



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

Graduado/a en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

TRABAJO FIN DE GRADO

Propuesta y desarrollo de contribuciones a la librería de  
modelado fotovoltaico de código abierto pvlib python

Autor: Echedey Luis Álvarez

Co-Tutor:  
Rubén Núñez Judez  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, AUTOMÁTICA  
Y FÍSICA APLICADA (D180)

Tutor:  
César Domínguez Domínguez  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, AUTOMÁTICA  
Y FÍSICA APLICADA (D180)

Madrid, Septiembre, 2024

Este Trabajo Fin de Grado se ha depositado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid para su defensa.

*Trabajo Fin de Grado*

*Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática*

*Título:* Propuesta y desarrollo de contribuciones a la librería de modelado fotovoltaico de código abierto pvlib python

Septiembre, 2024

# Resumen

La finalidad de este Trabajo Fin de Grado es la contribución de modelos científicos aplicados a la fotovoltaica dentro de la iniciativa de código abierto pvlib python. Adicionalmente, dentro del marco de contribuciones, se han añadido datasets, mejoras a la documentación ya existente, varios arreglos al flujo de integración y desarrollo continuo (CI/CD) y corregir múltiples bugs.

**Palabras Clave:** fotovoltaica, código libre, pvlib python, simulación, modelado

# Abstract

The purpose of this final-year thesis is the contribution of scientific models used in photovoltaic simulation and research. Contributions have been proposed to the free and open source software pvlib python. Merged pull requests range from new dataset inclusion, improvements to the existing documentation, various fixes to the continuous integration and continuous development (CI/CD) workflow and multiple bugfixes.

**Keywords:** photovoltaic, open source, pvlib python, simulation, modelling

# Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis tutores Rubén Núñez Judez y César Domínguez Domínguez por darme la posibilidad de invertir mi tiempo y capacidad en un proyecto que se alinea con mis objetivos de autorrealización, así como en su indispensable ayuda para entender y aplicar algunos de los modelos.

A Nuria Martín Chivelet por explicarme detalladamente el funcionamiento de su modelo científico y ofrecerme continuar en esa misma línea de trabajo.

A todos los mantenedores de la librería pvlib python por sus revisiones en profundidad. En especial a Kevin Anderson y a Adam Jensen por ofrecerme y guiarme en obtener una beca bajo el programa *Google Summer of Code*<sup>1</sup>.

A todas las personas que públicamente han contribuido directa o indirectamente en crear ecosistemas de desarrollo de software libre y de código abierto, en especial a aquellos involucrados en la comunidad de Python y Visual Studio Code entre innumerables otros.

Finalmente, a Aurelio Acevedo Rodríguez por inculcarme la importancia de la sección de agradecimientos. En paz descanse.

---

<sup>1</sup><https://summerofcode.withgoogle.com/programs/2024/projects/fxPFQqZc>

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación del proyecto . . . . .	1
1.2. Contexto del proyecto . . . . .	1
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.4. Estructura del Documento . . . . .	3
<b>2. Trabajo relacionado y Estado del Arte</b>	<b>4</b>
2.1. La energía solar fotovoltaica . . . . .	4
2.2. Simulación de sistemas fotovoltaicos . . . . .	6
2.3. La librería pvlib python . . . . .	7
2.3.1. Objetivos de la librería . . . . .	7
2.3.2. Funcionalidades . . . . .	9
2.3.3. Estructura de la librería . . . . .	10
2.3.4. Herramientas de desarrollo del proyecto . . . . .	10
<b>3. Desarrollo</b>	<b>11</b>
3.1. Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas . . . . .	13
3.2. Contribuciones científicas . . . . .	13
3.2.1. Modelado de ajuste espectral . . . . .	13
3.2.1.1. Fundamento teórico . . . . .	13
3.2.1.2. Resultado . . . . .	13
3.2.2. Cálculo del cenit solar proyectado sobre las coordenadas de un colector . . . . .	13
3.2.2.1. Fundamento teórico . . . . .	13
3.2.2.2. Resultado . . . . .	13
3.2.3. Cálculo de fracción de sombra unidimensional . . . . .	13
3.2.3.1. Fundamento teórico . . . . .	13
3.2.3.2. Resultado . . . . .	13
3.2.4. Modelo de pérdidas por heterogeneidad de irradiancia por célula . . . . .	13
3.2.4.1. Fundamento teórico . . . . .	13
3.2.4.2. Resultado . . . . .	13
3.2.5. Transformación de respuesta espectral a eficiencia cuántica externa . . . . .	13
3.2.5.1. Fundamento teórico . . . . .	13
3.2.5.2. Resultado . . . . .	13
3.2.6. Adición de base de datos de respuesta espectral de algunas tecnologías . . . . .	13
3.2.6.1. Fundamento teórico . . . . .	13

