

DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE UNA MICRO-RED DE ESTACIONES RADIOMÉTRICAS EN CASTILLA Y LEÓN

DE SIMÓN-MARTÍN, Miguel ^(1,2); GONZÁLEZ-PEÑA, David ^(1,3)

ALONSO-TRISTÁN, Cristina ^(1,3); DíEZ-MEDIAVILLA, Montserrat ^(1,3)

miguel.simon@unileon.es

⁽¹⁾ Grupo de Investigación SWIFT (Solar and Wind Feasibility Technologies)

⁽²⁾ Universidad de León, Dpto. de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática

⁽³⁾ Universidad de Burgos, Dpto. de Ingeniería Electromecánica

RESUMEN

En la presente comunicación se expone el diseño, configuración, calibración, particularidades y puesta en marcha de una micro-red de estaciones radiométricas situada en el centro de Castilla y León con objeto de mejorar la información climática disponible y la caracterización del recurso solar en la zona. En la actualidad, la micro-red está compuesta por dos estaciones ubicadas, una de ellas (estación SWIFT0001) en la Escuela Politécnica Superior de Burgos (42.351°N, -3.688°W, 857 m.s.n.m.), y la otra (estación SWIFT0002) en las instalaciones de una planta de producción fotovoltaica en Astudillo, provincia de Palencia (42.202°N, -4.269°W, 813 m.s.n.m.). Uno de los principales aspectos novedosos de la micro-red, y que la diferencia de otras existentes, es que, aparte de incorporar dispositivos de medición de variables climáticas convencionales, tales como temperatura ambiente en bulbo seco, humedad relativa, dirección y velocidad de viento, cantidad de agua precipitada o radiación solar global en el plano horizontal, se dispone de medición de radiación solar global en el plano vertical en las cuatro direcciones cardinales: Norte, Sur, Este y Oeste. Además, en la estación SWIFT0001 se dispone de dispositivos de medición de radiación solar difusa en el plano horizontal mediante disco solar con seguidor, radiación directa y medida de radiación solar difusa en el plano vertical en las cuatro direcciones cardinales mediante un novedoso dispositivo de sombreado patentado. Por otro lado, en la estación SWIFT0002, se dispone de la posibilidad de medición de la producción fotovoltaica de cuatro paneles solares monocristalinos adecuadamente modelados. Para todos los dispositivos se han aplicado los procedimientos y recomendaciones de medición, calibración y mantenimiento especificados por organismos internacionales como la Organización Meteorológica Mundial (WMO), el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL), la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), garantizando así la calidad de las mediciones realizadas. La información proporcionada por la micro-red permitirá profundizar en el análisis y modelado de sistemas solares y, especialmente, en aquellos integrados en la edificación.

Palabras clave: Instrumentación, estación radiométrica, tratamiento de datos.

1. Introducción

Muchos autores consideran que la Energía Solar constituye la fuente de energía primaria del planeta Tierra, pues de ella no sólo se aprovechan los efectos fotovoltaico y térmico, sino que de ella derivan también la energía eólica, la energía hidráulica, la energía mareomotriz, mareomotérmica, de biomasa... [1]–[3]. Además no se debe pasar por alto que constituye un elemento fundamental a tener en cuenta para considerar el crecimiento de cosechas, tasas de evaporación de agua del terreno, efectos climáticos, procesos biológicos, etc. La Humanidad ha observado y estudiado el Sol desde tiempos ancestrales y ha tratado de aprovechar sus efectos sobre la superficie terrestre para mejorar su calidad de vida desde entonces: desde la adecuación del diseño de edificios e infraestructuras, hasta la producción directa de electricidad mediante células de Silicio, pasando por distintos tipos de dispositivos para calentar, cocinar alimentos, automatizar diversos procesos, etc. La energía solar es totalmente gratuita y está disponible para todo el mundo, siempre que cuente con los dispositivos necesarios para su aprovechamiento, que cabe decir, cada vez son más baratos, accesibles y eficientes.

No obstante, el aprovechamiento de este recurso, mediante cualquiera de las tecnologías disponibles en la actualidad, resulta ineficiente o incluso inútil si no se cuenta con una evaluación adecuada del mencionado recurso y no se dispone de técnicas que permitan su modelado y predicción ante determinadas condiciones bajo un nivel aceptable de incertidumbre. Para la construcción de dichos modelos, imprescindibles cuando no se dispone de mediciones directas, es preciso recopilar información mediante la instrumentación de medida adecuada. Además, las medidas de irradiancia solar son fundamentales para:

- Estudiar las transformaciones de energía en un sistema Tierra-atmósfera.
- Analizar las propiedades y distribución de la atmósfera, los elementos que la constituyen, tales como aerosoles en suspensión, vapor de agua, ozono, etc.
- Estudiar la distribución y variaciones de la radiación incidente, reflejada y total.
- Satisfacer las necesidades derivadas de las actividades de la biología, la medicina, la agricultura, la arquitectura, la ingeniería y la industria relacionadas con la radiación.

