

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS
TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR
GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE
PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA**

Autor: Manuel Amaya Jiménez

Tutor: Dr. Isidoro Lillo Bravo

**Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS
TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR
GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE
PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA**

Autor:

Manuel Amaya Jiménez

Tutor:

Isidoro Lillo Bravo

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN
SOLAR GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA

Autor: Manuel Amaya Jiménez

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Ante todo, darle las gracias al profesor D. Isidoro Lillo Bravo por su inestimable ayuda y paciencia en el período que ha durado la resolución de este trabajo fin de grado. Encontrando siempre el tiempo necesario para resolver dudas y seguir con un criterio excelente las pautas necesarias para completarlo. Sin duda, he aprendido mucho.

A mi familia y amigos que siempre han estado ahí hasta la conclusión del trabajo. Han sido una constante de apoyo y comprensión en todo el proceso. Muchas gracias.

Manuel Amaya Jiménez

Sevilla, 2019

Resumen

El siguiente trabajo trata de identificar las diferencias en las medidas de Radiación Solar Global entre dos equipos, el piranómetro térmico y la célula fotovoltaica calibrada. A través de las medidas tomadas por ambos equipos en las instalaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla se realiza un estudio comparativo considerando los intervalos de tiempo entre las medidas el factor referencia en el mismo.

En primer lugar se realiza un estudio en detalle de casos concretos de medidas de Radiación Solar Global para días nublados y soleados, teniendo en cuenta la estabilidad/variabilidad de la radiación, la magnitud de esta, la temperatura ambiente y otros factores. Posteriormente se analiza la frecuencia de cambios de estado en lo denominado como transitorios.

El objetivo de este documento es detectar y confirmar la diferencia en las medidas de Radiación Solar Global entre ambos equipos y sus consecuencias en la producción de electricidad, afectando principalmente al dimensionado y funcionamiento de las plantas fotovoltaicas.

Abstract

The following analysis tries to identify the differences in the measures of Global Solar Radiation between two measurement equipment, the pyranometer and the calibrated cell. Through the measures taken by both equipments in the facilities of Escuela Técnica Superior de Ingeniería of the University of Seville, a comparative study is carried out, being the reference factor the time intervals between the measures.

Once analyzed the frequency of change of the Global Solar Radiation in a time interval, a more detailed study of specific cases was carried out, considering the stability / variability of the radiation, magnitude of the radiation, the environment temperature and others.

The objective of this document is to detect and confirm the difference of Global Solar Radiation between the measures of both equipment and its consequences in the production of electricity, giving an approximation of the magnitudes of these differences and consequences.

Agradecimientos	7
Resumen	9
Abstract	11
Índice	12
ÍNDICE DE TABLAS	14
ÍNDICE DE FIGURAS	16
1 INTRODUCCIÓN	19
2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	21
3 BASE DE DATOS	23
3.1 <i>Revisión Bibliográfica Inicial</i>	23
3.1.1 Medida de la Radiación Solar. Instrumentos de Radiación (I)	23
3.1.2 Desarrollo de modelos empíricos para estimar la radiación global solar en superficie horizontal: un caso de estudio	23
3.1.3 Compatibilidad de técnicas diferentes de medir la radiación global solar y aplicación para observaciones a largo plazo en el Observatorio de Izaña (Tenerife, España)	24
3.1.4 Comparación de Piranómetros vs Células calibradas fotovoltaicas para evaluación del rendimiento de equipos fotovoltaicos.	24
3.1.5 Tesis Doctoral: Caracterización estadística de los transitorios de la DNI. Aplicación a la plataforma solar de Almería	25
3.2 <i>Equipos para la Medida de la Radiación Solar Global</i>	25
3.2.1 Estación de recopilación de datos	27
3.2.2 Piranómetro Térmico	29
3.2.3 Célula Fotovoltaica Calibrada Compensada	30
3.2.4 Diferencias principales entre los equipos de medida	31
3.3 <i>Tratamiento de los datos</i>	32
3.3.1 Influencia de las fluctuaciones en la radiación	33
3.3.2 Transitorios de Radiación	37
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
4.1 <i>Importancia/Efectos de las fluctuaciones de la Radiación Solar</i>	38
4.1.1 Caso A: Estabilidad en la medida de la Radiación Solar Global	38
4.1.2 Caso B: Desfase en la medida de la Radiación Solar Global	41
4.1.3 Caso C: Variabilidad en la medida de la Radiación Solar Global	43
4.1.4 Otros casos de estudio en la medida de Radiación Solar Global	46
4.2 <i>Caracterización de los transitorios</i>	51
4.2.1 Matrices de transición y matrices de probabilidad.	51
4.2.2 Análisis de la frecuencia de cambios de estado (cuando $i \neq j$).	64
5 CONCLUSIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	78
Referencias	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias principales entre piranómetro y célula calibrada.	31
Tabla 2. Datos obtenidos de los equipos de medida.	32
Tabla 3. Casos analizados para días específicos.	33
Tabla 4. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (caso A).	41
Tabla 5. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (caso B).	43
Tabla 6. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (caso C).	46
Tabla 7. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (25 octubre).	47
Tabla 8. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (20 diciembre).	47
Tabla 9. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (20 septiembre)	48
Tabla 10. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (1 junio)	49
Tabla 11. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (20 junio)	50
Tabla 12. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (2013)	50
Tabla 13. Matriz de transición piranómetro para 5 segundos año 2013	52
Tabla 14. Matriz de probabilidad piranómetro para 5 segundos año 2013	53
Tabla 15. Matriz de transición célula para 5 segundos año 2013	54
Tabla 16. Matriz de probabilidad piranómetro para 5 segundos año 2013	55
Tabla 17. Matriz de transición piranómetro para 30 segundos año 2013	56
Tabla 18. Matriz de probabilidad piranómetro para 30 segundos año 2013	57
Tabla 19. Matriz de transición célula para 30 segundos año 2013	58
Tabla 20. Matriz de probabilidad piranómetro para 30 segundos año 2013	59
Tabla 21. Matriz de transición piranómetro para 60 segundos año 2013	60
Tabla 22. Matriz de probabilidad piranómetro para 60 segundos año 2013	61
Tabla 23. Matriz de transición célula para 60 segundos año 2013	62
Tabla 24. Matriz de probabilidad piranómetro para 60 segundos año 2013	63
Tabla 25. Matriz de probabilidad de cambio de estado piranómetro para 5 segundos año 2013	65
Tabla 26. Matriz de probabilidad de cambio de estado célula para 5 segundos año 2013	66
Tabla 27. Matriz de probabilidad de cambio de estado piranómetro para 30 segundos año 2013	67
Tabla 28. Matriz de probabilidad de cambio de estado célula para 30 segundos año 2013	68
Tabla 29. Matriz de probabilidad de cambio de estado piranómetro para 60 segundos año 2013	69
Tabla 30. Matriz de probabilidad de cambio de estado célula para 60 segundos año 2013	70
Tabla 31. Número de transiciones por intervalo de tiempo en 2013	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Espectro Solar Terrestre.	25
Ilustración 2. Radiación en un día determinado en la Estación GTER	26
Ilustración 3. Estación Meteorológica del GTER.	27
Ilustración 4. Piranómetro Térmico Kipp & Zonen CMP21	29
Ilustración 5. Célula Calibrada Compensada Atersa	30
Ilustración 6. Gráfico de Irradiancia y temperatura con estabilidad (5 segundos)	34
Ilustración 7. Gráfico de Irradiancia y temperatura con estabilidad (60 segundos)	34
Ilustración 8. Gráfico de Irradiancia y temperatura con estabilidad (1 hora)	35
Ilustración 9. Gráfico de Irradiancia y temperatura con variabilidad (5 segundos)	35
Ilustración 10. Gráfico de Irradiancia y temperatura con variabilidad (60 segundos)	36
Ilustración 11. Gráfico de Irradiancia y temperatura con variabilidad (1 hora)	36
Ilustración 12. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (caso A)	39
Ilustración 13. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=10\text{min}$ (caso A)	39
Ilustración 14. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=30\text{min}$ (caso A)	40
Ilustración 15. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=1\text{h}$ (caso A)	40
Ilustración 16. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (caso B)	41
Ilustración 17. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=10\text{min}$ (caso B)	42
Ilustración 18. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=30\text{min}$ (caso B)	42
Ilustración 19. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=1\text{h}$ (caso B)	43
Ilustración 20. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (26 agosto)	44
Ilustración 21. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=10\text{min}$ (caso C)	44
Ilustración 22. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=30\text{min}$ (caso C)	45
Ilustración 23. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=1\text{h}$ (caso B)	45
Ilustración 24. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (25 octubre)	46
Ilustración 25. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (20 diciembre)	47
Ilustración 26. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (20 septiembre)	48
Ilustración 27. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (1 junio)	49
Ilustración 28. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (20 julio)	50
Ilustración 29. Número de transiciones para un intervalo de 5 segundos.	71
Ilustración 30. Probabilidad de cambio de estado para un intervalo de 5 segundos.	72

Ilustración 31. Número de transiciones para un intervalo de 30 segundos.	73
Ilustración 32. Probabilidad de cambio de estado para un intervalo de 30 segundos.	73
Ilustración 33. Número de transiciones para un intervalo de 60 segundos.	74
Ilustración 34. Probabilidad de cambio de estado para un intervalo de 60 segundos.	74

1 INTRODUCCIÓN

A día de hoy la energía es uno de los principales pilares de la economía y motor de las necesidades básicas de la sociedad. El consumo eléctrico ha aumentado exponencialmente en los últimos años dando una situación de inestabilidad acorde a las condiciones climatológicas. Se han puesto en marcha proyectos tanto a nivel europeo como a nivel mundial sobre los efectos del uso de la energía en la producción eléctrica y su posible solución, dando como resultado el desarrollo e inversión en energías más limpias como la eólica, solar o geotérmica. A su vez, la Unión Europea analiza el impacto de la energía renovable en la creación de empleo y crecimiento de la economía, debido a la consumición de dos tercios de la electricidad en la UE por parte de los sectores de industria y servicio (CEPS, COWI, Directorate-General for Energy (European Commission), 2019).

La energía solar es una fuente ilimitada, lo que la hace fundamental en esta línea de trabajo debido a la capacidad de producir electricidad que se puede conseguir, a mayor o menor escala, respetando las condiciones del entorno de trabajo. Este estudio se centra en la energía solar fotovoltaica, concretamente, en los datos recopilados diariamente en las instalaciones que se encuentran en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

La Radiación Solar Global es la suma de la radiación solar difusa y directa. La fracción de la radiación que llega con una trayectoria definida entre el Sol y la superficie terrestre es la denominada Directa. La otra fracción que interacciona con las partículas y sustancias de la atmósfera para luego llegar a la superficie terrestre (sin trayectoria definida) es la denominada Difusa. Al tener dos equipos distintos, el estudio se centra en la radiación solar global y sus cambios de estado en un intervalo de tiempo, lo que se considera como los Transitorios de Radiación.

La principal diferencia entre ambos equipos se detecta en la radiación medida por el piranómetro, la cual es mayor que la medida por la célula calibrada, resultando una mayor fluctuación de la potencia eléctrica afectando al almacenamiento de la misma, la fiabilidad de la red y la calidad de la potencia. Este comportamiento se debe principalmente a la capacidad del piranómetro a captar un mayor espectro de la radiación solar en comparación con la célula calibrada. De aquí la importancia de buenos equipos de medida para el dimensionado de una planta fotovoltaica.

En el siguiente capítulo se expresan con más detalle los objetivos de este estudio. En el capítulo tercero se detalla la metodología de trabajo seguida, empezando por un repaso a la bibliografía existente en la actualidad para seguir con la obtención y uso de los datos necesarios como la Radiación Solar Global o los transitorios. En el cuarto capítulo se analizará los resultados del capítulo anterior, así como casos específicos de radiación basados en un día concreto. Por último, en el capítulo cinco se detalla las conclusiones y se definen futuras líneas de trabajo. Al final del documento se encuentra la bibliografía en la que se apoya este estudio dando la posibilidad de ampliar el conocimiento del lector.

2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

Anteriormente se ha descrito la importancia de la fluctuación o cambios de estado de la radiación solar en el dimensionado y funcionamiento de las plantas solares fotovoltaicas. En general, las principales variables a tener en cuenta para el diseño de una planta es la capacidad de producción que se necesite, así como el rendimiento de la instalación. En consecuencia, se busca reducir los daños en la instalación y controlar mejor la producción de electricidad, de aquí que el sensor usado para medir la radiación solar tenga que ser el adecuado.

El objetivo principal de este trabajo es demostrar que el uso del piranómetro para el dimensionado y control de las instalaciones solares fotovoltaicas es mejor que el uso de la célula calibrada, ya que obtiene un mayor rango del espectro y por lo tanto una medida real de la radiación. Por esta razón, si las medidas de radiación son obtenidas por medio de una célula fotovoltaica calibrada de la misma tecnología y encapsulación que el módulo fotovoltaico de la instalación, la aproximación al valor real de la radiación viene incluida y su cálculo depende del fabricante y del productor.

Es habitual utilizar la medida tomada por la célula porque te viene incorporada con la placa y aunque no recoja todo el espectro solar, suele dar una aproximación válida de la producción eléctrica de la planta. En el caso de elegir el piranómetro, habría que descontar una parte de la medida (2% por ejemplo en una primera hipótesis para que se asemeje a la medida por la placa.

Con este estudio, se busca reducir la incertidumbre entre las medidas de piranómetro y célula calibrada para conseguir una mayor aproximación de la Radiación Solar Global.

Los medidores de irradiancia como son los piranómetros y pirheliómetros entrañan un alto coste y mantenimiento constante. Por el contrario, radiómetros que tienen como sensor células fotovoltaicas son más baratos y tienen mejor tiempo de respuesta. El piranómetro tiene mayor precisión y linealidad en comparación a la célula calibrada que premia una respuesta más rápida con la consiguiente mejora en la detección de fluctuaciones rápidas de la irradiancia. Se han realizado estudios de medidas de las diferentes componentes de la radiación solar con piranómetro o variables que afecten a la absorción de la radiación por la placa, este proyecto se centra en las diferencias de radiación entre ambos sensores de medida.

La metodología seguida para conseguir el objetivo ha sido la siguiente:

- Revisión de bibliografía para definir el alcance y base del proyecto.
- Explicación del funcionamiento de la Estación de la Escuela y los datos recogidos.
- Cálculo de los transitorios de radiación a partir de la herramienta Matlab.
- Análisis de los transitorios y búsqueda de los casos más desfavorables.
- Cálculo de variables estadísticas para comprender la radiación los días más desfavorables.
- Conclusiones de los análisis y líneas futuras de trabajo.

3 BASE DE DATOS

La base de este proyecto se centra en la recopilación de los datos por parte de los equipos de medida situados en las instalaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. A su vez, se incluye una revisión inicial de la bibliografía existente sobre el tema con distintos artículos publicados en revistas, tesis doctorales y documentos relacionados con el estudio de este trabajo con el objetivo de conseguir una idea inicial de lo que se realizará después.

A continuación, se expone el funcionamiento de los equipos de medida utilizados en este trabajo (piranómetro y célula fotovoltaica calibrada) para luego mostrar una comparativa genérica de las principales diferencias entre los dos equipos.

Para concluir el capítulo se explica el proceso de tratamiento de datos para su posterior explotación en el análisis de radiación. Centrándose en la medida de la Radiación Solar Global y el cálculo de los transitorios, es decir, las fluctuaciones de la radiación en un intervalo de tiempo.

3.1 Revisión Bibliográfica Inicial

A continuación, se hace un repaso de distintos artículos publicados, así como tesis doctorales, que tratan los conceptos con lo que se trabaja en este proyecto. La medida de la radiación solar, los errores entre diferentes equipos de medida o el efecto que tiene las fluctuaciones de la irradiancia en el funcionamiento de la planta, son los casos analizados previamente.

3.1.1 Medida de la Radiación Solar. Instrumentos de Radiación (I)

Para las medidas de la radiación solar, en el volumen 3 de la revista “Renewable Energy”, capítulo 4, los autores H.P. Garg y S.N. Garg del Instituto Indio de Tecnología de Nueva Deli (India) definen los instrumentos usados para la medición de la Radiación Solar.

- Pirheliómetro: es un instrumento para medir el flujo de Radiación Solar Directa en incidencia normal. El instrumento generalmente está conectado a una montura ecuatorial accionada eléctricamente que rastrea el sol.
- Piranómetro: es un instrumento para medir la irradiancia directa y difusa que llega de todo el hemisferio. Este hemisferio suele ser la cúpula del cielo completo. Un piranómetro se puede usar en una posición inclinada, en cuyo caso también recibirá radiación reflejada en el suelo.
- Piranómetro con un dispositivo de sombra: es un instrumento que mide la irradiancia solar dentro de un ángulo sólido de 2π S, con la excepción del ángulo sólido subtendido por el disco solar.

En este capítulo hacen un análisis de la medida de la radiación global, en el cual explican el funcionamiento del piranómetro como instrumento de medida. El sensor más común en los piranómetros se basa en principios termoeléctricos, termo-mecánicos o fotovoltaicos. A diferencia del absorbente cónico de algunos pirheliómetros, el sensor de los piranómetros son superficies planas.

3.1.2 Desarrollo de modelos empíricos para estimar la radiación global solar en superficie horizontal: un caso de estudio

Hilmi Cenk, Cihan Demircan y Ali Kecebas comparan modelos empíricos (piranómetros) que existen y el desarrollo de nuevos modelos de estimación de la RSG en superficie horizontal en la ciudad de Mugliam, Turquía (Renewable and Sustainable Energy Reviews 81,2018). Con un programa de MATLAB comparan las series de datos recopilados por un piranómetro Kipp & Zonen entre los años 2007 y 2015 (incluidos) dando

como resultados una serie de errores (error relativo global, etc). Entre sus conclusiones está la división del estudio en dos periodos enero-junio y julio-diciembre, debido a la existencia de modelos que funcionan mejor para cada época del año.

Este artículo se aplica al estudio de este proyecto por la posibilidad de reducir los errores entre equipos de medida (a través de variables concretas) según el periodo de recopilación de datos a lo largo del año.

3.1.3 Compatibilidad de técnicas diferentes de medir la radiación global solar y aplicación para observaciones a largo plazo en el Observatorio de Izaña (Tenerife, España)

Este estudio analiza las medidas de la Radiación Solar Global Diaria (RSGD) entre distintos equipos. De título “*Compatibility of different measurement techniques of global solar radiation and application for long-term observations at Izaña Observatory*” (2017), el Observatorio Atmosférico de Izaña (Islas Canarias, Tenerife) realiza una intercomparación durante 1 año de instrumentos clásicos y modernos de radiación y de duración de luz solar. Estos son los siguientes:

- Piranómetro Kipp&Zonen CM-21 tomado en el marco de la Red de Radiación de Superficie Baseline
- Radiómetro de Banda Oculta Rotativo Multifilamento (MFRSR)
- Piranómetro Bimetálico (PYR)
- Radiación Solar Global Diaria estimada a partir de la duración de luz solar realizado por un registrador de sol Campbell-Stokes (CS) y un sensor Kipp&Zonen de sol (CSD).

Factores como la temperatura, la humedad relativa y el ángulo solar zenit se demuestran que afectan moderadamente a la RSGD. Se obtienen errores entre el 4 y 7 %, en consecuencia, reevalúan las medidas tomadas. Estos resultados demuestran que (1) la continua intercomparación de diferentes técnicas de RSGD ofrece importantes diagnósticos para identificar inconsistencias entre medidas de radiación y (2) las medidas obtenidas con instrumentos más clásicos y simples son consistentes con técnicas más modernas.

3.1.4 Comparación de Piranómetros vs Células calibradas fotovoltaicas para evaluación del rendimiento de equipos fotovoltaicos.

Un estudio ya realizado sobre el caso de estudio de este trabajo es el artículo realizado por Lawrence Dunn, Michael Gostein y Keith Emery para la 38ª conferencia de especialistas fotovoltaicos IEEE que tuvo lugar en Austin, TX, en junio 2012. El título del artículo es “*Comparison of Pyranometers vs Reference Cells for Evaluation of PV Array Performance*” y su objetivo es responder a las necesidades de una mejora en la medición de la radiación debido al crecimiento de la industria fotovoltaica.

En el artículo se analiza por qué los dispositivos de referencia fotovoltaicos son más adecuados para las aplicaciones fotovoltaicas y estimamos las incertidumbres típicas en las mediciones de irradiancia realizadas por piranómetros y dispositivos de referencia fotovoltaicos.

Concluyen afirmando que la cantidad de interés en la monitorización de una planta fotovoltaica es la irradiancia equivalente bajo el espectro solar de referencia IEC 60904-3 que produciría la misma respuesta eléctrica en la matriz fotovoltaica que la radiación solar incidente. Para aplicaciones de monitorización de plantas fotovoltaicas encuentran que las incertidumbres en las mediciones de irradiancia de este tipo son del orden de +/- 5% para los piranómetros de termopila y de +/- 2,4% para los dispositivos de referencia fotovoltaica (células).

Tomaremos estas aproximaciones como base en la comparación de este trabajo, con el fin de realizar una mejor aproximación al error entre ambas medidas.