3.2.6.2. Resultado . . . . .	13
3.2.7. Adición de espectro estándar completo ASTM G173-03 . . . . .	13
3.2.7.1. Fundamento teórico . . . . .	13
3.2.7.2. Resultado . . . . .	13
3.3. Contribuciones técnicas . . . . .	13
3.3.1. Arreglo a los tests de integración continua . . . . .	13
3.3.1.1. Resultado . . . . .	13
3.3.2. Arreglo a un parámetro ignorado en una función de transposición inversa . . . . .	13
3.3.2.1. Resultado . . . . .	13
3.3.3. Dar soporte a otra función para el cálculo del IAM en el diseño orientado a objetos . . . . .	13
3.3.3.1. Resultado . . . . .	13
3.3.4. Suprimir una advertencia en la publicación del paquete . . . . .	13
3.3.4.1. Resultado . . . . .	13
3.3.5. Exponer parámetros de tolerancia para resolver el modelo de un diodo . . . . .	13
3.3.5.1. Resultado . . . . .	13
3.4. Contribuciones menores . . . . .	13
<b>4. Impacto del trabajo</b>	<b>14</b>
4.1. Impacto general . . . . .	14
4.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible . . . . .	14
<b>5. Resultados y conclusiones</b>	<b>15</b>
5.1. Resultados . . . . .	15
5.2. Conclusiones personales . . . . .	15
5.3. Trabajo futuro . . . . .	15
<b>Bibliografía</b>	<b>16</b>
<b>A. Anexo</b>	<b>18</b>

# **Índice de Figuras**



# **Índice de Tablas**

# **Índice de Listings**

# Capítulo 1

## Introducción

El cambio climático es un tema de actualidad que plantea un reto social, económico y tecnológico. Dentro de este marco, las energías renovables se presentan como una solución tecnológica a la dependencia de los combustibles fósiles, que son los principales responsables de la emisión de gases de efecto invernadero. Una de las tantas fuentes de energía renovables más prometedoras es la solar fotovoltaica, ya que es renovable y no contamina en su explotación directa.

Este Trabajo de Fin de Grado pretende potenciar la adquisición, investigación e implementación de la energía solar, mejorando herramientas de simulación y diseño de instalaciones fotovoltaicas. Para ello, se han realizado múltiples contribuciones a un proyecto de código abierto llamado *pulib python*, que es una biblioteca de herramientas escrita en Python para el análisis de sistemas fotovoltaicos.

### 1.1. Motivación del proyecto

El alumno declara que la motivación para la realización de este Trabajo de Fin de Grado se fundamenta en su interés por las energías renovables, el código libre y su ya experiencia previa en desarrollo de software de Python, también de acceso abierto.

Asimismo una de las principales inquietudes del alumno es aplicar sus conocimientos a generar nueva ciencia de forma accesible y contrastable, y que pueda ser utilizada por la comunidad científica y técnica de manera completamente transparente.

### 1.2. Contexto del proyecto

Con el incremento del interés por las energías renovables y las facilidades del desarrollo software como caldo de cultivo, se ha propuesto al alumno la realización de este Trabajo de Fin de Grado, que se enmarca en el desarrollo de la biblioteca *pulib python*.

La propuesta parte de los tutores del alumno, que son miembros del grupo de investigación *Instruments and Systems Integration* del *Instituto de Energía Solar* de la propia Universidad Politécnica de Madrid. Asimismo, el proyecto *pulib python* es un

proyecto de código abierto que se encuentra en desarrollo por otros investigadores de centros de investigación y universidades públicas de múltiples países, y algunos miembros de empresas privadas del mismo campo.

El perfil de usuario de esta biblioteca presenta ciertos tipos principales:

- Investigadores que desean realizar simulaciones y estudios de sistemas fotovoltaicos.
- Ingenieros y técnicos que desean optimizar el diseño de instalaciones fotovoltaicas.
- Ingenieros y técnicos que quieren identificar faltas en este tipo de instalaciones, mediante la comparación de datos reales con simulaciones.

Por supuesto, tratándose de un proyecto de código abierto, cualquier persona puede utilizar la biblioteca, por lo que no se descarta la posibilidad de que otros perfiles de usuario puedan beneficiarse de las mejoras realizadas en este Trabajo de Fin de Grado. En este aspecto, sucede que esta iniciativa democratiza el acceso por parte de usuarios más noveles en el campo de la energía solar fotovoltaica, que no tienen acceso a herramientas comerciales.