Cualquier modelo de estimación o predicción del potencial solar de una determinada localización necesita de mediciones precisas de diversas variables climáticas, dando lugar a las denominadas estaciones radiométricas [2], [4], [5]. Éstas suelen caracterizarse por la medición de:

- Temperatura ambiente en bulbo seco.
- Humedad relativa.
- Presión barométrica.
- Velocidad de viento.
- Dirección de viento.
- Número de horas de insolación.
- Irradiancia global sobre plano horizontal.
- Irradiancia difusa sobre plano horizontal.
- Irradiancia directa.

La construcción de determinados modelos para la determinación de la transmisividad de la radiación a través de la atmósfera terrestre también puede requerir el conocimiento de los denominados parámetros meteorológicos integrados en columna y de turbidez atmosférica [6]:

- Trayectoria mínima vertical de ozono.
- Trayectoria total vertical de NO₂.
- Cantidad de agua precipitada.
- Visibilidad.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la mayoría de las estaciones radiométricas sólo realizan mediciones de irradiancia sobre plano horizontal, siendo necesarios modelos (isótropos o anisótropos) para la extrapolación de mediciones a planos con distintos ángulos acimut y cenital, ya que es sobre plano inclinado y orientado la posición en la que se instalan la mayoría de los captadores solares, con objeto de aprovechar mayores niveles de irradiancia y salvar las limitaciones del espacio disponible.

1.1. Estaciones en tierra vs. mediciones por satélite

La medición de variables de irradiancia sobre la superficie terrestre puede realizarse a partir de dos tipos de fuentes:

- a) Medidas directas en estaciones climatológicas terrestres.
- b) Medidas indirectas mediante datos de satélite.

La medición directa de valores de irradiancia en tierra ofrece datos de muy alta resolución y precisión para ubicaciones específicas (pueden registrarse datos minutales). Sin embargo, los equipos precisan de determinadas tareas de mantenimiento tales como limpieza de los sensores de polvo, nieve, hielo... y pueden sombrearse esporádicamente por obstáculos en el horizonte. Si no se presta atención a los aspectos anteriores, las medidas podrían quedar invalidadas [7], [8].

Los inconvenientes anteriores pueden salvarse mediante la transformación de mediciones realizadas mediante redes de satélites, que miden, en distintos anchos de banda, la radiación reflejada por la superficie terrestre y, a partir de estos datos, infieren las magnitudes correspondientes a nivel de la superficie terrestre. Normalmente tienen una buena resolución temporal (las redes de satélites geoestacionarios toman instantáneas de la Tierra en intervalos de 15 a 30 minutos) y cubren toda la superficie terrestre. Sin embargo, cada píxel de las imágenes tomadas representa un rectángulo de varios kilómetros de lado, con lo que la medida para ubicaciones específicas debe promediarse a lo largo de amplias extensiones. Los satélites con órbitas polares ofrecen una mejor resolución espacial. Sin embargo, las mediciones con satélite tienen el inconveniente de que suelen confundir la luz reflejada por la nieve y por las nubes y tienen dificultades de cálculo en terrenos con grandes cambios de altitud (terrenos montañosos) y con alturas solares pequeñas [7]. Además, los costes de operación y mantenimiento de la red de satélites es mucho mayor que la de estaciones en tierra.

1.2. Redes radiométricas y bases de datos de irradiancia

Existen diversas redes radiométricas públicas y privadas en todo el mundo. En España, la red radiométrica principal es la de la *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)* que tiene como finalidad la medida de la radiación solar en sus diferentes componentes (global, difusa, directa y reflejada) y principales longitudes de onda (visible, infrarroja y ultravioleta). Está compuesta por 58 estaciones repartidas a lo largo de todo el territorio español, de las cuales, para Castilla y León existen únicamente las estaciones descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Relación de estaciones de la AEMET para Castilla y León.

ID	Provincia	Localidad	Precisión	VARIABLES MEDIDAS*
2030	Soria	Soria	Horaria	RG, RB, RD, P, T, HR, PLU, V
2331	Burgos	Villafraja	Horaria	P, T, HR, PLU, V
2422	Valladolid	Valladolid	Horaria	RG, RB, RD, P, T, HR, PLU, V
2661	León	Virgen del Camino	Horaria	RG, RB, RD, P, T, HR, PLU, V

*P: presión barométrica, T: temperatura ambiente, HR: humedad relativa, PLU: lluvia, V: velocidad y dirección de viento, RG: irradiancia global horizontal, RB: irradiancia directa, RD: irradiancia difusa sobre plano horizontal.

Los equipos de los que dispone la Red están montados en el plano horizontal y están conectados a sistemas de adquisición de datos que almacenan valores horarios por integración de registros minuto a minuto y que, mediante conexión de red, se conectan con la sede de AEMET en tiempo real.

También existen distintas bases de datos de irradiación, tanto de estaciones en tierra como de imágenes de satélite, de acceso público o privado. Dentro de las de acceso público son destacables las de la *Red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío)* [9], *NREL-MIDC* [10], *HELIOS-IES* [11], *NASA* [12], *PVGIS* [7] y *SODA-Esra* [13]. Sin embargo, aunque constituyen un buen conjunto de partida para la mayoría de las aplicaciones, estos datos están restringidos a determinadas ubicaciones, de las cuales, salvo la *Red SIAR*, no disponen de datos precisos en Castilla y León y la resolución temporal normalmente es de orden mensual o anual.

