



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, Junio, 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

Junio, 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 haberme dado 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*¹.

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, Visual Studio Code y GitHub Copilot entre innumerables otros.

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

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

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Contexto del proyecto	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Estructura del Documento	2
2. Trabajo relacionado y Estado del Arte	4
2.1. La energía solar fotovoltaica	4
2.2. Simulación de sistemas fotovoltaicos	4
2.3. La librería pvlib python	5
2.3.1. Objetivos de la librería	5
2.3.2. Funcionalidades	5
2.3.3. Estructura de la librería	5
2.3.4. Herramientas de desarrollo del proyecto	5
3. Desarrollo	6
3.1. Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas	8
3.2. Contribuciones científicas	8
3.2.1. Modelado de ajuste espectral	8
3.2.1.1. Fundamento teórico	8
3.2.1.2. Resultado	8
3.2.2. Cálculo del cenit solar proyectado sobre las coordenadas de un colector	8
3.2.2.1. Fundamento teórico	8
3.2.2.2. Resultado	8
3.2.3. Cálculo de fracción de sombra unidimensional	8
3.2.3.1. Fundamento teórico	8
3.2.3.2. Resultado	8
3.2.4. Modelo de pérdidas por heterogeneidad de irradiancia por célula	8
3.2.4.1. Fundamento teórico	8
3.2.4.2. Resultado	8
3.2.5. Transformación de respuesta espectral a eficiencia cuántica externa	8
3.2.5.1. Fundamento teórico	8
3.2.5.2. Resultado	8
3.2.6. Adición de base de datos de respuesta espectral de algunas tecnologías	8
3.2.6.1. Fundamento teórico	8

3.2.6.2. Resultado	8
3.2.7. Adición de espectro estándar completo ASTM G173-03	8
3.2.7.1. Fundamento teórico	8
3.2.7.2. Resultado	8
3.3. Contribuciones técnicas	8
3.3.1. Arreglo a los tests de integración continua	8
3.3.1.1. Resultado	8
3.3.2. Arreglo a un parámetro ignorado en una función de transposición inversa	8
3.3.2.1. Resultado	8
3.3.3. Dar soporte a otra función para el cálculo del IAM en el diseño orientado a objetos	8
3.3.3.1. Resultado	8
3.3.4. Suprimir una advertencia en la publicación del paquete	8
3.3.4.1. Resultado	8
3.3.5. Exponer parámetros de tolerancia para resolver el modelo de un diodo	8
3.3.5.1. Resultado	8
3.4. Contribuciones menores	8
4. Impacto del trabajo	9
4.1. Impacto general	9
4.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible	9
5. Resultados y conclusiones	10
5.1. Resultados	10
5.2. Conclusiones personales	10
5.3. Trabajo futuro	10
Bibliografía	11
A. Anexo	12

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Índice de Listings

Capítulo 1

Introducción

La problemática medioambiental es un tema de actualidad que preocupa al futuro de la humanidad. Dentro de este marco, las energías renovables se presentan como una solución a la dependencia de los combustibles fósiles, que son los principales responsables de la emisión de gases de efecto invernadero; y por consiguiente, la energía solar fotovoltaica es una fuente muy prometedora, ya que es renovable y no contamina en su explotación directa.

Este Trabajo de Fin de Grado pretende potenciar la energía solar fotovoltaica, 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 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 incrementado 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 algún miembro de empresas privadas.

El perfil de usuario de esta biblioteca presenta dos 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 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

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.

Introducción

- En Sección 2.3 La librería `pvlb python`, se presentan las características de la biblioteca *pvlb 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 resultado 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

«Explicación, en secciones, del estado del arte de las diferentes tecnologías, estudios, sistemas, etc., que trata este Trabajo de Fin de Grado, con referencias a la información, artículos, estudios, etc. que se tratan, como a continuación: [1]»

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 como *PVsyst*, *SAM* y muchas más [1].

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 [2]. Posteriormente, en 2013¹ inicia el desarrollo de la versión en Python, que es la que se trata en este trabajo [3].

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

2.3. La librería pvlib python

2.3.1. Objetivos de la librería

2.3.2. Funcionalidades

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] 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>.
- [2] Joshua S. Stein et al. «PVLIB: Open source photovoltaic performance modeling functions for Matlab and Python». En: *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2016, págs. 3425-3430. DOI: 10.1109/PVSC.2016.7750303.
- [3] 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>.

Apéndice A

Anexo

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