

Calibración de piranómetros como base para la complementariedad energética de Colombia

Sergio Holguín Cardona

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

La medición precisa de la irradiancia solar es esencial en sus diferentes aplicaciones, desde la meteorología y agricultura hasta la generación de energía eléctrica. La irradiancia solar desempeña un papel fundamental en la meteorología, ya que proporciona información básica para determinar la temperatura y clima en una ubicación (Portillo, 2023). Además, esta irradiancia es usada en la agricultura para captar energía, la cual se emplea posteriormente en el proceso de fotosíntesis. A través de este proceso, los cultivos crecen y generan materia vegetal estableciendo así una conexión directa entre la cantidad de radiación solar absorbida por el cultivo y la eventual cosecha a obtener (Hernández, Escobar, & Castilla, 2001). Por otra parte, la irradiancia solar desempeña un papel crucial en la generación de energía eléctrica a través de los sistemas solares fotovoltaicos. En este proceso, los fotones recorren un camino hasta llegar al panel solar, compuesto por celdas solares fabricadas con materiales semiconductores. Cuando estos materiales se excitan por la interacción con los fotones, comienza a fluir una corriente eléctrica (CELSIA, 2018). Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, es necesario conocer el valor real en el lugar y momento específico donde la irradiancia solar incidente va a ser aprovechada para algún de los casos enunciados o para otro diferente. De este modo, la calibración de los elementos radiométricos, como lo son los piranómetros y pirheliómetros, van a ser el punto de partida en la complementariedad energética de Colombia; principalmente cuando la irradiancia solar está siendo considerada como una fuente energética para apoyar y complementar una red eléctrica hídricamente dependiente entre el 70 % y 80 % como lo es el sistema interconectado nacional de Colombia (Colombia Risk Analysis, 2021).

GIPEM 05, diciembre (2023)
pp. 100-107
www.gipem.co/revista-gipem
gipem_fiarman@unal.edu.co
©Derechos patrimoniales
Universidad Nacional de
Colombia

El Sistema Interconectado Nacional de Colombia es una infraestructura de redes y dispositivos asociados a la electricidad conectados entre sí formando un sistema de potencia que se extiende alrededor del 48 % del territorio

colombiano (PARDO, 2022), esta red se compone por las plantas generadores de energía eléctrica, las redes de interconexión regionales o interregionales para la transmisión de electricidad y los usuarios conectados al sistema que están representados como cargas eléctricas (Congreso de Colombia, 1994, pág. Artículo 11). Para el año 2022, el Sistema Interconectado Nacional dependía alrededor de un 70 % de las centrales hidroeléctricas para suministrar el fluido eléctrico requerido por las cargas conectadas al sistema (International Hydropower Association, 2022). Gracias a esto la generación de electricidad en Colombia se ve afectada en periodos del año donde los fenómenos climatológicos, como es el fenómeno del Niño, influyen en los niveles de los embalses de dichas centrales. Por este motivo, la complementariedad energética es una forma de solución a la dependencia de las hidroeléctricas, donde agregando distintas formas de generación a la matriz eléctrica la confiabilidad de esta red será mayor. Comprender la disponibilidad, la calidad y las capacidades de los recursos renovables *in-situ* para la generación de electricidad es crucial para desarrollar un catálogo de oportunidades para una nación (Paredes & Ramírez C., 2017). De esta manera, la calibración de los elementos de medida de los recursos renovables, como la irradiancia solar, es el primer paso para la recolección de datos fidedignos para los futuros estudios de investigación que dan paso a la creación de proyectos de generación.