2. Objetivos

En este trabajo se persiguen los siguientes objetivos:

1. Determinar las condiciones necesarias para establecer un conjunto de estaciones radiométricas terrestres que permitan, de forma sencilla evaluar el recurso solar aprovechable en instalaciones energéticas convencionales e integradas en la edificación.
2. Describir la micro-red de estaciones radiométricas SWIFT.

3. Descripción de las instalaciones

A la hora de poner en marcha una estación radiométrica, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones fundamentales:

1. La instrumentación solar debe ubicarse en un entorno con la menor proyección de sombras posible, no sólo de los elementos del entorno, sino también de los propios instrumentos de la estación.
2. La instrumentación debe colocarse de forma que sea sencilla la realización de las labores de limpieza y mantenimiento según los protocolos establecidos.
3. El cableado debe estar protegido de la actuación de la intemperie y de la fauna. Además el cableado expuesto debe ser el mínimo posible.
4. El acceso a la estación debe limitarse a aquel personal encargado del mantenimiento y calibración de los equipos.
5. La vegetación entorno a la estación, si existe, debe mantenerse por debajo de los umbrales que puedan afectar a las mediciones.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, hemos comenzado la definición de una micro-red de estaciones radiométricas en la Comunidad Autónoma de Castilla y León con el objetivo de mejorar la precisión de mediciones de irradiancia solar en la zona y reforzar así los datos disponibles por la AEMET. Dichas estaciones se encuentran situadas en las ubicaciones marcadas en la figura 1.

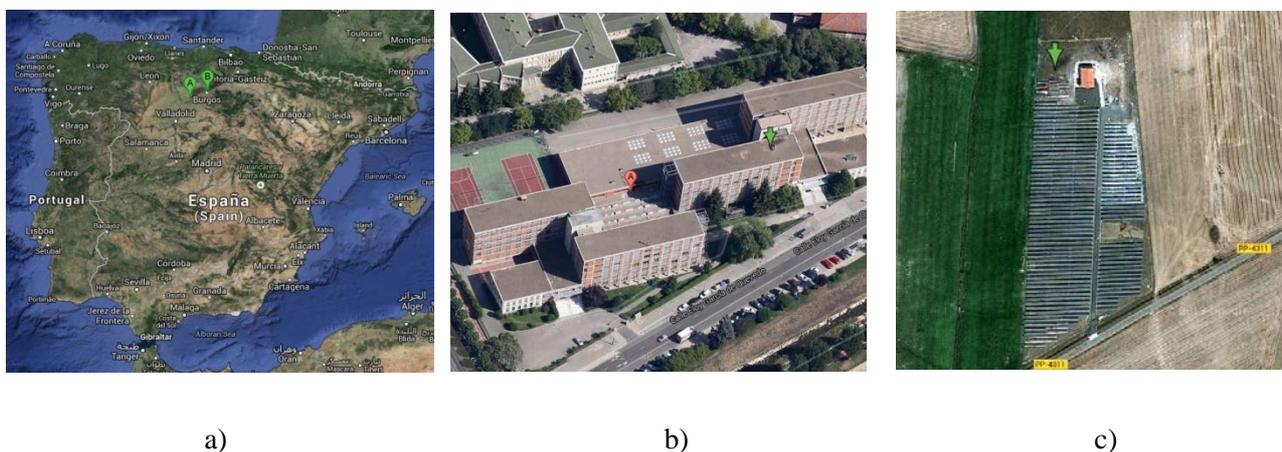


Figura 1. Ubicación de las estaciones de la micro-red SWIFT. a) Ubicación en la geografía española siendo A: SWIFT0002 y B: SWIFT0001. b) Estación SWIFT0001. c) Estación SWIFT0002.

3.1. Estación SWIFT0001

La estación de medidas radiométricas SWIFT0001 se sitúa en la azotea del edificio A de la Escuela Politécnica Superior de Burgos, Campus de Río Vena, cuyas coordenadas geográficas son $42,351^{\circ}\text{N}$ y $-3,688^{\circ}\text{W}$ a una altitud sobre el nivel del mar (incluida la altura del edificio) de 857 m. La instalación incluye un total de 14 equipos de medición que pueden apreciarse en la figura 2 y que se encuentran enumerados en la tabla 2.

Se trata de una estación radiométrica completa, con la medición de las variables climáticas más relevantes para la construcción y validación de modelos y series temporales de valores de irradiancia de distinta índole. Destaca especialmente por estar diseñada para la medida de dichas variables sobre plano vertical en distintas orientaciones, concretamente las direcciones cardinales. Son muy pocas las estaciones radiométricas que poseen este tipo de mediciones y que cada vez se van haciendo más necesarias conforme aumenta el nivel de integración de dispositivos de captación solar en la edificación.

