



Universidad de Valladolid

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal,
Agronómica y de la Bioenergía**

Campus de Soria

MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**TÍTULO: Diseño, implementación y análisis del aumento de
productividad de un sistema solar en flotación.**

~~~~~

**AUTOR: David Ciriano Martínez**

**DEPARTAMENTO: Ingeniería agrícola y forestal / Física aplicada**

**TUTOR/ES: Luis Hernández Callejo / Víctor Alonso Gómez**

**SORIA, Septiembre de 2022**



## AUTORIZACIÓN DE LOS TUTORES DEL TRABAJO FINAL DE MASTER

D.LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO profesor del departamento de ingeniería agrícola y forestal y D.VÍCTOR ALONSO GÓMEZ profesor del departamento de física aplicada, como tutores del Trabajo Final de Master titulado "Diseño, implementación y análisis del aumento de productividad de un sistema solar en flotación", presentado por el alumno D.DAVID CIRIANO MARTÍNEZ, da el Vº. Bº. y autoriza la presentación del mismo, considerando que el alumno ha desarrollado un TFM acorde con las expectativas del mismo.

Soria, 17 de Septiembre de 2022.

Los tutores del TFM

Fdo.: Luis Hernández Callejo .

Fdo.: Víctor Alonso Gómez.

|                                      |                                                                                                                                                               |               |                     |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|
| <b>Código Seguro De Verificación</b> | wNSdSopKnYJ51UiUVUnzlG==                                                                                                                                      | <b>Estado</b> | <b>Fecha y hora</b> |
| <b>Firmado Por</b>                   | Luis Hernandez Callejo                                                                                                                                        | Firmado       | 19/09/2022 10:24:31 |
|                                      | Victor Alonso Gomez                                                                                                                                           | Firmado       | 18/09/2022 18:56:51 |
| <b>Observaciones</b>                 |                                                                                                                                                               | <b>Página</b> | 1/1                 |
| <b>Url De Verificación</b>           | <a href="https://sede.uva.es/Validacion_Documentos?code=wNSdSopKnYJ51UiUVUnzlG==">https://sede.uva.es/Validacion_Documentos?code=wNSdSopKnYJ51UiUVUnzlG==</a> |               |                     |
| <b>Normativa</b>                     | Este informe tiene carácter de copia electrónica auténtica con validez y eficacia administrativa de ORIGINAL (art. 27 Ley 39/2015).                           |               |                     |



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

D. DAVID CIRIANO MARTÍNEZ estudiante del Máster en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética de la Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía de la Universidad de Valladolid, **DECLARO:**

Que el Trabajo Fin de Máster (TFM) que presento para su exposición y defensa titulado “*Diseño, implementación y análisis del aumento de productividad de un sistema solar en flotación*”, es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Soria, 17 de Septiembre de 2022.

Fdo.: David Ciriano Martínez.

## AGRADECIMIENTOS

A mis tutores, Luis Hernández y Víctor Alonso, por su ayuda y dedicación en la elaboración de este trabajo.

Convenio entre la Universidad de Valladolid, Elivere Innovación y Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, O.A., M.P. (CIEMAT) para el *"estudio del aumento del rendimiento de módulos solares fotovoltaicos debido al enfriamiento de los mismos a partir de la flotación en agua"*

A todos los que están, a los que no están y a los que nunca podrán estar.

# RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MASTER

TÍTULO: DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DEL AUMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD DE UN SISTEMA SOLAR EN FLOTACIÓN.

AUTOR: DAVID CIRIANO MARTINEZ.

TUTORES: LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO Y VÍCTOR ALONSO GÓMEZ.

DEPARTAMENTOS: INGENIERÍA AGRÍCOLA Y FORESTAL Y FÍSICA APLICADA.

## RESUMEN:

En este Trabajo de Fin de Master (TFM) se realizará una comparativa entre el funcionamiento de dos grupos de dos paneles cada uno, estando ubicado un grupo en tierra y el otro grupo en el interior de un tanque de agua. Ambos paneles se conectan hasta dos micro inversores para completar el circuito y generar energía eléctrica en corriente alterna.

Para realizar la comparativa, se implementará la monitorización de los principales parámetros de funcionamiento como, por ejemplo, las temperaturas superficiales de todos los paneles, la temperatura ambiente, las temperaturas de los inversores y la potencia generada por cada panel.

El periodo de estudio y recopilación de datos está comprendido entre el 30 de mayo de 2022 al 14 de agosto del 2022.

Una vez recopilados toda esa información, se almacena de forma semanal, para posteriormente ser analizados. Para realizar el análisis, se desarrolla un software en el lenguaje "Python", para facilitar el análisis masivo y la obtención de conclusiones de todos los datos recopilados durante el periodo de estudio.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                                          | <b>1</b>  |
| <b>1.1. ENERGÍA FOTOVOLTAICA</b>                                | <b>1</b>  |
| <b>1.2. TIPOS DE INSTALACIÓN</b>                                | <b>3</b>  |
| 1.2.1. INSTALACIÓN EN TIERRA                                    | 3         |
| 1.2.2. INSTALACIÓN EN FLOTACIÓN                                 | 4         |
| <b>1.3. ANTECEDENTES</b>                                        | <b>5</b>  |
| 1.3.1. ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA                           | 5         |
| 1.3.2. ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL MUNDO                         | 7         |
| <b>2. OBJETIVOS</b>                                             | <b>9</b>  |
| <b>3. METODOLOGÍA</b>                                           | <b>10</b> |
| <b>3.1. INSTALACIÓN</b>                                         | <b>10</b> |
| <b>3.2. OBTENCIÓN DE DATOS</b>                                  | <b>12</b> |
| <b>3.3. ANÁLISIS DE DATOS</b>                                   | <b>13</b> |
| <b>4. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS</b>              | <b>19</b> |
| <b>5. BIBLIOGRAFÍA</b>                                          | <b>20</b> |
| <b>6. ANEJOS</b>                                                | <b>22</b> |
| <b>6.1. FOTOGRAFÍAS COMPLEMENTARIAS DE LA INSTALACIÓN</b>       | <b>22</b> |
| <b>6.2. DATOS INICIALES OBTENIDOS</b>                           | <b>25</b> |
| <b>6.3. CÓDIGO SOFTWARE DE PYTHON</b>                           | <b>26</b> |
| <b>6.4. ALMACENAMIENTO DE DATOS EN LA BASE DE DATOS CENTRAL</b> | <b>27</b> |

# 1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se llevará a cabo una breve descripción de la energía fotovoltaica y sus lugares de instalación más comunes para tener una idea general sobre ellos y comprender el objetivo del estudio. Además, se realizará un breve estudio del estado del sector fotovoltaico en España y a nivel global.

## 1.1. ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Un módulo fotovoltaico es un equipo que se encarga de convertir la energía de los fotones que absorbe, emitidos por el sol, en energía eléctrica. Esta conversión se realiza mediante el efecto fotoeléctrico en materiales semiconductores, de los cuales están fabricados las células que se encuentran en el interior de los paneles. [2]

En un material semiconductor, la absorción de la energía de un fotón por un electrón en la banda de valencia, proporciona la energía suficiente para saltar a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia.

Si se cierra externamente ese circuito, los electrones libres en estados energéticos más elevados en la banda de conducción, fluyen por el circuito con intención de decaer a los estados de baja energía de la banda de valencia para ocupar ese hueco que ha sido generado previamente.

A la ocupación de ese hueco en la banda de valencia por parte del electrón procedente de la banda de conducción, se le denomina recombinación.

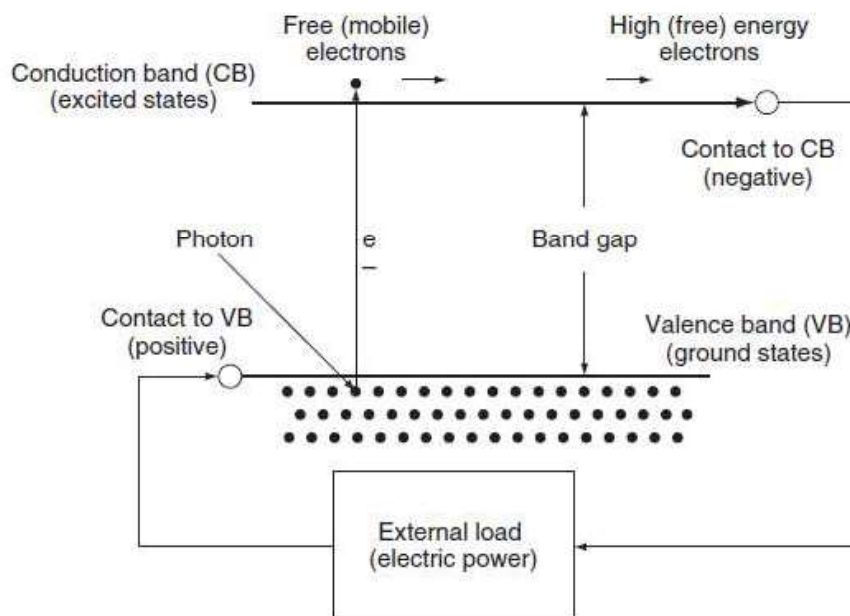


Figura 1: Funcionamiento de una célula fotovoltaica para la generación de energía eléctrica. Fuente: [3]



La conductividad de estos semiconductores, es una característica que se ha generado mediante la introducción de impurezas durante el proceso de fabricación. Las impurezas pueden ser de tipo "p" si las impurezas son aceptoras, o tipo "n" si las impurezas son donadoras.

El silicio tiene 4 electrones de valencia, cada uno de los silicios forma en una estructura cristalina perfecta sin impurezas 4 enlaces covalentes compartiendo esos electrones con otros 4 silicios que hacen lo mismo para llegar a completar su última capa electrónica para tener estructura de gas noble (de tal manera que cada enlace covalente esté compartiendo dos electrones, uno de cada uno de los dos silicios implicados en el enlace). [4]

Una impureza tipo "p", es aquella que tiene menos de 4 electrones en su última capa para compartir y formar enlaces covalentes (generalmente, 3, como el Boro, Aluminio, Galio, Indio, etc.). De este modo, uno de los 4 silicios de alrededor no podría compartir un electrón con él y faltaría un electrón para ese posible enlace covalente, lo que se denomina un hueco (o más si tiene 2 o 1 electrones en la última capa), como se muestra en la figura 2.