Para conocer el valor de las distintas componentes de irradiancia solar anteriormente mencionados los elementos utilizados para estas medidas son los piranómetros y los pirheliómetros. Estos equipos comúnmente implementan un sensor fotoeléctrico o termoelectrónico, las dos tecnologías proporcionan una salida en μV que corresponde a un valor de irradiancia solar. El primero está compuesto por una célula de semiconductores, el cual al estar en presencia de fotones se excitan los electrones ubicados en la banda de Valencia del material provocando un salto de los electrones a la banda de conducción, formando los pares electro-huecos (Juntura P. N., 2017). Este tipo de tecnología es de bajo costo a comparación de los sensores termoelectrónicos, pero la precisión de estos es menor, esto se debe a que tiene un espectro visible de longitud de onda entre 400 nm a 1.100 nm. El segundo tipo de transductores utiliza la temperatura en sus mediciones, esta conformado por una termopila de color negro para absorber la radiación solar. La termopila al elevar su temperatura conduce el calor a una resistencia térmica que traducirá la diferencia de temperaturas en una tensión (Benito, 2018). Esta tecnología es de mayor precisión porque abarca todas las longitudes de onda de la radiación solar desde 300 nm a 3.000 nm (Tom Stoffel, 2010).

El dispositivo de medida más utilizado es el piranómetro, esto se debe a la versatilidad en sus medidas, la facilidad en la instalación y la diferencia precios respecto al pirheliómetro. Estos dispositivos son utilizados en la medición de la irradiancia solar global, para esta medición es necesario posicionar el instrumento en una superficie horizontal fija. También, puede ser utilizado para medir la irradiancia solar difusa, en esta medida es necesario instalar el equipo en estructura que bloquee la componente de directa, existen diferentes plataformas, pero los más utilizados son las bandas de sombra y los discos de sombra, estos suelen estar pintados de negro para evitar la reflexión y afectar las medidas por el sensor (Tom Stoffel, 2010) (M.C. Kotti, 2014). Además, este mismo instrumento puede ser usado para medir la irradiancia solar reflejada o de albedo posicionándolo de forma invertida y horizontal, de acuerdo con las recomendaciones por el *World Meteorological Organization* (WMO) este dispositivo debe estar ubicado a una altura entre uno y dos metros del suelo (Kipp&Zonen, 2010). Por otro lado, el pirheliómetro es únicamente usado para determinar la irradiancia solar directa en un punto en específico, este elemento debe estar instalado en un seguidor solar automático, esto es de carácter obligatorio porque el sensor necesita mantener una alineación directa con el sol para iluminar la cavidad de medida del dispositivo desde el amanecer hasta la puesta del sol (Tom Stoffel, 2010). De igual manera, la componente directa de la irradiancia solar puede ser calculada con el resultado de la diferencia entre la irradiancia solar global y la irradiancia solar difusa sobre el seno del ángulo de altura solar, estos valores deben ser tomados en la misma ubicación y al mismo tiempo para disminuir el margen de error (M.C. Kotti, 2014) (P. BAJONS, U. WERNHART and H. ZEILER, 1998).

Esto muestra un panorama donde el piranómetro es el radiómetro más usado gracias a su polivalencia para medir distintos componentes de la irradiancia solar. En el caso de Colombia, para la creación del Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia en el año 2.017 se tuvieron en cuenta 96 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) con piranómetros del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 34 piranómetros del Centro de investigación de la caña de azúcar (Cenicaña), 15 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), 10 del El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE) y 28 de La Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz) (IDEAM, UPME, 2017). Expresando que la calibración de los 183 piranómetros era imperativa antes de la ejecución de este proyecto, ya que los datos recopilados serían fundamentales para la elaboración de un informe que documentaría el comportamiento de la radiación solar en todo el territorio colombiano, dejando ver cuales son los lugares con mayor potencial energético de este recurso y de esta manera el gobierno impulsaría las iniciativas que deseen aprovechar las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) en la producción de energía eléctrica, como se establece en la Ley 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014, art. 5).