En este sentido se realiza la medición tanto de irradiancia global como de irradiancia difusa. Como además se dispone de mediciones de irradiancia directa mediante pirheliómetro, es posible validar las características de cualquiera de las componentes, pues se sabe que:

$$G_{\theta_{zp},\gamma} = B_{\theta_{zp},\gamma} + D_{\theta_{zp},\gamma} + R_{\theta_{zp},\gamma} = \cos \theta_{sp} B + R_d D_0 + R_r R_0 \quad (1)$$

donde θ_{zp} y γ son los ángulos cenital y azimut respectivamente de la superficie de estudio, G es la irradiancia global, B es la irradiancia directa, D es la irradiancia difusa, R es la irradiancia reflejada o de albedo y θ_{sp} el ángulo que forma la posición del Sol con la normal a la superficie. R_d y R_r son los factores de transformación de irradiancia del plano horizontal (subíndice 0) al plano inclinado.

Muy pocas estaciones radiométricas realizan la medición de irradiancia difusa sobre plano inclinado en orientaciones distintas de la dirección Ecuatorial (Sur en este caso). En este sentido hemos desarrollado un prototipo [14] que, basado en los sistemas de medición de radiación difusa mediante anillo de sombreamiento, es capaz de realizar dicha medición simultáneamente sobre cuatro sensores ubicados en cuatro direcciones ortogonales y con la posibilidad de modificar el ángulo de inclinación de forma independiente entre 60 y 90 grados con la vertical. Dicho dispositivo puede observarse en la figura 2.c. En un principio, éste mide irradiancia difusa y reflejada, pero puede anularse esta última mediante la instalación de las pantallas adecuadas. Así mismo, las medidas tomadas deben corregirse con el factor de corrección apropiado que cuantifique la cantidad de irradiancia procedente del cielo (y del terreno si es el caso) que queda oculta del ángulo de visión del sensor por la propia configuración geométrica del anillo lobular de sombreamiento [15], [16].

Tabla 2. Relación de instrumentos de medición de en la estación SWIFT0001.

ID	Cant.	Equipo	Marca/Modelo	Variable
01	1	Sonda de temperatura ambiente en bulbo seco y humedad relativa.	VAISALA/HMD50U/Y	Temperatura ambiente. Humedad relativa.
02	1	Barómetro.	Campbell Scientific/CS106	Presión atmosférica.
03	1	Anemómetro.	RM YOUNG/03101	Velocidad de viento.
04	1	Veleta.	RM YOUNG/03301	Dirección de viento.
05	1	Pluviómetro.	RM YOUNG/52203	Agua precipitada.
06	1	Piranómetro horizontal.	Hukseflux/SR11	Radiación global horizontal.
07	1	Piranómetro sobre seguidor con disco de sombreamiento.	Hukseflux/SR11	Radiación difusa horizontal.
08	1	Pirheliómetro.	Hukseflux/DR01	Radiación directa.
09	1	Piranómetro en plano vertical dirección Norte.	Ph. Schenk 8101	Radiación global plano vertical dirección Norte.
10	1	Piranómetro en plano vertical dirección Sur.	Ph. Schenk 8101	Radiación global plano vertical dirección Sur.
11	1	Piranómetro en plano vertical dirección Este.	Ph. Schenk 8101	Radiación global plano vertical dirección Este.
12	1	Piranómetro en plano vertical dirección Oeste.	Ph. Schenk 8101	Radiación global plano vertical dirección Oeste.
13	1	Dispositivo de medición de radiación solar difusa MK6.	Fabricación propia	Radiación difusa en plano vertical direcciones Norte, Sur, Este y Oeste.
14	1	Datalogger.	Campbell/CR3000	Almacenamiento de datos.



Figura 2. Relación de equipos de la estación SWIFT0001. a) Visión general de la estación. b) Torre de medición de radiación global sobre plano vertical, veleta y anemómetro. c) Torre de medición de irradiancia difusa mediante anillo lobular. d) Pluviómetros y seguidor con disco solar para la medida de irradiancia difusa sobre plano horizontal, irradiancia global horizontal e irradiancia directa con pirheliómetro.

3.2. Estación SWIFT0002

La estación de medidas radiométricas SWIFT0002 se encuentra situada en la localidad palentina de Astudillo, en las coordenadas geográficas (42,202 °N, -4,269 °W) y una altitud sobre el nivel del mar de 813 m. El emplazamiento coincide con una instalación fotovoltaica y la estación de medición se encuentra a ras de suelo en una zona despejada de la parte alta de la instalación, tal y como muestra la figura. La estación se compone de 9 equipos de medición, descritos en la tabla 3.

Cabe destacar que dentro de esos equipos se encuentra un dispositivo experimental para la medición de la energía fotovoltaica generada por cuatro paneles fotovoltaicos orientados en las cuatro direcciones cardinales: Norte, Sur, Este y Oeste y, aunque inicialmente en posición vertical, con la posibilidad de regular diferentes grados de inclinación. Dichos paneles se encuentran conectados en un esquema de conexión aislado por lo que precisan de unos elementos disipadores de la energía generada, en nuestro caso una serie de luminarias LED que se pueden observar en la figura 3.b. La monitorización de la energía producida por estos dispositivos permitirá mejorar la definición de modelos de producción fotovoltaica sobre superficies verticales y orientadas, tales como fachadas de edificación, marquesinas, vehículos, etc.

Tabla 3. Relación de instrumentos de medición de en la estación SWIFT0002.