3.1.5 Tesis Doctoral: Caracterización estadística de los transitorios de la DNI. Aplicación a la plataforma solar de Almería

Tesis doctoral dirigida por el Doctor y Catedrático de la ETSI Don Carlos Gómez Camacho y realizada en 1997 por la ahora profesora de la escuela Ana M^a María Marco Ramírez, que tiene como título “*Caracterización estadística de los transitorios de la DNI. Aplicación a la plataforma solar de Almería*”. Esta tesis estudia el fenómeno de los transitorios de la irradiación solar normal directa (DNI).

Esta tesis doctoral es base de este estudio a causa de su análisis de la variación de la radiación solar en distintos intervalos de tiempo, lo que conlleva el estudio de las fluctuaciones. Aunque se centre en la irradiación solar normal directa, su proceso de cálculo puede utilizarse en otras medidas de radiación como el análisis de la Radiación Solar Global.

3.2 Equipos para la Medida de la Radiación Solar Global

En las instalaciones donde se produce el efecto fotovoltaico es imprescindible evaluar la eficiencia de la planta a lo largo del tiempo con la finalidad de optimizar el funcionamiento diario de la instalación. La importancia de buenos sensores de radiación radica en la capacidad de los mismos para detectar una mayor distribución espectral, haciendo de ello un factor clave a tener en cuenta.

La distribución espectral de la irradiancia de luz solar se distribuye en un amplio espectro de ondas como se aprecia en la siguiente figura. El mapeo del espectro solar se llevó a cabo minuciosamente por primera vez en 1814 de la mano de Farunhofer, el cual publicó su mapa del espectro solar con un total de 574 líneas oscuras, siendo Kirchhoff y Bunsen en 1859 quienes demostraron la caracterización de las líneas oscuras.

El espectro solar en su mayoría se concentra en bajas longitudes de ondas (entre 0,3 y 3,3 μm) y su curva es similar a la distribución espectral de un radiador integral a 5777°K (ambas curvas representan un área total de 1367 W/m²). La banda de luz visible se encuentra entre las longitudes 0,4-0,7 μm , por lo que más de la mitad de la energía que percibimos es detectada. Queda fuera de alcance la radiación infrarroja y ultravioleta.

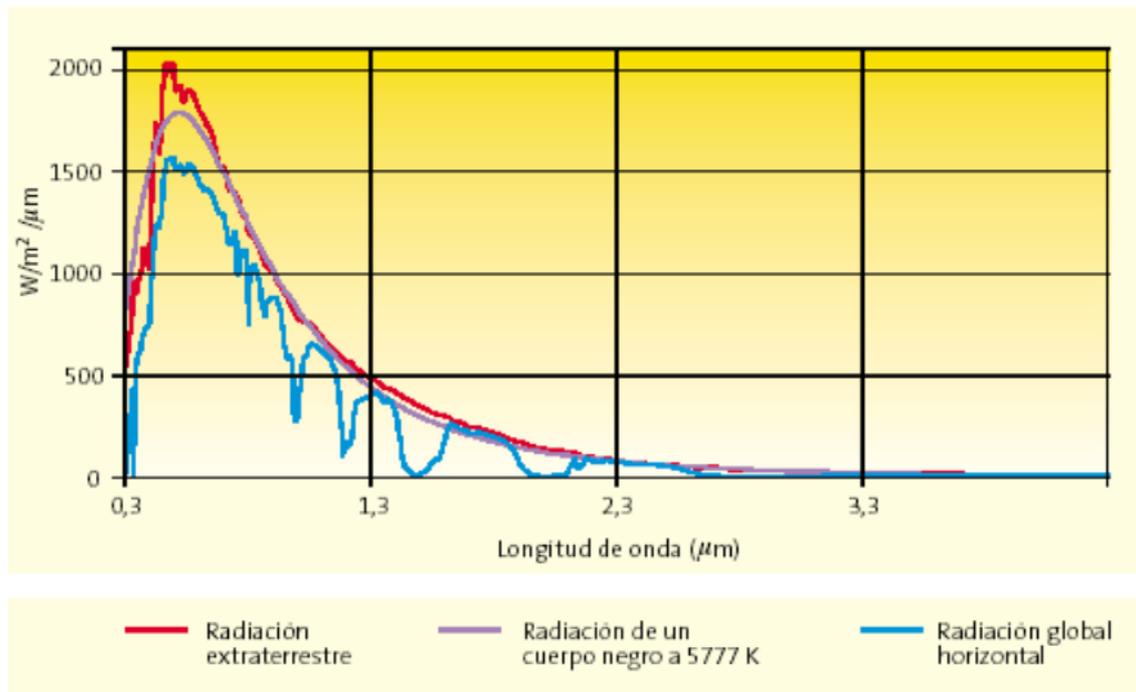


Ilustración 1. Espectro Solar Terrestre.

En la ilustración se aprecian las siguientes curvas:

- Radiación extraterrestre: radiación que llega a la atmósfera e interactúa con las partículas atmosféricas.
- Radiación de un cuerpo negro (integral) a 5777°K: es la curva teórica de emisión de un cuerpo negro a 5777K que es la temperatura estimada para la fotosfera solar.
- Radiación Global Horizontal: es la que llega a la superficie terrestre, principalmente medida sobre superficie horizontal, sumando la radiación directa y la difusa. Es aquella donde se centra este estudio.

La radiación solar es medida básicamente por instrumentos denominados radiómetros, los cuales dependiendo del tipo de radiación que se quiera medir, existen distintos tipos. En nuestro caso, la Radiación Solar Global se mide a través de un piranómetro, y generalmente, sobre una superficie horizontal.

- **Radiación Difusa:** es aquella que interactúa con las partículas atmosféricas antes de llegar a la superficie terrestre, es decir, no tiene una trayectoria intermitente. Se mide sobre superficie horizontal con un piranómetro que evite la visión del disco solar eliminando la componente directa.
- **Radiación Directa:** es aquella que recibe la superficie terrestre sin interactuar con ninguna partícula antes. Se mide con un pirheliómetro que consiste en medir la irradiancia sobre superficie horizontal.

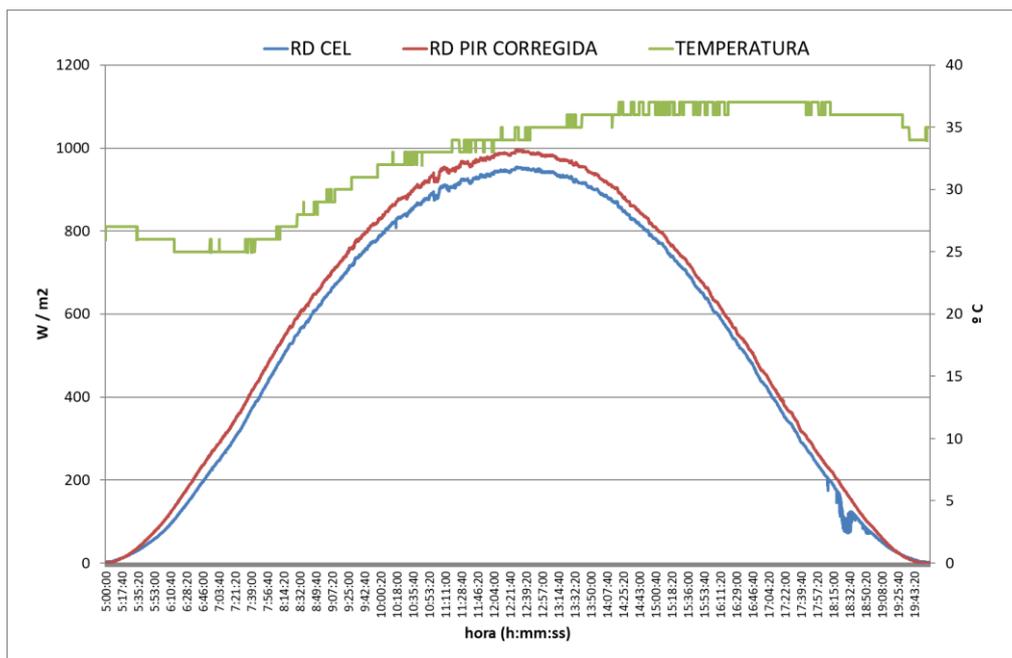


Ilustración 2. Radiación en un día determinado en la Estación GTER

En la figura se representa la radiación sobre superficie horizontal de las componentes directa y difusa, así como la global. Las medidas de radiación son de un día claro (cd), por ello la inexistencia de picos y sobresaltos en la curva de radiación, además de la baja radiación Difusa que hay.

De manera genérica se usa el término radiación para expresar la energía emitida por el sol. Ahora bien, concretando se distinguen los siguientes términos:

- **Irradiancia(I):** energía incidente sobre una superficie, por unidad de tiempo y área (W/m^2).
- **Irradiación(H):** energía incidente sobre una superficie y área en un período de tiempo (J/m^2).

3.2.1 Estación de recopilación de datos

La información utilizada en este estudio se recopiló a través de la Estación de Medida del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros (ETSI) de Sevilla, en el año 2013. La estación de medidas meteorológicas y radiométricas del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables se emplaza en la azotea del edificio de laboratorios L-1 de la ETSI desde diciembre del año 1998. Las coordenadas geográficas de la estación son 37, 40° de latitud Norte y 6,01° de longitud Oeste. Antiguamente, la estación se encontraba en el antiguo edificio de la ETSI situado en las coordenadas 37, 37° de latitud Norte y 6,00° longitud Oeste (siendo mínima la diferencia).



Ilustración 3. Estación Meteorológica del GTER.

La estación de medidas está integrada por un sistema automático que mide, trata y registra digitalmente los valores de variables radiométricas y meteorológicas de forma automática y continuada. En ella se incluyen también medidas de otros equipos que no están integrados en dicho sistema digital debido a la imposibilidad de tratar electrónicamente su salida (heliógrafo de Campbell-Stokes) o no están adaptados para la medida continua y rutinaria.

La composición de la estación es la siguiente:

- **Sensores:** captan el valor absoluto o la variación de una determinada magnitud física (señal de entrada) y la convierten en una señal de salida preparada para su tratamiento electrónico posterior. Dichos sensores están situados a dieciséis metros sobre el nivel del mar, instalados en la plataforma superior de las instalaciones de la estación de medidas.
- **Panel de conexión:** situado en la misma plataforma que los sensores, proporciona una interfaz física entre la unidad de adquisición y estos sensores. Su misión es facilitar y simplificar la instalación y el mantenimiento del cableado.
- **Unidad de adquisición:** realiza las funciones de amplificación de las señales de los sensores, muestreo y retención, multiplexión, y la conversión analógica/digital de las señales de los sensores que requieren todos o algunos de estos procesos con anterioridad a su tratamiento digital en la unidad central. En la actualidad esta unidad es un escáner HP 34970A de Hewlett-Packard, con las siguientes características:
 - Capacidad de hasta 120 canales analógicos, con tres ranuras para inserción de módulos multiplexores.
 - Resolución de 6 ½ dígitos (22 bits).
 - Velocidad de muestreo de hasta 250 canales por segundo.
 - Un módulo multiplexor HP 34901A con 20 canales de entrada (se pueden mezclar canales de 2 y 4 hilos), más de 2 canales protegidos (intensidad de hasta 1 amperio), velocidad de

muestreo de 60 canales por segundo y hasta 120 conmutaciones por segundo (canales digitales).

- **Unidad central:** compuesta por un ordenador personal, una tarjeta controladora para la conexión con la unidad de adquisición por medio de una interfaz HP-IB y un conjunto de programas de ordenador (software) para las funciones de; control del sistema de adquisición, interfaz de operador y programación y mantenimiento del módulo de adquisición. El programa de la unidad central está desarrollado en lenguaje HP-VEE.

Para una correcta medición de la disponibilidad energética en un lugar es imprescindible la medición de variables radiométricas como la radiación global, ultravioleta o térmica, además de variables meteorológicas como pueden ser la humedad, la temperatura o la velocidad del viento.

Los datos se pueden exportar en diferentes formatos, siendo recopilada la información en intervalos de 5 segundos. A efectos de medidas erróneas debido a fallos electrónicos, se sustituye el error por la media del valor previo y posterior a la toma de la medida errónea.

3.2.1.1 Equipos y sensores de medida

Hoy en día, el sistema automático de recopilación de datos agrupa los siguientes equipos (Morales, 2013):

- Pirheliómetro KIPP&ZONEN CHP1 para la irradiancia directa normal montado sobre un seguidor solar.
- Pirheliómetro Eppley NIP para la irradiancia directa normal montado sobre un seguidor solar.
- Piranómetro KIPP&ZONEN CM21 para la irradiancia global horizontal.
- Piranómetro KIPP&ZONEN CM6B para la irradiancia global horizontal.
- Piranómetro Campbell SR11 para la irradiancia global horizontal.
- Célula ATERSA para la irradiancia global horizontal.
- Piranómetro Middleton SK01-D para la irradiancia global sobre superficie inclinada (45° sur).
- Piranómetro EPPLEY 8-48 Blanco/Negro para la irradiancia difusa sobre superficie horizontal con banda de sombra de 7,40cm de anchura y 30,40cm de radio.
- Piranómetro EPPLEY 8-48 B/N para la irradiancia difusa sobre superficie horizontal con sistema de bolas y seguimiento.
- Piranómetro CAMPBELL SR11 para la irradiancia global sobre superficie inclinada (37° sur).
- Célula ATERSA para la irradiancia global sobre superficie inclinada (37° sur).
- Conjunto Anemómetro-veleta YOUNG modelo Wind Monitor-MA 05106 para la medida de velocidad y dirección del viento.
- Sonda barométrica Young modelo 61201 con puerto de presión Young modelo 61002 para la presión atmosférica.
- Sonda Young modelo 41372VC/VF compuesta por RTD de Platino de 1000 W y sensor capacitivo de humedad instalados en un protector de radiación solar para la medida de temperatura ambiente y humedad relativa.

Para la medida de irradiancia difusa horizontal con sombreado de bolas, los equipos están instalados sobre un seguidor 2AP de KIPP&ZONEN.

Como se ha comentado anteriormente la radiación solar global se mide a través de instrumentos denominados piranómetros. Ahora bien, según el principio físico que rige su funcionamiento se pueden dividir en tres categorías (nos centramos en la medida de radiación solar a corta longitud de onda):

- **Termomecánicos:** a través de una placa metálica, dos cintas aisladas térmicamente se unen para ver el grado de dilatación (curvatura) que soporta debido a la diferencia de temperatura de ambas cintas. Una de ellas está recubierta de una pintura absorbente de la radiación solar (en la mayoría negra) y la otra está recubierta de un material reflectante (blanco es lo habitual) que se mantiene protegida de la radiación. La deformación medida por métodos ópticos o mecánicos determina el valor de la radiación global solar media que llega a la superficie.
- **Termoeléctricos:** estos piranómetros usan una serie de uniones termoeléctricas que proporcionan una señal electrónica proporcional a la diferencia de temperatura entre una superficie absorbente negra y otra de referencia. Ésta última puede ser una superficie blanca reflectante o la parte interna de la base del sensor. El uso del negro en la superficie absorbente proporciona una absorción uniforme de la radiación en todo el espectro solar (rango de longitudes de onda de la luz emitida por el sol), específicamente para la que se quiere medir entre 0,15-4,0 μm . El elemento de detección generalmente está encerrado dentro de uno o dos domos de vidrios que pasan uniformemente la radiación hacia los sensores.
- **Fotovoltaicos:** entre los dispositivos fotoeléctricos, los instrumentos fotovoltaicos son los más numerosos en el campo de la medición de radiación solar. Un dispositivo fotovoltaico está hecho de un material semiconductor como el silicio. La unión p-n semiconductor se forma al unir un material con un electrón deficiente a un material con un exceso. Los átomos inciden en la unión p-n, produciendo una corriente eléctrica que surge del movimiento continuo del exceso de electrones y agujeros.

A continuación, se detalla las características de cada equipo en el que se basa este trabajo, así como las suposiciones que se realizan para el cálculo de la radiación global solar.

3.2.2 Piranómetro Térmico

De acuerdo al Estándar Internacional ISO 9060:1990 y la Organización Mundial Meteorológica, un piranómetro es el tipo designado de instrumento para la medida de la radiación solar hemisférica (global y difusa) integrada entre el rango de 0.3 a 3 μm (300 a 3000 nm). La estación utiliza un piranómetro de *Kipp & Zonen CMP21*, el cual está diseñado acorde al estándar internacional.

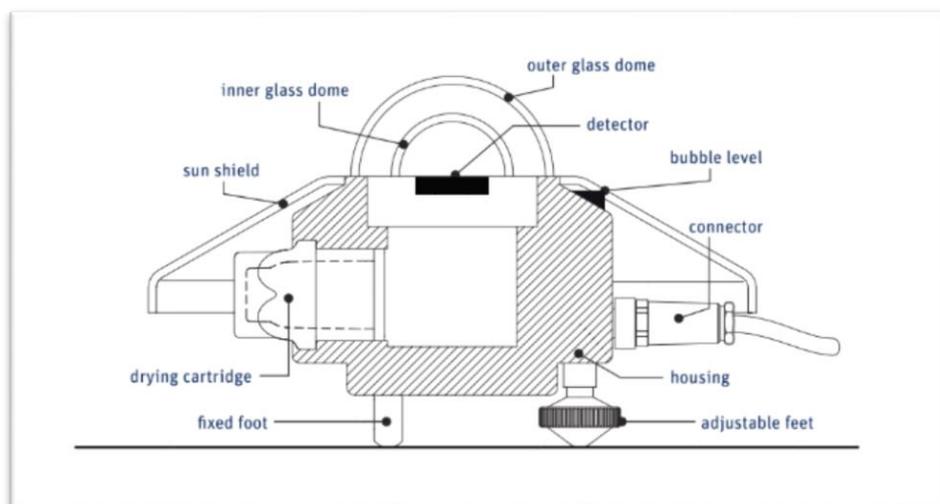


Ilustración 4. Piranómetro Térmico Kipp & Zonen CMP21

Este tipo de piranómetro está diseñado con una alta calidad para medir irradiancia de corta onda en una superficie plana (flujo radiante, W/m^2) cuyos resultados se obtienen a partir de la suma de la radiación solar directa y difusa reflejada por el hemisferio sobre el instrumento. Incluye también la medida de la cantidad de radiación entrante

la cual es reflejada por la superficie de debajo.

Para conseguir las características direccionales y espectrales requeridas, el piranómetro CMP 21 usa detectores termopila y cúpulas de cristal. Tiene niveles de burbuja incorporados y pies de nivelación ajustables. Los protectores solares a presión reducen el calentamiento solar y las carcasas. Este instrumento tiene una compensación de temperatura a través de un sensor incorporado para monitorizar la temperatura del equipo. Para el procesamiento de los datos a posteriori, incorpora los datos de la respuesta direccional y la temperatura que el usuario necesita.

Por último, el piranómetro está calibrado de acuerdo al anexo A.3 de ISO 9847 “Calibration of Field Pyranometers by Comparison to a Reference Pyranometer”. El anexo hace referencia a “Calibration Devices Using Artificial Sources” y las calibraciones son rastreadas por la Referencia Radiométrica Mundial en Davos, Suiza.

*Para más información se adjunta en la bibliografía la documentación técnica del equipo.

3.2.3 Célula Fotovoltaica Calibrada Compensada

La empresa Atersa del grupo elecnor es la responsable de la *Célula Calibrada 6'' Compensada* utilizada en la estación del GTER. Es un instrumento de medida electrónico de precisión que permite medir la radiación solar, la temperatura propia de la célula y la temperatura ambiente.

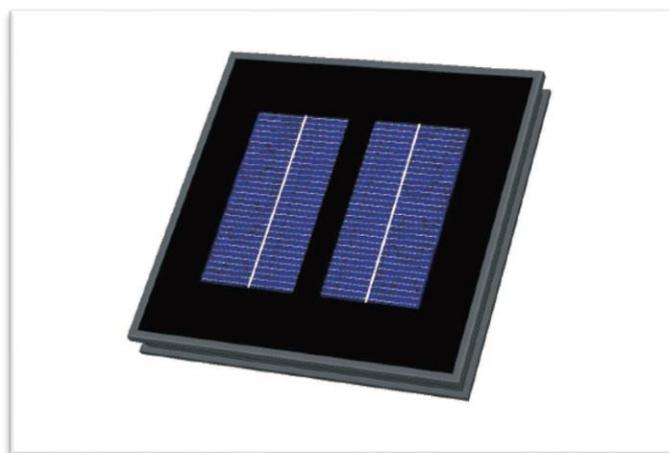


Ilustración 5. Célula Calibrada Compensada Atersa

Las salidas de señal dependen única y exclusivamente de la radiación, ya que el equipo incorpora compensación de temperatura. La configuración de salida es de 65mV DC redundantes, independientes y eléctricamente aisladas (para detectar obstáculos de suciedad en el cristal).

Características eléctricas:

- Relación Tensión-Radiación: 65 mVdc por salida=1000 W/m²
- Error Intrínseco de Medida: +/- 0,1%
- Error de Medida del Patrón de Referencia calibrado en el CIEMAT: +/-2,0%
- Impedancia Conectada a la Salida: >= 10MOhms **

Características físicas:

- Dimensiones (mm.): 266x266x35
- Peso (aprox.): 1,60 Kg

* Para más información se adjunta en la bibliografía la documentación técnica del equipo.