Una impureza de tipo "n", es aquella en la que se ha introducido un átomo que tenga más de 4 electrones para compartir en su última capa (generalmente 5 como el Nitrógeno, Fósforo, el Arsénico, el Antimonio, etc.), se podrán formar 4 enlaces covalentes con los 4 silicios de alrededor, pero quedaría un electrón sin poder estar en enlace (o más si tiene 6 o 7 en la última capa). Pero, por cuestiones que exceden este trabajo, ese electrón (o electrones) no tiene cabida en la capa de valencia y tiene que saltar a estados energéticos de la banda de conducción, como se muestra en la figura 2.

Por ello, un material tipo "n", tiene una cantidad más elevada de electrones en la banda de conducción y un material tipo "p" tiene una cantidad más elevada de huecos en la banda de valencia.

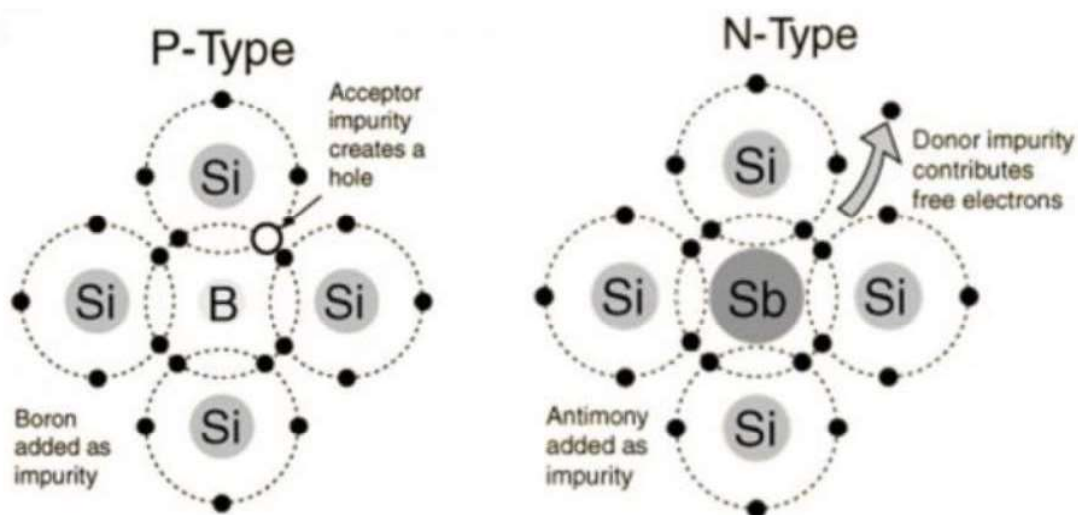


Figura 2: Red cristalina de silicio dopada con impurezas para crear semiconductores de tipo "p" y tipo "n". Fuente: [5]

## 1.2. TIPOS DE INSTALACIÓN

Las instalaciones fotovoltaicas de generación de energía se pueden situar en diferentes lugares y configuraciones, pero las dos principales que son objeto de este estudio, son las instalaciones en tierra y en flotación.

### 1.2.1. INSTALACIÓN EN TIERRA

Se trata del tipo de instalación más clásica y, por lo tanto, de la que se tiene mayor experiencia y conocimiento. Toda la instalación se realiza sobre un terreno previamente adecuado, manteniendo unas condiciones de limpieza y preparación de este que evite los obstáculos como árboles o excesiva vegetación que puedan influir de forma negativa en la generación de energía.

El módulo se instala sobre una estructura metálica para poder proporcionar un ángulo de inclinación adecuado. Esta estructura puede ser fija o móvil, para hacer un seguimiento parcial (seguidores a un eje) o total (seguidores a dos ejes) de la posición del sol y maximizar la captación de energía solar.

A su vez, la estructura se fija al suelo, directamente clavada o mediante una pequeña cimentación, capaz de soportar y distribuir las cargas generadas por el propio peso y el generado por las condiciones climáticas variables, como viento o nieve.

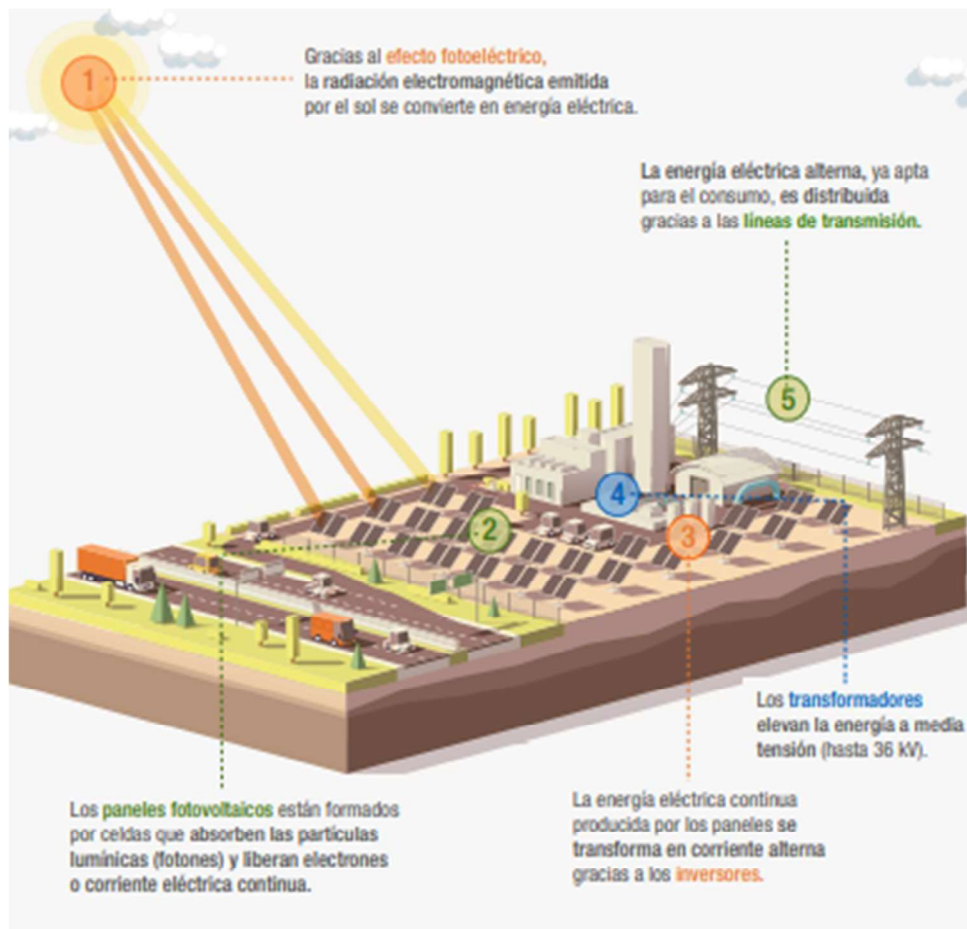


Figura 3: Esquema de instalación fotovoltaica típica en tierra. Fuente: [6]



Figura 4: Paneles fotovoltaicos instalados en tierra. Fuente: [7]

### 1.2.2. INSTALACIÓN EN FLOTACIÓN

Es un tipo de instalación más novedoso, y, por lo tanto, no se dispone de suficiente experiencia ni conocimientos, por lo que se debe prestar especial atención a cualquier resultado que se obtenga para mejorar los desarrollos.

En este tipo de instalación, el módulo se ubica en el interior de un área con una gran cantidad de agua, esta zona, puede ser un depósito, una balsa de riego, un estanque, un lago, un pantano, o incluso, el mar.

El módulo se instala sobre una estructura de soporte y de flotación. Esta estructura, puede tener un ángulo de inclinación o ser completamente paralela a la superficie del agua, dependerá de cada instalación y el área sobre la que se instale.



Figura 5: Esquema de instalación fotovoltaica flotante. Fuente: [8]



*Figura 6: Paneles fotovoltaicos instalados en flotación. Fuente: [9]*

### 1.3. ANTECEDENTES

#### 1.3.1. ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA

Las energías renovables, y en especial la fotovoltaica en los últimos años, continúan batiendo récords cada año, tanto en capacidad instalada como en energía generada. Como se observa en la figura 7, el incremento de la capacidad de generación mediante energías renovables está directamente ligada a la reducción de las energías no renovables.

Esta transición es necesaria para poder cumplir los objetivos establecidos por la Unión Europea, y a su vez, por el Gobierno de España y la “Agenda 2030”. [11]

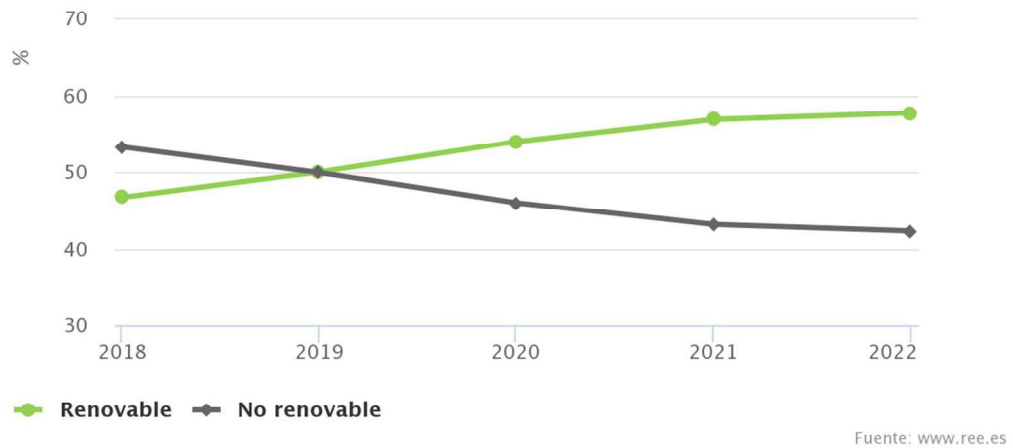


Figura 7: Evolución de potencia instalada de origen renovable vs no renovable. Fuente: [10]

Dentro de las energías renovables, hay diferentes tecnologías, por lo que, desglosando por cada tipo de tecnología, se obtienen las capacidades y el incremento de capacidad de cada una de ellas. Destacan principalmente la hidráulica, la eólica y la solar fotovoltaica.