ID	Cant.	Equipo	Marca/Modelo	Variable
01	1	Sonda de temperatura ambiente en bulbo seco y humedad relativa.	VAISALA/HMD50U/Y	Temperatura ambiente. Humedad relativa.
02	1	Barómetro.	Campbell Scientific/CS106	Presión atmosférica.
03	1	Anemómetro.	RM YOUNG/03101	Velocidad de viento.
04	1	Veleta.	RM YOUNG/03301	Dirección de viento.
05	1	Pluviómetro.	RM YOUNG/52203	Agua precipitada.
06	1	Panel PV en plano vertical dirección Norte.	Cuatum Solar/Suniva USA 60 Mono	Potencia/Energía eléctrica plano vertical dirección Norte.
07	1	Panel PV en plano vertical dirección Sur.	Cuatum Solar/Suniva USA 60 Mono	Potencia/Energía eléctrica plano vertical dirección Sur.
08	1	Panel PV en plano vertical dirección Este.	Cuatum Solar/Suniva USA 60 Mono	Potencia/Energía eléctrica plano vertical dirección Este.
09	1	Panel PV en plano vertical dirección Oeste	Cuatum Solar/Suniva USA 60 Mono	Potencia/Energía eléctrica plano vertical dirección Oeste.
10	1	Piranómetro en plano vertical dirección Norte.	Hukseflux/SR11	Radiación global plano vertical dirección Norte.
11	1	Piranómetro en plano vertical dirección Sur.	Hukseflux/SR11	Radiación global plano vertical dirección Sur.
12	1	Piranómetro en plano vertical dirección Este.	Hukseflux/SR11	Radiación global plano vertical dirección Este.
13	1	Piranómetro en plano vertical dirección Oeste.	Hukseflux/SR11	Radiación global plano vertical dirección Oeste.
14	1	Datalogger.	Campbell/CR3000	Almacenamiento de datos.

4. Calibración y mantenimiento de equipos

Para ambas estaciones se deben definir protocolos de mantenimiento y calibración de los equipos. Éstos siguen las directrices y recomendaciones de buenas prácticas citadas por la *Organización Meteorológica Mundial (WMO)* [17], [18], el *Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL)* [19], la *Comisión Internacional de Iluminación (CIE)* [20] y el *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)* [21]. En términos generales debe garantizarse la:

1. Limpieza de cúpulas de piranómetros de polvo, hielo y nieve diariamente.
2. Vigilancia de ausencia de reflejos que puedan alcanzar los sensores.
3. Revisión mensual del buen estado del cableado y funcionamiento del datalogger.
4. Verificación de ausencia de suciedad u obstrucciones en el pluviómetro.
5. Calibración con frecuencia mínima bianual de los sensores de temperatura ambiente, humedad relativa, barómetro, pluviómetro, anemómetro y veleta.
6. Calibración en campo con frecuencia mínima anual de piranómetros para irradiancia global e irradiancia difusa, así como de pirheliómetros.
7. La calibración de piranómetros de irradiancia difusa debe realizarse a una inclinación 45 grados.
8. Calibración de piranómetro patrón con frecuencia mínima bianual por comparación de medidas con piranómetros de mayor rango.

5. Almacenamiento y tratamiento de datos

Las mediciones tomadas por los sensores descritos en cada una de las estaciones radiométricas se ha realizado mediante un datalogger de la marca *Campbell Scientific* modelo CR3000 en la estación SWIFT0001 y CR1000 en la estación SWIFT002. El cableado entre los sensores y el datalogger debe adecuarse a la señal transmitida (diferencia de potencial, corriente, frecuencia de pulsos, etc.) y garantizar que no se produce una pérdida de la señal registrada por la resistencia de los conductores.

Los datos registrados finalmente deben incluirse en una base de datos con una estructura adecuadamente definida que permita el fácil acceso a cualquier registro deseado. En la organización de dicha estructura debe conseguirse un balance entre el rendimiento computacional que ofrecen las

formas normalizadas y la eficiencia y agilidad de consulta que permiten los particionamientos o des-normalizaciones [22].

En este caso se ha optado por dos claves primarias, una correspondiente al identificador de la estación y la otra a la fecha-hora de registro y tantos atributos como variables climáticas se registren. Para facilitar el acceso a los datos consultados con más frecuencia, la tabla de datos se ha particionado en dos: una correspondiente a todas las mediciones de irradiancia de distinta índole y otra correspondiente al resto de variables climáticas. La primera tabla podría volver a particionarse almacenando por separado los valores correspondientes al plano horizontal de los registrados sobre plano vertical en sus respectivas orientaciones.

Antes de realizar el almacenamiento de los datos se deben aplicar los protocolos de pre-procesamiento y garantía de calidad y consistencia de los datos [23]–[25].