3.2.4 Diferencias principales entre los equipos de medida

Haciendo un repaso a la bibliografía existente, se resume en la siguiente tabla las principales diferencias entre los dos equipos utilizados en este estudio. Prestando especial atención al tiempo de respuesta, espectro solar (precisión) y el coste como parámetros más relevantes a la hora de decidir cuál utilizar.

	PIRANÓMETRO	CÉLULA CALIBRADA
Tipo de Radiación	Global	Global
Espectro Solar (Precisión)	Alta. Ha de corregirse para aproximarla al panel solar.	Baja. Puede hacerse que coincida con el panel solar.
Linealidad	Alta	Baja
Tiempo de respuesta	Lento. Mayor a los 30 segundos.	Rápido. Similar a sistemas PV (milisegundos)
Efecto de Temperatura	Bajo. Diseñados para minimizar el error por temperatura.	Medio. Similar a sistemas PV
Efecto del ángulo	Bajo. Responde a todos los ángulos.	Medio. Aproximación al panel solar
Coste	Alto	Bajo

Tabla 1. Diferencias principales entre piranómetro y célula calibrada.

Las ventajas de los piranómetros termoelectricos residen en su amplio uso y precisión. La superficie negra absorbe uniformemente la radiación solar a través del espectro solar de onda corta. En cuanto a la respuesta espectral uniforme, permite la precisión de radiación solar de onda corta característica de estos instrumentos de medida. Ahora bien, por lo general son significativamente más caros que los piranómetros de células fotovoltaicas.

Varios estudios realizados sobre la diferencia entre ambas medidas de la radiación solar global llegan a la misma conclusión. Para medir la irradiancia superior es preferible usar células calibradas para aplicaciones de monitorización de plantas fotovoltaicas que usar un piranómetro. (Moreno-Tejera, Silva-Pérez, Lillo-Bravo, & Ramírez-Santigosa, 2016)

La principal razón es la diferencia en el espectro solar. Esta depende de la nubosidad, la precipitación de agua y la profundidad óptica del aerosol. La corriente de cortocircuito es el principal parámetro afectado por la distribución del espectro solar, pero en algunas tecnologías también influye la eficiencia, la potencia máxima y el factor de llenado. Por lo tanto, una corrección del espectro ha de usarse para ajustar la incidencia en la irradiancia solar para así mejorar el rendimiento de la planta (si se usa un piranómetro). Esta corrección del espectro depende de la tecnología utilizada en el módulo fotovoltaico.

En algunos casos la estructura del módulo fotovoltaico no tiene seguimiento en dos ejes, en consecuencia, la

irradiancia solar global que incide en la placa es afectada por el ángulo solar de la incidencia. En general, el software utilizado en el diseño de las instalaciones fotovoltaicas tiene implementado un modelo para tener en cuenta las pérdidas angulares.

Otra alternativa a estos métodos de aproximación entre las medidas de la célula calibrada fotovoltaica respecto a las medidas tomadas por el piranómetro es un modelo simplificado que relacione las medidas de radiación global solar de ambos equipos.

3.3 Tratamiento de los datos

En este capítulo se describe las partes numéricas de este proyecto. Desde la recepción de los datos por parte de la Estación del GTER hasta el cálculo de variables descriptivas que a continuación se detallan, contemplando en cada caso el procedimiento seguido y las herramientas utilizadas.

Como se ha comentado con anterioridad, la serie de datos proviene de la estación de medida del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER) de la ETSI de Sevilla, la cual los guarda en una base de datos. Esta produce un fichero diario con la información recopilada a diario para un intervalo de 5 segundos. De toda la información almacenada, este estudio se centra en los siguientes datos:

- Hora de la medida: hora GMT en formato hh: mm: ss.
- Irradiancia Global Horizontal (piranómetro) medida en W/m².
- Irradiancia Célula Horizontal medida en W/m².
- Temperatura ambiente en °C.

Con la ayuda de la herramienta informática Matlab se modifica y recopila cada fichero diario (con formato “txt”), en un fichero anual (con formato “mat”). Cada fichero contiene una fila de información por cada 5 segundos (“t”) como la presentada a continuación:

Nº día	Hora	Minuto	Segundo	RD_PIR (W/m ²)	RD_CEL (W/m ²)	T (°C)
63	15	11	45	777	743	34
63	15	11	50	777	744	34
63	15	11	55	777	743	34
63	15	12	0	777	744	34
63	15	12	5	777	744	34
63	15	12	10	777	744	34
63	15	12	15	776	744	34

Tabla 2. Datos obtenidos de los equipos de medida.

Este fichero se puede descargar en otros formatos. Para este caso y con el fin de agilizar el tratamiento de los datos con la herramienta Excel, se reducen el tamaño del fichero a las horas con medidas de radiación (5am-23pm), descartando así las horas nocturnas.

3.3.1 Influencia de las fluctuaciones en la radiación

Un primer análisis realizado de los datos obtenidos de la estación es su estudio para días concretos. En ellos, se aprecia diferencias considerables en días soleados respecto a días nublados, los cuáles producen mayores fluctuaciones en la medida de la radiación Solar.

A partir de la herramienta informática Excel, se realizan macros para calcular los gráficos según distintos intervalos de tiempo. Los datos proceden de un archivo Matlab (con formato “txt”), al cual se realiza un primer filtro para no contar los valores antes de las 5:00 de la mañana y después de las 20:00 de la tarde, con la finalidad de descartar datos irrelevantes (ceros).

Con la finalidad de analizar en concreto distintos casos de curvas de radiación, se divide este apartado en días de estabilidad y días de variabilidad, analizando 10 casos en total para distintas épocas del año; 5 en invierno y 5 en verano.

Año 2013	
15 Enero	21 Junio
25 Noviembre	15 Febrero
1 Junio	26 Agosto
20 Septiembre	25 Octubre
20 Julio	20 Diciembre

Tabla 3. Casos analizados para días específicos.

Estos gráficos representan en los ejes verticales:

- Radiación Global Solar del piranómetro (Horizontal) en W/m². [rojo]
- Radiación Global Solar de la célula calibrada en W/m². [azul]
- Temperatura ambiente en grados centígrados. [verde]

Y, en el eje horizontal:

- La hora y minuto en la que se toma la medida.

Un ejemplo de estabilidad es el día 15 de enero de 2013:

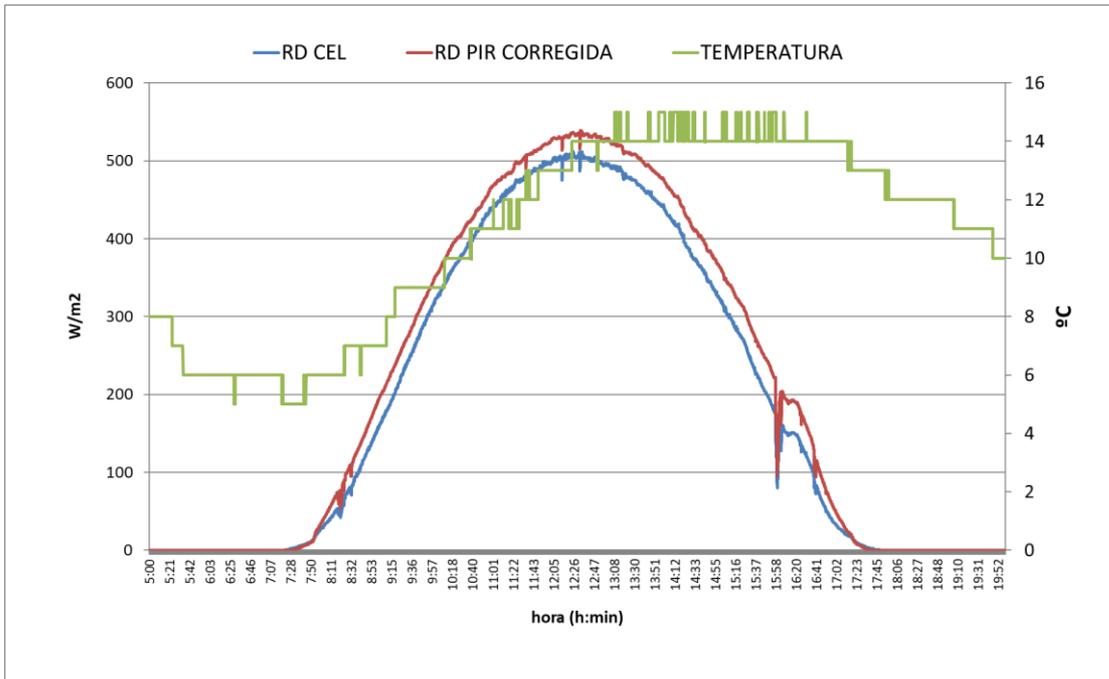


Ilustración 6. Gráfico de Irradiancia y temperatura con estabilidad (5 segundos)

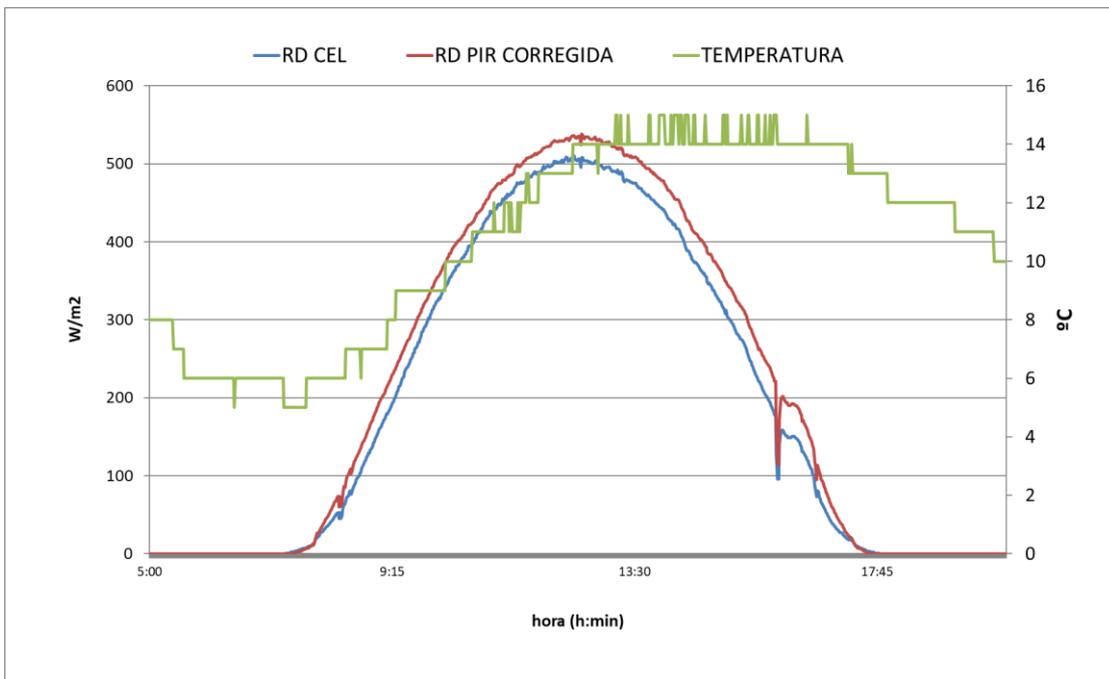


Ilustración 7. Gráfico de Irradiancia y temperatura con estabilidad (60 segundos)

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA

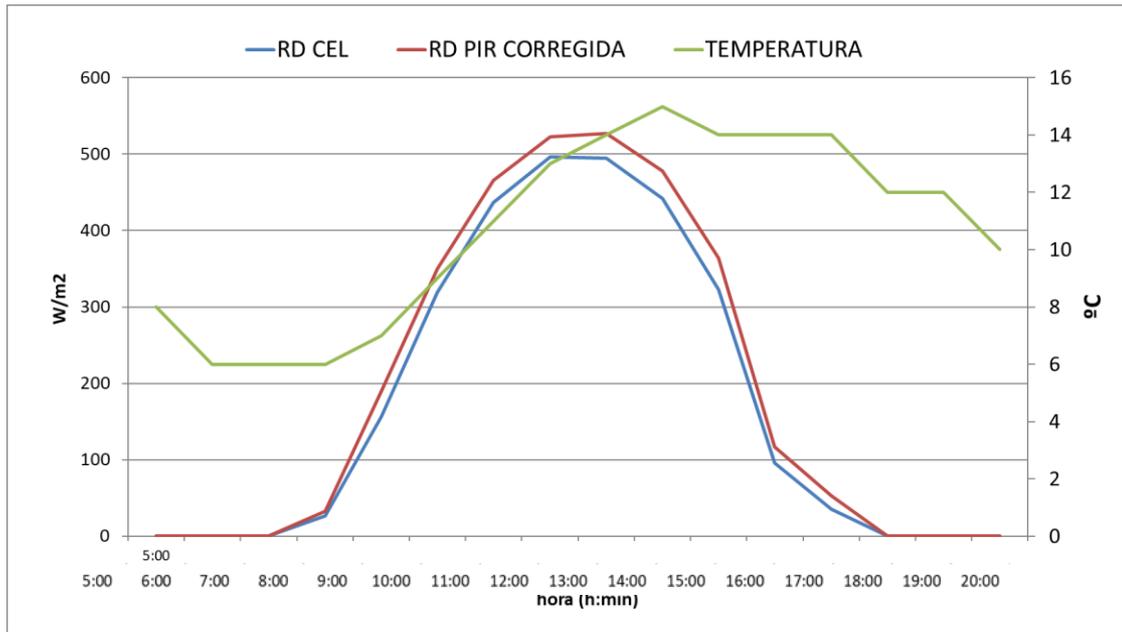


Ilustración 8. Gráfico de Irradiancia y temperatura con estabilidad (1 hora)

Como se comenta anteriormente, se distingue estos casos de los días con variabilidad en la medida de la radiación.

Un ejemplo de variabilidad es el día 15 de febrero de 2013:

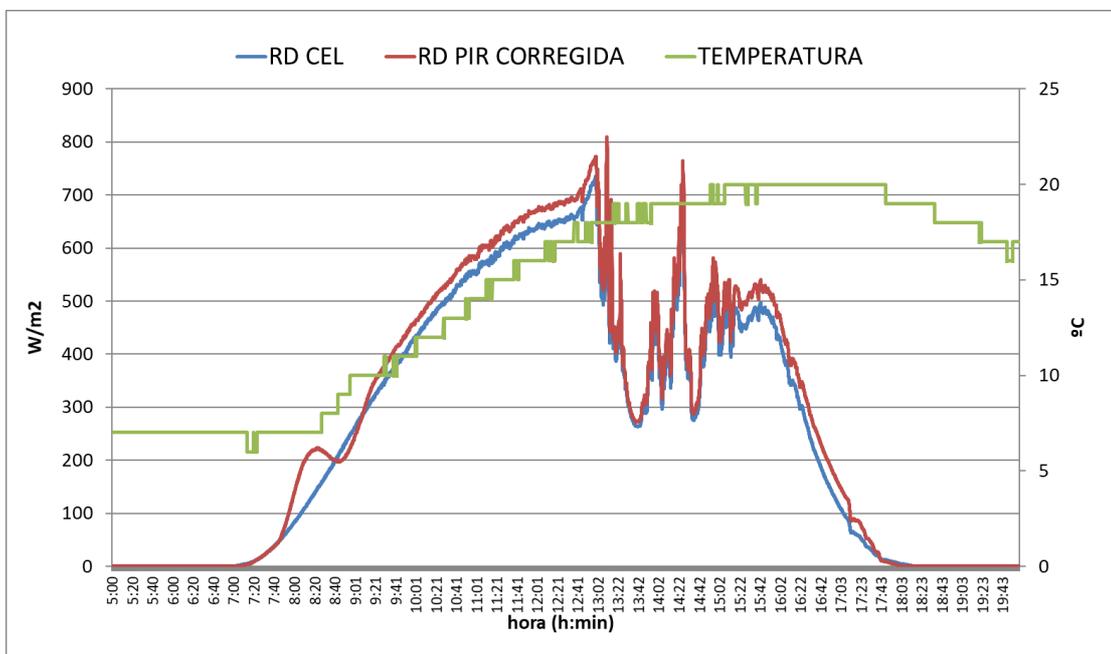


Ilustración 9. Gráfico de Irradiancia y temperatura con variabilidad (5 segundos)

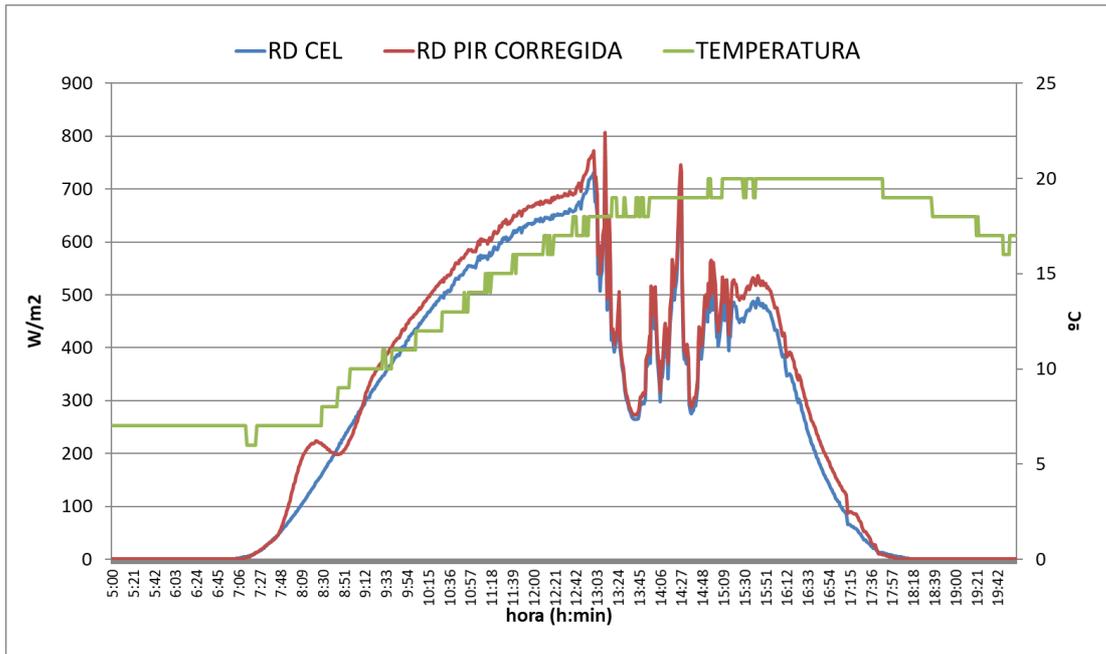


Ilustración 10. Gráfico de Irradiancia y temperatura con variabilidad (60 segundos)

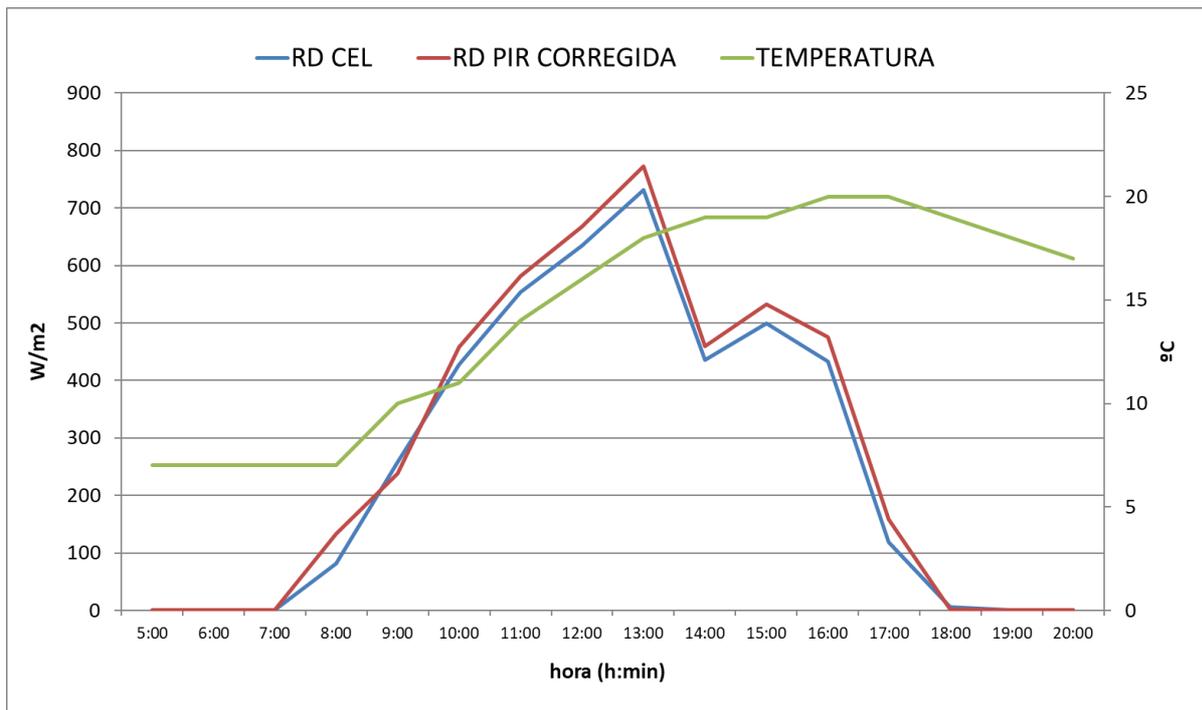


Ilustración 11. Gráfico de Irradiancia y temperatura con variabilidad (1 hora)

Una vez identificados los días específicos para ambos casos, se calcula las siguientes variables:

- Se analizará la diferencia de la radiación según el tiempo, es decir, la radiación en un momento “t” respecto a su valor previo en “t-1”:

$$\Delta RD_{X(t)} = RD_{X(t)} - RD_{X(t-1)}$$

- Diferencia en valor absoluto de los cambios de radiación(estado) entre equipos:

$$VAR_{RD(t)} = \Delta RD_{PIR(t)} - \Delta RD_{CEL(t)}$$

- Error relativo entre los cambios de estado de la radiación medida con piranómetro respecto a la célula:

$$E_{relativo} = \frac{|RD_{PIR}(t) - RD_{CEL}(t)|}{|RD_{CEL}(t)|}$$

Los cálculos se realizan para intervalos de tiempo de 5 segundos, 1 minuto, 10 minutos, 30 minutos y una hora.