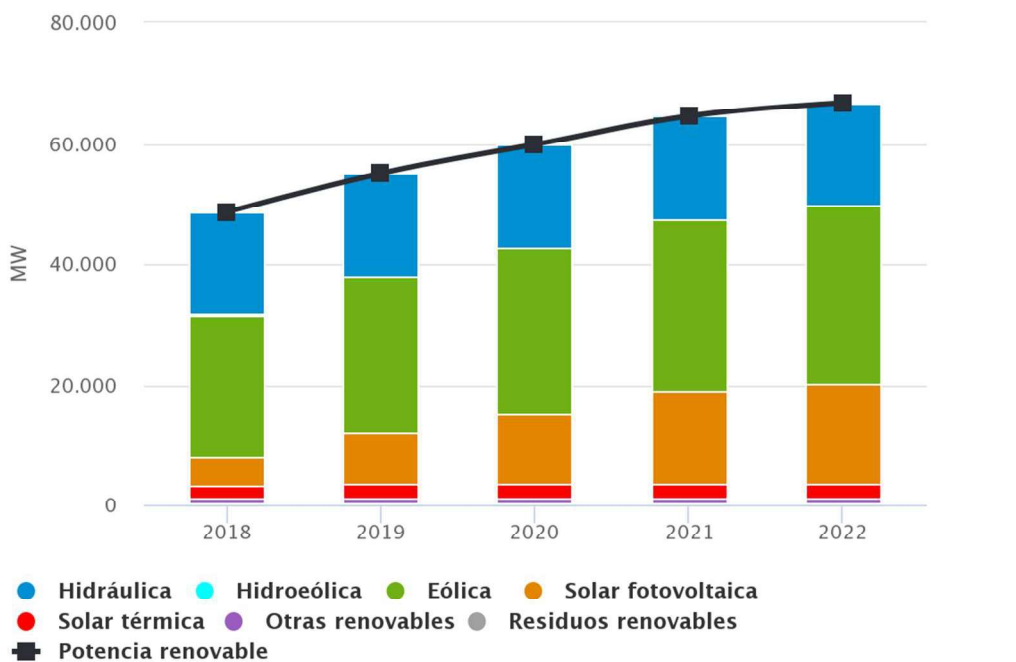
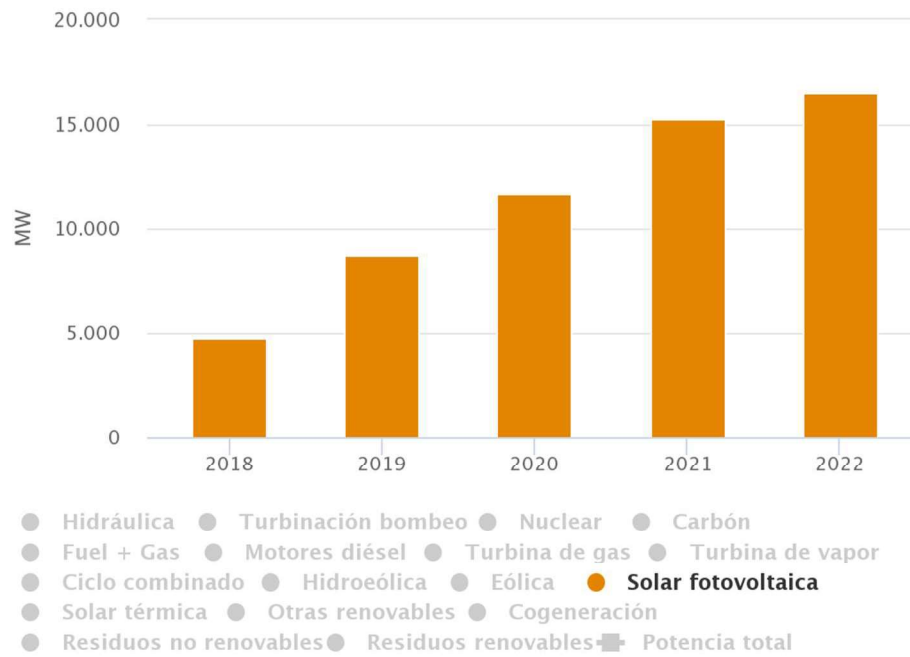


Figura 8: Evolución de la capacidad de origen renovable por tipo de tecnología de generación. Fuente: [10]

El objeto de este trabajo se centra en la energía solar fotovoltaica, por lo que será la única que se analice más en profundidad, como se muestra a continuación en la figura 9.



Fuente: www.ree.es

Figura 9: Evolución de la capacidad instalada de energía renovable solar fotovoltaica. Fuente: [10]

Como se observa en la figura 9, la capacidad instalada se ha multiplicado por 3 en los últimos 5 años. Además, la previsión para este y sucesivos años, es de incrementar la capacidad instalada hasta los 21GW en el año 2025 y 38GW en el año 2030. [11]

Para poder lograr esos objetivos, la energía fotovoltaica tendrá una gran importancia, por lo que su instalación se realizará en instalaciones en flotación, para aprovechar más la superficie, entre otros beneficios. Por este motivo, es fundamental continuar desarrollando nuevos estudios para ampliar el conocimiento del comportamiento de las instalaciones fotovoltaicas en este medio.

### 1.3.2. ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL MUNDO

El crecimiento exponencial de las energías renovables, y en especial de la fotovoltaica no es exclusivo de España. Si se analiza muy brevemente la capacidad instalada a nivel global, se observa un crecimiento similar al crecimiento a nivel nacional.

Desde el año 2011, la potencia instalada y, por lo tanto, también la potencia la producida, se han incrementado exponencialmente, debido principalmente a la reducción de costes en la fabricación e instalación. Además, el incremento de la conciencia social, a todos los niveles, desde pequeños consumidores individuales a grandes empresas consumidoras y generadoras, es otro importante motivo de este gran crecimiento.

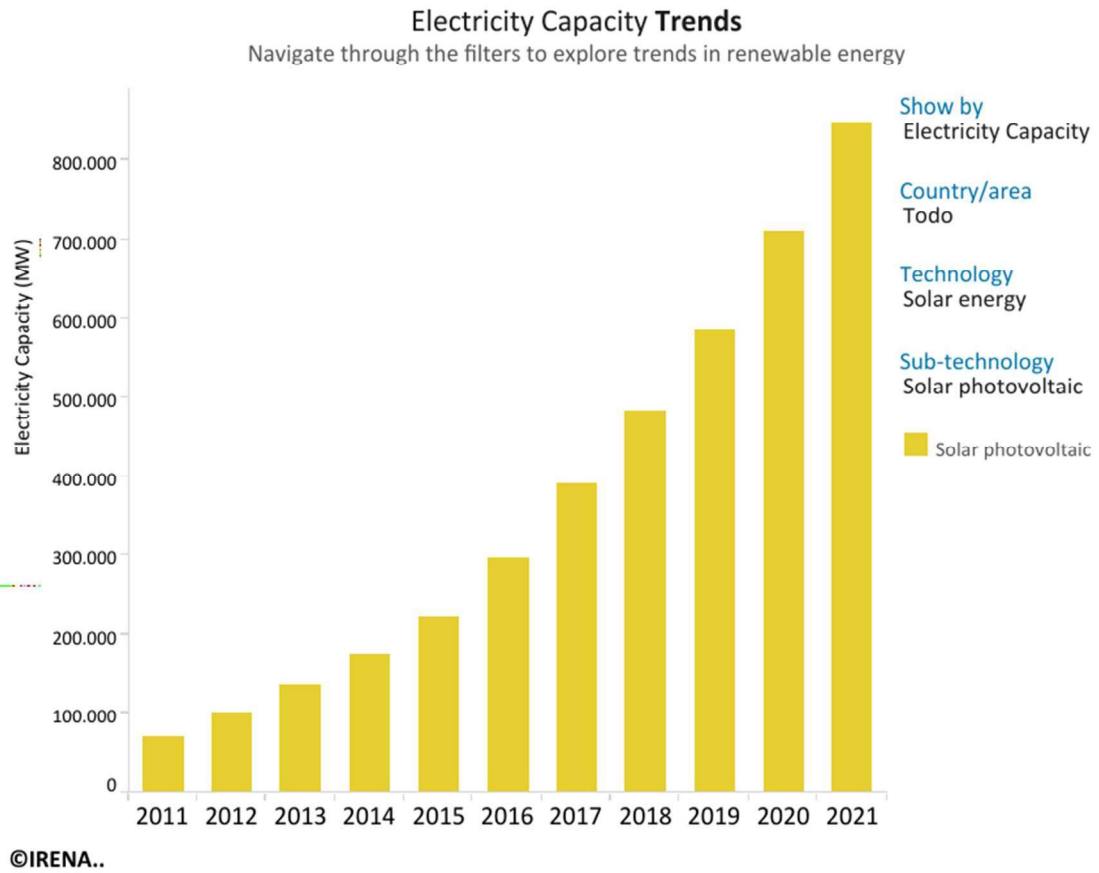


Figura 10: Evolución de la capacidad instalada a nivel global de energía solar fotovoltaica.  
Fuente: [12]



## 2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es realizar una comparativa del comportamiento de dos grupos de dos paneles fotovoltaicos de similares características, en dos entornos diferenciados y controlados. Los dos entornos, se encuentra ubicados en las instalaciones del CEDER-CIEMAT en Lubia, Soria.

Para la comparativa, uno de ellos se instala en flotación en un depósito de agua, y el otro grupo, en tierra firme junto al exterior del depósito. Ambos paneles se ubican en una distancia muy próxima, por lo que las condiciones ambientales pueden suponerse similares para el estudio. Además, se realiza el diseño de la estructura y comunicación para la transmisión de los datos recogidos por las diversas sondas instaladas en los paneles fotovoltaicos para la recogida de datos.

Los datos serán obtenidos de forma semanal y analizados con la ayuda de registro de datos en Arduino [13] y el análisis de la totalidad de los datos con Python [1] para facilitar el análisis de los datos masivos acumulados y la obtención de los resultados de la comparativa.

Objetivo principal del Trabajo Fin de Master:

- Comparación del comportamiento entre paneles fotovoltaicos instalados en tierra y en agua.

Objetivos secundarios del Trabajo Fin de Master:

- Diseño del sistema.
- Instalación de sensores para obtener datos de los equipos instalados.
- Instalación red de comunicación y registro de datos para su posterior análisis.



## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. INSTALACIÓN

El estudio de este Trabajo Final de Master, se realiza en colaboración con el CEDER (Centro de Desarrollo de Energías Renovables), ubicado en la localidad de Lubia, provincia de Soria, por lo que se utilizarán estas instalaciones para la ubicación de los equipos [14].