## 1.3. Objetivos

La línea principal de este trabajo es la adición de nuevas funcionalidades a la biblioteca *pulib python*, que permitan mejorar la simulación, investigación y diseño de plantas fotovoltaicas. Para ello, se han establecido los siguientes objetivos:

- Contribuir modelos variados científicos en propósito y utilidad.
- Añadir otras funcionalidades, que no siendo modelos, sean útiles para el usuario.
- Validar el funcionamiento mediante tests unitarios.
- Facilitar su uso con una documentación didáctica y concisa.
- Seguir los rigurosos estándares de calidad de un proyecto científico de código libre.
- Ayudar a la comunidad de usuarios de la biblioteca a través de la resolución de dudas y problemas.
- Participar en la revisión de código de otros contribuyentes.
- Crear asuntos y cuestiones que promuevan la mejora de la biblioteca, en especial para animar a otros contribuyentes a participar.
- Ayudar a mantener la biblioteca actualizada para mejorar su ciclo de vida y arreglar fallos de forma preventiva.

Por otra parte, entre los objetivos secundarios destacan:

- Dar visibilidad a autores nacionales y de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Potenciar proyectos de beneficio común desde la Universidad pública.

Si bien no es el propósito específico de este trabajo tratar estos últimos objetivos, se considera que son una consecuencia natural y deseable del presente proyecto.

### 1.4. Estructura del Documento

La estructura de este Trabajo de Fin de Grado pretende ser intuitiva y distribuida por bloques sobre temas similares. El lector podrá leer a continuación:

- En Capítulo 2 Trabajo relacionado y Estado del Arte, se da a conocer el estado actual de la energía solar fotovoltaica y algunas de las herramientas de simulación utilizadas.
- En Sección 2.3 La librería *pvl* python, se presentan las características de la biblioteca *pvl* python.
- En Capítulo 3 Desarrollo, se detalla el desarrollo de las contribuciones propuestas a la biblioteca, con factores tanto técnicos como humanos sobre el resultado.
- En Capítulo 5 Resultados y conclusiones, se resume el estado final o intermedio de las propuestas realizadas

## Capítulo 2

# Trabajo relacionado y Estado del Arte

En este capítulo se cubre el estado del arte de la energía solar fotovoltaica y, particularmente, la librería *pvlíb python*. El lector podrá encontrar en las siguientes secciones:

- En Sección 2.1 La energía solar fotovoltaica, se explica el estado actual de la energía solar fotovoltaica y su fundamento teórico base.
- En Sección 2.2 Simulación de sistemas fotovoltaicos, se detallan las herramientas de simulación utilizadas en el sector fotovoltaico y el marco general de comparación de la librería *pvlíb python*.
- En Sección 2.3 La librería *pvlíb python*, se presentan las características de la biblioteca *pvlíb python*.

### 2.1. La energía solar fotovoltaica

En esta sección se presentará el estado del arte de las diferentes tecnologías, estudios y sistemas relacionados con la energía solar fotovoltaica.

La energía solar fotovoltaica es una tecnología que convierte la radiación solar en electricidad utilizando células solares mediante el efecto fotoeléctrico [1, pp. 701-706]. Este fenómeno consiste en la generación de una corriente eléctrica cuando la luz incide sobre un material semiconductor y excita los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. Esta excitación genera un par electrón-hueco que se separa por la acción de un campo eléctrico externo (en cuyo caso no se produce energía neta positiva) o mediante la distribución de cargas en un semiconductor p-n, que permite la extracción de energía. Este último caso es el de aplicación en células solares fotovoltaicas, pues la intención es obtener energía eléctrica.

Existen varias tecnologías de células solares, como las de silicio, las de película delgada y las más experimentales de concentración y de otros materiales orgánicos y multiunión, que se agrupan en generaciones [2]. Cada generación responde a una serie de características e implantación en el mercado, donde destacan:

- Primera generación: células de silicio monocristalino y policristalino. Se encuentran bien implantadas en el mercado y son las más utilizadas en aplicaciones fotovoltaicas. Según el límite teórico que alcanzaban Shockley y Queisser en 1961, el silicio es el material más apropiado para la fabricación de células solares, ya que su banda prohibida de 1.1 eV es la que mejor se ajusta al máximo de la radiación solar [1, p. 1126]. Sin embargo, presentan un coste de producción moderado y un alto uso de material. El límite de eficiencia teórico obtenido por los anteriores autores es del 33.7% [3], pero asumen que no tratan con células solares de concentración ni con células solares de múltiples uniones o tandem.
- Segunda generación: células de película delgada, como las de telururo de cadmio (*CdTe*), las de di-seleniuro de cobre, indio y galio (*Copper indium gallium selenide*) (*CuInGaSe<sub>2</sub>*), las de arseniuro de galio (*Gallium arsenide*) (*GaAs*) y las de silicio amorfo (*a-Si:H*). Destacan por ser de capa delgada (*thin-film*) y, consecuentemente, más baratas de producir por el bajo uso de material, si bien pueden llegar a ser composiciones más caras. Nótese que el silicio amorfo es ampliamente utilizado, en especial en aplicaciones de baja potencia, como calculadoras, pero su eficiencia es inferior a las células de silicio cristalino.
- Tercera generación: células de concentración, células de múltiples uniones y células orgánicas. Se encuentran en fase de investigación y desarrollo, y se caracterizan por su alta eficiencia y coste elevado. Por un lado destacan la tecnología de concentración, que emplea lentes para concentrar la luz solar en células solares de alta eficiencia, normalmente de múltiples uniones, que pueden alcanzar eficiencias superiores al 40% [4, Tabla 5]. Se emplean sistemas ópticos para disminuir el uso de material semiconductor, el principal factor de coste en estas células.

Cada una tiene sus propias características y aplicaciones específicas. Las células de primera y segunda generación son las más comunes en aplicaciones fotovoltaicas, mientras que las de tercera generación se encuentran en fase de investigación y desarrollo. Se remite el lector a [2] para una revisión más detallada de cada grupo y las peculiaridades de cada material.

En cuanto a los sistemas fotovoltaicos, se han desarrollado diferentes configuraciones, como sistemas conectados a la red, sistemas autónomos y sistemas de bombeo [5]. Cada configuración tiene sus propias ventajas y desafíos, y se han realizado investigaciones para optimizar su diseño y operación. En todos estos casos, es fundamental contar con herramientas de simulación y análisis para evaluar el rendimiento de los sistemas, optimizar su diseño y diagnosticar fallos a partir de datos meteorológicos.

Toda simulación para un sistema fotovoltaico tradicional -en referencia a los colectores planos y no aquellos de concentración, que presentan otras características- se basa en la radiación solar incidente en la superficie de los módulos. Los datos de partida de una simulación siempre son determinados valores meteorológicos como la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento. Adicionalmente, se emplean modelos empíricos para obtener valores como la radiación solar extraterrestre en una superficie normal al vector posición solar y deducir otros parámetros de entrada para el resto del flujo de cálculos, en función de los instantes de tiempo que se vayan a analizar.

## 2.2. Simulación de sistemas fotovoltaicos

A partir de unos valores de *GHI*, *DNI* y *DHI* -que son las componentes de la radiación solar global en una superficie horizontal, normal al vector solar y difusa en la superficie horizontal, respectivamente- se pueden obtener los valores de radiación solar en una superficie inclinada y orientada en función de los ángulos de inclinación y orientación de los módulos. Estas se relacionan mediante:

$$GHI = DNI \cdot \cos(\theta) + DHI \quad (2.1)$$

La existencia de los parámetros de entrada mencionados se explica mediante la necesidad de independizar las medidas de irradiancia solar de la superficie de interés, y lo que permiten cuantificar los instrumentos de medida en campo. Estos se tratan de piranómetros para medir *GHI*; pirheliómetros, para *DNI*; y piranómetros de sombra para *DHI*.

Esta radiación se descompone en tres componentes: la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada. La radiación directa es la que proviene del sol y llega directamente a la superficie de los módulos, la radiación difusa es la que proviene del cielo y se dispersa en todas direcciones, y la radiación reflejada es la que proviene de la reflexión de la radiación directa en superficies cercanas. Estas componentes se suman para obtener la radiación total incidente en la superficie de los módulos, que es la que se emplea para calcular la producción de energía.

En resumen, el estado del arte de la energía solar fotovoltaica abarca una amplia gama de tecnologías, estudios y sistemas. En este Trabajo de Fin de Grado, se tratarán algunas de las propuestas que se han realizado en el ámbito de la simulación y el análisis de sistemas fotovoltaicos, con un enfoque particular en la librería *pvl* *python*.

## 2.2. Simulación de sistemas fotovoltaicos

La importancia de simulaciones y análisis previo a la implantación de sistemas fotovoltaicos tanto para inversores, operaciones de financiación y diseñadores ha dado lugar a múltiples herramientas software y modelos como V Watts, PVGIS, PV-Online, PV\*SOL, PVsyst, System Advisor Model (SAM) y muchas más [6, 7]. Normalmente estas herramientas propietarias tienen un foco muy específico en que un usuario pueda calcular el rédito energético y económico de una instalación fotovoltaica, pero no en la investigación y validación de modelos científicos. En 2.3 se comprobará que la librería *pvl* *python* se centra en la investigación y validación de modelos científicos para la simulación de sistemas fotovoltaicos, y que estos cálculos de rédito energético tienen más peso en el lado del usuario.

