



Universidad de Málaga

Escuela de Ingenierías Industriales

Lenguajes y ciencias de la computación

Trabajo Fin de Grado

---

# Programa para calcular y simular un sistema fotovoltaico

---

Ingeniería Eléctrica

Autor: Elisabeth López Gunnarsson

Tutor: José Galindo Gómez

5 de octubre de 2025





# Resumen

## Programa para calcular y simular un sistema fotovoltaico

**Autor:** Elisabeth López Gunnarsson

**Tutor:** José Galindo Gómez

**Departamento:** Lenguajes y ciencias de la computación

**Titulación:** Ingeniería Eléctrica

**Palabras clave:** App Designer; sistemas fotovoltaicos; optimización de diseño fotovoltaico

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el desarrollo de una herramienta computacional destinada a calcular y simular el rendimiento de sistemas fotovoltaicos. Mediante el uso de MATLAB App Designer, se ha diseñado una aplicación interactiva que permite modelar la producción de energía de instalaciones solares, integrando variables fundamentales como la radiación solar, el ángulo de incidencia y la eficiencia de los módulos. La herramienta utiliza el modelado de curvas I-V y P-V para representar de manera gráfica y numérica el comportamiento de los paneles fotovoltaicos bajo diferentes condiciones operativas, lo cual facilita la evaluación del rendimiento y la identificación de oportunidades de optimización en el diseño de sistemas solares.

El proyecto surge ante la creciente relevancia de las energías renovables y la necesidad de simplificar los complejos cálculos asociados al diseño y análisis de instalaciones fotovoltaicas. Además de su aplicación práctica en el ámbito de la ingeniería solar, esta herramienta se posiciona como un recurso didáctico valioso para estudiantes y profesionales interesados en la mejora de la eficiencia energética. El desarrollo de la aplicación incluye el diseño de una interfaz intuitiva para la entrada y visualización de datos, y la validación de resultados mediante casos de estudio y pruebas comparativas. En conjunto, el trabajo no solo contribuye a la optimización de procesos de cálculo en la ingeniería, sino que también apoya el aprendizaje interdisciplinario, integrando conocimientos de programación, modelado matemático y tecnologías de la energía solar.



# Abstract

## Software to calculate and simulate a photovoltaic system

**Author:** Elisabeth López Gunnarsson

**Supervisor:** José Galindo Gómez

**Department :** Languages and computer science

**Degree:** Electrical Engineering

**Keywords:** App Designer; Interactive application; Energy production modeling; Design optimization

This Bachelor's Thesis focuses on the development of a computational tool designed to calculate and simulate the performance of photovoltaic systems. Using MATLAB App Designer, an interactive application has been created that enables the modeling of energy production in solar installations by integrating key variables such as solar irradiance, angle of incident, and module efficiency. The tool employs I-V and P-V curve modeling to graphically and numerically represent the behavior of photovoltaic panels under different operating conditions, thus facilitating performance evaluation and the identification of optimization opportunities in solar system design.

The project arises from the growing importance of renewable energies and the need to simplify the complex calculations involved in the design and analysis of photovoltaic installations. Beyond its practical application in the field of solar engineering, this tool serves as a valuable educational resource for students and professionals interested in improving energy efficiency. Its development includes the design of an intuitive interface for data entry and visualization, the implementation of robust algorithms for data processing, and the validation of results through case studies and comparative test. Altogether, this work not only contributes to the optimization of calculation workflows in engineering but also support interdisciplinary learning by integrating programming, mathematical modeling, and solar energy technologies.



*A todas las personas que apuestan por un futuro sostenible.*



# Agradecimientos

A mis padres, por su apoyo incondicional, su esfuerzo y el ejemplo que me han dado siempre.

A mis amistades y a mi pareja, por el ánimo, la paciencia y la compañía en cada etapa de este camino.

A mi tutor, José Galindo Gómez, por su guía, rigor y confianza, que han hecho posible este trabajo.