Este punto es clave en la estructura y objetivo de este trabajo, ya que pone en énfasis a alto nivel las diferencias en la medida de la irradiancia de los distintos equipos de medición. A posteriori, se realiza el estudio por año analizado para tener mayor precisión en los resultados.

Analizando estos casos se identifica aquellas variables que más afectan a la evolución de la medida de la radiación y en consecuencia dar una aproximación del error que conlleva. Es útil para tenerlo en cuenta a la hora de dimensionar la planta y calcular la producción eléctrica de la misma.

3.3.2 Transitorios de Radiación

A continuación, se realiza a partir de un programa Matlab del cálculo de los transitorios para los dos tipos de radiación solar global, la del piranómetro y la célula calibrada. El procedimiento seguido se detalla a continuación:

1. Se agrupan los cambios de estado que se producen de la radiación solar global (piranómetro y célula por separado) al pasar de un estado “i” a otro estado “j” en un intervalo de 5 segundos.
2. Estos cambios de estado se concentran en saltos de 100 W/m² entre 0 y 1100 W/m². Es decir, hay 11 estados empezando por el primer estado (0-100 W/m²), segundo estado (100-200 W/m²) y acabando por el undécimo estado (1000-1100 W/m²). En definitiva, el archivo de salida contiene una matriz de 11x11.
3. Para optimizar los cálculos se añade un filtro para cuantificar los saltos iguales o mayores de 50 W/m², apartando del análisis los que no cumplan.
4. Teniendo dos medidas de radiación diferentes, se analiza su variación para 3 intervalos de tiempo; 5 segundos, 30 segundos y 60 segundos. Por lo tanto, se obtiene para cada año seis matrices con el número de cambios de estado por intervalo y tipo de radiación según el equipo utilizado.
5. Por último, se analiza la probabilidad de cambio de estado de cada matriz utilizando la herramienta Excel.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Explicado el procedimiento de cálculo de los datos en los que se basa este estudio, en este apartado se exponen y analizan los resultados para sustentar las conclusiones tomadas al final del trabajo. En primer lugar, se compara los casos de estudio de días con diferentes curvas de irradiancia para demostrar la importancia de las fluctuaciones de la medida de la Radiación Solar Global y sus efectos en la planta fotovoltaica. Posteriormente, se presentan los resultados anuales de estos cambios de radiación en intervalos de tiempo, denominados Transitorios de Radiación.

4.1 Importancia/Efectos de las fluctuaciones de la Radiación Solar

Analizando los casos específicos comentados anteriormente se analizan las siguientes variables para ver la diferencia de medidas entre ambos equipos:

Se analizará la diferencia de la radiación (fluctuación) según el tiempo:

$$\Delta RD_{X(t)} = RD_{X(t)} - RD_{X(t-1)}$$

Siendo “x”, piranómetro o célula calibrada.

Diferencia en valor absoluto de los cambios de radiación entre equipos:

$$VAR_{RD(t)} = \Delta RD_{PIR(t)} - \Delta RD_{CEL(t)}$$

Así como el error relativo entre los cambios de estado de la radiación medida con piranómetro respecto a la célula:

$$E_{relativo} = \frac{|RD_{PIR}(t) - RD_{CEL}(t)|}{|RD_{CEL}(t)|}$$

La diferencia en valor absoluto afecta a la producción de electricidad de la planta fotovoltaica, así como el error relativo, que muestra cuánto se desvía la medida del piranómetro de la medida “real” que es el de la célula. A continuación, se analizan por separado los casos de estabilidad y casos de variabilidad, para terminar con las diferencias encontradas entre ambas casuísticas.

4.1.1 Caso A: Estabilidad en la medida de la Radiación Solar Global

En primer lugar, se muestra el caso del día 25 de noviembre de 2013, representando en gráfica los resultados de las diferencias entre piranómetro y célula de los saltos de radiación y el error relativo que conlleva. Este es el caso con menor error por parte de los equipos debido a la falta de variabilidad, no obstante, se da la casuística de obtener una mayor diferencia en el momento de alta radiación en el día.

En estos casos en los que la variación es estable tanto en el piranómetro como en la célula, las medidas tienden a ser distintas. Para este caso se observa que a medida que aumenta la radiación solar (mediodía), mayor es la diferencia entre equipos. Su consecuencia resulta en un mayor ajuste de la célula para estos casos, obteniendo un mayor error relativo si se tuviera constante el ajuste.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA

Para el **caso A**, se tiene un día normal de irradiancia, dándose el pico de radiación a mediodía y sin desfases tanto a la mañana como por la tarde:

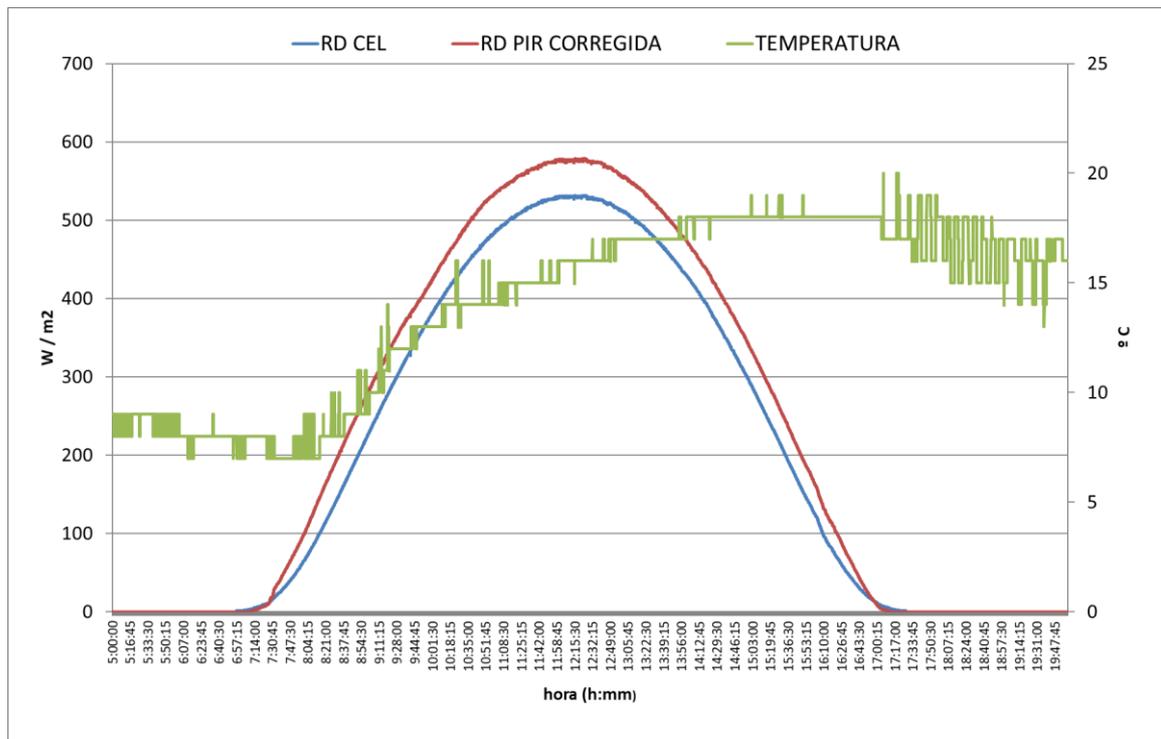


Ilustración 12. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (caso A)

Realizando los cálculos establecidos, se obtiene para este día los siguientes gráficos (se descartan los intervalos de 5 segundos y 1 minuto debido a la escasa claridad de los gráficos):

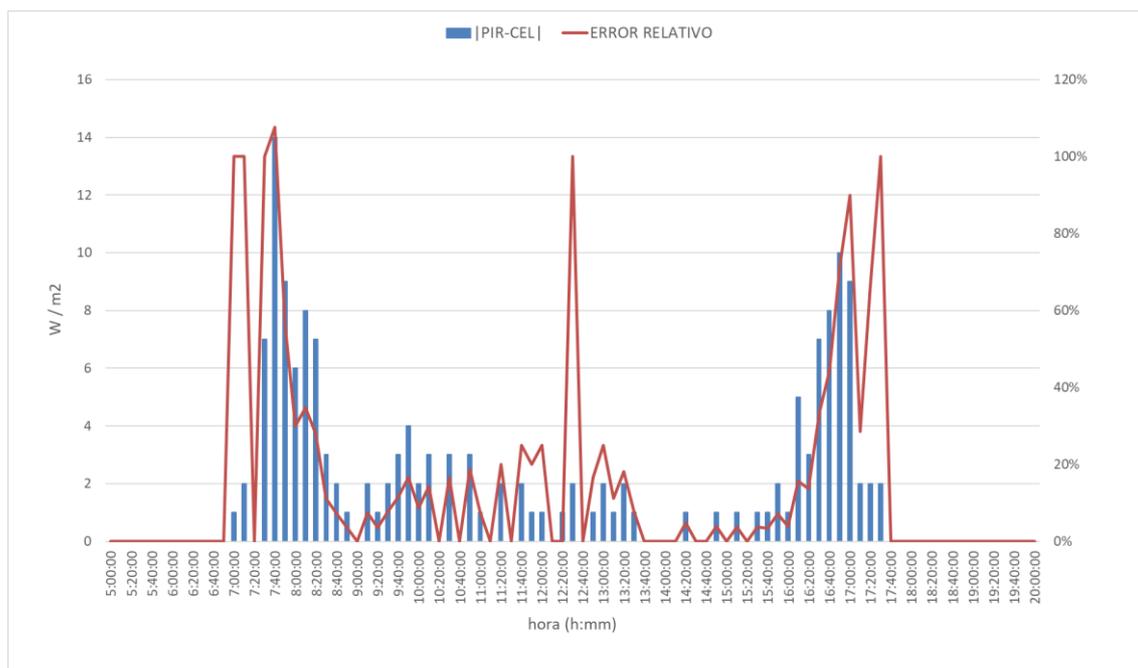


Ilustración 13. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=10\text{min}$ (caso A)

Para un intervalo de 10 minutos las diferencias no alcanzan los 10 W/m² cuando el día está despejado, al contrario del caso de variabilidad (por la tarde) donde se dispara la diferencia entre equipos. Misma tendencia para el error relativo, teniendo picos concretos que llegan al 100%.

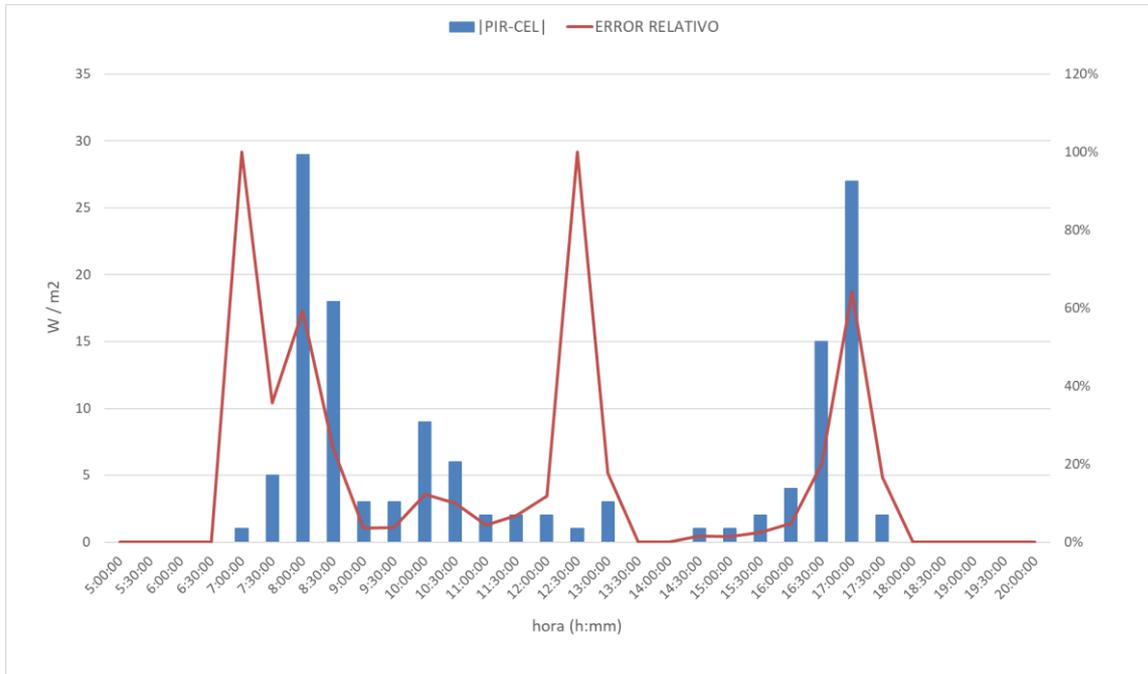


Ilustración 14. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con t=30min (caso A)

Incrementando el intervalo se observa el aumento en las diferencias en la mañana y la tarde del día a causa del salto en la radiación en esas horas del día, ahora bien, el error relativo es más constante y acorde a las diferencias.

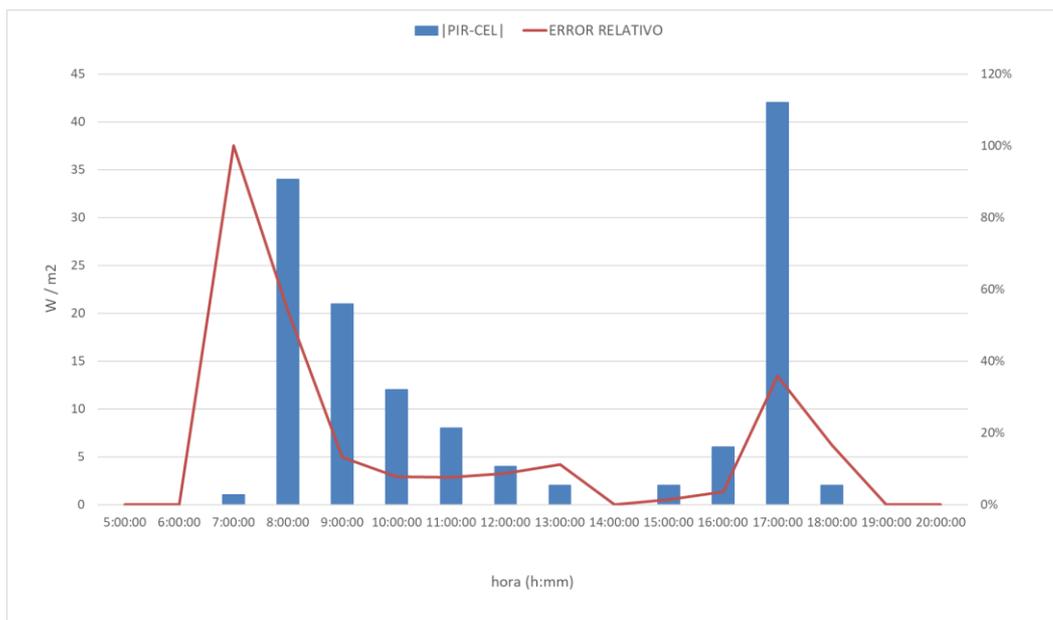


Ilustración 15. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con t=1h (caso A)

Estos valores se resumen en la siguiente tabla como el promedio de todo el día según el intervalo:

	Dif RD_PIR	Dif RD_CEL	Dif [RD_PIR-RD_CEL]	Error REL
5 segundos	0,22	0,35	0,35	19,05%
1 minuto	1,72	1,60	0,67	26,31%
10 minutos	12,39	11,62	1,87	17,30%
30 minutos	35,79	33,81	4,03	15,04%
1 hora	70,83	67,00	7,08	15,19%

Tabla 4. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (caso A).

En cuanto a la diferencia de la variación de radiación ($t - (t-1)$) entre ambos equipos, en la mañana y tarde se producen mayores diferencias debido a la rapidez con que la célula detecta los cambios de magnitud. A mediodía se puede dar también grandes diferencias debido a la mejor capacidad de medir a altas magnitudes del piranómetro que la célula. Según aumenta el intervalo, esta diferencia se reduce debido a que el piranómetro tiene mayor tiempo para reaccionar. Lo mismo pasa al error relativo, ya que depende de la diferencia del cambio de radiación en ambos equipos, a mayor intervalo menor el error relativo. Para este caso de estabilidad en la radiación, el error relativo se encuentra en torno al 20% en función del intervalo tomado. Destacando el incremento para el intervalo de 1 minuto del error relativo (26%) comparado con el resto de intervalos de tiempo.

4.1.2 Caso B: Desfase en la medida de la Radiación Solar Global

Para este caso, se analiza el 21 de junio de 2013 con la finalidad de observar el desfase en las medidas de radiación de los equipos de medida. Cómo de rápido son capaces de seguir la variabilidad de la radiación y sus consecuencias en la planta.

Siendo un día estable como el anterior, las diferencias en un principio son menores y la curva se asemeja más una a la otra (incluido mediodía), pero se da una hora donde hay presencia de nubes y los equipos reaccionan diferente.

Para el **caso B**, se tiene un día de elevada irradiancia, dándose el pico de radiación a mediodía y con desfase por la tarde:

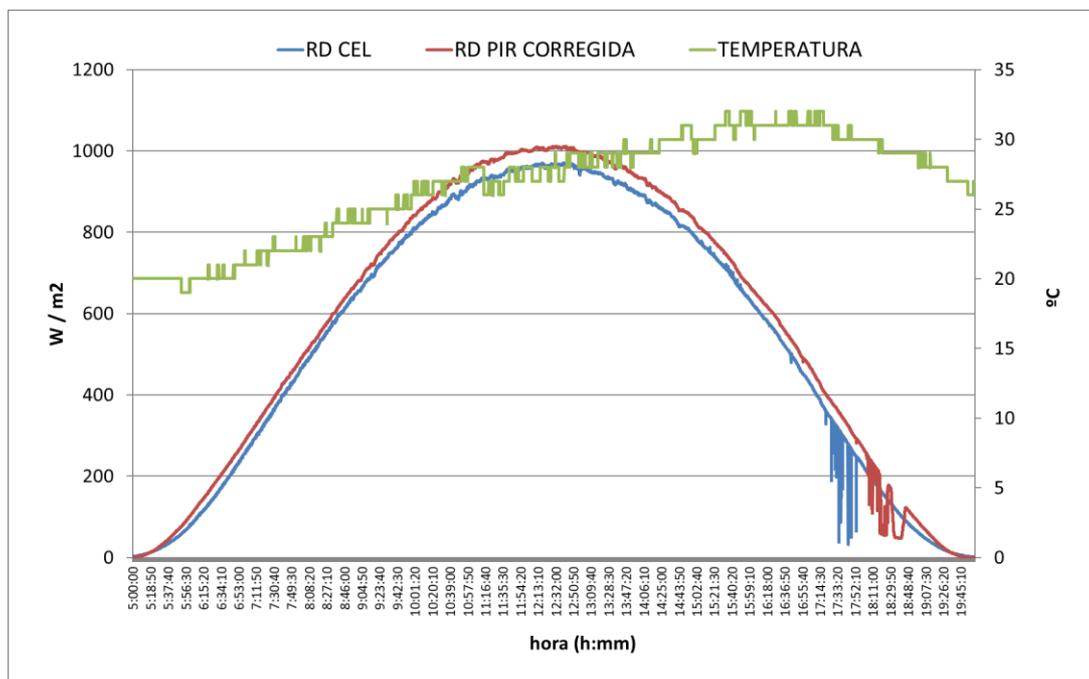


Ilustración 16. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (caso B)

En este caso se sigue el mismo procedimiento que el anterior (se descarta los intervalos de 5 segundos y 1 minuto por no poder distinguir con claridad el gráfico):

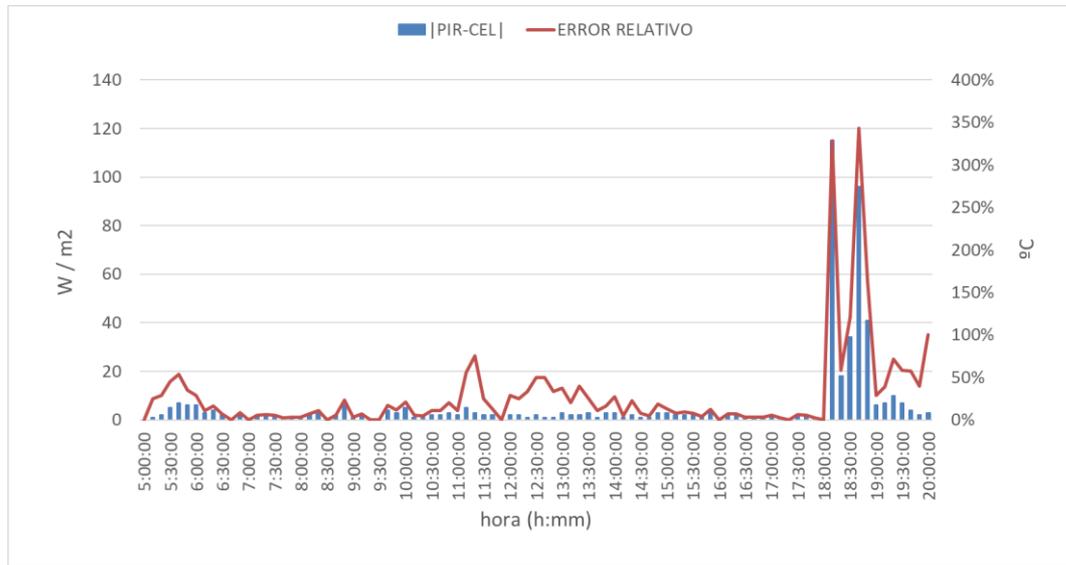


Ilustración 17. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=10min$ (caso B)

En este caso el desfase está más definido, y se observa la clara rapidez del equipo frente a las variaciones de radiación. Para el resto del día, las diferencias no sobrepasan los 10 W/m^2 (semejante al caso anterior) y el error disminuye, con picos que alcanzan 350%.