Dentro de este grupo de herramientas, surge la iniciativa de código abierto PVLIB-MatLab con origen en los laboratorios de *Sandia National Laboratories*, EEUU hacia el año 2009 [8]. Posteriormente, en 2013<sup>1</sup> inicia el desarrollo de la versión en Python [9, 10, 11, 12, 13], que es de la que trata este trabajo.

La librería *pvl* *python* aporta una serie de mejoras a su contrapartida en MATLAB, entre ellas la infraestructura de tests, la documentación y otros procedi-

---

<sup>1</sup><https://web.archive.org/web/20240411190506/https://pvl-lib-python.readthedocs.io/en/stable/#history-and-acknowledgement>



mientos de Integración Continua y Desarrollo Continuo (CI/CD) que facilitan el desarrollo, opuesto a la ausencia de tests, control de versiones en un documento de Microsoft Word y, en general, la falta de mantenimiento y actividad de la versión en MATLAB<sup>2</sup>.

### 2.3. La librería *pvl*ib python

La librería *pvl*ib python es una biblioteca de código abierto que proporciona herramientas para la simulación, análisis e investigación de sistemas fotovoltaicos. Se encuentra desarrollada para el lenguaje de programación interpretado Python [14], que es ampliamente utilizado en la comunidad científica y de desarrollo de software por su sintaxis sencilla, facilidad de desarrollo y diseño orientado a objetos.

Como todo proyecto de código abierto que se encuentra en constante desarrollo, esta librería cuenta con un grupo de desarrolladores y colaboradores que contribuyen a su mantenimiento y mejora. Estas personas partícipes del proyecto son mayoritariamente científicos e investigadores de diferentes instituciones y universidades, normalmente públicas, e ingenieros u otros investigadores del ámbito privado. El código y la colaboración se realiza a través del repositorio de código abierto GitHub<sup>3</sup>.

El código se encuentra disponible al público bajo la licencia *BSD 3-Clause*<sup>4</sup>, que permite su uso, modificación, redistribución y uso en otros proyectos siempre que haga la atribución de autoría pertinente y no emplee la imagen de *pvl*ib python con fines publicitarios o promotores. La librería se distribuye a través del índice de paquetes de Python, PyPI<sup>5</sup> y en el canal de *conda-forge*<sup>6</sup> para la distribución de Python *Conda*, orientada a facilitar conjuntos de librerías para ciencia de datos sin que existan conflictos. *Conda* se distribuye en dos sabores -o conjuntos de librerías- conocidas como *Anaconda* y *Miniconda*, cada una con sus propias características y ventajas en tiempo de instalación, espacio en disco y paquetes preinstalados.

La documentación de la librería<sup>7</sup> se encuentra disponible en la plataforma *ReadTheDocs*, donde se detallan las funcionalidades, los ejemplos de uso, la estructura del código y la API<sup>8</sup>, las herramientas de desarrollo, las directrices para contribuir al proyecto y la historia de cambios y versiones. La documentación se encuentra disponible exclusivamente en inglés.

#### 2.3.1. Objetivos de la librería

Como se ha comentado anteriormente, la librería *pvl*ib python tiene como objetivo principal proporcionar herramientas para la simulación, análisis e investigación de sistemas fotovoltaicos. Para ello, cuenta con una serie de funciones y clases que

---

<sup>2</sup>[http://web.archive.org/web/20211207215130/https://pvl-lib-python.readthedocs.io/en/v0.9.0/comparison\\_pvl-lib\\_matlab.html](http://web.archive.org/web/20211207215130/https://pvl-lib-python.readthedocs.io/en/v0.9.0/comparison_pvl-lib_matlab.html)

<sup>3</sup>Véase <https://github.com/pvl-lib/pvl-lib-python>

<sup>4</sup>Texto de la licencia disponible en <https://opensource.org/licenses/BSD-3-clause>

<sup>5</sup>Véase <https://pypi.org/project/pvl-lib/>

<sup>6</sup>Véase <https://anaconda.org/conda-forge/pvl-lib>

<sup>7</sup>Accesible en <https://pvl-lib-python.readthedocs.io/en/stable/>

<sup>8</sup>API es la contracción de *Application Programming Interface* y se trata del conjunto de utilidades que se proveen para programadores que empleen la librería.

permiten realizar cálculos de radiación solar, generación de energía, sombreado, eficiencia de módulos, pérdidas de energía, entre otros. Estas herramientas se basan en modelos científicos y métodos de cálculo validados por la comunidad científica y se han implementado en Python para facilitar su uso y extensión. Es importante denotar que los autores pretenden establecer la implementación de la librería como una referencia fiable y certera de los modelos científicos que se emplean en la simulación de sistemas fotovoltaicos, con un enfoque en la rigurosidad de las publicaciones y artículos científicos que se emplean como base.