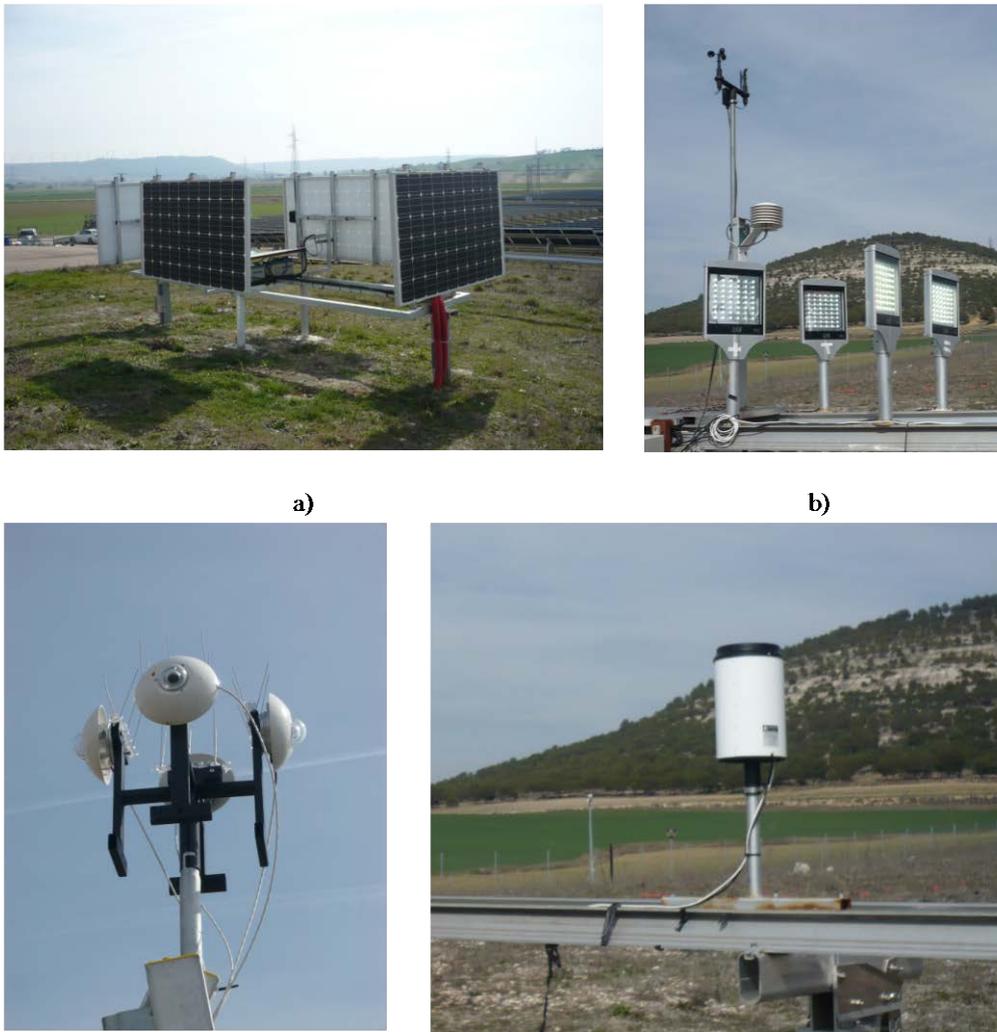


Figura 3. Relación de equipos de la estación SWIFT0002. a) Módulos fotovoltaicos verticales. b) Anemómetro, veleta, sonda de temperatura y humedad relativa y lámparas para disipación de potencia de los módulos. c) Torre de medición de irradiancia global sobre plano vertical. d) Pluviómetro.

6. Resultados y casos de aplicación

Como se comentó en el apartado 1.2, la resolución de las mediciones de variables climáticas y radiativas en la Comunidad de Castilla y León son muy limitadas y los datos ofrecidos por *AEMET* están restringidos a determinadas capitales de provincia. En la figura 4 se expone una comparativa de las mediciones de irradiancia global sobre plano vertical en las cuatro direcciones cardinales y las discrepancias obtenidas respecto a 5 modelos comúnmente utilizados en la literatura (1 modelo isótropo y 4 modelos anisótropos) [4], [26]–[31] para la determinación de dichos valores, indicando

que es preciso evaluar un ajuste de dichos modelos para aumentar su fiabilidad de aplicación. Finalmente, la figura 5 muestra dos mapas de la región de los valores de irradiancia global horizontal interpolados a partir de datos de la red de estaciones *AEMET*, la *Red SIAR* y la incorporación de los datos de la micro-red SWIFT.