En el documento se menciona que se realizó una segunda jornada de calibración en agosto del 2013 en la ciudad de Cartagena, donde se calibraron los piranómetros patrones secundarios para posteriormente calibrar los piranómetros de campo. También, se hace referencia que la información utilizada en el estudio fue de años pasados hasta el año de 2016 (IDEAM, UPME, 2017). Se puede interpretar que los equipos radiométricos de este estudio fueron usados por periodos donde la sensibilidad de estos mismos no fue recalculada, como lo recomienda la *International Organization for Standardization* (ISO) que este tipo de equipos radiométricos deben tener una calibración de su sensibilidad cada 2 años, esto es necesario para evitar sesgos en las medidas y proporcionar información precisa con una incertidumbre mínima (International standardd (ISO: 9060), 2023) (International standardd (ISO:9847), 2018). Suponiendo que exista una falta de calibración de los elementos de medida la información proporcionada en el documento, y precisamente en los mapas de irradiancia solar en la superficie nacional y en los análisis del potencial energético puede estar erróneos provocando subestimaciones del recurso o sobrestimaciones. Cuando en una ubicación se lleva a cabo un proyecto de generación a gran escala donde el recurso energético fue subestimado el impacto puede ser beneficioso para la planta porque el sistema de generación podrá generar mayor electricidad de lo planeado. El problema es cuando el recurso es sobrestimado y la planta de generación no alcanza a producir la potencia nominal esperada, comenzando a producir pérdidas económicas para la empresa. Es por este motivo, que la calibración de los elementos de medición puede impedir el peor escenario para un proyecto de esta índole.

La calibración de un piranómetro constituye un proceso fundamental en el cual se determina la sensibilidad, una magnitud que actúa como el factor de conversión. Esta sensibilidad desempeña un papel esencial en la transición de la señal de salida del piranómetro, generalmente expresada en tensiones pequeñas, a la medida precisa de irradiancia solar. El *datalogger* es el componente que recibe la señal de voltaje, la almacena y es el encargado de llevar a cabo esta conversión, asegurando así la fiabilidad de los datos recopilados. En el contexto colombiano, la calibración de piranómetros carece de un formato estandarizado, lo que subraya la importancia de recurrir a normas internacionales reconocidas. Este vacío en la estandarización ha llevado a la adopción de normativas internacionalmente aceptadas, reguladas por organizaciones especializadas, como la *International Organization for Standardization* (ISO). La implementación de estas normas proporciona un marco sólido y confiable para la calibración de piranómetros en Colombia, garantizando la consistencia y precisión de las mediciones realizadas (IDEAM, 2017). Según estos estándares existen diferentes formas de calibración de los elementos radiométricos, como del piranómetro y del pirheliómetro, pero se basan en la comparación de las medidas entre dos equipos radiométricos. Uno de estos es el dispositivo para calibrar y el otro es el equipo de referencia el cual debe tener una calibración no mayor a 2 años, debe ser clasificado como patrón secundario cómo lo especifica la norma ISO 9060 (International standardd

(ISO:9060), 2018) y la sensibilidad debe contar con la trazabilidad de estar calibrado con el *World Radiometric Reference* (WRR). El WRR es un centro de investigación y meteorología ubicado en Davos del país Suiza nombrado por *World Meteorological Organization* (WMO) como referencia mundial de radiométrica en 1979 (C Fröhlich, 1991).

En el proceso de calibración de piranómetros, se pueden emplear dos enfoques distintos. La primera modalidad implica la comparación con otro piranómetro considerado como referencia. Este tipo de calibración se divide en dos métodos: puede llevarse a cabo en un entorno controlado, con condiciones de iluminación y temperatura rigurosamente gestionadas, o al aire libre, donde se replican las mismas condiciones en las que el piranómetro de campo realiza sus mediciones regulares (International standard (ISO:9847), 2023). La segunda metodología para calibrar un piranómetro consiste en compararlo con un pirheliómetro. En este caso, las mediciones se llevan a cabo al aire libre, requiriendo tanto un pirheliómetro como un piranómetro de referencia que mida la irradiancia solar difusa. Para calcular la irradiancia solar global a partir de la irradiancia solar directa y la difusa, se multiplica el valor de la irradiancia solar directa por el seno del ángulo de altura solar, y después sumándole el valor de la irradiancia solar difusa (International standard (ISO:9846), 1993). Es importante destacar que la calibración de un pirheliómetro solo puede realizarse mediante la comparación con otro pirheliómetro. Este enfoque de calibración garantiza mediciones precisas y confiables en situaciones que involucran la irradiancia solar.