Enumerando los objetivos de la librería, se pueden destacar los siguientes:

1. Proporcionar herramientas para la simulación y análisis de sistemas fotovoltaicos.
2. Implementar modelos científicos y métodos de cálculo validados por la comunidad científica.
3. Establecer un referente fiable de las implementaciones de las características citadas anteriormente.
4. Auditar las contribuciones para garantizar la funcionalidad de las aportaciones.
5. Facilitar la integración con servicios de datos meteorológicos y bases de datos de radiación solar.
6. Fomentar la colaboración y la contribución de la comunidad científica y de desarrollo de software.

Cabe destacar que también existen los no-objetivos de la librería, que se refieren a las características que no se pretenden implementar o documentar. Entre estos destacan:

1. Proporcionar contenido didáctico sobre la energía solar fotovoltaica en términos generales, más allá del necesario para entender y aplicar las herramientas de la librería por usuarios con una base de los fundamentos.
2. Hacer inferencias, sugerencias o recomendaciones que no estén publicadas formalmente sobre el uso de los modelos implementados.
3. Facilitar un sistema *ready-to-go* para usuarios finales.

Puede parecer que estos no-objetivos son limitantes, pero en realidad se trata de una forma de garantizar la calidad y la fiabilidad de la librería, ya que se centra en la implementación rigurosa de publicaciones de la comunidad científica.

Una nota importante, en especial sobre el último punto, es que la definición de la misma librería es que se trata de una *toolbox*<sup>9</sup>. Esta nota es en contraposición a las herramientas de simulación y análisis de sistemas fotovoltaicos comerciales, que limitan y simplifican la experiencia del usuario, varias veces dejando de lado la documentación y la transparencia de los cálculos<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup>En español, “caja de herramientas”. <https://github.com/pvlib/pvlib-python/blob/99619e8fc5aea5c5dc4dacabb75b617786cc4a1a/README.md?plain=1#L61>

<sup>10</sup>Como hecho anecdótico, se puede observar alguna crítica sobre esto entre los participantes del proyecto, por ejemplo en <https://github.com/pvlib/pvlib-python/issues/2057#issuecomment-2197279047>

### 2.3.2. Funcionalidades

El proyecto de código abierto *pvlib python* cuenta múltiples características que abarcan un amplio rango de temas relacionados con la producción de energía solar fotovoltaica. Al momento de la redacción de este documento, la versión de la librería es la 0.11.0, publicada el 21 de junio de 2024. A continuación, se detallan algunas de las funcionalidades más destacadas:

- Cálculo de la posición del sol: para determinar la posición del sol en el cielo en función de la localización y la hora del día, en el submódulo `pvlib.solarposition`.
- Cálculo de valores estándares de la radiación solar: la librería proporciona herramientas para calcular la radiación solar en una superficie plana y horizontal en función de la localización, la posición del sol y parámetros atmosféricos. Véase `pvlib.solarposition` y `pvlib.clearsky`.
- Procedimientos de descomposición, transposición y transposición inversa de la radiación solar: se emplean para, a partir de la radiación solar en una superficie plana y horizontal, obtener la radiación solar en una superficie inclinada y orientada determinados ángulos. Y una vez obtenidas las componentes directa, difusa y de albedo de la irradiación, aplicar correcciones convenientes para obtener la radiación efectiva colectada en la superficie. También se puede realizar el proceso inverso, de las componentes en el plano inclinado a la radiación en una superficie plana y horizontal. Estas utilidades se encuentran en el submódulo `pvlib.irradiance`.
- Obtención de parámetros atmosféricos como la columna o masa de aire, un número que representa cuánta atmósfera hay, relativa a la columna completamente vertical ( $A_M=1$ ), en el submódulo `pvlib.atmosphere`.
- Valores de albedo predefinidos, bien de materiales sólidos o de superficies naturales de agua, en `pvlib.albedo`.
- Corrección de la radiación incidente en función del ángulo de incidencia: debido a la reflexión que sufre la luz solar al incidir en una superficie de forma oblicua. Las utilidades se encuentran en el submódulo `pvlib.iam`.
- Producción fotovoltaica: mediante puntos característicos como el de máxima potencia (*MPP*) o calculando curvas I-V completas. Se emplean modelos de eficiencia de módulos y pérdidas de energía para estimar la producción de energía en un sistema fotovoltaico, mediante el modelo de un único diodo. Se encuentra en el submódulo `pvlib.singlediode`.
- Cálculo de sombreado: métodos analíticos para calcular la fracción sombreada de hileras de filas. Véase el submódulo `pvlib.shading`.
- Cálculo de ángulos de seguimiento: para seguidores de uno y dos ejes, que permitan coleccionar la máxima radiación solar directa, que normalmente se corresponderá con la máxima producción de energía. Véase el submódulo `pvlib.tracking`.
- Cálculo de temperatura de los módulos: normalmente empíricos, facilitan estimar la producción de energía ya que la eficiencia de las células es bastante susceptible a la temperatura. Estas utilidades se encuentran en `pvlib.temperature`.