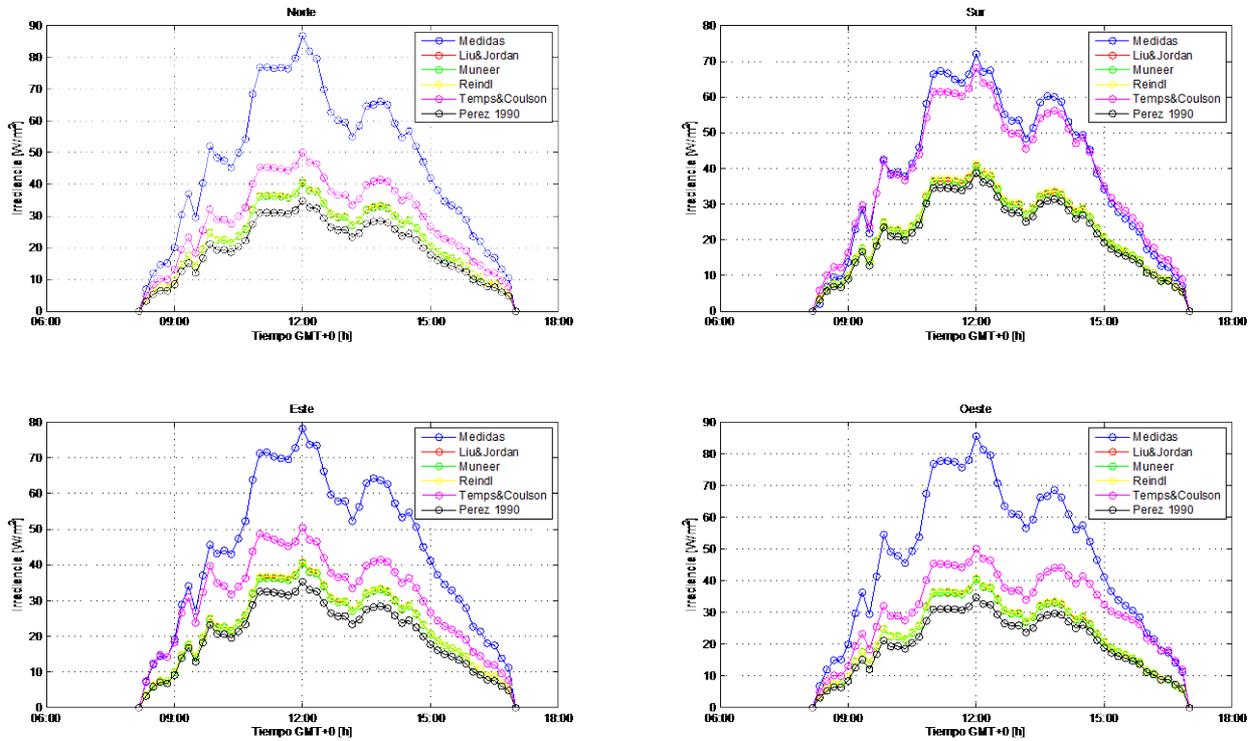


Figura 4. Ejemplo de irradiancia global vertical en las cuatro direcciones cardinales obtenidas mediante mediciones directas y mediante modelos (día cubierto, estación SWIFT0001).

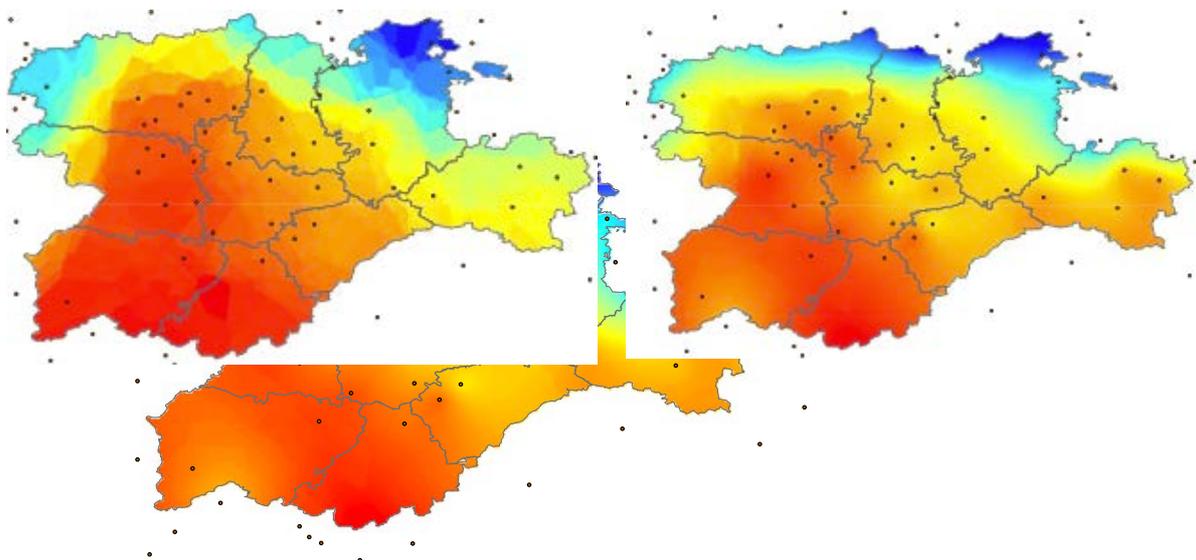


Figura 5. Mapas de irradiancia global media diaria anual de la Comunidad obtenidos mediante técnicas de interpolación espacial.

7. Conclusiones

En este artículo hemos presentado las bases de diseño, características y consideraciones en la puesta en marcha de una micro-red de estaciones radiométricas en Castilla y León formada, hasta el momento, por dos estaciones que realizan mediciones completas y de alta precisión de variables climáticas y de irradiancia, no sólo en el plano horizontal sino también sobre plano vertical. Se ha conseguido de esta forma mejorar la precisión de la red radiométrica nacional en esta zona. Además, permitirá captar datos para mejorar el modelado de irradiancia sobre superficies verticales.

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido financiación económica del Gobierno Español a través del Proyecto de Investigación concedido ENE2011-27511.