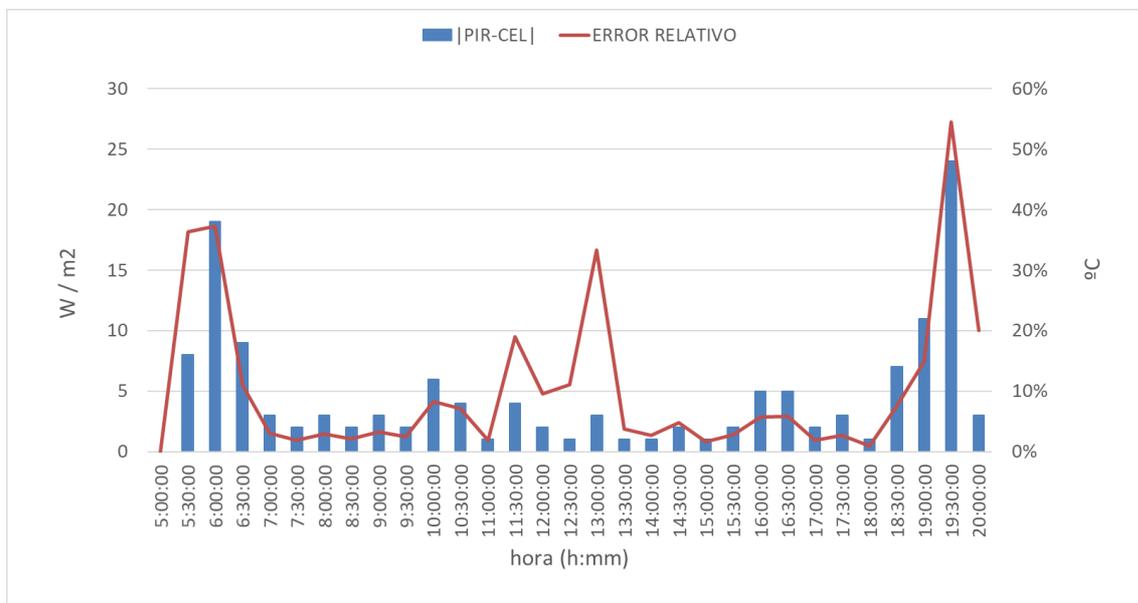


Ilustración 18. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=30min$ (caso B)

Este gráfico muestra cómo se estabilizan las diferencias al incrementar el intervalo a 30 minutos, dando suficiente tiempo a los equipos a medir. No obstante, las diferencias a la mañana y tarde rondan el 50%.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA

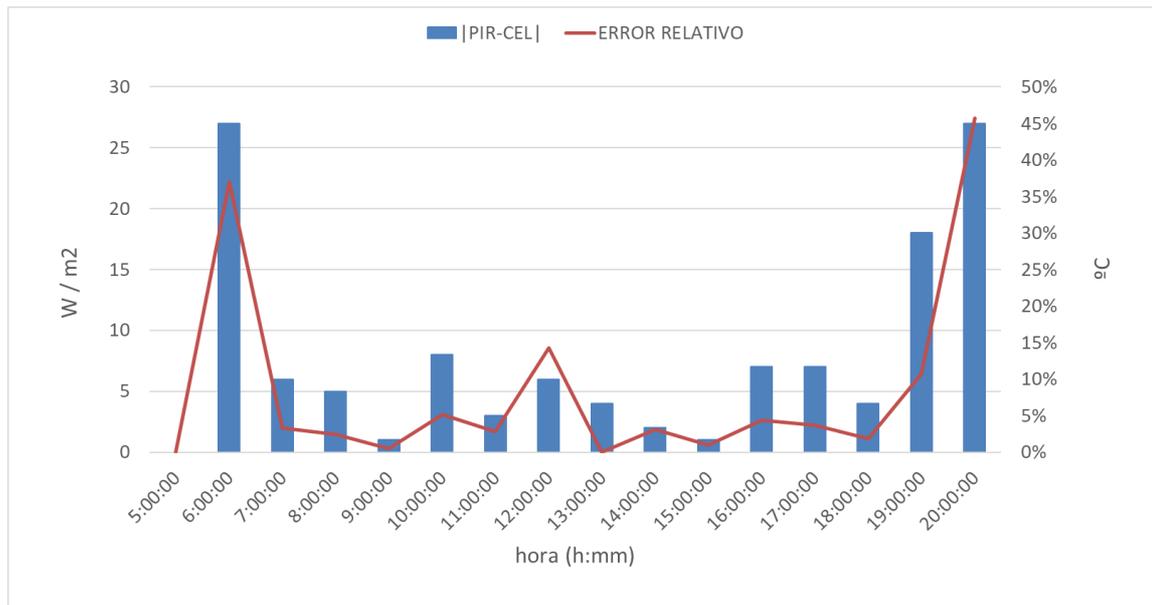


Ilustración 19. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con t=1h (caso B)

En última instancia, las diferencias aumentan a la mañana y tarde del día, al contrario del mediodía el cual se reduce el error relativo para mismas diferencias comparado con el intervalo de 30 minutos.

Estos valores se resumen en la siguiente tabla como la media de todo el día según el intervalo:

	Dif RD_PIR	Dif RD_CEL	Dif RD_PIR-RD_CEL	ERROR REL
5 segundos	0,8	1,1	1,5	43,9%
1 minuto	3,3	3,0	2,2	65,7%
10 minutos	24,6	21,8	5,0	26,7%
30 minutos	67,6	64,0	8,2	15,3%
1 hora	129,9	125,2	10,7	10,8%

Tabla 5. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (caso B).

En este caso se aprecia con claridad el desfase en la medida de ambos equipos. El piranómetro tarda más en detectar la fluctuación, aunque tome mayores valores de la misma. Así, la célula actúa más rápido detectando la fluctuación unos minutos antes, aunque tomando menores valores de radiación. El error relativo promedio de este día es elevado para el caso inicial de 5 segundos, aumentando para el intervalo de 1 minuto.

Este día muestra la rapidez de la célula para cambios en la irradiancia en plazos cortos de tiempo. Se da el caso que para un intervalo de 5 segundos la célula obtiene mayores diferencias (por encima de la unidad) que el piranómetro el cual está en 0,8 W/m² (siendo el promedio de todo el día).

4.1.3 Caso C: Variabilidad en la medida de la Radiación Solar Global

Siguiendo el desfase analizado en el caso anterior, se muestra el día 26 de agosto de 2013, el cuál presenta variabilidad durante la mayor parte del día y con altos saltos de magnitud. En este caso se estudia en cuestión la rapidez de los equipos frente a la variabilidad de la irradiancia.

Tomando como referencia los dos casos anteriormente analizados, es interesante ver cómo reaccionan ambos equipos cuando hay elevada irradiancia todo el día (agosto) y es día nublado. Este tipo de casos son los que más

afectan al dimensionado, debido a la capacidad de medir la radiación no se ajusta a una aproximación constante para todo el día.

Para el **caso C**, se tiene un día de elevada irradiancia, dándose picos de radiación continuamente a mediodía y sin desfase en todo el día:

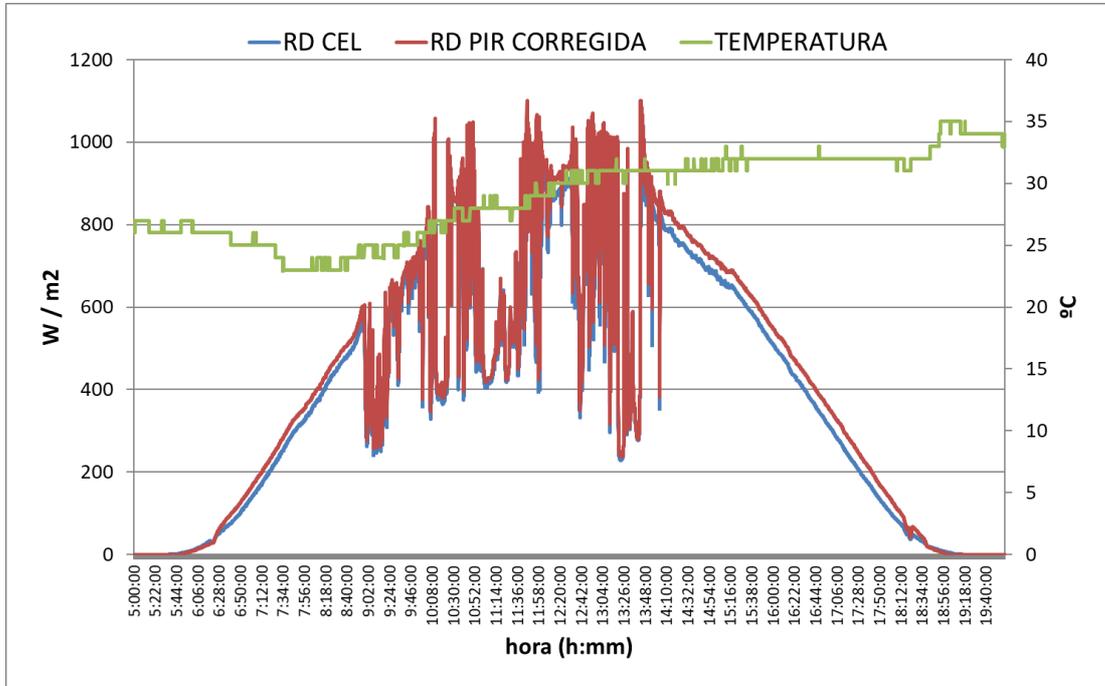


Ilustración 20. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (26 agosto)

A continuación, se presenta los gráficos de irradiancia y error relativo para los intervalos de 10, 30 y 60 minutos (se descarta los intervalos de 5 segundos y 1 minuto por no poder distinguir con claridad el gráfico):

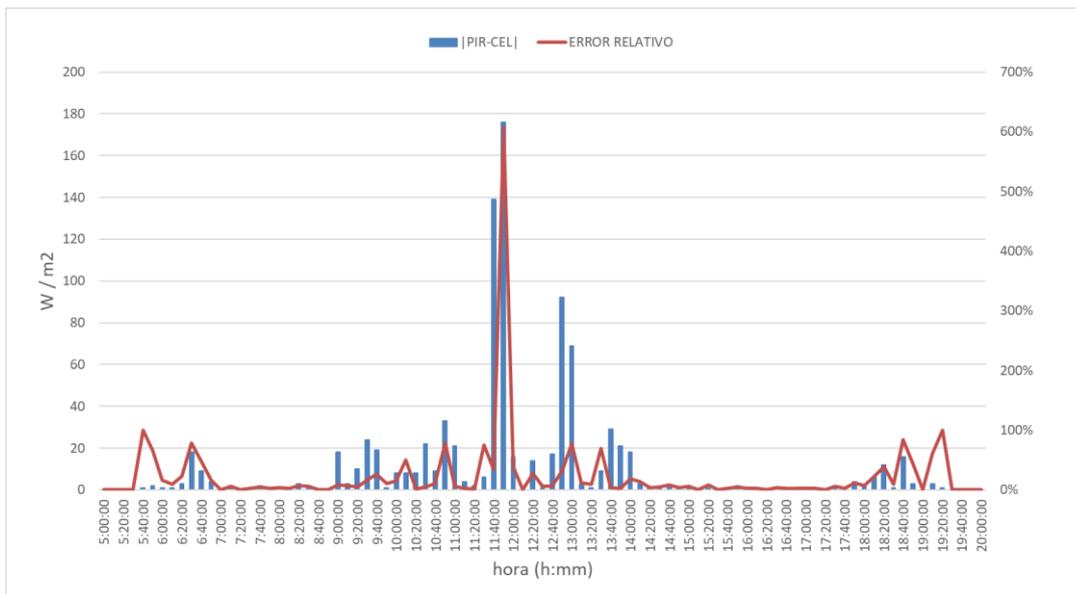


Ilustración 21. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con $t=10\text{min}$ (caso C)

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA

Esta imagen muestra claramente donde se encuentra el error entre ambos equipos, siendo la zona de alta variabilidad la que presenta mayores diferencias. Por un lado, el error relativo se dispara sobrepasando el 100% en comparación a las horas de mañana y tarde-noche donde las diferencias son mínimas (5-10 W/m²).

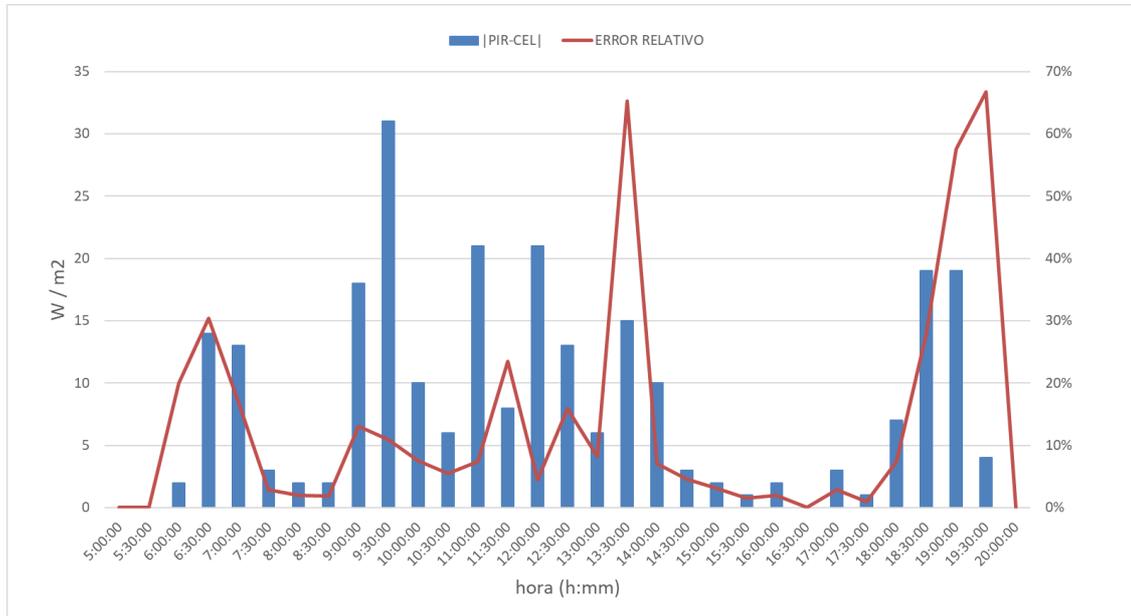


Ilustración 22. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con t=30min (caso C)

Aquí se aprecia la alta variabilidad con valores que sobrepasan los 20 W/m², frontera que no se pasaba en los casos A y B. También se reduce el error relativo por debajo del 100%.

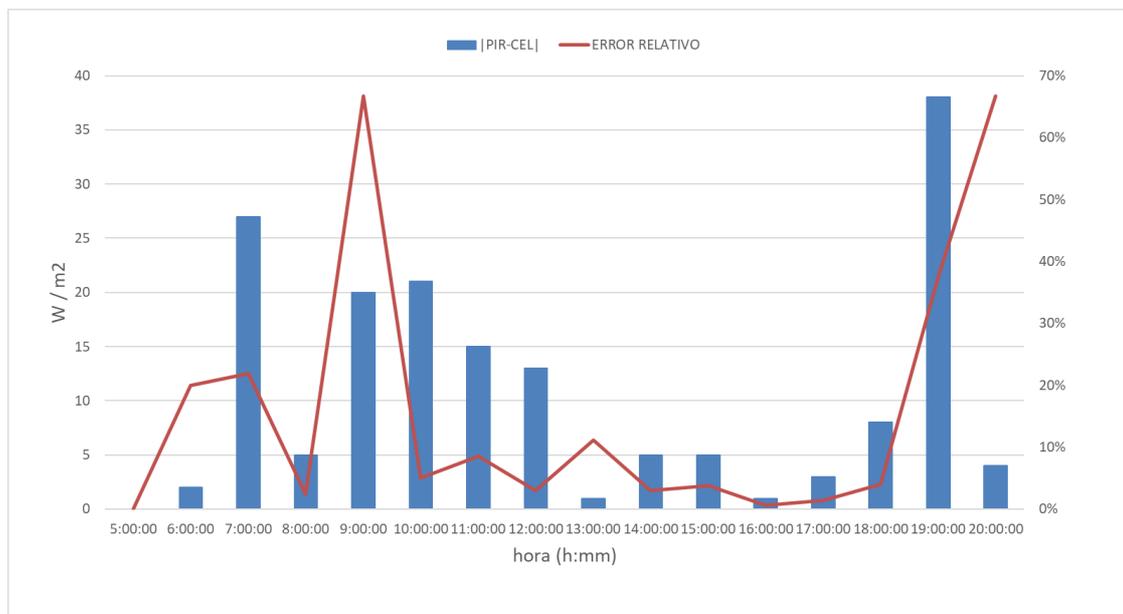


Ilustración 23. Curva diferencias de radiación entre equipos y error relativo con t=1h (caso B)

Resultando como valores promedio:

	Dif RD_PIR	Dif RD_CEL	Dif RD_PIR-RD_CEL	ERROR REL
5 segundos	8,8	9,6	5,5	48,4%
1 minuto	31,6	30,8	7,0	34,8%
10 minutos	80,3	77,0	9,6	24,6%
30 minutos	139,6	132,5	13,2	23,5%
1 hora	180,9	172,1	15,9	24,3%

Tabla 6. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (caso C).

Para mayores salto de radiación, crece la diferencia en la medida tomada entre ambos equipos. Alcanza aproximadamente al 50% en intervalos de 5 segundos y no pasa del 25% aumentando hasta la hora. Este caso representa el caso extremo del análisis de este punto, para un día con mucha variabilidad y de alto valor de consigue diferencia de un 5,5 W/m² entre ambos equipos, donde en otros casos no alcanzan 1,5 W/m².

Haciendo promedio de los valores obtenidos a lo largo del día, se obtiene altos porcentajes de error relativos aún en intervalos de 1 hora. Recalcando el peso de las horas del mediodía donde se conseguían errores por encima del 500%.

4.1.4 Otros casos de estudio en la medida de Radiación Solar Global

A continuación, se presentan más casos de estudio para mostrar al lector distintas casuísticas con mayor o menor irradiancia y/o variabilidad frente estabilidad.

- a. **25 de octubre de 2013:** día de variabilidad durante todo el día con irradiancia baja.

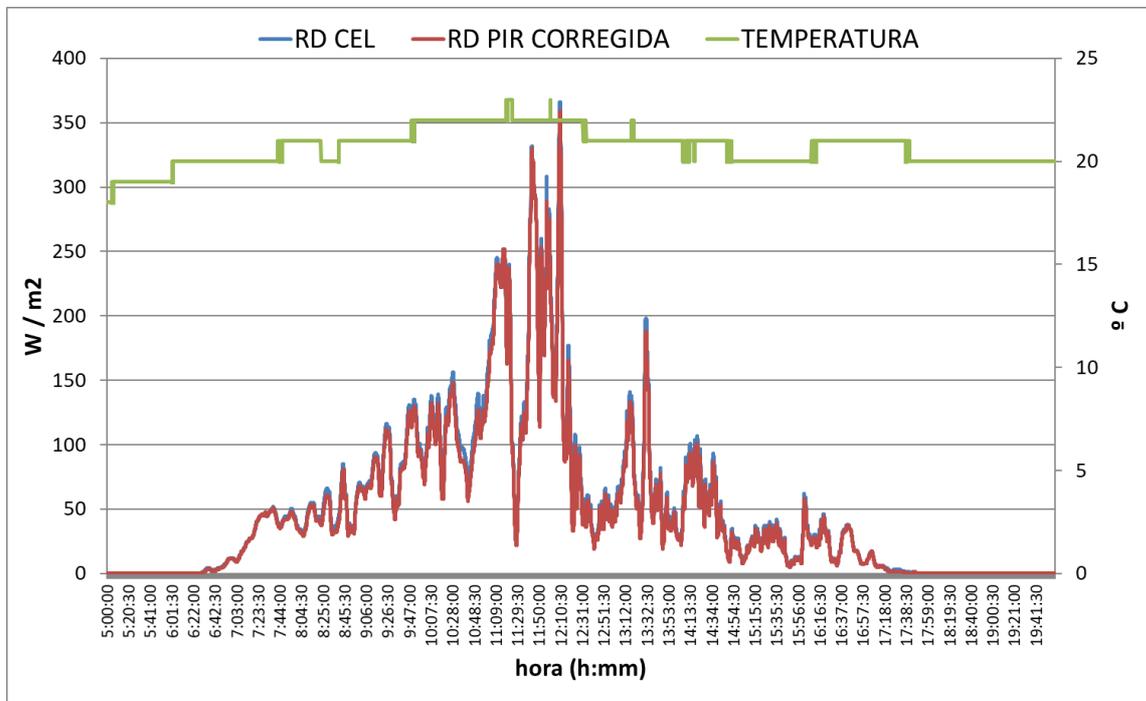


Ilustración 24. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (25 octubre)

Siguiendo el mismo procedimiento que los casos anteriores, se presenta la tabla con los resultados promedios para cada intervalo de tiempo.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA

	Dif RD_PIR	Dif RD_CEL	Dif RD_PIR-RD_CEL	ERROR REL
5 segundos	0,67	0,70	0,3	12,6%
1 minuto	6,4	6,7	0,6	12,1%
10 minutos	21,6	22,0	1,3	9,7%
30 minutos	27,8	28,5	1,6	11,2%
1 hora	32,3	32,9	1,7	11,2%

Tabla 7. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (25 octubre).