- Estimación de ganancias o pérdidas por efectos del espectro solar: pues en función de la composición del espectro solar incidente en los módulos, la eficiencia de los mismos puede variar. En `pvlib.spectrum`.
- Modelado de eficiencia de inversores: para estimar la eficiencia de los inversores DC-AC en función de la potencia de entrada y sus demás características. En `pvlib.inverter`.
- Modelado de pérdidas en transformadores: para estimar las pérdidas en los transformadores de conexión a red. En `pvlib.transformer`.
- Modelado de pérdidas en cables: para estimar las pérdidas resistivas en los cables. En `pvlib.pvsystem`.
- Integración de APIs externas para la obtención de datos meteorológicos relacionados con la fotovoltaica, en `pvlib.iotools`.
- Abstracciones de los componentes que conforman una instalación fotovoltaica, mediante las clases `Location`, `Array`, `PVSystem` y la clase que agrupa el flujo computacional `Modelchain`, en los submódulos `pvlib.location`, `pvlib.pvsystem` y `pvlib.modelchain`.
- Cálculos adicionales para sistemas bifaciales, que son aquellos colectores planos que permiten la captación de radiación solar por ambas caras del módulo. En `pvlib.bifacial`.

### 2.3.3. Estructura de la librería

### 2.3.4. Herramientas de desarrollo del proyecto

```
1 import pvlib
```

## **Capítulo 3**

### **Desarrollo**

«Capítulo dedicado a describir el desarrollo del Trabajo realizado. De acuerdo con el tutor, este capítulo puede tener distintas estructuras, e incluso pueden existir varios capítulos.»

«Todos los capítulos deben empezar en una página nueva.»

«Los apartados dentro de los capítulos se numeran de forma jerárquica, pero siempre deben estar alineados al margen izquierdo»

---

### **3.1. Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas**

### **3.2. Contribuciones científicas**

#### **3.2.1. Modelado de ajuste espectral**

##### **3.2.1.1. Fundamento teórico**

##### **3.2.1.2. Resultado**

#### **3.2.2. Cálculo del cénit solar proyectado sobre las coordenadas de un colector**

##### **3.2.2.1. Fundamento teórico**

##### **3.2.2.2. Resultado**

#### **3.2.3. Cálculo de fracción de sombra unidimensional**

##### **3.2.3.1. Fundamento teórico**

##### **3.2.3.2. Resultado**

#### **3.2.4. Modelo de pérdidas por heterogeneidad de irradiancia por célula**

##### **3.2.4.1. Fundamento teórico**

##### **3.2.4.2. Resultado**

#### **3.2.5. Transformación de respuesta espectral a eficiencia cuántica externa**

##### **3.2.5.1. Fundamento teórico**

##### **3.2.5.2. Resultado**

#### **3.2.6. Adición de base de datos de respuesta espectral de algunas tecnologías**

##### **3.2.6.1. Fundamento teórico**

##### **3.2.6.2. Resultado**

#### **3.2.7. Adición de espectro estándar completo ASTM G173-03**

##### **3.2.7.1. Fundamento teórico**

##### **3.2.7.2. Resultado**

### **3.3. Contribuciones técnicas**

#### **3.3.1. Arreglo a los tests de integración continua**

##### **3.3.1.1. Resultado**

#### **3.3.2. Arreglo a un parámetro ignorado en una función de transposición inversa**

##### **3.3.2.1. Resultado**

#### **3.3.3. Dar soporte a otra función para el cálculo del IAM en el diseño orientado a objetos**

##### **3.3.3.1. Resultado**

#### **3.3.4. Suprimir una advertencia en la publicación del paquete**

## Capítulo 4

# Impacto del trabajo

«Breve explicación, por secciones, de los contenidos de este capítulo»

### 4.1. Impacto general

«Análisis del impacto potencial de los resultados obtenidos durante la realización del TFG, en los diferentes contextos para los que se aplique. Además, se harán notar aquellas decisiones tomadas a lo largo del trabajo que tienen como base la consideración del impacto.»