Cuando un piranómetro es calibrado correctamente y cuenta con un certificado de calibración con trazabilidad, se documenta la sensibilidad específica calculada durante el proceso de calibración. Además de esto, se debe prestar atención al equipo electrónico encargado de recibir la señal del piranómetro y llevar a cabo la conversión correspondiente. Entre estos dispositivos, los *dataloggers* destacan por su especialización en la recopilación de información sobre diversas variables, tales como las temperaturas de los sistemas fotovoltaicos, la irradiancia solar, las diferencias de potencial y las corrientes eléctricas (M. Fuentes, M. Vivar, J. M. Burgos, J. Aguilera y J. A. Vacas, 2014). Por ende, estos elementos también requieren una calibración en los canales de entrada, donde se reciben las lecturas de los transductores encargados de medir las variables previamente mencionadas (Creus, 2009). En este contexto, el proceso de adecuación de los elementos destinados a proyectos de captura de información de variables se extiende, pero su realización es imperativa. La ausencia de bases sólidas en el desarrollo de estas iniciativas podría acarrear consecuencias inesperadas en el futuro. La meticulosidad en la calibración y preparación de estos elementos es esencial para garantizar mediciones precisas y fidedignas.

En la ejecución del Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia en el año 2017, aunque no se dispone de información detallada sobre la meticulosidad con la que se llevó a cabo el proceso de preparación previamente mencionado, el documento puede considerarse como un punto de partida para comprender el comportamiento de la irradiancia solar en el país. No obstante, este Atlas podría ser considerado como un punto de partida para comprender el comportamiento de la irradiancia solar en Colombia. A raíz de esto, las empresas interesadas podrían iniciar el desarrollo de propuestas destinadas a aprovechar este recurso en la generación de electricidad, lo cual se vuelve crucial dada la importancia de diversificar la matriz energética del país. Es importante abordar este tema en el contexto colombiano, ya que la energía eléctrica en el país es vulnerable a las fluctuaciones climáticas, como se mencionó anteriormente. En épocas de escasa lluvia y elevadas temperaturas, los costos de electricidad se incrementan notablemente. Por esta razón, el gobierno, a través de la ley 1715 de 2014, regula la integración de energías renovables no convencionales en el sistema interconectado nacional, reconociendo la necesidad de buscar una diversificación del sistema energético para garantizar una mayor estabilidad y sostenibilidad en el suministro eléctrico del país (Congreso de Colombia, 2014) (Hurtado, 2022).

El gobierno nacional tiene como objetivo, en el mejor escenario, alcanzar una participación de 239 MW de energías renovables no convencionales, específicamente en energía solar, para el año 2028 (UPME, 2015). Para lograr este objetivo, es imperativo aprovechar de manera óptima la irradiancia solar en el territorio colombiano. Las formas predominantes de generación eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía solar incluyen los sistemas de energía solar por concentración y los sistemas fotovoltaicos. Los sistemas de energía solar por concentración se basan en la utilización exclusiva de la irradiancia solar directa. Estos sistemas, que emplean tecnologías como colectores parabólicos o torres centrales, dirigen los rayos solares hacia un punto específico a través de heliostatos. Este enfoque permite calentar un fluido que, de manera directa o indirecta, impulsa una turbina conectada a un generador. Aunque esta modalidad de generación es más costosa en comparación con los sistemas fotovoltaicos, presenta la ventaja de poder utilizar mecanismos de almacenamiento de temperatura, lo que garantiza la producción de energía eléctrica en momentos de ausencia de sol; sin embargo, según los mapas satelitales de irradiancia solar global en Colombia, la irradiancia solar directa es relativamente baja, aproximadamente 1000 kWh/m² menos en comparación con otros países de América Latina, como Chile y Bolivia (World Bank Group, ESMAP and Solargis, 2023) (IEA, ISA, 2019). Por esta razón, los proyectos de sistemas por concentración no resultan viables en Colombia. En contraste, los sistemas fotovoltaicos son altamente aplicables en el contexto colombiano, ya que aprovechan tanto la irradiancia solar directa como la irradiancia solar difusa. Por estas razones, todos los generadores de electricidad con energía solar en Colombia emplean esta tecnología.