En este caso, aun siendo un día con mucha variabilidad, las diferencias entre equipos (tanto en valor absoluto como el error relativo) no son grandes comparadas con otros casos. Debido a que es un día con poca radiación (el pico máximo no rebasa los 400 W/m²) se reduce los errores y la diferencia.

- b. 20: día de variabilidad menos acentuada con unos picos altos de irradiancia comparado con el resto de horas.

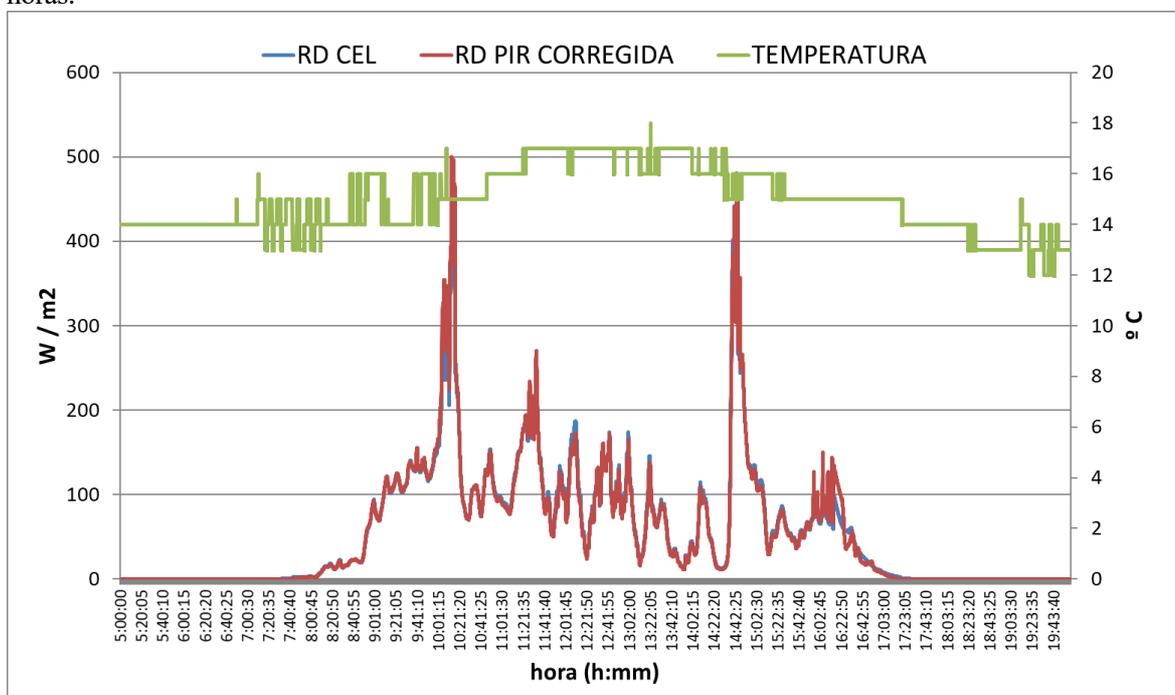


Ilustración 25. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (20 diciembre)

	Dif RD_PIR	Dif RD_CEL	Dif RD_PIR-RD_CEL	ERROR REL
5 segundos	0,8	0,8	0,4	12,3%
1 minuto	6,6	6,3	0,9	17,2%
10 minutos	28,7	27,5	3,1	17,3%
30 minutos	39,2	37,1	4,1	19,0%
1 hora	49,7	48,0	4,4	17,7%

Tabla 8. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (20 diciembre).

Dando tiempo a los equipos, entre los saltos de irradiancia, se reducen los errores relativos por debajo del 20%,

prestando atención al intervalo de 30 minutos que supera al resto. En comparación con el caso anterior, los errores aumentan debido a que los cambios de radiación son más prolongados y por consiguiente las medidas difieren más.

Si bien, a nivel de diferencias en las medidas cada 5 segundos, ambos equipos reaccionan bien resultando valores por debajo de la unidad en W/m^2 .

- c. **20 de septiembre de 2013:** desfase al principio del día con mayor salto de irradiancia en un día de valores altos de magnitud.

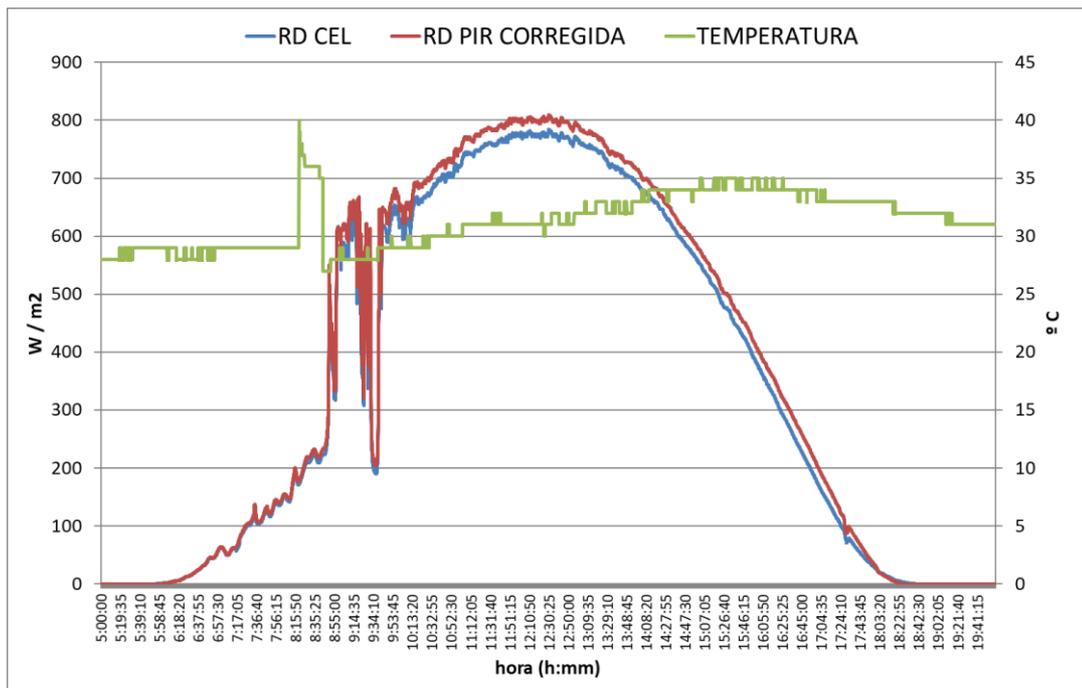


Ilustración 26. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (20 septiembre)

La gráfica muestra un día de alta irradiancia alcanzando los $800 W/m^2$ máximo para el caso del piranómetro y $50 W/m^2$ menos la célula. Se aprecia también la rapidez de cambio de los equipos frente a las variaciones de radiación con el paso de una nube.

	Dif RD_PIR	Dif RD_CEL	Dif RD_PIR-RD_CEL	ERROR REL
5 segundos	0,9	1,0	0,6	20,6%
1 minuto	5,7	5,5	0,9	22,5%
10 minutos	26,6	25,6	2,0	15,9%
30 minutos	61,8	59,6	3,6	11,5%
1 hora	106,9	103,6	5,4	9,2%

Tabla 9. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (20 septiembre)

Aquí se junta la estabilidad de un día y un desfase con salto elevado de radiación, el cual se detecta en bajos intervalos de tiempo (20% de error relativo aproximadamente). Para intervalos mayores se reduce por el corto intervalo que tiene cada salto de irradiancia, siendo detectable a intervalos bajos de tiempo.

La diferencia en la medida de radiación aumenta con el incremento del intervalo de tiempo en un 800%

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA

mostrando la capacidad del piranómetro para medir la irradiancia cogiendo todo el espectro.

- d. **1 de junio de 2013:** caso estable durante todo el día con un mínimo desfase al final de un día de alta irradiancia.

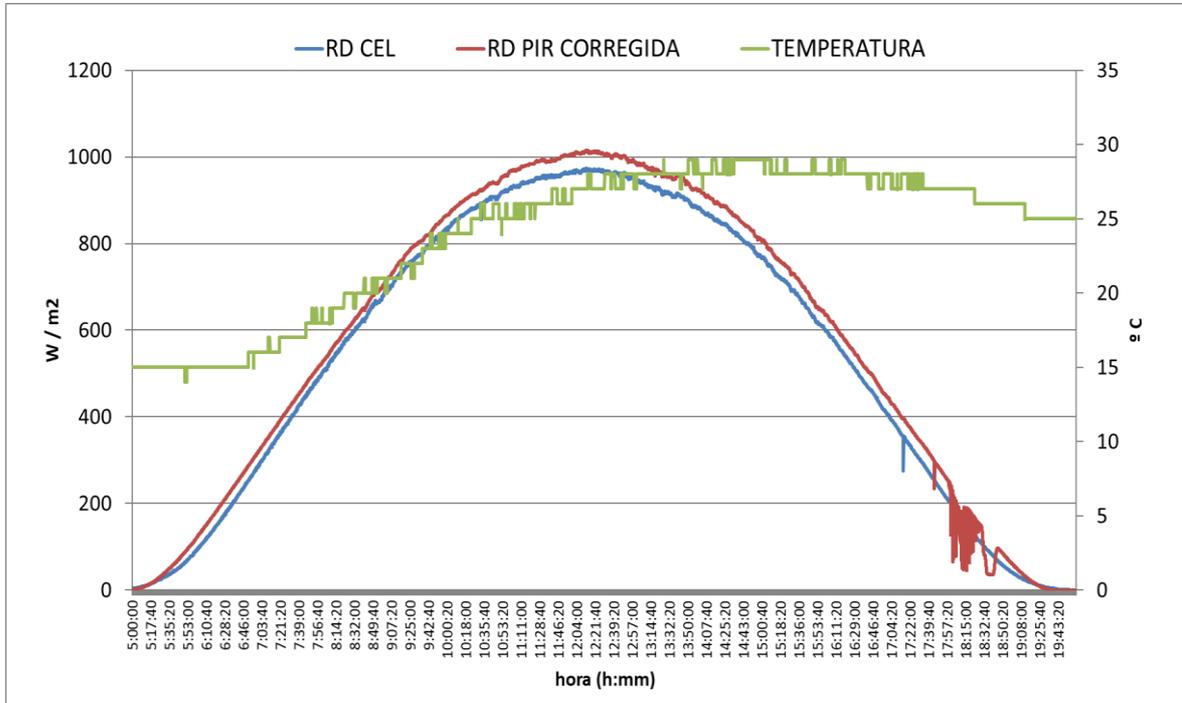


Ilustración 27. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (1 junio)

	Dif RD_PIR	Dif RD_CEL	Dif RD_PIR-RD_CEL	ERROR REL
5 segundos	1,1	0,7	1,4	52,1%
1 minuto	3,8	2,5	2,2	78,5%
10 minutos	24,4	21,5	4,7	28,7%
30 minutos	67,3	64,2	7,0	15,3%
1 hora	130,3	125,7	9,5	11,0%

Tabla 10. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (1 junio)

Para este caso las diferencias se disparan comparadas con el caso anterior. Siendo un día soleado de irradiancia sin cambios exceptuando el desfase del piranómetro al final del día, el cual la célula no detecta, pudo darse el caso de errores en la medida del equipo.

Alcanzando diferencias de 130 W/m² y 125 W/m² del piranómetro y célula respectivamente, se plantea una curva de irradiancia regular. Por la mañana y la tarde se dan los casos más destacados debido a la subida/bajada en la medida de la irradiancia. Teniendo en cuenta posibles pasos de nubosidad (la temperatura baja un par de grados), este caso muestra la capacidad “perdida” en la medida de la célula frente al piranómetro.

En el siguiente caso, se presenta la casuística contraria. La célula detecta variaciones al final del día siguiendo durante todas las horas un día sin nubosidad.

- e. **20 de julio de 2013:** día estable sin desfase y alta irradiancia.

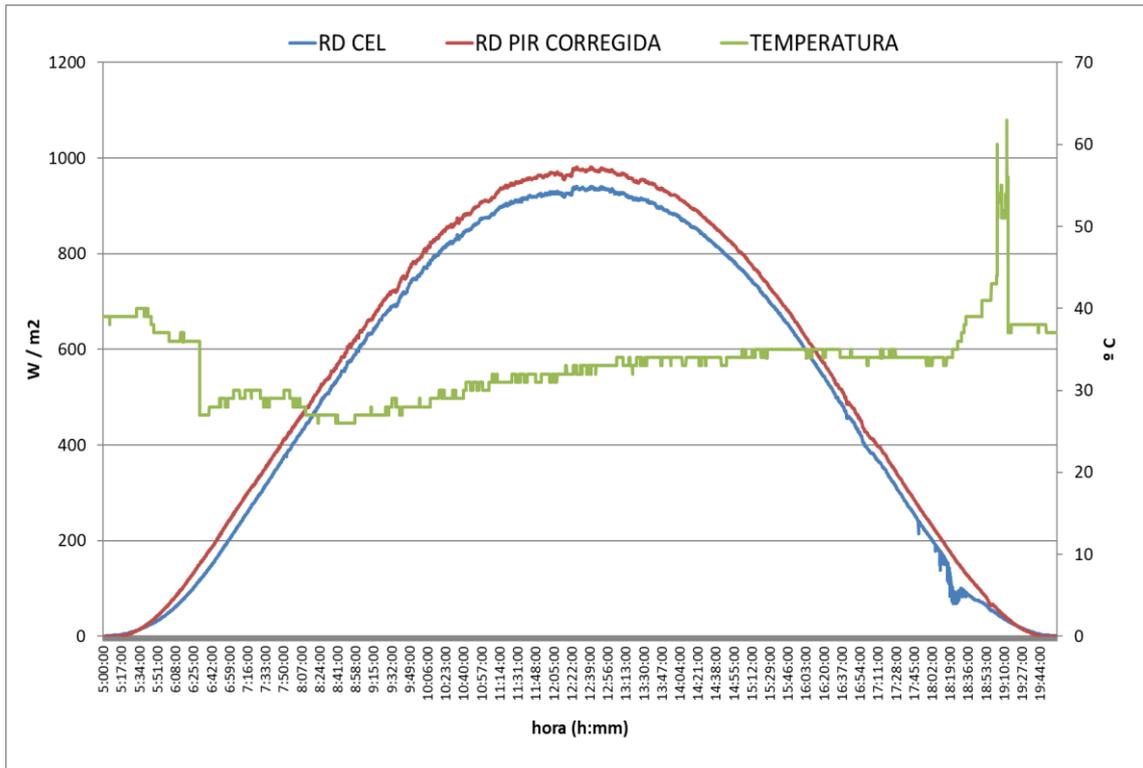


Ilustración 28. Gráfico de Irradiancia y temperatura ambiente (20 julio)

	Dif RD_PIR	Dif RD_CEL	Dif RD_PIR-RD_CEL	ERROR REL
5 segundos	0,4	0,6	0,6	25,7%
1 minuto	2,5	2,5	0,9	33,1%
10 minutos	21,9	21,1	2,6	21,1%
30 minutos	65,0	62,2	5,4	17,5%
1 hora	128,2	122,9	8,3	11,5%

Tabla 11. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (20 junio)

Por último, día de estabilidad con pequeñas variaciones al final del día. Como se ha comentado anteriormente, la célula detecta estos cambios mínimos en la irradiación, repasando lo datos detenidamente, no sobrepasa los 5 W/m² en intervalos de 5 segundos. Sin embargo, el piranómetro mide una bajada gradual de la irradiación sin sobresaltos.

Si se aglutinan todos los casos analizados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados:

	Dif RD_PIR	Dif RD_CEL	Dif [RD_PIR-RD_CEL]	Error REL
5 segundos	0,22	0,35	0,35	19,05%
1 minuto	1,72	1,60	0,67	26,31%
10 minutos	12,39	11,62	1,87	17,30%
30 minutos	35,79	33,81	4,03	15,04%
1 hora	70,83	67,00	7,08	15,19%

Tabla 12. Resultados fluctuaciones y error relativo promedio según el intervalo (2013)

Este punto resalta la importancia y pone en evidencia las diferencias entre las curvas de irradiación del piranómetro frente a la célula calibrada. Si es verdad que son mínimas (no superan la unidad – W/m²) en la

mayoría de los casos para un intervalo de 5 segundos, a lo largo de un año, la irradiancia “pérdida” por la célula es considerable. Hay que tener en cuenta la capacidad de la misma para detectar con mayor rapidez los cambios de radiación, característica que los piranómetros no incluyen (punto 3.2.4 del documento).

4.2 Caracterización de los transitorios

En este apartado se analizan los datos de manera global aglutinados por año. Se contabilizan el número de veces que la irradiancia cambia del estado “i” al estado “j” agrupados en saltos de 100 W/m² ([0-100], [100-200], [200-300], [300-400], ...) para los distintos intervalos: 5 segundos, 30 segundos y 60 segundos. Es lo que se denomina el número de transiciones.

En resumen, se obtiene para cada año 6 matrices de transición o transitorios (dos equipos y tres intervalos). Los valores de irradiancia cuyo salto no sea mayor de 50 W/m² no se contabilizarán para centrar el foco debido a la alta cantidad de valores que se evalúa. Se incluye también la matriz de probabilidad de cambio entre los saltos de radiación, con el objetivo de mostrar el comportamiento de ambos equipos, el piranómetro y la célula calibrada.

4.2.1 Matrices de transición y matrices de probabilidad.

Se presenta a continuación las matrices de transición (transitorios) y las matrices de probabilidad para el año 2013 con intervalos de tiempo de 5, 30 y 60 segundos. Los datos presentados están filtrados para saltos de radiación mayores a 50 W/m².

Posteriormente al volcado de los datos a la herramienta MATLAB, los datos son aglutinados por estados para luego proceder a su tratamiento con la herramienta Excel. En ella, se realiza una primera comprobación de los datos con el objetivo de evitar falsos saltos de irradiancia.