Referencias

- [1] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*. California (USA): Academic Press, 1983.
- [2] F. Vignola, J. Michalsky, y T. Stoffel, *Solar and Infrared Radiation Measurements*, vol. 1, 1 vols. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [3] Z. Sen, «Solar energy in progress and future research trends», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, n.º 4, pp. 367-416, 2004.
- [4] V. Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, vol. 1, 1 vols. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [5] D. R. Myers, *Solar Radiation. Practical Modeling for Renewable Energy Applications*, vol. 1, 1 vols. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [6] V. Badescu, C. A. Gueymard, S. Cheval, C. Oprea, M. Baciu, A. Dumitrescu, F. Iacobescu, I. Milos, y C. Rada, «Accuracy analysis for fifty-four clear-sky solar radiation models using routine hourly global irradiance measurements in Romania», *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 85-103, jul. 2013.
- [7] European Commission, «PVGIS: PV Potential Estimation Utility», *Photovoltaic Geographical Information System*. [En línea]. Disponible en: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>. [Accedido: 28-mar-2014].
- [8] C. Rigollier, O. Bauer, y L. Wald, «On the clear sky model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas — with respect to the heliosat method», *Sol. Energy*, vol. 68, n.º 1, pp. 33-48, ene. 2000.
- [9] Gobierno de España, «Red SIAR - <http://portal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>».
- [10] National Renewable Energy Laboratory, «NREL-MIDC - <http://www.nrel.gov/midc/>».
- [11] Universidad Politécnica de Madrid, «HELIOS-IES - <http://helios.ies-def.upm.es/>».
- [12] NASA, «NASA Surface meteorology and Solar Energy - <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?>».
- [13] MINES Paris Tech, «SODA-Esra - http://www.soda-is.com/eng/services/services_radiation_free_eng.php».
- [14] M. de Simón-Martín, M. Díez-Mediavilla, C. Alonso-Tristán, y D. González-Peña, «Dispositivo de medida de radiación difusa y procedimiento de utilización del mismo», 09-may-2014.
- [15] J. Ramírez-Faz, R. López-Luque, y F. J. Casares, «Development of synthetic hemispheric projections suitable for assessing the sky view factor on vertical planes», *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 279-286, feb. 2015.
- [16] S. M. Ivanova, «Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part I – Vertical surfaces», *Sol. Energy*, vol. 95, pp. 376-391, sep. 2013.
- [17] World Meteorological Organization, *Guide to the Global Observing System*, 2013.^a ed., vol. 1, 1 vols. WMO, 2013.
- [18] World Meteorological Organization, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, 2010.^a ed., vol. 1, 1 vols. WMO, 2010.
- [19] M. Sengupta, A. Habte, S. Kurtz, A. Dobos, S. Wilbert, E. Lorenz, T. Stoffel, D. Renné, C. Gueymard, D. R. Myers, S. Wilcox, P. Blanc, y R. Perez, «Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications». NREL, 2015.
- [20] «International Commission on Illumination. <http://www.cie.co.at/index.php/Publications/Standards>».
- [21] Gobierno de España, «CIEMAT - <http://www.energiarenovables.ciemat.es/index.php?pid=1000>».
- [22] «Fundamentos Y Prácticas De Bases De Datos de Alegre Gutiérrez, Enrique/fernández Díaz, Ramón Ángel/sánchez González, Lidia 978-84-9773-040-2». [En línea]. Disponible en: http://www.todostuslibros.com/libros/fundamentos-y-practic-as-de-bases-de-datos_978-84-9773-040-2. [Accedido: 30-mar-2015].
- [23] T. Muneer y F. Fairouz, «Quality control of solar radiation and sunshine measurements – lessons learnt from processing worldwide databases», *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 23, n.º 3, pp. 151-166, ene. 2002.
- [24] J. E. Hay, «Solar radiation data: Validation and quality control», *Renew. Energy*, vol. 3, n.º 4-5, pp. 349-355, jun. 1993.
- [25] H. P. Garg y S. N. Garg, «Measurement of solar radiation - II. Calibration and standarization», *Renew. Energy*, vol. 3, n.º 45, pp. 335-348, 1993.
- [26] T. Muneer, *Solar Radiation and Daylight Models*, 2nd ed., vol. 1, 1 vols. Oxford: ButterWorth-Heinemann, 2004.
- [27] B. Y. H. Liu y R. C. Jordan, «The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation», *Sol. Energy*, vol. 4, n.º 3, pp. 1-19, jul. 1960.
- [28] R. C. Temps y K. L. Coulson, «Solar radiation incident upon slopes of different orientations», *Sol. Energy*, vol. 19, n.º 2, pp. 179-184, 1977.
- [29] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, y R. Stewart, «Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance», *Sol. Energy*, vol. 44, n.º 5, pp. 271-289, 1990.
- [30] D. T. Reindl, W. A. Beckman, y J. A. Duffie, «Evaluation of hourly tilted surface radiation models», *Sol. Energy*, vol. 45, n.º 1, pp. 9-17, 1990.
- [31] G. S. Saluja y T. Muneer, «An Anisotropic Model for Inclined Surface Solar Irradiation», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 201, n.º 1, pp. 11-20, ene. 1987.