Los precios de los componentes de los sistemas solares fotovoltaicos han experimentado una reducción significativa en los últimos años, lo que facilita la adquisición de estos equipos. La versatilidad de estos sistemas constituye una ventaja destacada, ya que tienen la capacidad de conectarse a la red eléctrica para inyectar energía o pueden operar de manera independiente, suministrando electricidad a cargas específicas para las cuales fueron diseñados. Adicionalmente, los sistemas fotovoltaicos se adaptan a las necesidades individuales, ya que pueden ser diseñados para generar potencias mínimas, desde 100 vatios, hasta sistemas capaces de generar grandes potencias en Megavatios. La fuente de energía de estos sistemas son los fotones de energía solar, que transportan energía en forma de campo electromagnético. La generación de corriente eléctrica en las celdas solares de los paneles sigue el mismo fenómeno físico que ocurre en los piranómetros con sensores fotoeléctricos mencionados anteriormente, mediante el fenómeno de pares electro-huecos (Juntura P. N., 2017). En el ámbito colombiano, se han establecido regulaciones específicas para respaldar la creación de proyectos de energía basados en fuentes no convencionales (IEA, ISA, 2019) (Congreso de Colombia, 2014).

El gobierno colombiano es el ente encargado de crear las regulaciones que apoyan este tipo de proyectos, estas van a impactar de manera positiva al desarrollo de proyectos vinculados a fuentes no convencionales de energía, generando estímulos que abarcan desde apoyo financiero hasta incentivos fiscales. Dentro de los incentivos fiscales establecidos, destaca la significativa reducción del impuesto de renta, que puede llegar hasta el 50 % de la inversión y aplicarse durante un período de 5 años a partir del inicio de la obra (Congreso de Colombia, 2014). Adicionalmente, se ha establecido la exención del pago de impuestos para los dispositivos y servicios indispensables para la ejecución de la actividad, siempre y cuando estén avalados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Este beneficio busca aliviar la carga tributaria asociada a los elementos necesarios para llevar a cabo proyectos de energía no convencional en el país. Otro incentivo importante dentro de este marco legal determina que los equipos, herramientas, maquinarias e insumos que no sean de producción nacional y resulten esenciales, requiriendo su importación para la ejecución de proyectos con fuentes no convencionales de energía, estarán exentos del pago de aranceles a la entrada del país (UPME, 2015). Esta medida busca promover la adquisición de tecnología y componentes internacionales para fortalecer la capacidad de implementación de proyectos de energías renovables en Colombia.

Según las últimas versiones del plan indicativo de expansión de la generación, se prevé que los sistemas fotovoltaicos realizarán un importante aporte de energía eléctrica al sistema interconectado nacional mediante la instalación de 16 plantas solares. Este aporte se distribuirá entre 13 plantas de generación que entrarán en funcionamiento en 2023 y 3 plantas adicionales programadas para los primeros meses de 2024. Esta iniciativa tiene como resultado una contribución significativa de 1.606 MW de energía eléctrica proveniente de fuentes no convencionales, específicamente del recurso solar (UPME, 2023). En paralelo, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) ha consolidado un portafolio de proyectos con aprobación de conexión al sistema en las fases 2 y 3. La cantidad total de energía esperada de este portafolio asciende a 8.267 MW (UPME, 2023). Esta proyección indica que, para el final del primer trimestre de 2024, aproximadamente el 19,42 % de este portafolio estará en funcionamiento, contribuyendo de manera significativa a la diversificación de la matriz eléctrica del país. Este avance hacia la diversificación de fuentes energéticas no solo impulsa la expansión de la capacidad de generación, sino que también fortalece la confiabilidad del sistema eléctrico nacional, por disminuir la dependencia del recurso hídrico, proporcionando una mayor estabilidad y seguridad en el suministro de energía para el crecimiento sostenible del país.