*Figura 11: Instalaciones CEDER-CIEMAT en la localidad de Lubia, Soria*

Se instalarán cuatro paneles fotovoltaicos, de similares características técnicas en dos lugares diferentes, dos sobre tierra firme, y otros dos, en el interior de un depósito de agua. Ambos paneles, estarán montados sobre una estructura metálica, con una inclinación de 33 grados, siendo la misma inclinación para ambas ubicaciones.

Para garantizar que el panel situado en el agua no tenga movimiento, su estructura se apoya en suelo, lastrándola con peso en la parte inferior, para evitar el efecto vela del panel y su desorientación respecto a la posición solar por efecto de una ráfaga fuerte de viento.

Ambos paneles se ubicarán muy próximos, es decir, uno en el interior del depósito, y el otro, en exterior del mismo, para que las condiciones externas sean lo más similares posibles.

El depósito de agua es hormigón armado, con unas dimensiones aproximadas de 25m de diámetro y 1 m de altura, generando un volumen total del depósito de 490 m<sup>3</sup>. Además, consta con una partición interior, por lo que, a efectos de estudio, solo se debe considerar la mitad del depósito.

Durante el periodo de la realización del trabajo, y debido a diversos problemas y a la realización de obras, su capacidad total de agua durante la toma de datos es aproximadamente de un 50% de su capacidad máxima.



*Figura 12: Paneles instalados en tierra y en agua.*

Sobre cada grupo de paneles, se instala una sonda de temperatura para la obtención de datos, y otra una zona central trasera de los paneles, para obtener los valores de la temperatura de la superficie de cada panel y la temperatura ambiente en la zona próxima.



*Figura 13: Panel instalado en tierra. Parte trasera. Detalle de ubicación de las tres sondas de temperatura.*

Como punto final, cada grupo de paneles, están unidos a dos micro inversores independientes, pero de similares características, los cuales también están sensorizados para el monitoreo de la temperatura y la potencia generada por cada panel.

### 3.2. OBTENCIÓN DE DATOS

Para empezar a tener suficientes datos para obtener conclusiones y evitar posibles malfuncionamientos o anomalías ambientales, se debe obtener una muestra de datos lo suficientemente grande, entre 10 y 15 semanas. En este trabajo, se tomará una extensión de 11 semanas para poder disponer de tiempo suficiente para la realización de mismo.

La obtención de los datos para el estudio se centraliza a través de un sistema Arduino, que se encarga de registrar toda la información en dos intervalos de tiempo diferentes, con periodicidad minutil y quinceminutil, para su posterior envío diario a la base de datos para su análisis.

Para facilitar la visualización de datos, se tomarán los datos quinceminutales, para suavizar los cambios bruscos y repentinos en los valores obtenidos, como, por ejemplo, con la presencia puntual de una nube.



### 3.3. ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis de una cantidad tan elevada de datos, se opta por desarrollar un software en el lenguaje de programación Python, para facilitar la evaluación y el filtrado de los datos que puedan ser erróneos para obtener las conclusiones.

El principal análisis, se centra en la comparación de los parámetros característicos de los que se disponen datos. Estas variables de trabajo son:

- Paneles de tierra: temperatura ambiente (°C).
- Paneles de tierra: temperatura superficie panel izquierdo (°C).
- Paneles de tierra: temperatura superficie panel derecho (°C).
- Paneles de agua: temperatura ambiente (°C).
- Paneles de agua: temperatura superficie panel izquierdo (°C).
- Paneles de agua: temperatura superficie panel derecho (°C).
- Inversor tierra: potencia total (W).
- Inversor tierra: potencia panel izquierdo (W).
- Inversor tierra: potencia panel derecho (W).
- Inversor agua: potencia total (W).
- Inversor agua: potencia panel izquierdo (W).
- Inversor agua: potencia panel derecho (W).
- Inversor tierra: temperatura (°C).
- Inversor agua: temperatura (°C).
- Irradiancia ( $W/m^2$ ).

Para un primer paso de visualización rápido de datos, se realizan diferentes gráficas de las variables anteriormente definidas, para visualizar su comportamiento a lo largo del día y observar si existen o no divergencias significativas.

Al ser el principal punto de estudio la comparación de energía obtenida, este es el primer punto a analizar, y punto de partida para la obtención de conclusiones.

Para ello, se realiza un primer trazado de los datos acumulados durante el periodo de 6 semanas que ha durado la recogida de información. Los datos acumulados y que se van a graficar son la potencia total de inversor de tierra, la potencia total del inversor de agua, la diferencia entre ambos y la irradiancia.

Todas estas variables, se grafican de forma simultánea como puede verse en la figura 14.

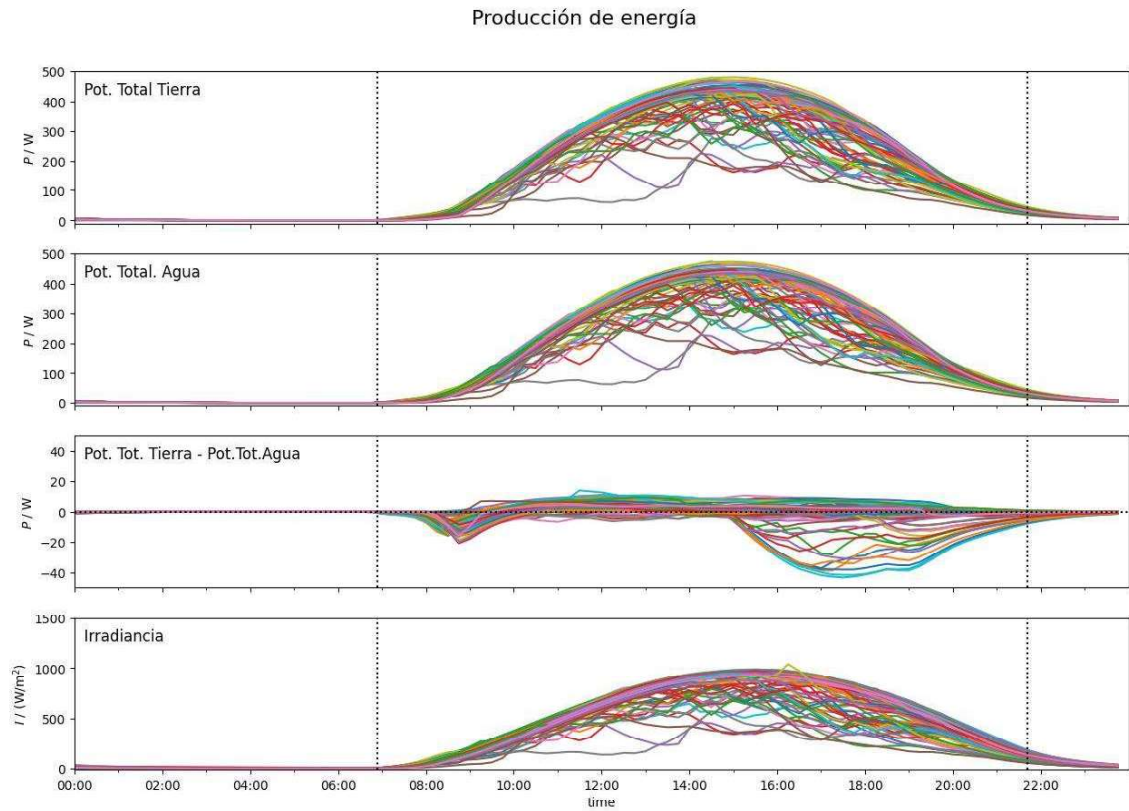


Figura 14: Producción de energía. Desde el 30/05/2022 al 14/08/2022

Como se observa en la figura 14, existen varios puntos destacables.

- La producción total en los paneles de tierra, al inicio del día, entre las 9:00 y las 9.30 es inferior que los paneles en agua. Esto se debe a la existencia de un árbol que genera una leve sombra sobre estos paneles. Esta diferencia de generación se visualiza perfectamente en la tercera gráfica. A partir de las 10:00, esta sombra ya no existe, y la energía generada es la estimada hasta las 15:00.
- Entre el periodo de tiempo de 10:00 a 15:00, la energía generada es muy similar en ambas ubicaciones. Puede comprobarse como la diferencia entre la producción de ambas ubicaciones es próxima a cero.
- Desde las 15:00 hasta el final de la generación, aproximadamente sobre las 22:00, se observa como la energía generada en los paneles de agua es superior a la generada por los paneles de tierra.

Para obtener un mayor detalle, a continuación, se realiza un graficado de los datos de cada ubicación y de cada panel, siendo las variables: temperatura de la superficie del panel de tierra izquierdo menos temperatura del panel derecho, diferencia entre la potencia del panel de tierra izquierdo menos la del panel derecho, temperatura de la superficie del panel de agua izquierdo menos temperatura del panel derecho, diferencia entre la potencia del panel de agua izquierdo

menos la del panel derecho, temperatura del inversor de tierra menos la del inversor de agua y la irradiancia.

Todas estas variables, se grafican de forma simultánea, como puede verse a continuación, en la figura 15.

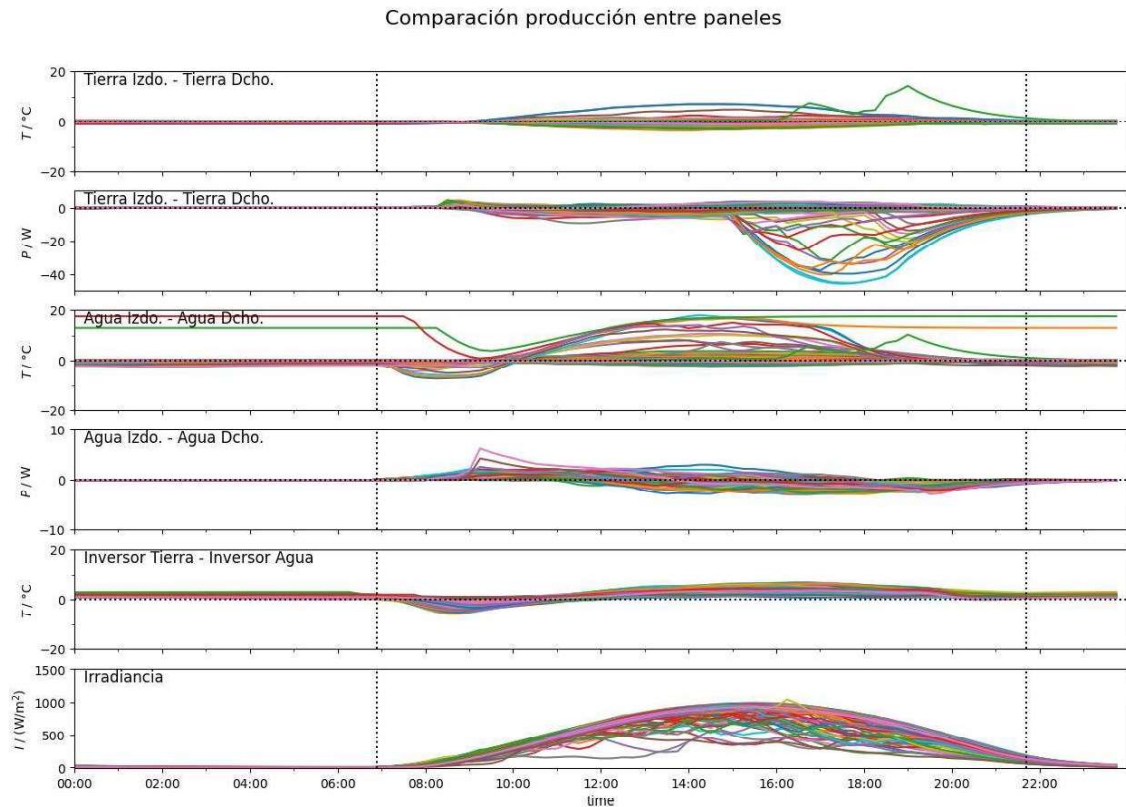


Figura 15: Comparación de producción de energía entre paneles. Desde el 30/05/2022 al 14/08/2022.

