámetro arroja resultados más precisos, que replican

durante buena parte del día los resultados que sabemos correctos. A pesar de proporcionar resultados más precisos, los resultados dados por esta fibra también muestran un mayor rizado, debido a que, al captar menos potencia (por tener menos superficie de núcleo expuesta a la radiación), el dispositivo diseñado se encuentra trabajando más cerca del límite de sensibilidad. El factor de rizado se reduce a medida que aumenta el diámetro del núcleo de la fibra, como se refleja en el resto de resultados para fibras con mayor diámetro de núcleo.

Los resultados mostrados en la Figura 3 se corresponden con el uso de las fibras THORLABS FG105LCA y la FG200LEA como elementos captadores de la luz solar, donde esta última se caracteriza por un diámetro de núcleo de 200 μm y misma apertura numérica que en los casos anteriores. Para la medida realizada con la primera de las fibras se observa que es un día mayormente soleado, con la presencia de algunas nubes en torno a las 16:00h. Para el segundo caso, el día vuelve a ser nublado. En ambos experimentos, la longitud de onda seleccionada ha sido de 635nm, por lo que el factor de corrección es igual al valor de 1.3.

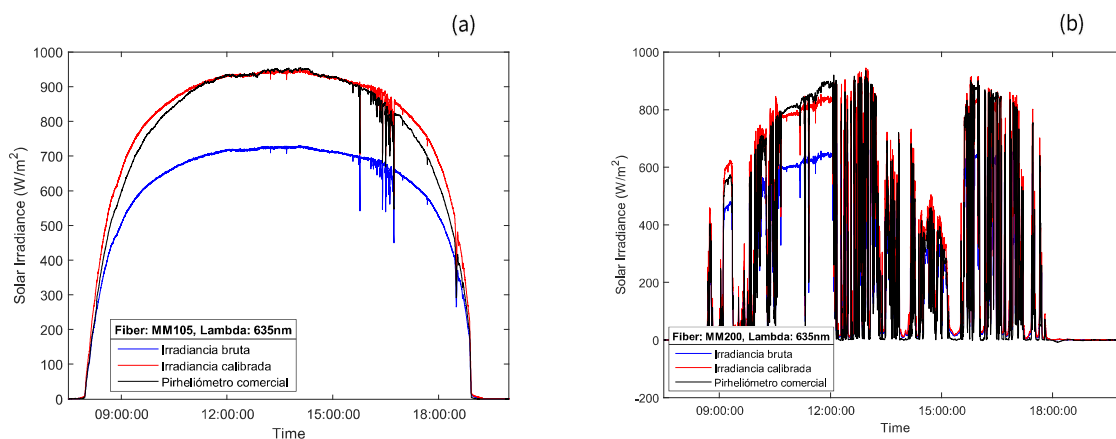


Fig. 3. Medida de la DNI mediante la nueva configuración de pirheliómetro y comparación con medida de DNI proporcionada por pirheliómetro de investigación: a) con fibra THORLABS FG105LCA; y b) con fibra THORLABS FG200LEA.

Los resultados anteriores sirven para realizar un comentario relativo a la influencia de la irradiancia espectral sobre la medida de la DNI proporcionada por el nuevo pirheliómetro. Observando la Figura 3a, se deduce que la medida arrojada por el pirheliómetro fibra óptica es prácticamente idéntica a la del pirheliómetro comercial desde antes de mediodía hasta que comienza a atardecer. Las mayores divergencias para este caso entre las medidas se dan justo en los momentos de amanecer y atardecer, donde la medida del dispositivo propuesto es sensiblemente mayor. Este hecho se debe a que, como se ha mencionado anteriormente, el espectro de radiación solar observado en la superficie terrestre se ve afectado por las masas de aire que debe atravesar hasta llegar a la superficie, de forma que en los momentos al comienzo y final del día, donde existe una mayor horizontalidad del sol respecto del sensor, mayor volumen de aire en la atmósfera debe ser atravesado por los rayos de sol; lo que hace que el espectro sufra las mayores modificaciones del día. Para realizar el procesamiento, la irradiancia espectral empleada se corresponde con la del sol a mediodía y con cielo despejado (visión directa del sol); por lo que es lógico que las

mayores divergencias se encuentren en el amanecer y atardecer, donde el espectro sufre mayores divergencias respecto del modelo empleado. Esto explica, de la misma forma, que en días como el que se muestra en la Figura 3b, donde el cielo está claramente nublado, las divergencias entre las medidas sean mayores y se mantengan durante todo el día, en tanto que el modelo de espectro empleado para la radiación solar no se corresponde con el que se mediría en una jornada así.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto una nueva configuración de pirheliómetro para la medida de irradiancia normal directa (DNI), que incluye el uso de una fibra óptica como elemento captador de la luz y un fotodiodo como detector de radiación; además de un algoritmo para corregir las medidas tomadas. En base a los resultados propuestos se puede afirmar que el dispositivo propuesto permite tomar medidas similares a las que se obtienen por pirheliómetros comerciales, con un pequeño error, a cambio de un precio considerablemente menor.

Los trabajos futuros están orientados en la línea de caracterizar y corregir el error provocado por la divergencia entre la irradiancia espectral real y el modelo empleado; el estudio del comportamiento del pirheliómetro para distintos valores de apertura numérica de fibra óptica para adaptar el diseño a las restricciones de la WMO sobre el ángulo sólido del mismo, y el estudio de distintos fotodiodos como elemento detector de la potencia óptica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del marco de los proyectos de investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación CHLOE con referencia PID2021-125786OB-C22, y CATION con referencia TED2021-132190B-C22, así como en el proyecto ASTERIX-CAESar, que ha recibido fondos del programa de investigación e innovación Horizon Europe de la Unión Europea, bajo el acuerdo N°101122231.

REFERENCIAS/REFERÊNCIAS

Naciones Unidas, Objetivos de Desarrollo Sostenible. 2015.

Organización Internacional para la Normalización (ISO), Solar Energy – Vocabulary, ISO 9488:2022, 2022.

P. Blanc et al. (2014). Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue. Solar Energy. n° 110, pp. 516-577.

O. Abeidina et al. (2019). Optimal offering and bidding strategies of renewable energy based large consumer using a novel hybrid robust-stochastic approach. Journal of Cleaner Production. vol. 215, pp. 878-889.

Organización Internacional para la Normalización (ISO), Solar Energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation, ISO 9060:2018, 2018.

J. Cwirko et al. (2015). Comparative tests of temperature effects on the performance of GaN and SiC photodiodes. *Metrol. Meas. Syst.* vol. 22, no. 1, pp. 119-126