Por todo lo expuesto en este ensayo, la búsqueda de la complementariedad energética en Colombia a través de fuentes no convencionales, como la energía solar, se presenta como un respaldo crucial para la transición energética propuesta por el actual gobierno. En este contexto, los proyectos que se enfocan en aprovechar el recurso solar en Colombia requieren contar con información precisa y segura. Esta necesidad se basa en la importancia de llevar a cabo diseños precisos de los sistemas solares fotovoltaicos. La calibración de los elementos radiométricos, como el piranómetro, antes de la toma de lecturas emerge como un aspecto de vital importancia en este proceso. La adecuada calibración sirve como una salvaguarda contra sesgos en las mediciones, lo que a su vez evita errores en el cálculo del potencial del recurso solar para la producción de energía eléctrica. En el peor de los escenarios, la sobrestimación de este recurso podría desencadenar pérdidas económicas para la empresa generadora de electricidad. Es crucial destacar que la existencia de riesgos de este tipo en la elaboración de propuestas puede llevar a que las empresas se abstengan de participar en subastas de generadores. Esta reticencia podría resultar en una desaceleración, e incluso un retraso, en la implementación de la complementariedad y la transición energéticas del país. Dichos retrasos podrían afectar negativamente los planes establecidos por la Unidad de Planeación Minero Energética, generando un impacto significativo en el cronograma previsto para estas iniciativas.

Referencias

- Adler F., B. M. (2013). *Energía solar fotovoltaica*. Universidad Nacional de Mar de Plata.
- Benito, J. L. (21 de Marzo de 2018). *Energy News*. Obtenido de Fotovoltaica: <https://www.energynews.es/que-son-y-para-que-sirven-los-piranometros/>
- C Fröhlich. (1991). History of solar radiometry and the world radiometric reference. 28, 111. Obtenido de https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/28/3/001/meta?casa_token=2OiqGzeeoWYAAAAA:GJYv3FqHRNKIBHWte9Dc81-IByuO9brle53GbbTQavT2DFzExAltyEXudSAXEIuw47d-5cwKZFQQ55sdu0hLQfQs-sy7
- CELSIA. (05 de 05 de 2018). *CELSIA*. Obtenido de Paneles solares ¿Cómo funcionan y qué son?: <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son/>
- Colombia Risk Analysis. (2021). *Sector risk monthly renewable energy*. ISSUE #012. Colombia Risk Analysis. Obtenido de https://mcusercontent.com/ec9dfc3030795aea9dd7ee1b6/files/eb39a235-86c5-89fa-1e76-8d5cf508bb64/Renewable_Energy_012_Risk_Monthly_November_2021.pdf