Como se observa en la Figura 15, en los paneles ubicados en tierra la temperatura de la superficie en ambos es muy similar, salvo un único registro, por lo que ese último valor no es relevante. En la potencia generada en estos paneles, se observa como existe una diferencia significativa entre el periodo de 15:00 a 22:00, con mayor generación del panel derecho. Esta diferencia es debida a la sombra generada por un edificio cercano sobre el panel de tierra izquierdo, limitando su capacidad de generación de energía.

En los paneles ubicados en agua, la temperatura de la superficie no es similar, existiendo una diferencia significativa, hasta de 16°C, con mayor temperatura del panel izquierdo. La potencia generada por ambos es muy similar, no existiendo diferencias relevantes. Al no existir diferencia en la potencia, se puede asumir que esta diferencia no es real, y que sea debido a una acción externa, como una mala sujeción de la sonda de temperatura o una concentración de la radiación reflejada al estar dentro de un depósito de agua circular.

Respecto a las temperaturas de trabajo de ambos inversores, desde el inicio del día hasta las 10:00, la temperatura del inversor de tierra es inferior a la de agua. Esto es debido a la presencia de una zona de sombra, explicada anteriormente sobre los paneles de tierra. A partir de las

10:00, la sombra desaparece y ambos inversores trabajan a plena carga, obteniendo una temperatura levemente superior del inversor de tierra sobre el inversor de agua, entre 1 y 5°C.

Para obtener un mayor detalle de los resultados, se realiza una nueva gráfica, de las principales variables de los paneles, para compararlas y detectar divergencias. Las variables a graficar son temperatura del panel de tierra izquierdo menos el derecho, temperatura del panel de agua izquierdo menos el derecho, temperatura del panel de tierra izquierdo menos el panel de agua izquierdo, temperatura del panel de tierra derecho menos el panel de agua derecho, temperatura ambiente en tierra menos temperatura ambiente en agua e irradiancia.

Todas estas variables, se grafican de forma simultánea, como puede verse en la figura 16.

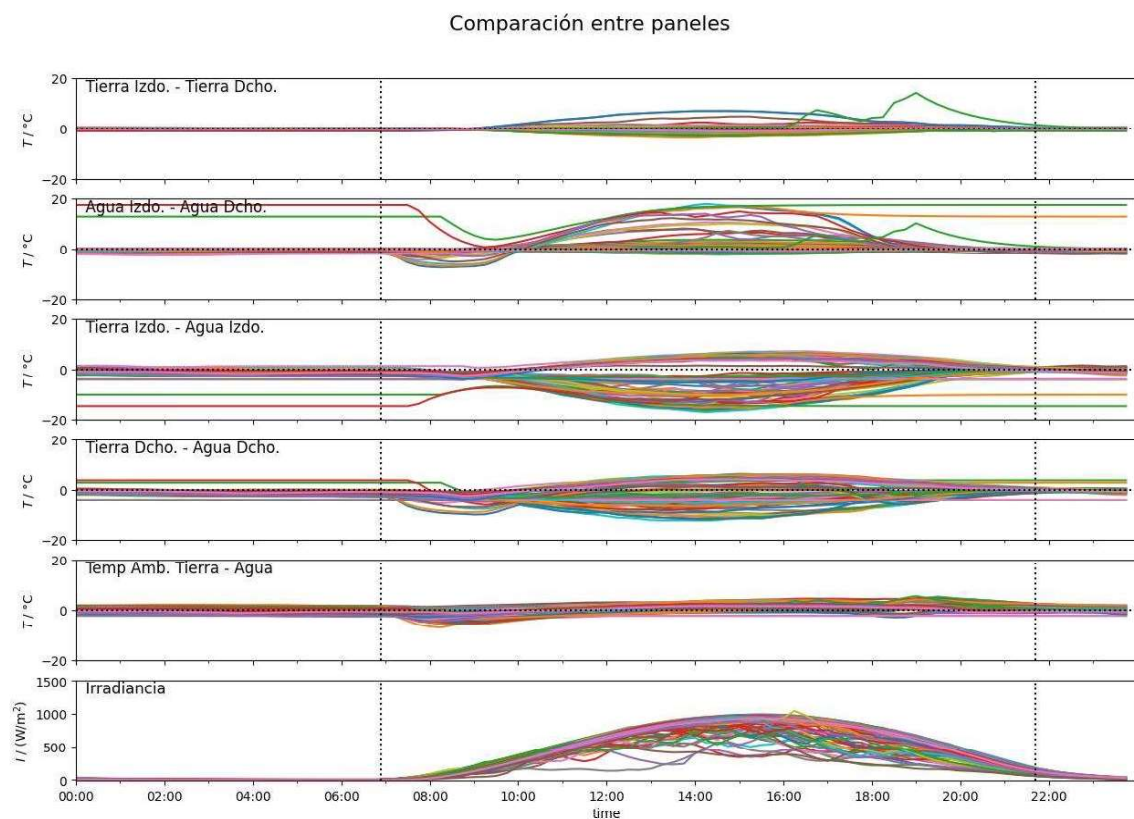


Figura 16: Comparación entre paneles. Desde el 30/05/2022 al 14/08/2022.

Como se observa en la figura 16, y ya se ha explicado anteriormente, la temperatura superficial de los paneles izquierdo y derecho, tanto en agua como en tierra son muy similares en cada ubicación.

Además, la temperatura ambiente en agua es ligeramente inferior a la temperatura ambiente en tierra, entre 0-5°C, favoreciendo la refrigeración del panel ubicado en agua, y, por tanto, teóricamente también su capacidad de generación de energía. La pérdida de la eficiencia de un módulo puede llegar hasta un 0,4-0,5%/°C. [15]



Filtrando más los datos y separando para graficar los días en los cuales, la generación de potencia en los paneles ubicados en agua ha sido superior a la potencia generada en los paneles ubicados en tierra, obtenemos las mismas gráficas que las mostradas anteriormente, pero con mayor claridad.

Al estar explicadas anteriormente, únicamente se muestran sin explicación para poder visualizar los datos de forma más cómoda, en las figuras 17, 18 y 19.

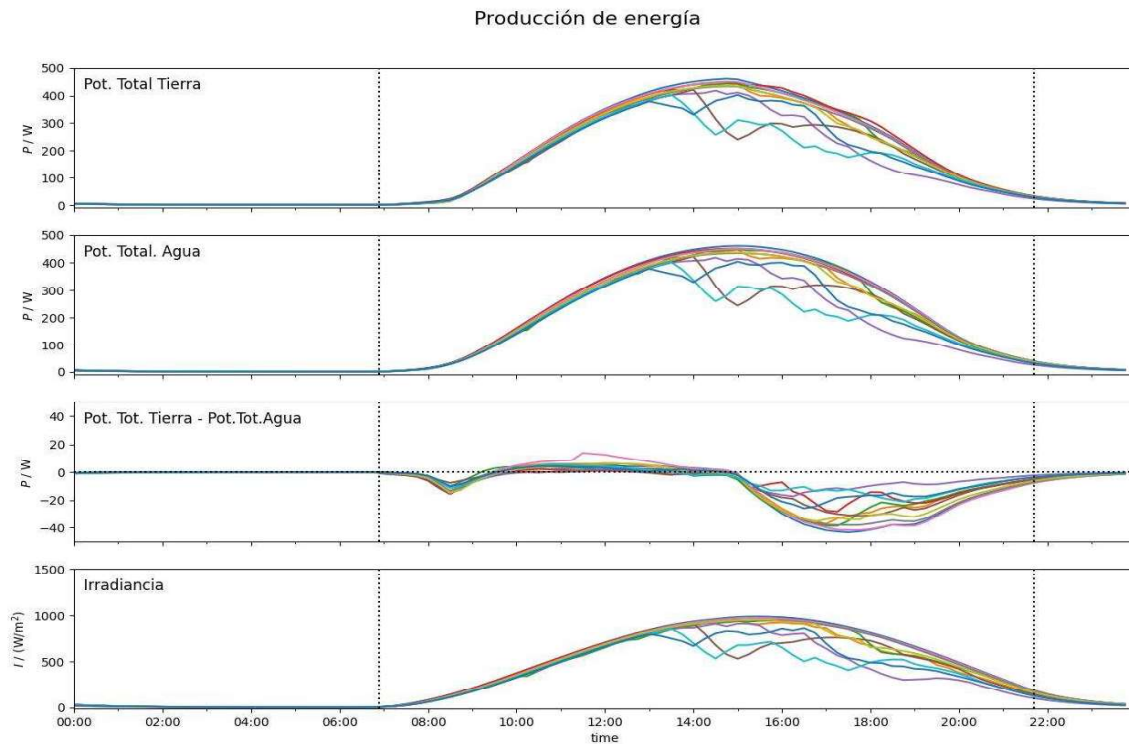


Figura 17: Producción de energía. Datos filtrados.