# Acrónimos y notación matemática

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
$\phi$	Latitud	(°)
$\delta$	Declinación solar	(°)
$\omega$	Ángulo horario	(°)
$\alpha$	Elevación solar	(°)
$\gamma$	Acimut solar	(°)
$N$	Día del año	(—)
$H$	Irradiación diaria	(kWh/m <sup>2</sup> ·día)
$E$	Irradiancia	(W/m <sup>2</sup> )
$I_{sc}$	Corriente de cortocircuito	(A)
$V_{oc}$	Tensión de circuito abierto	(V)
$I_{mp}$	Corriente en el punto de máxima potencia	(A)
$V_{mp}$	Tensión en el punto de máxima potencia	(V)
$FF$	Factor de llenado	(adimensional)



# Índice

	Página
<b>Índice de figuras</b>	<b>xix</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivos y contribución . . . . .	2
1.2.1. Objetivos específicos . . . . .	2
1.2.2. Contribución . . . . .	3
1.3. Estructura de la memoria . . . . .	4
<b>2 Contexto y marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Cambio climático y transición energética . . . . .	6
2.2. Fundamentos de física solar . . . . .	6
2.2.1. Parámetros solares . . . . .	7
2.2.2. Características de la radiación solar . . . . .	8
2.2.3. Principios de los módulos fotovoltaicos . . . . .	10
2.2.4. Modelado matemático y algoritmos de simulación . . . . .	11
2.3. Estado del arte y software de simulación fotovoltaica . . . . .	14
<b>3 Herramientas y aspectos técnicos del software</b>	<b>17</b>
3.1. MATLAB . . . . .	18
3.1.1. Ventajas principales . . . . .	18
3.1.2. Inconvenientes . . . . .	18
3.1.3. Alternativas consideradas . . . . .	19
3.2. App Designer . . . . .	19
3.2.1. Ventajas principales . . . . .	19
3.2.2. Inconvenientes . . . . .	19
3.2.3. Alternativas consideradas . . . . .	20

3.3.	Toolboxes empleados . . . . .	20
3.4.	Estructura de nuestra aplicación . . . . .	21
3.4.1.	Organización de carpetas y archivos . . . . .	21
3.4.2.	Formato de datos y entrada de usuario . . . . .	22
3.4.3.	Visualización de resultados . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Implementación en App Designer</b> . . . . .	<b>25</b>
4.1.	Funcionalidades implementadas . . . . .	26
4.2.	Estructura del código y lógica interna . . . . .	27
4.3.	Gestión de la localización geográfica . . . . .	28
4.4.	Estructura de datos y almacenamiento en memoria . . . . .	28
4.5.	Buenas prácticas de programación . . . . .	29
4.6.	Implementación . . . . .	30
4.6.1.	Enfoque general del proyecto . . . . .	30
4.6.2.	Fases del desarrollo . . . . .	30
4.6.3.	Herramientas utilizadas . . . . .	31
4.7.	Arquitectura de la aplicación y organización del código . . . . .	32
4.7.1.	Estructura general . . . . .	32
4.7.2.	Componentes y flujo de eventos . . . . .	32
4.7.3.	Funciones y <i>callbacks</i> principales . . . . .	33
4.7.4.	Flujo de datos . . . . .	33
4.7.5.	Validación y comprobación . . . . .	33
4.7.6.	Organización del trabajo . . . . .	34
4.8.	Estructura del código fuente . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Manual de usuario</b> . . . . .	<b>39</b>
5.1.	Requisitos previos e instalación . . . . .	40
5.1.1.	Requisitos e instalación . . . . .	40
5.1.2.	Instrucciones para arrancar la App . . . . .	41
5.2.	Descripción general de la interfaz . . . . .	42
5.3.	Estudio solar . . . . .	42
5.3.1.	Vista general . . . . .	42
5.3.2.	Mapa georreferenciado . . . . .	43
5.3.3.	Mapa de irradiación media diaria . . . . .	45
5.3.4.	Cálculo horario y elevación solar . . . . .	46
5.3.5.	Visualización de resultados . . . . .	46
5.3.6.	Controles y botones . . . . .	48
5.3.7.	Validación y errores comunes . . . . .	48
5.4.	Estudio solar panel . . . . .	49