### 4.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible

«Se recomienda analizar también el potencial impacto respecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), de la Agenda 2030, que sean relevantes para el trabajo realizado (ver enlace 1, ver enlace 2)»



## **Capítulo 5**

# **Resultados y conclusiones**

«Breve explicación, por secciones, de los contenidos de este capítulo»

### **5.1. Resultados**

«Resumen de resultados obtenidos en el TFG»

### **5.2. Conclusiones personales**

«Conclusiones personales del estudiante sobre el trabajo realizado»

### **5.3. Trabajo futuro**

«Trabajo futuro que no se haya podido realizar o siguientes pasos que tomará el desarrollo realizado en este TFG»

# Bibliografía

- [1] K.W. Böer y D. Bimberg. *Survey of Semiconductor Physics, Survey of Semiconductor Physics*. Wiley, 2002. ISBN: 9780471355724. URL: [https://books.google.es/books?id=\\_pdvAQAAACAAJ](https://books.google.es/books?id=_pdvAQAAACAAJ).
- [2] Mahmood H. Shubbak. «Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 115 (nov. de 2019), pág. 109383. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109383.
- [3] William Shockley y Hans J. Queisser. «Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells». En: *Journal of Applied Physics* 32.3 (mar. de 1961), págs. 510-519. ISSN: 0021-8979. DOI: 10.1063/1.1736034.
- [4] Martin A. Green et al. «Solar cell efficiency tables (Version 63)». en. En: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 32.1 (2024), págs. 3-13. ISSN: 1099-159X. DOI: 10.1002/pip.3750.
- [5] O. Perpiñán. *Energía Solar Fotovoltaica*. 2020. URL: <http://oscarperpinan.github.io/esf/>.
- [6] Joshua S Stein y Geoffrey T Klise. «Models used to assess the performance of photovoltaic systems.» En: (dic. de 2009). DOI: 10.2172/974415. URL: <https://www.osti.gov/biblio/974415>.
- [7] Nallapaneni Manoj Kumar. «Simulation Tools for Technical Sizing and Analysis of Solar PV Systems». En: *Proceedings of the 6th World Conference on Applied Sciences, Engineering and Technology (WCSET-2017), 26-27 August 2017, UM-PO, Indonesia, ISBN 13: 978-81-930222-3-8, pp 218-222, At Universitas Muhammadiyah Ponorogo, Indonesia*. (ene. de 2017). URL: [https://www.academia.edu/35141273/Simulation\\_Tools\\_for\\_Technical\\_Sizing\\_and\\_Analysis\\_of\\_Solar\\_PV\\_Systems](https://www.academia.edu/35141273/Simulation_Tools_for_Technical_Sizing_and_Analysis_of_Solar_PV_Systems).
- [8] Joshua S. Stein et al. «PVLIB: Open source photovoltaic performance modeling functions for Matlab and Python». En: *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. Jun. de 2016, págs. 3425-3430. DOI: 10.1109/PVSC.2016.7750303. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7750303>.
- [9] Kevin S. Anderson et al. «pvlib python: 2023 project update». En: *Journal of Open Source Software* 8.92 (2023), pág. 5994. DOI: 10.21105/joss.05994. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.05994>.
- [10] Joshua S. Stein. «The photovoltaic Performance Modeling Collaborative (PVPMLC)». En: *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Jun. de 2012, págs. 003048-003052. DOI: 10.1109/PVSC.2012.6318225. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6318225>.
- [11] Robert W. Andrews et al. «Introduction to the open source PV LIB for python Photovoltaic system modelling package». En: *2014 IEEE 40th Photovoltaic Spe-*

- cialist Conference (PVSC)*. Jun. de 2014, págs. 0170-0174. DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925501. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6925501>.
- [12] William F. Holmgren et al. «PVLIB Python 2015». En: *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. Jun. de 2015, págs. 1-5. DOI: 10.1109/PVSC.2015.7356005. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7356005>.
- [13] William F. Holmgren y Derek G. Groenendyk. «An open source solar power forecasting tool using PVLIB-Python». En: *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. Jun. de 2016, págs. 0972-0975. DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749755. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7749755>.
- [14] G. van Rossum. *Python tutorial*. Inf. téc. CS-R9526. Amsterdam: Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), mayo de 1995.

## **Apéndice A**

### **Anexo**

«Este capítulo (anexo) es opcional, y se escribirá de acuerdo con las indicaciones del Tutor.»