Comparación producción entre paneles

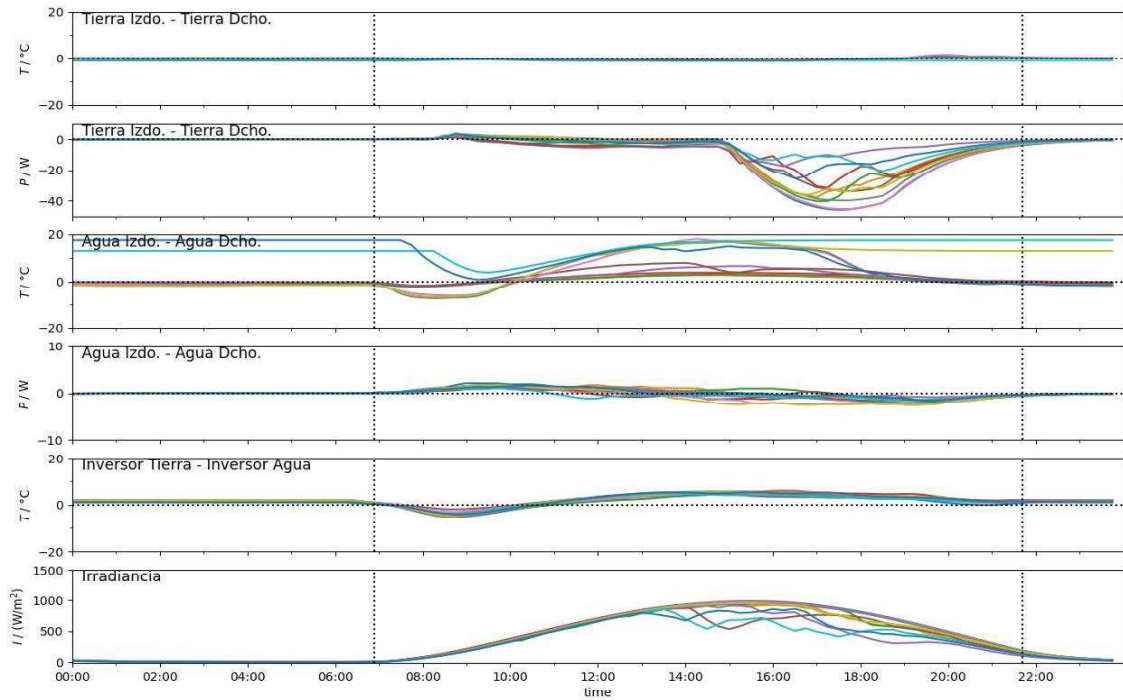


Figura 18: Comparación entre paneles. Datos filtrados

Comparación entre paneles

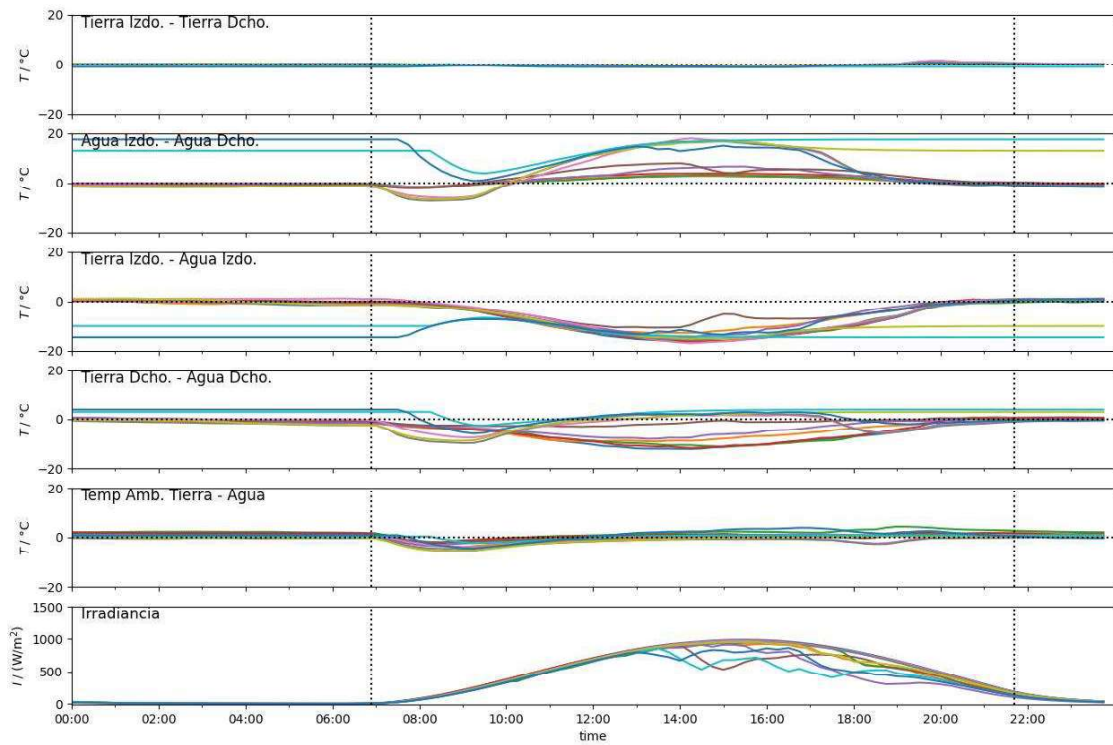


Figura 19: Comparación entre paneles. Datos filtrados.



## 4. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

Durante los meses de mayo, junio, julio y agosto de 2022, se han registrado durante un periodo de 11 semanas completas, diversas variables de 2 inversores y de 4 paneles fotovoltaicos, instalados en grupos de 2 unidades, estando un grupo instalado en tierra, y el otro grupo en el interior de un depósito de agua. Los principales parámetros registrados han sido referentes a temperatura en diversos puntos de la instalación y a la potencia generada. Los datos se han registrado en intervalos minutales y quinceminutales.

Analizando todos estos datos, podemos definir las siguientes conclusiones:

- Se valida el principal objetivo de este trabajo, verificar que, en las mismas condiciones ambiente, de irradiancia, orientación y posición, los paneles en agua son capaces de producir mayor potencia que los paneles ubicados en tierra.
- Se detecta una temperatura ambiente menor en los paneles ubicados en agua. Esta diferencia térmica, favorece una menor temperatura de la célula, y por lo tanto un mayor potencial de mayor generación energética.
- Comprobando las curvas de irradiancia, los principales datos que verifican el trabajo, corresponde a aquellos días en los que no ha existido ninguna sombra producida por nubosidades y por lo tanto la curva de irradiancia es la ideal.

Para obtener información más concreta sobre la eficiencia, la producción de energía y la mejora del rendimiento, se deberán desarrollar un estudio más amplio con las siguientes líneas de mejora y desarrollo de trabajos futuros:

- Ampliación del periodo de estudio a otras estaciones en las que la posición solar es diferente, por ejemplo, en invierno. También es recomendable, realizar la toma de datos a lo largo de todo un año completo.
- Aumento de la monitorización de las variables externas, como la temperatura del agua, la temperatura de la tierra, la humedad relativa y la velocidad del viento.
- Revisión de la ubicación, para garantizar que no existen sombras que puedan desvirtuar los datos en ningún periodo del año.
- Completar el llenado del depósito de agua en su totalidad para aumentar la masa de agua y simular mejor las condiciones de la instalación del estudio a las reales, como lagos, pantanos, balsas de riego o el mar.
- Cambio en la orientación de los paneles ubicados en agua, para que sea más similar a la posición en la que se instalan en las grandes extensiones de agua.
- Caracterización de los paneles que formen parte del estudio, mediante la realización de curvas IV, fotografías térmicas y electroluminiscencia, para garantizar que no existen anomalías ocultas que puedan afectar a su producción.
- Ampliación del estudio a paneles bifaciales.



## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Python, «Python,» [En línea]. Available: <https://www.python.org/about/>.
- [2] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), «Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE),» Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica>.
- [3] A. Luque y S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering, Second ed., John Wiley & Sons, 2011.
- [4] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, R. Corkish y A. Sproul, Applied Photovoltaics, Third ed., London: Earthscan, 2011.
- [5] M. Olmo, «HyperPhysics,» [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/dope.html>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [6] Iberdrola., «Iberdrola,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [7] Degher, «Degher,» [En línea]. Available: <https://www.degerenergie.de/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [8] Iberdrola, «Iberdrola,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/fotovoltaica-flotante>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [9] M. Acharya y S. Devraj, «Floating Solar Photovoltaic (FSPV): A Third Pillar to Solar PV Sector?,» TERI, 2019.
- [10] Red Eléctrica Española (REE), «Red Eléctrica Española (REE),» Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/generacion>.
- [11] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), «Plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030,» 2020.
- [12] International Renewable Energy Agency (IRENA), «International Renewable Energy Agency (IRENA),» Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.irena.org/solar>.
- [13] Arduino, «Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [14] Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER), «Centro de Desarrollo de Energías Renovables,» Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.ciemat.es/portal.do?IDM=69&NM=3>.



- [15] A. Majumder, R. Innamorati, A. Frattolillo, A. Kumar y G. Gatto, «Performance analysis of a floating photovoltaic system and estimation of the evaporation losses reduction,» *Energies*, 2021.
- [16] «Visual Studio Code,» [En línea]. Available: <https://code.visualstudio.com/>.
- [17] «SQLite,» [En línea]. Available: <https://www.sqlite.org/index.html>.
- [18] World Bank Group, ESMAP and SERIS, «Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practicioners,» World Bank, 2019.