- Congreso de Colombia. (1994). *LEY 143 DE 1994*. por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia de energética. Obtenido de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1650315>
- Congreso de Colombia. (2014). *LEY 1715 DE 2014*. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Creus, A. (2009). *Instrumentos industriales, su ajuste y calibracion* (Tercera ed.). Barcelona: Marcombo S.A. Obtenido de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LSiU0piawq0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=calibraci%C3%B3n+de+instrumentos+medici%C3%B3n&ots=i_GiKEGnjD&sig=xVLT6dNtp6j64UPSve5DY5Uyfow#v=onepage&q=calibraci%C3%B3n%20de%20instrumentos%20medici%C3%B3n&f=false
- Hernández, J., Escobar, I., & Castilla, N. (2001). *La Radiación Solar en Invernaderos Mediterráneos*. España. 18-26 p.: Revista *Horticultura* 157. Obtenido de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Hort/Hort_2001_157_18_27.pdf
- Hurtado, O. L. (2022). *Energías Renovables Como Estrategia Para La Diversificación De La Matriz Energética De Colombia*. UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA. BARRANCABERMEJA: UNAD. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/344716317.pdf>
- IDEAM. (2017). *NORMALIZACIÓN Y CALIBRACIÓN DE SENSORES DE RADIACIÓN*. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/normalizacion-y-calibracion-de-sensores-de-radiacion>
- IDEAM, UPME. (2017). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. Bogota: Imprenta nacional de Colombia. Obtenido de <https://www.andi.com.co/Uploads/RADIACION.compressed.pdf>
- IEA, ISA. (2019). *Solar Energy Mapping the road ahead*. IEA. Obtenido de https://iea.blob.core.windows.net/assets/7de8652c-47b0-474e-8642-cbf20245b1f6/Solar_Energy_Mapping_the_road_ahead.pdf
- International Hydropower Association. (2022). *Hydropower Status Report Sector trends and insights*. IHA Central Office. Obtenido de <https://www.hydropower.org/publications/2022-hydropower-status-report>
- International standard (ISO:9060). (2018). *Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. ISO: 9060.
- International standard (ISO:9846). (1993). *Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrhelimeter*. ISO:9846.
- International standard (ISO:9847). (2023). *Solar energy - Calibration of pyranometers by comparison to a reference pyranometer*. ISO: 9847.
- J.L. Balenzategui(1), J. De Lucas(2), M. Molero(1), J. Cuenca(1), F. Fabero(1), A. González-Leiton(1), J.P. Silva(1), E. Mejuto(1). (2022). *Caracterización de Radiómetros de Cavidad para la Medida de Irradiancia Solar con Trazabilidad al WRR/SI. Ponencia nº S1-2-R12-OP*. Congreso español de meteorología.

- Juntura P. N. (2017). SEMICONDUCTORES:. Escuela de Educación Técnico Profesional N° 460 Guillermo Lehmann.
- Kipp&Zonen. (2010). *Manual de Usuario CMP series*. Delftechpark: Kipp & Zonen B.V.
- M.C. Kotti, A. A. (2014). Estimation of direct normal irradiance from measured global and. *Energy*, 382-392.
- M.Fuentesa, M.Vivar, J.M.Burgos, J.Aguileraa, J.A.Vacase. (2014). Designofanaccurate, low-costautonomousdataloggerforPVsystem monitoringusingArduino™thatcomplieswithIECstandards. *SolarEnergyMaterials&SolarCells*, 529-543.
- Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. (s.f.). LA RADIACIÓN SOLAR. Agencia Estatal de Meteorología. Obtenido de https://www.aemet.es/documentos/es/el tiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf
- P. BAJONS, U. WERNHART and H. ZEILER. (1998). A SENSOR ELEMENT FOR DIRECT RADIATION MEASUREMENT. *Solar Energy*, vol. 63, 125-134.
- PARDO, H. J. (2022). ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DE LAS HIDROELECTRICAS EL QUIMBO E HIDROITUANGO EN COLOMBIA. 24-26. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8954>
- Paredes, J. R., & Ramírez C., J. J. (2017). *Energías renovables variables y su contribución a la seguridad energética: Complementariedad en Colombia*. Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Energ%C3%ADas-renovables-variables-y-su-contribuci%C3%B3n-a-la-seguridad-energ%C3%A9tica-Complementariedad-en-Colombia.pdf>
- Portillo, G. (2023). *Metereología en Red*. Obtenido de Irradiancia: <https://www.meteorologiaenred.com/irradiancia.html>
- Rodriguez Murcia, H. (2009). *Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n28/n28a12.pdf>
- Tom Stoffel, D. R. (2010). *CONCENTRATING SOLAR POWER*. National Renewable Energy Laboratoy. Recuperado el 16 de 11 de 2023
- UPME. (2015). *PLAN ENERGETICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO ENERGÉTICO 2050*. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA , Bogota. Obtenido de chrome-extension://ehttps://www1.upme.gov.co/Documents/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf
- UPME. (2016). *Informe de gestión UPME 2016*. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2023). *Plan Indicativo de Expansión de la Generación 2023-2037*. Bogotá D.C.: República de Colombia Ministerio de Minas y Energía.
- World Bank Group, ESMAP and Solargis. (2023). *ENERGYDATA:INFO*. Obtenido de Global solar atlas: <http://globalsolaratlas.info>.