En las siguientes páginas se expone las matrices correspondientes:

MATRIZ DE TRANSICIÓN AÑO 2013
Piranómetro cada 5 segundos

5 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	230743	1517	89	40	1	1	0	0	0	0	0
100-200	1511	372870	3091	175	49	21	13	10	1	0	0
200-300	96	3093	319402	4932	465	178	91	72	26	12	3
300-400	41	156	4969	286910	6180	753	315	173	89	47	18
400-500	4	61	453	6272	274693	6471	882	378	213	88	52
500-600	2	32	177	733	6577	266030	5749	875	377	193	97
600-700	2	12	85	300	892	5820	215098	5158	821	327	160
700-800	0	1	53	157	384	917	5217	194520	4428	729	288
800-900	0	3	32	74	196	376	891	4466	188543	3770	593
900-1000	0	0	9	48	78	171	298	793	3829	230506	3239
1000-1100	0	0	3	14	49	90	133	271	608	3315	83103

Tabla 13. Matriz de transición piranómetro para 5 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD AÑO 2013
Piranómetro cada 5 segundos

5 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100-200	0	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0
200-300	0	1	97	2	0	0	0	0	0	0	0
300-400	0	0	2	96	2	0	0	0	0	0	0
400-500	0	0	0	2	95	2	0	0	0	0	0
500-600	0	0	0	0	2	95	2	0	0	0	0
600-700	0	0	0	0	0	3	94	2	0	0	0
700-800	0	0	0	0	0	0	3	94	2	0	0
800-900	0	0	0	0	0	0	0	2	95	2	0
900-1000	0	0	0	0	0	0	0	0	2	96	1
1000-1100	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	95

Tabla 14. Matriz de probabilidad piranómetro para 5 segundos año 2013

MATRIZ DE TRANSICIÓN AÑO 2013

Célula Calibrada cada 5 segundos

5 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	275899	2766	9	11	4	5	1	1	2	0	0
100-200	2762	393297	3252	170	68	53	33	15	8	21	0
200-300	20	3251	331487	5398	490	204	115	55	36	19	1
300-400	13	173	5429	287580	6417	750	311	169	101	51	22
400-500	5	71	481	6491	298560	6331	908	385	176	97	43
500-600	8	51	196	743	6435	237212	5663	865	390	186	74
600-700	1	25	98	327	908	5727	203264	4707	794	337	150
700-800	1	14	61	155	361	897	4747	201595	4003	741	227
800-900	2	7	34	82	167	397	842	4052	214558	3757	426
900-1000	2	24	14	45	90	170	337	727	3829	171362	1504
1000-1100	0	1	2	15	44	73	115	226	437	1564	13727

Tabla 15. Matriz de transición célula para 5 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD AÑO 2013
Célula Calibrada cada 5 segundos

5 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100-200	1	98	1	0	0	0	0	0	0	0	0
200-300	0	1	97	2	0	0	0	0	0	0	0
300-400	0	0	2	96	2	0	0	0	0	0	0
400-500	0	0	0	2	95	2	0	0	0	0	0
500-600	0	0	0	0	3	94	2	0	0	0	0
600-700	0	0	0	0	0	3	94	2	0	0	0
700-800	0	0	0	0	0	0	2	95	2	0	0
800-900	0	0	0	0	0	0	0	2	96	2	0
900-1000	0	0	0	0	0	0	0	0	2	96	1
1000-1100	0	0	0	0	0	0	1	1	3	10	85

Tabla 16. Matriz de probabilidad piranómetro para 5 segundos año 2013

MATRIZ DE TRANSICIÓN AÑO 2013

Piranómetro cada 30 segundos

30 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	38469	254	24	10	0	0	0	0	0	0	0
100-200	246	62163	513	27	8	2	2	1	1	0	0
200-300	9	501	53189	855	81	40	13	6	4	1	0
300-400	4	32	815	47858	952	142	49	30	16	12	3
400-500	0	13	79	1081	45779	1119	134	77	33	17	14
500-600	0	6	31	112	1093	44332	960	145	70	30	16
600-700	0	7	13	54	161	952	35831	819	138	49	25
700-800	0	0	11	31	51	148	842	32427	791	122	52
800-900	0	0	8	13	31	65	135	774	31442	632	87
900-1000	0	0	3	10	9	35	55	142	629	38367	513
1000-1100	0	0	0	3	6	17	25	57	120	581	13832

Tabla 17. Matriz de transición piranómetro para 30 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD AÑO 2013
Piranómetro cada 30 segundos

30 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100-200	0	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0
200-300	0	1	97	2	0	0	0	0	0	0	0
300-400	0	0	2	96	2	0	0	0	0	0	0
400-500	0	0	0	2	95	2	0	0	0	0	0
500-600	0	0	0	0	2	95	2	0	0	0	0
600-700	0	0	0	0	0	3	94	2	0	0	0
700-800	0	0	0	0	0	0	2	94	2	0	0
800-900	0	0	0	0	0	0	0	2	95	2	0
900-1000	0	0	0	0	0	0	0	0	2	96	1
1000-1100	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	94

Tabla 18. Matriz de probabilidad piranómetro para 30 segundos año 2013

MATRIZ DE TRANSICIÓN AÑO 2013**Célula Calibrada cada 30 segundos**

30 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	46033	490	3	3	1	2	0	0	0	0	0
100-200	439	65548	511	42	9	12	5	1	1	6	0
200-300	4	503	55180	890	89	46	12	7	3	2	0
300-400	1	31	914	47951	1048	129	46	38	21	11	3
400-500	2	14	78	1102	49804	1049	132	76	26	14	7
500-600	0	11	27	119	1102	39479	973	138	73	33	19
600-700	0	6	23	58	144	984	33874	806	139	49	28
700-800	1	3	12	28	54	134	751	33613	662	126	42
800-900	0	0	8	10	33	74	127	722	35794	596	79
900-1000	0	8	2	8	7	31	57	138	646	28494	255
1000-1100	0	0	1	1	9	10	28	40	69	253	2289

Tabla 19. Matriz de transición célula para 30 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD AÑO 2013
Célula Calibrada cada 30 segundos

30 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100-200	1	98	1	0	0	0	0	0	0	0	0
200-300	0	1	97	2	0	0	0	0	0	0	0
300-400	0	0	2	96	2	0	0	0	0	0	0
400-500	0	0	0	2	95	2	0	0	0	0	0
500-600	0	0	0	0	3	94	2	0	0	0	0
600-700	0	0	0	0	0	3	94	2	0	0	0
700-800	0	0	0	0	0	0	2	95	2	0	0
800-900	0	0	0	0	0	0	0	2	96	2	0
900-1000	0	0	0	0	0	0	0	0	2	96	1
1000-1100	0	0	0	0	0	0	1	1	3	9	85

Tabla 20. Matriz de probabilidad piranómetro para 30 segundos año 2013

MATRIZ DE TRANSICIÓN AÑO 2013

Piranómetro cada 60 segundos

60 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	19207	128	12	5	0	0	0	0	0	0	0
100-200	109	31114	251	11	6	0	1	1	1	0	0
200-300	6	271	26555	422	42	25	7	3	0	1	0
300-400	1	20	403	23953	475	58	26	14	5	6	1
400-500	0	8	39	540	22935	539	67	33	15	5	9
500-600	0	4	18	57	537	22153	475	74	33	12	9
600-700	0	3	7	27	81	492	17914	419	81	22	16
700-800	0	0	3	16	27	75	419	16239	364	56	19
800-900	0	0	5	8	18	35	59	376	15731	328	50
900-1000	0	0	2	3	3	12	18	72	314	19153	261
1000-1100	0	0	0	3	3	11	14	24	50	296	6937

Tabla 21. Matriz de transición piranómetro para 60 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD AÑO 2013
Piranómetro cada 60 segundos

60 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100-200	0	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0
200-300	0	1	97	2	0	0	0	0	0	0	0
300-400	0	0	2	96	2	0	0	0	0	0	0
400-500	0	0	0	2	95	2	0	0	0	0	0
500-600	0	0	0	0	2	95	2	0	0	0	0
600-700	0	0	0	0	0	3	94	2	0	0	0
700-800	0	0	0	0	0	0	2	94	2	0	0
800-900	0	0	0	0	0	0	0	2	95	2	0
900-1000	0	0	0	0	0	0	0	0	2	97	1
1000-1100	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	95

Tabla 22. Matriz de probabilidad piranómetro para 60 segundos año 2013

MATRIZ DE TRANSICIÓN AÑO 2013

Célula Calibrada cada 60 segundos

60 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	23021	255	2	1	0	2	0	0	0	0	0
100-200	222	32747	232	19	4	7	3	1	1	5	0
200-300	1	261	27623	424	43	31	6	2	0	1	0
300-400	0	19	449	24002	537	49	26	19	8	6	2
400-500	0	8	35	544	24894	547	65	41	9	7	4
500-600	0	7	16	60	515	19749	497	61	40	18	10
600-700	0	3	10	33	73	511	16929	408	64	27	14
700-800	1	1	6	17	28	63	381	16787	336	62	21
800-900	0	0	6	4	19	30	56	354	17857	309	46
900-1000	0	3	1	3	4	17	22	69	315	14283	140
1000-1100	0	0	1	1	4	5	13	15	33	129	1140

Tabla 23. Matriz de transición célula para 60 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD AÑO 2013
Célula Calibrada cada 60 segundos

60 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100-200	1	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0
200-300	0	1	97	1	0	0	0	0	0	0	0
300-400	0	0	2	96	2	0	0	0	0	0	0
400-500	0	0	0	2	95	2	0	0	0	0	0
500-600	0	0	0	0	2	94	2	0	0	0	0
600-700	0	0	0	0	0	3	94	2	0	0	0
700-800	0	0	0	0	0	0	2	95	2	0	0
800-900	0	0	0	0	0	0	0	2	96	2	0
900-1000	0	0	0	0	0	0	0	0	2	96	1
1000-1100	0	0	0	0	0	0	1	1	2	10	85

Tabla 24. Matriz de probabilidad piranómetro para 60 segundos año 2013

A partir de las matrices, tanto de transición como de probabilidad, se hace constar la tendencia de la irradiancia a permanecer en el mismo estado, es decir, cuando $i=j$ (diagonal de la matriz). Esta situación es conocida como persistencia y no es el objetivo de este trabajo, el cual es la diferencia de cambios de estado de la radiación medida por distintos equipos de medición.

Alrededor del 95% de las transiciones no cambia de estado, mostrando la célula para estados altos de irradiancia (1000-1100 W/m²) probabilidades por debajo del 90% para los 3 tipos de intervalos de tiempo. El piranómetro no baja del 94% en ninguno de los casos. En ello, se encuentra la primera diferencia de los transitorios. En una primera aproximación, la célula detecta mayores saltos de radiación (mínimo de 50 W/m²) que los medidos por el piranómetro.

No obstante, la célula capta menos transiciones con saltos mayores a 50 W/m², lo que conlleva el menor porcentaje. Por otro lado, el piranómetro para el estado en cuestión (1000-1100 W/m²) capta 83103 transiciones (tabla 13) frente a las 13727 de la célula (tabla 15), esto representa un 505,4% más. En el siguiente punto se analiza en detalle esta diferencia.

Con el objetivo de mostrar la tendencia de cambio de estado de ambos equipos, se presentan las matrices de probabilidad de cambio de estado sin contabilizar la diagonal de la matriz (cuando $i \neq j$).

4.2.2 Análisis de la frecuencia de cambios de estado (cuando $i \neq j$).

Una vez presentado el número de transiciones a lo largo de un año, el presente apartado se centra en los cambios de estado de irradiancia (aquellos valores de la matriz distintos a la diagonal principal). Por ejemplo: un valor de 35W/m² que al cabo de 30 segundos pasa a 75W/m² no contabilizaría ya que sigue en el primer estado [0-100] W/m². Si contabilizaría el caso de que sobrepasase los 100 W/m², porque entraría en el salto [100-200] W/m².

Una vez presentadas las matrices de cambio de estado o transición, se realiza un estudio detallado de la frecuencia de cambio a partir de gráficos y tendencias que ayuden a entender mejor la casuística tratada.

Los elementos de la nueva matriz corresponden al cálculo de cada transición de un estado “i” a otro estado “j” entre el número total de transición de dicho estado “i”. Siguiendo la expresión:

$$A_{ij} = \frac{B_{ij} * 100}{N_t};$$

Donde:

- A_{ij} es el elemento correspondiente a la fila “i” y columna “j” de la nueva matriz.
- B_{ij} es el dato correspondiente a la fila “i” y columna “j” de la matriz de transición.
- N_t es el número de transiciones totales para la fila “i” sin contabilizar los valores de la diagonal principal ($i \neq j$).

Siendo una matriz de probabilidad, la suma de cada fila e columna ha de sumar 100. En las siguientes páginas se presenta los resultados de esta nueva matriz para cada equipo (piranómetro y célula) e intervalo de tiempo correspondiente (5 segundos, 30 segundos y 60 segundos):

MATRIZ DE PROBABILIDAD DE CAMBIO DE ESTADO AÑO 2013
Piranómetro cada 5 segundos

5 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	-	92	5	2	0	0	0	0	0	0	0
100-200	31	-	63	4	1	0	0	0	0	0	0
200-300	1	34	-	55	5	2	1	1	0	0	0
300-400	0	1	39	-	49	6	2	1	1	0	0
400-500	0	0	3	42	-	44	6	3	1	1	0
500-600	0	0	1	5	44	-	39	6	3	1	1
600-700	0	0	1	2	7	43	-	38	6	2	1
700-800	0	0	0	1	3	8	43	-	36	6	2
800-900	0	0	0	1	2	4	9	43	-	36	6
900-1000	0	0	0	1	1	2	4	9	45	-	38
1000-1100	0	0	0	0	1	2	3	6	14	74	-

Tabla 25. Matriz de probabilidad de cambio de estado piranómetro para 5 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD DE CAMBIO DE ESTADO AÑO 2013
Célula Calibrada cada 5 segundos

5 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	-	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100-200	43	-	51	3	1	1	1	0	0	0	0
200-300	0	34	-	56	5	2	1	1	0	0	0
300-400	0	1	40	-	48	6	2	1	1	0	0
400-500	0	0	3	43	-	42	6	3	1	1	0
500-600	0	0	1	5	44	-	39	6	3	1	1
600-700	0	0	1	3	7	44	-	36	6	3	1
700-800	0	0	1	1	3	8	42	-	36	7	2
800-900	0	0	0	1	2	4	9	41	-	38	4
900-1000	0	0	0	1	1	3	5	11	57	-	22
1000-1100	0	0	0	1	2	3	5	9	18	63	-

Tabla 26. Matriz de probabilidad de cambio de estado célula para 5 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD DE CAMBIO DE ESTADO AÑO 2013
Piranómetro cada 30 segundos

30 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	-	88	8	3	0	0	0	0	0	0	0
100-200	31	-	64	3	1	0	0	0	0	0	0
200-300	1	33	-	57	5	3	1	0	0	0	0
300-400	0	2	40	-	46	7	2	1	1	1	0
400-500	0	1	3	42	-	44	5	3	1	1	1
500-600	0	0	1	5	44	-	39	6	3	1	1
600-700	0	0	1	2	7	43	-	37	6	2	1
700-800	0	0	1	2	2	7	41	-	39	6	3
800-900	0	0	0	1	2	4	8	44	-	36	5
900-1000	0	0	0	1	1	3	4	10	45	-	37
1000-1100	0	0	0	0	1	2	3	7	15	72	-

Tabla 27. Matriz de probabilidad de cambio de estado piranómetro para 30 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD DE CAMBIO DE ESTADO AÑO 2013
Célula Calibrada cada 30 segundos

30 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	-	98	1	1	0	0	0	0	0	0	0
100-200	43	-	50	4	1	1	0	0	0	1	0
200-300	0	32	-	57	6	3	1	0	0	0	0
300-400	0	1	41	-	47	6	2	2	1	0	0
400-500	0	1	3	44	-	42	5	3	1	1	0
500-600	0	0	1	5	44	-	39	6	3	1	1
600-700	0	0	1	3	6	44	-	36	6	2	1
700-800	0	0	1	2	3	7	41	-	37	7	2
800-900	0	0	0	1	2	4	8	44	-	36	5
900-1000	0	1	0	1	1	3	5	12	56	-	22
1000-1100	0	0	0	0	2	2	7	10	17	62	-

Tabla 28. Matriz de probabilidad de cambio de estado célula para 30 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD DE CAMBIO DE ESTADO AÑO 2013
Piranómetro cada 60 segundos

60 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	-	88	8	3	0	0	0	0	0	0	0
100-200	29	-	66	3	2	0	0	0	0	0	0
200-300	1	35	-	54	5	3	1	0	0	0	0
300-400	0	2	40	-	47	6	3	1	0	1	0
400-500	0	1	3	43	-	43	5	3	1	0	1
500-600	0	0	1	5	44	-	39	6	3	1	1
600-700	0	0	1	2	7	43	-	36	7	2	1
700-800	0	0	0	2	3	8	43	-	37	6	2
800-900	0	0	1	1	2	4	7	43	-	37	6
900-1000	0	0	0	0	0	2	3	11	46	-	38
1000-1100	0	0	0	1	1	3	3	6	12	74	-

Tabla 29. Matriz de probabilidad de cambio de estado piranómetro para 60 segundos año 2013

MATRIZ DE PROBABILIDAD DE CAMBIO DE ESTADO AÑO 2013
Célula Calibrada cada 60 segundos

60 seg	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
0-100	-	98	1	0	0	1	0	0	0	0	0
100-200	45	-	47	4	1	1	1	0	0	1	0
200-300	0	34	-	55	6	4	1	0	0	0	0
300-400	0	2	40	-	48	4	2	2	1	1	0
400-500	0	1	3	43	-	43	5	3	1	1	0
500-600	0	1	1	5	42	-	41	5	3	1	1
600-700	0	0	1	3	6	45	-	36	6	2	1
700-800	0	0	1	2	3	7	42	-	37	7	2
800-900	0	0	1	0	2	4	7	43	-	38	6
900-1000	0	1	0	1	1	3	4	12	55	-	24
1000-1100	0	0	0	0	2	2	6	7	16	64	-

Tabla 30. Matriz de probabilidad de cambio de estado célula para 60 segundos año 2013

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA

Evaluando las matrices, se aprecia la tendencia a seguir cerca de la diagonal de la matriz o también denominado, una transición suave. Para estados por debajo de los 500 W/m² (por la mañana del día), el piranómetro detecte transiciones más rápidas a estados de mayor radiación frente a la transición suave que realiza la célula.

Por ejemplo, para intervalo de 60 segundos, el piranómetro (tabla 29) detecta transiciones del estado [0-100] al estado [100-200] en un 88% frente al 98% de la célula (tabla 30). Si bien, en estados intermedios que rondan los 500 W/m², la tendencia se asemeja en ambos equipos. Analizando los estados de mayor radiación la tendencia se invierte, el piranómetro detecta mayores transiciones que la célula en las horas de mayor radiación.

Debido a su capacidad para medir la irradiancia real, el piranómetro es capaz de medir mayor número de transiciones que la célula. No obstante, la diferencia está alrededor del 2% para intervalos de tiempo de 5 y 30 segundos, alrededor del 1% para 60 segundos. En la siguiente tabla se resume los valores recopilados para el año 2013:

	Piranómetro	Célula calibrada	Diferencia (%)
5 segundos	107.014	105.071	1,8%
30 segundos	17.899	17.580	1,8%
60 segundos	8.877	8780	1,1%

Tabla 31. Número de transiciones por intervalo de tiempo en 2013

Para ilustrar mejor esta capacidad de cambio de los equipos, se muestra en las siguientes figuras que estados son más propicios a tener más transiciones.

Por un lado, la siguiente gráfica muestra la suma de las transiciones del estado “i” (fila de la matriz) que cambian de estado ($i \neq j$). Por ejemplo, el estado [200-300] W/m² es menos propenso (9000 aprox.) a cambiar al estado “j” (columna de la matriz) que el estado [500-600] W/m² (pico de la gráfica).

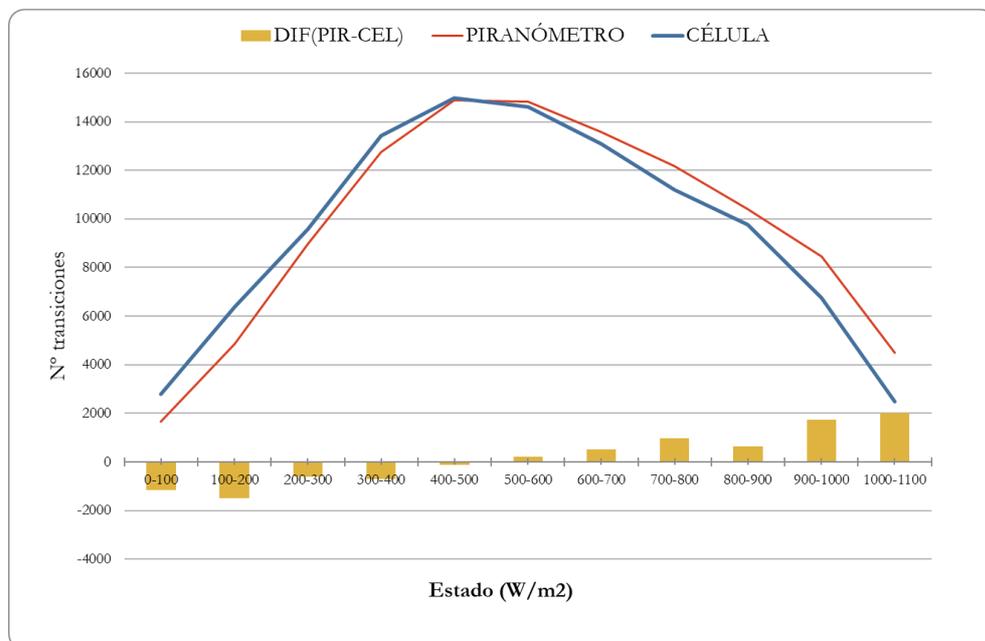


Ilustración 29. Número de transiciones para un intervalo de 5 segundos.

[Datos calculados a partir de las tablas 13 y 15 de este documento.]

La gráfica muestra claramente los estados más propensos al cambio. Aquellos que se aproximan a valores cercanos a 500 W/m². Relacionado con las curvas de radiación analizadas anteriormente (punto 4.1), las horas de la mañana y tarde son los momentos del día que más cambio de estado obtienen.