## 6. ANEJOS

### 6.1. FOTOGRAFÍAS COMPLEMENTARIAS DE LA INSTALACIÓN



*Figura 20: Vista conjunta de ambos grupos de paneles, en agua y en tierra..*



*Figura 21: Módulos instalados en agua.*



*Figura 22: Módulos instalados en tierra.*



*Figura 23: Detalle de la estructura de soporte de los paneles.*



*Figura 24: Detalle de la posición de las sondas de temperatura ambiente y de superficie de panel.*



*Figura 25: Detalle de la sonda de temperatura de superficie de panel.*

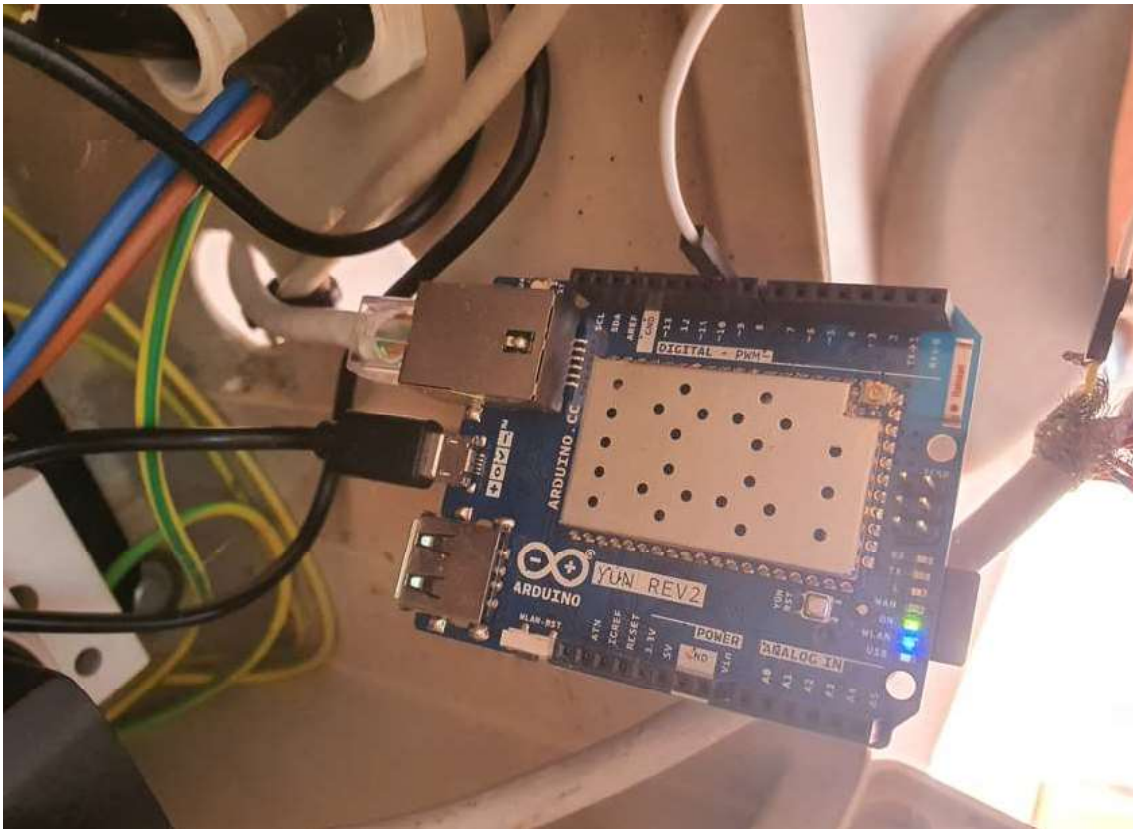


Figura 26: Detalle de la placa Arduino.

## 6.2. DATOS INICIALES OBTENIDOS

Los datos iniciales se obtienen en formato CSV (“Comma Separated Values” o en castellano, “valores separados por comas”). La estructura de los datos es la mostrada en la figura 20.

|    | FECHA               | TEMPERATURA PANEL TIERRA AMBIENTE [°C] | TEMPERATURA PANEL TIERRA IZQUIERDO [°C] | TEMPERATURA PANEL TIERRA DERECHO [°C] | TEMPERATURA PANEL AGUA AMBIENTE [°C] | TEMPERATURA PANEL AGUA IZQUIERDO [°C] | TEMPERATURA PANEL AGUA DERECHO [°C] | POTENCIA PANELES TIERRA [W] | POTENCIA PANEL TIERRA IZQUIERDO [W] | POTENCIA PANEL TIERRA DERECHO [W] | POTENCIA PANELES AGUA [W] | POTENCIA PANEL AGUA IZQUIERDO [W] | POTENCIA PANEL AGUA DERECHO [W] | TEMPERATURA INVERSOR TIERRA [°C] | TEMPERATURA INVERSOR AGUA [°C] | RADIACION SOLAR [Wh/m2] |
|----|---------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 1  | 2022-06-02 00:00:00 | 17.64                                  | 16.55                                   | 16.40                                 | 18.57                                | 17.26                                 | 17.03                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 2  | 2022-06-02 00:15:00 | 17.05                                  | 15.53                                   | 15.34                                 | 17.87                                | 16.39                                 | 16.12                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 3  | 2022-06-02 00:30:00 | 16.29                                  | 14.21                                   | 14.01                                 | 16.88                                | 15.34                                 | 15.03                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 4  | 2022-06-02 00:45:00 | 15.55                                  | 12.91                                   | 12.66                                 | 15.79                                | 14.33                                 | 14.04                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 5  | 2022-06-02 01:00:00 | 15.49                                  | 13.17                                   | 12.83                                 | 16.09                                | 14.41                                 | 14.13                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 6  | 2022-06-02 01:15:00 | 15.66                                  | 14.01                                   | 13.65                                 | 16.14                                | 14.69                                 | 14.40                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 7  | 2022-06-02 01:30:00 | 15.52                                  | 13.92                                   | 13.60                                 | 15.92                                | 14.54                                 | 14.21                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 8  | 2022-06-02 01:45:00 | 15.03                                  | 12.90                                   | 12.67                                 | 15.17                                | 13.94                                 | 13.65                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 9  | 2022-06-02 02:00:00 | 14.50                                  | 11.94                                   | 11.71                                 | 14.33                                | 13.04                                 | 12.75                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 10 | 2022-06-02 02:15:00 | 14.00                                  | 11.06                                   | 10.88                                 | 14.21                                | 12.68                                 | 12.43                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 11 | 2022-06-02 02:30:00 | 13.75                                  | 10.84                                   | 10.71                                 | 14.06                                | 12.70                                 | 12.41                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 12 | 2022-06-02 02:45:00 | 13.54                                  | 10.67                                   | 10.53                                 | 13.99                                | 12.54                                 | 12.22                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 13 | 2022-06-02 03:00:00 | 13.44                                  | 10.57                                   | 10.49                                 | 13.23                                | 12.29                                 | 12.02                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 14 | 2022-06-02 03:15:00 | 13.38                                  | 10.49                                   | 10.37                                 | 13.04                                | 12.22                                 | 11.95                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 15 | 2022-06-02 03:30:00 | 13.35                                  | 10.62                                   | 10.48                                 | 13.61                                | 12.57                                 | 12.32                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 16 | 2022-06-02 03:45:00 | 13.53                                  | 11.17                                   | 10.98                                 | 13.90                                | 12.96                                 | 12.70                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 17 | 2022-06-02 04:00:00 | 13.16                                  | 10.59                                   | 10.45                                 | 13.33                                | 12.50                                 | 12.22                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 18 | 2022-06-02 04:15:00 | 12.97                                  | 10.25                                   | 10.09                                 | 13.13                                | 11.95                                 | 11.65                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 19 | 2022-06-02 04:30:00 | 12.81                                  | 10.13                                   | 9.94                                  | 13.13                                | 11.77                                 | 11.43                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 20 | 2022-06-02 04:45:00 | 12.66                                  | 9.86                                    | 9.68                                  | 12.95                                | 11.55                                 | 11.24                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 21 | 2022-06-02 05:00:00 | 12.53                                  | 9.71                                    | 9.57                                  | 12.73                                | 11.48                                 | 11.18                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 22 | 2022-06-02 05:15:00 | 12.60                                  | 10.13                                   | 9.86                                  | 13.53                                | 11.66                                 | 11.34                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 23 | 2022-06-02 05:30:00 | 12.31                                  | 9.60                                    | 9.41                                  | 12.56                                | 11.33                                 | 11.03                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 24 | 2022-06-02 05:45:00 | 11.91                                  | 8.87                                    | 8.73                                  | 11.69                                | 10.62                                 | 10.32                               | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 25 | 2022-06-02 06:00:00 | 11.66                                  | 8.54                                    | 8.36                                  | 11.54                                | 10.26                                 | 9.97                                | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |
| 26 | 2022-06-02 06:15:00 | 11.66                                  | 8.54                                    | 8.36                                  | 11.54                                | 10.26                                 | 9.97                                | 0.0                         | 0.0                                 | 0.0                               | 24.00                     | 22.00                             | 0.0                             | 0.0                              | 0.0                            | 0.0                     |

Figura 27: Datos iniciales en CSV.



### 6.3. CÓDIGO SOFTWARE DE PYTHON

Para el desarrollo del código se utilizará el editor de texto Visual Studio Code [16], ya que es uno de los principales editores de código fuente en la actualidad desarrollado por Microsoft Corporation.

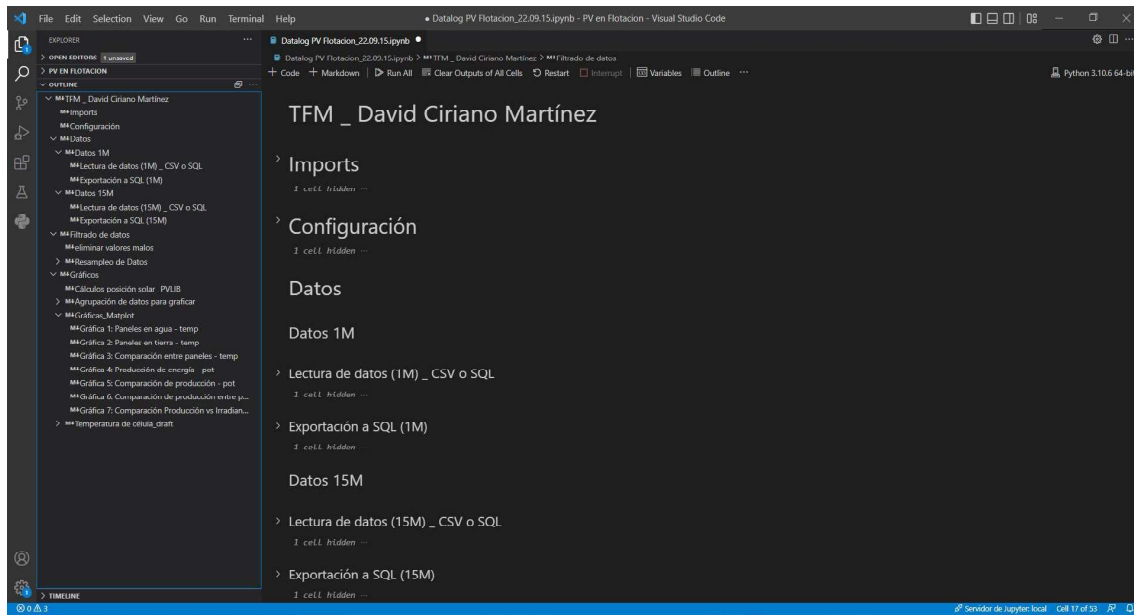


Figura 28: Estructura del código en Python.

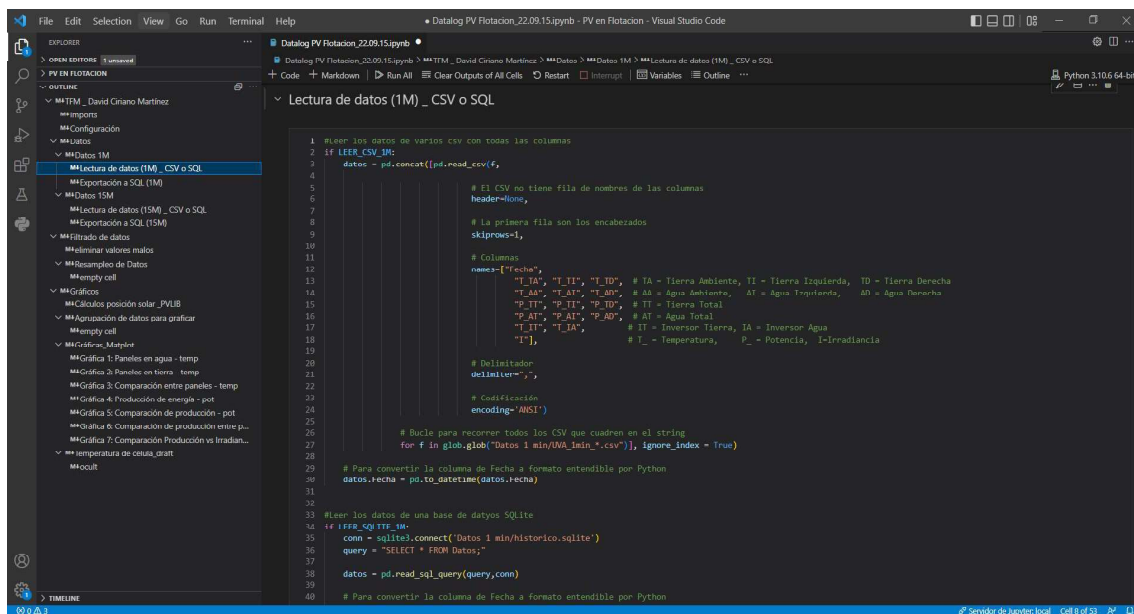


Figura 29: Detalle del código de Python. Lectura de datos.

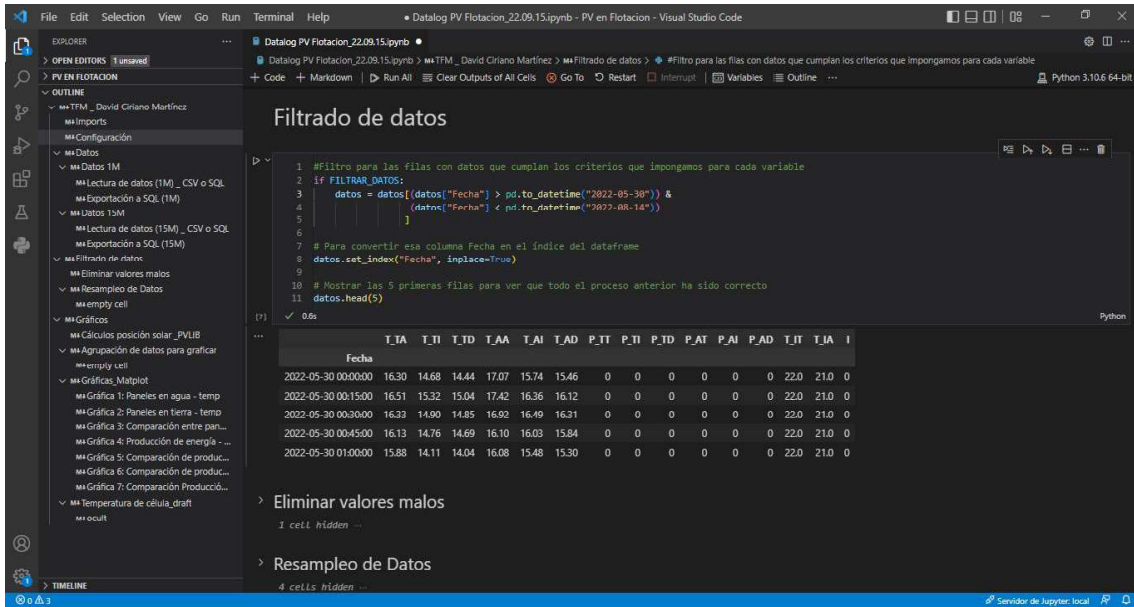


Figura 30: Detalle de código de Python. Filtrado y ordenación de los datos en columnas independientes.

### 6.4. ALMACENAMIENTO DE DATOS EN LA BASE DE DATOS CENTRAL

De forma adicional, para obtener un fácil y rápido acceso a los datos, se realiza un almacenamiento de los mismos en un fichero cerrado y protegido. En este caso, se opta por utilizar SQLite. [17]

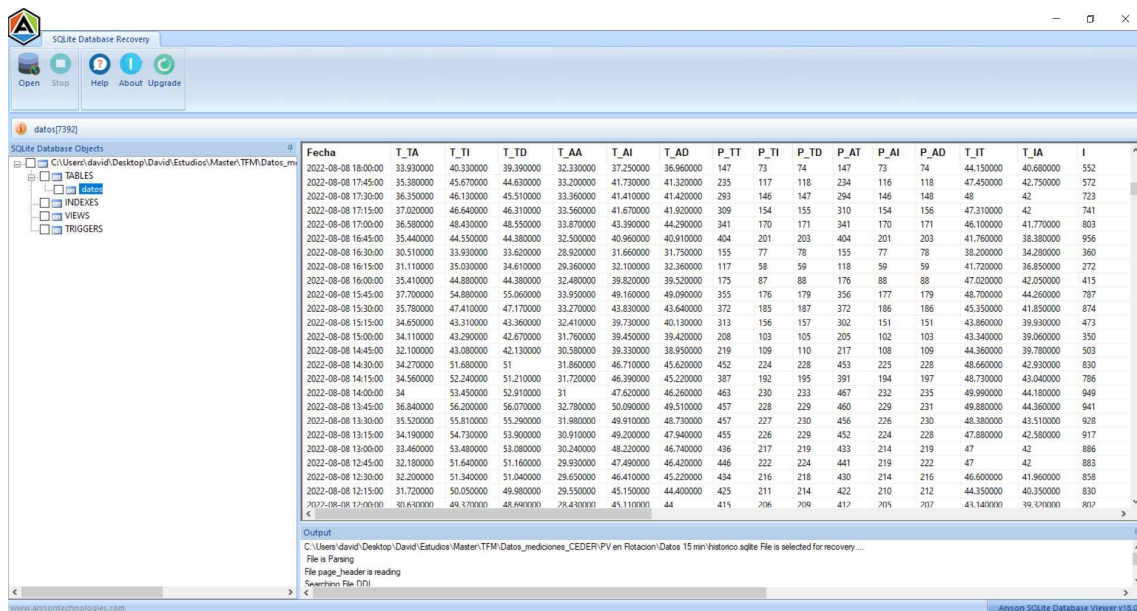


Figura 31: Contenido de la BBDD de SQLite con los datos históricos quinceminutales.



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Funcionamiento de una célula fotovoltaica para la generación de energía eléctrica. Fuente: [3]                | 1  |
| Figura 2: Red cristalina de silicio dopada con impurezas para crear semiconductores de tipo "p" y tipo "n". Fuente: [5] | 2  |
| Figura 3: Esquema de instalación fotovoltaica típica en tierra. Fuente: [6]                                             | 3  |
| Figura 4: Paneles fotovoltaicos instalados en tierra. Fuente: [7]                                                       | 4  |
| Figura 5: Esquema de instalación fotovoltaica flotante. Fuente: [8]                                                     | 4  |
| Figura 6: Paneles fotovoltaicos instalados en flotación. Fuente: [9]                                                    | 5  |
| Figura 7: Evolución de potencia instalada de origen renovable vs no renovable. Fuente: [10]                             | 6  |
| Figura 8: Evolución de la capacidad de origen renovable por tipo de tecnología de generación. Fuente: [10]              | 6  |
| Figura 9: Evolución de la capacidad instalada de energía renovable solar fotovoltaica. Fuente: [10]                     | 7  |
| Figura 10: Evolución de la capacidad instalada a nivel global de energía solar fotovoltaica. Fuente: [12]               | 8  |
| Figura 11: Instalaciones CEDER-CIEMAT en la localidad de Lubia, Soria                                                   | 10 |
| Figura 12: Paneles instalados en tierra y en agua                                                                       | 11 |
| Figura 13: Panel instalado en tierra. Parte trasera. Detalle de ubicación de las tres sondas de temperatura.            | 12 |
| Figura 14: Producción de energía. Desde el 30/05/2022 al 14/08/2022                                                     | 14 |
| Figura 15: Comparación de producción de energía entre paneles. Desde el 30/05/2022 al 14/08/2022.                       | 15 |
| Figura 16: Comparación entre paneles. Desde el 30/05/2022 al 14/08/2022.                                                | 16 |
| Figura 17: Producción de energía. Datos filtrados.                                                                      | 17 |
| Figura 18: Comparación entre paneles. Datos filtrados                                                                   | 18 |
| Figura 19: Comparación entre paneles. Datos filtrados                                                                   | 18 |
| Figura 20: Vista conjunta de ambos grupos de paneles, en agua y en tierra                                               | 22 |
| Figura 21: Módulos instalados en agua.                                                                                  | 22 |
| Figura 22: Módulos instalados en tierra                                                                                 | 23 |
| Figura 23: Detalle de la estructura de soporte de los paneles                                                           | 23 |
| Figura 24: Detalle de la posición de las sondas de temperatura ambiente y de superficie de panel.                       | 24 |
| Figura 25: Detalle de la sonda de temperatura de superficie de panel                                                    | 24 |
| Figura 26: Detalle de la placa Arduino.                                                                                 | 25 |
| Figura 27: Datos iniciales en CSV                                                                                       | 25 |
| Figura 28: Estructura del código en Python                                                                              | 26 |
| Figura 29: Detalle del código de Python. Lectura de datos.                                                              | 26 |
| Figura 30: Detalle de código de Python. Filtrado y ordenación de los datos en columnas independientes.                  | 27 |
| Figura 31: Contenido de la BBDD de SQLite con los datos históricos quinceminutales.                                     | 27 |