Por otro lado, se muestra el gráfico siguiente con la probabilidad de salto de cada estado “i” a otro estado “j”. Calculado como la suma de todas las transiciones cuando $i \neq j$ entre la suma total de las transiciones del estado “i” (incluyendo $i=j$):

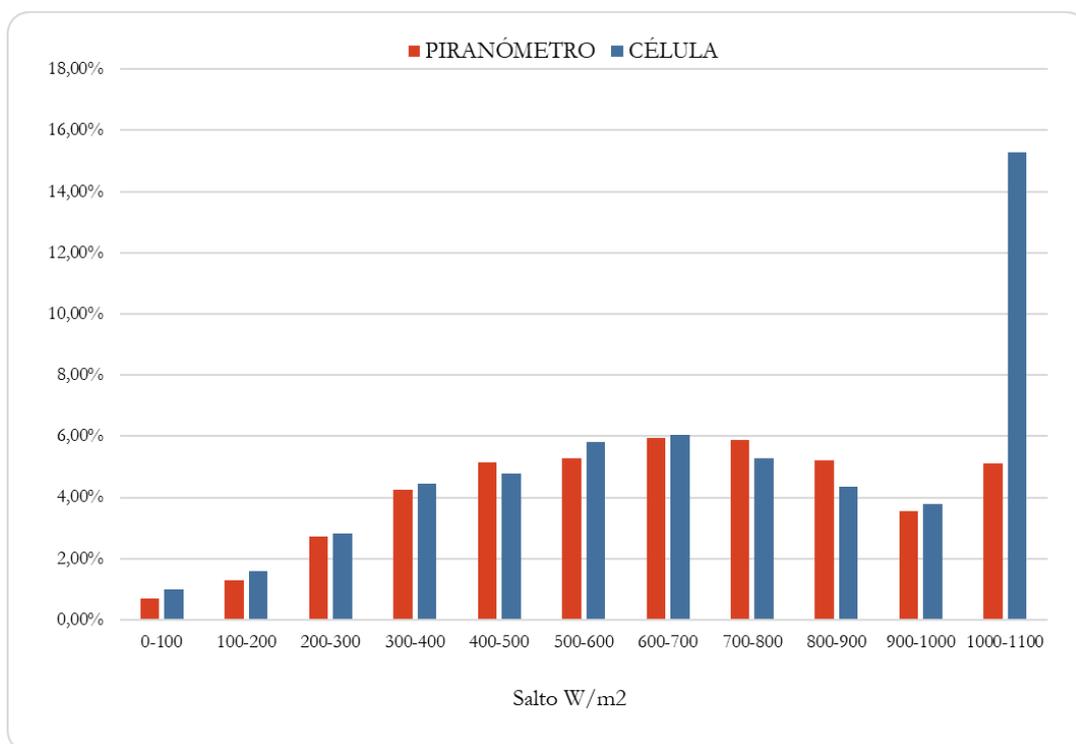


Ilustración 30. Probabilidad de cambio de estado para un intervalo de 5 segundos.

[Datos calculados a partir de las tablas 13 y 15 de este documento.]

Siguiendo la línea anterior, a bajos niveles de radiación (entre el 1-2% de probabilidad de cambio) la célula detecta mayores transiciones que el piranómetro. En su caso, detecta para el resto de estados (entre el 2-6% de probabilidad de cambio) más transiciones por encima de los 50 W/m².

Es interesante la probabilidad de cambio de estado de la célula en el estado de mayor radiación, el cual se dispara al 15 % aproximadamente. En estos niveles de irradiancia, el piranómetro detecta mejor la irradiancia siendo su funcionamiento mejor y es más estable comparado con la célula que no detecta todo el espectro solar.

Hay que tener en consideración el efecto del ángulo de incidencia solar (AOI) sobre la célula, debido a que existen instalaciones donde el equipamiento no viene con seguimiento a dos ejes. Por consiguiente, la radiación solar global que incide sobre la placa se ve afectada (Lillo-Bravo I, 2020)

Las medidas vienen tomadas cada 5 segundos por los equipos de medida instalados (punto 3.2 del documento). A continuación, se presentan los gráficos para intervalos de tiempo de 30 y 60 segundos, los cuales han sido calculados a partir de la herramienta Excel.

Con estos gráficos se busca analizar cómo afecta el tiempo en las medidas de la radiación y qué aproximación se puede dar si se tiene menos datos recopilados por los equipos.

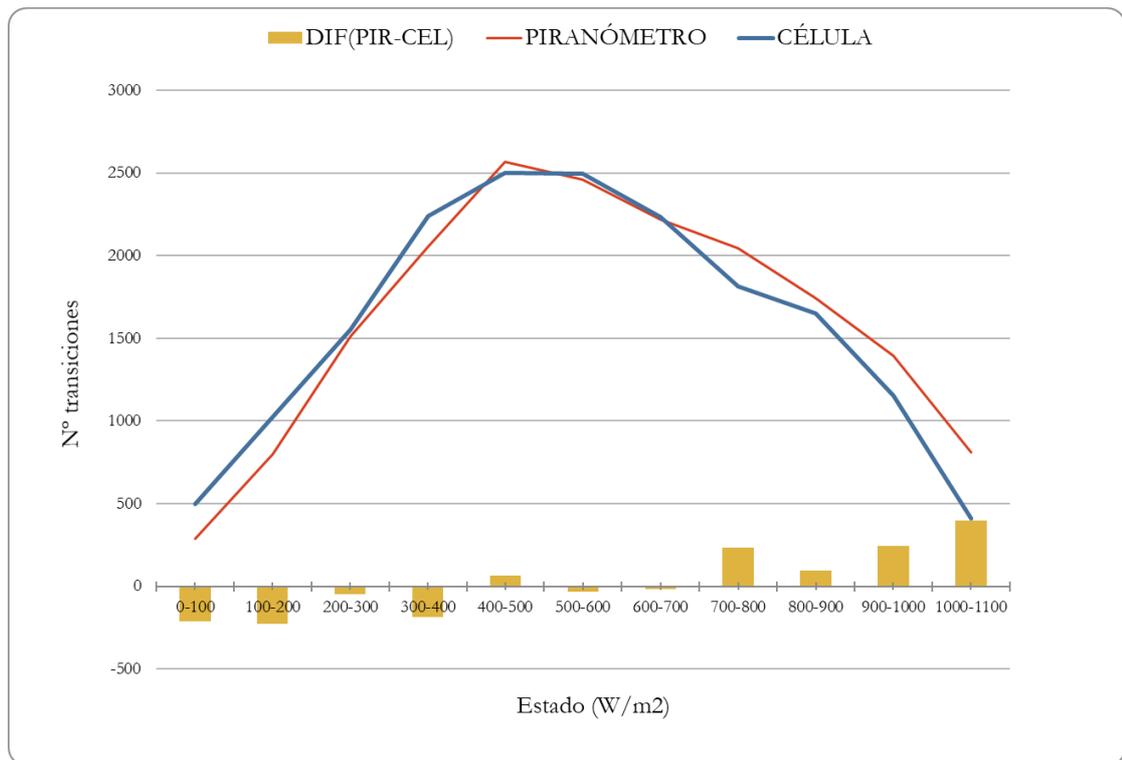


Ilustración 31. Número de transiciones para un intervalo de 30 segundos.

[Datos calculados a partir de las tablas 17 y 19 de este documento.]

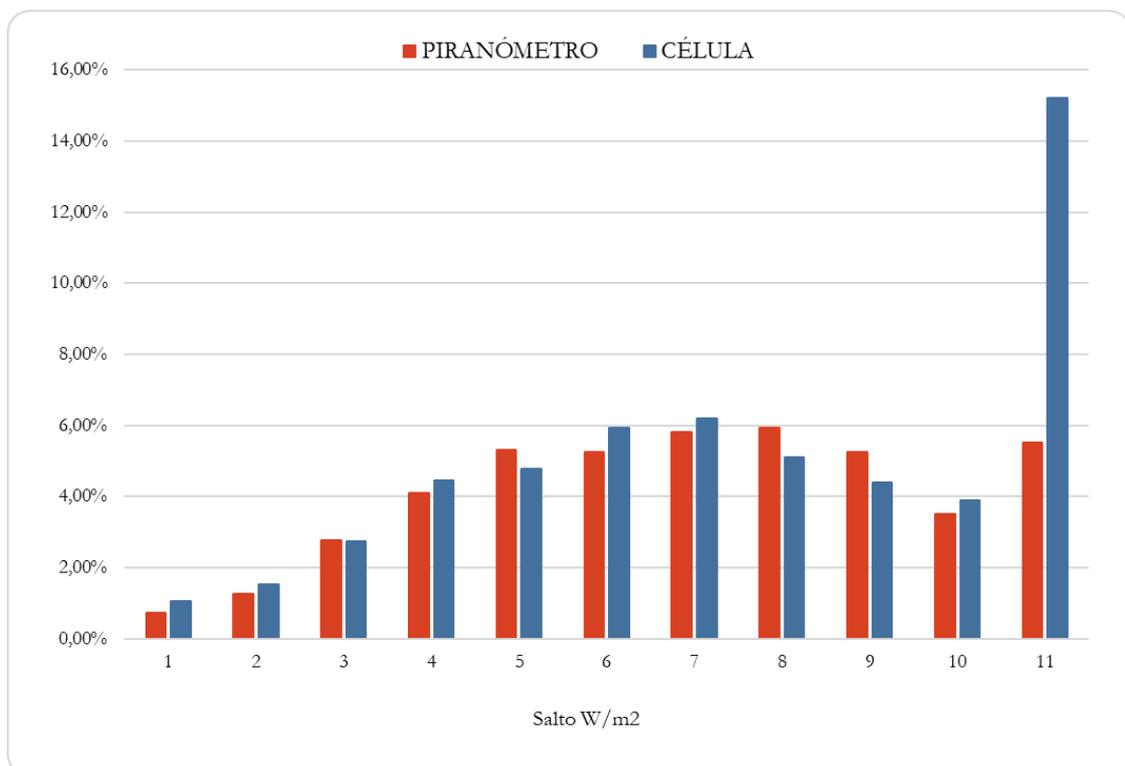


Ilustración 32. Probabilidad de cambio de estado para un intervalo de 30 segundos.

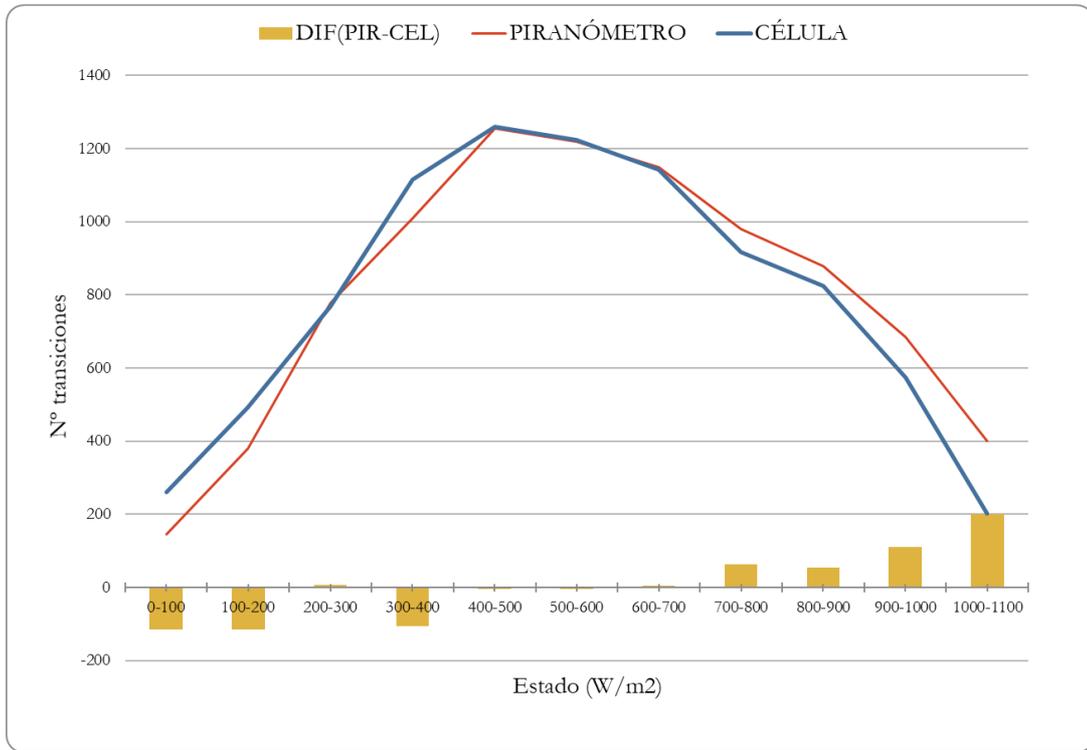


Ilustración 33. Número de transiciones para un intervalo de 60 segundos.

[Datos calculados a partir de las tablas 21 y 23 de este documento.]

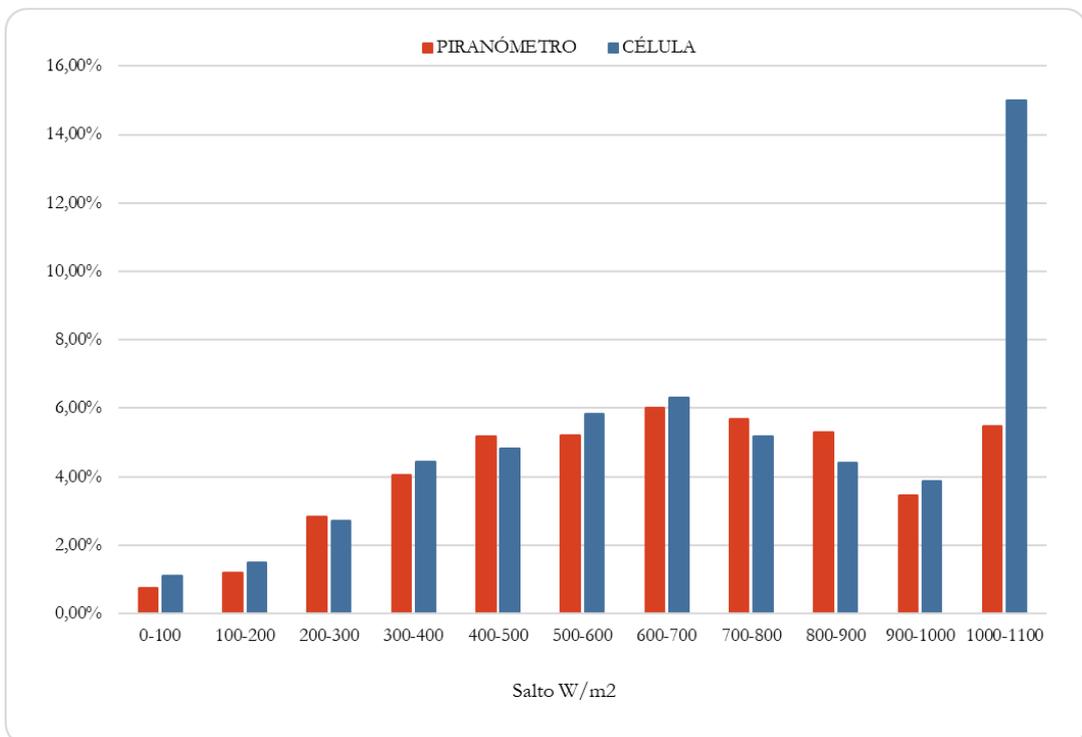


Ilustración 34. Probabilidad de cambio de estado para un intervalo de 60 segundos.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSITORIOS EN LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE MEDIDAS DE PIRANÓMETRO Y CÉLULA CALIBRADA

Siguiendo la tendencia para el intervalo de 5 segundos, estos gráficos muestran la diferencia según el estado (W/m^2) de las medidas de piranómetro y célula calibrada.

Se aglutina los valores de los gráficos en una tabla para una mayor comprensión:

	5 segundos	30 segundos	60 segundos
0-100	-1151	-211	-115
100-200	-1511	-226	-114
200-300	-621	-46	8
300-400	-695	-187	-106
400-500	-114	67	-5
500-600	201	-32	-5
600-700	503	-19	5
700-800	967	235	63
800-900	635	96	55
900-1000	1723	244	111
1000-1100	2006	398	200

Tabla 32. Resumen Diferencias de transiciones entre piranómetro y célula calibrada.

[Datos a partir de las ilustraciones 30,32 y 34 del documento]

A mayor intervalo de tiempo, más inestable los resultados aun reduciéndose las diferencias a 5 en los estados intermedios (alrededor de $500 W/m^2$). No obstante, se presenta la misma casuística. A estados de radiación bajos la célula detecta mayores transiciones y a mayores estados se invierte, siendo el piranómetro capaz de captar mayores transiciones.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo presenta los resultados de un análisis para el año 2013 de la Radiación Solar Global medida por un piranómetro y una célula calibrada instalados en Sevilla, España. Las medidas están tomadas cada 5 segundos y se ha extendido el estudio a los intervalos de 30 y 60 segundos en los transitorios y para los casos específicos a 1, 10, 30 y 60 minutos.

Se puede afirmar la diferencia en la medida de la radiación entre los dos equipos, siendo la del piranómetro mayor a la célula como se ha comentado anteriormente. Después de analizar casos específicos de días nublados y soleados para estudiar la variabilidad de la radiación, se obtienen errores relativos promedio para las diferencias de radiación en un tiempo “t” del 19% para el caso de 5 segundos y menor si se incrementa el intervalo. Se destaca los resultados para intervalo de 1 minuto, el cual resulta un error del 26%. En cuanto a la diferencia en los saltos de irradiancia entre ambos equipos, no superan la unida; 0,35 W/m² y 0,67 W/m² para intervalos de 5 segundos y 1 minuto respectivamente.

Con la ayuda de las curvas de irradiancia de ambos equipos por hora se detecta a simple vista las diferencias en ambas medidas y la capacidad de seguir la variación de la irradiancia por parte de los equipos. Siendo la célula más rápida en el tiempo de respuesta, es menos precisa porque no capta todo el espectro solar.

Las matrices de transición y de probabilidad muestran la tendencia a permanecer en el mismo estado de radiación (denominado el fenómeno de persistencia). Se obtiene un valor en torno al 95% de los casos que no cambia de estado para los tres intervalos de tiempo analizados. Destaca el caso del intervalo de mayor radiación [1000-1100] W/m² el cual en la célula baja al 85%, demostrando la menor capacidad de la misma de funcionar en valores altos de radiación en comparación al piranómetro el cual no se ve afectado. Concentrándose en el número de transiciones que si cambia de estado, se obtiene una probabilidad de cambio de estado de entre 1-2% para valores bajos de radiación (menores a 300 W/m²) y valores entre 2-6% para el resto de estados analizados. En concreto, también se aprecia cómo reacciona la célula en valores altos de radiación con una probabilidad de cambio del 15% en este estado límite.

En resumen, utilizando los datos analizados en este proyecto se deduce la diferencia en la medida de la radiación y su respuesta ante la variabilidad de la irradiancia del piranómetro frente a la célula calibrada.

Como posible línea futura de estudio, se puede realizar un modelo estadístico que en función de la hora y condiciones climatológicas del día aproxime la medida de la irradiancia del piranómetro a la célula para así evaluar proyectos de plantas fotovoltaicas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Laurent Linguet, Yannis Pousset, Christian Olivier, “*Identifying statistical properties of solar radiation models by using information criteria*”. Solar Energy (March 2016)
- [2] J. Meydbray, K. Emery. “Pyranometers and reference cells, what’s the difference?”. NREL/JA-5200-54498 (March 2012)
- [3] H. Haerberlin and Ch. Beutler. “*Comparison of pyranometer and si-reference cell solar irradiation data in long term PV plant monitoring*”. 13th EU PV Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Nice, France, 1995. Pages 1-4.
- [4] L. Dunn, M. Gostein, and K. Emery, “*Comparison of Pyranometers vs. Reference Cells for Evaluation of PV Array Performance*,” Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Austin, TX, June 3-8, 2012. 2012 IEEE.
- [5] Polo, W.G. Fernandez-Neira, M.C. Alonso-García. “*On the use of reference modules as irradiance sensor for monitoring and modelling rooftop PV systems*”. Renewable Energy, Volume 106, 2017, Pages 186-191, ISSN 0960-1481
- [6] B. Marion, “*Influence of atmospheric variations on photovoltaic performance and modelling their effects for days with clear skies*,” in Proc. 38th IEEE Photovoltaic Spec. Conf., 2012, pp. 3402–3407
- [7]. Alonso-Abella, M., Chenlo, F., Nofuentes, G., Torres-Ramírez, M., 2014. “*Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: the case of four specific sites*”. Energy 67, 435–443.
- [8] Bachour, D., Perez-Astudillo. D., 2014. “*Ground measurements of Global Horizontal Irradiation in Doha*”. Qatar. Renewable Energy 71
- [9] Ata Madanchi, M. Absalan, G. Lohmann, M. Anvari, M. Reza Rahimi Tabar, “*Strong short-term non-linearity of Solar Irradiance Fluctuations*”. Solar Energy (2017)
- [10] P.G. McCormick, H. Suehrcke, “*The effect of intermittent solar radiation on the performance of PV systems*”. Solar Energy (2018)
- [11] Estación de Medida del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER): <https://estacionmeteo.us.gter.es/>

REFERENCIAS

- CEPS, COWI, Directorate-General for Energy (European Commission). (2019). *Competitiveness of corporate sourcing of renewable energy*. Publications Office of the European Union. Retrieved from https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8a262c4f-c486-11e9-9d01-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc_id=Searchresult&WT.ria_c=37085&WT.ria_f=3608&WT.ria_ev=search
- Lillo-Bravo I, L. M.-O.-G. (2020, February). Simplified Model to correct thermopile pyranometer solar radiation measurements for photovoltaic module yield estimation. *Renewable Energy*.
- Morales, M. F. (2013, Mayo). Comparación de modelos de cielo despejado para la predicción a corto plazo de la irradiancia directa normal.
- Moreno-Tejera, S., Silva-Pérez, M., Lillo-Bravo, I., & Ramírez-Santigosa, L. (2016, April 4). Statistical characterisation of solar radiation at different time resolutions.