5.4.1.	Vista general . . . . .	49
5.4.2.	Catálogo de paneles . . . . .	50
5.4.3.	Visualización de resultados . . . . .	52
5.4.4.	Controles y botones . . . . .	54
5.4.5.	Validación y errores comunes . . . . .	55
5.5.	Comparación entre paneles . . . . .	55
5.5.1.	Vista general . . . . .	55
5.5.2.	Selección de Panel A y Panel B . . . . .	56
5.5.3.	Visualización de resultados . . . . .	57
5.5.4.	Controles y botones . . . . .	58
5.5.5.	Validación y errores comunes . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Resultados y validación</b>	<b>59</b>
6.1.	Casos de estudio . . . . .	60
6.1.1.	Caso 1: Ubicación en Málaga . . . . .	61
6.1.2.	Caso 2: Ubicación en Madrid . . . . .	65
6.2.	Discusión de resultados . . . . .	68
6.3.	Validación técnica . . . . .	68
6.4.	Pruebas funcionales . . . . .	69
6.5.	Limitaciones detectadas . . . . .	70
<b>7</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>73</b>
7.1.	Conclusiones . . . . .	73
7.2.	Líneas futuras . . . . .	74
	<b>Referencias</b>	<b>75</b>



# Índice de figuras

Figura	Página
2.1. Representación de latitud y longitud. Fuente: [11]	7
2.2. Relación entre la elevación solar y azimut. Fuente: [12]	8
2.3. Representación tipos de irradiancia. Fuente: [10]	10
2.4. Curva I-V con factor de llenado. Fuente: [9]	13
2.5. Conjunto de curvas P-V representando diferentes horarios. Fuente: [13]	14
5.1. Pestaña Estudio solar. Fuente: elaboración propia.	43
5.2. Mapa georreferenciado. Fuente: Instituto Geográfico Nacional [4].	44
5.3. Mapa de irradiación media diaria. Fuente: [14].	45
5.4. Radiación media diaria y irradiación diaria. Fuente: Elaboración propia.	47
5.5. Ángulo horario y elevación solar. Fuente: Elaboración propia.	47
5.6. Datos obtenidos de PVGIS. Fuente: Elaboración propia.	48
5.7. Pestaña Estudio solar panel. Fuente: elaboración propia.	50
5.8. Ventana Nuevo panel. Fuente: elaboración propia.	51
5.9. Curvas eléctricas I-V y P-V para el módulo seleccionado. Fuente: elaboración propia.	53
5.10. Ejemplo de curva de producción fotovoltaica diaria. Fuente: elaboración propia.	53
5.11. Ejemplo de producción mensual estimada (gráfica). Fuente: elaboración propia.	54
5.12. Ejemplo de producción mensual estimada (Tabla). Fuente: elaboración propia.	54
5.13. Pestaña Comparación entre panel. Fuente: elaboración propia.	56
5.14. Ejemplo de resultados en la pestaña de comparación entre paneles. Fuente: elaboración propia.	57
6.1. Curva I-V del caso 1. Fuente: elaboración propia.	62
6.2. Curva P-V del caso 1. Fuente: elaboración propia.	62
6.3. Producción diaria — caso 1. Fuente: elaboración propia.	63
6.4. Producción mensual estimada — caso 1 (gráfica). Fuente: elaboración propia.	64
6.5. Producción mensual estimada — caso 1 (tabla). Fuente: elaboración propia.	64
6.6. Curva I-V (comparación) con inclinación 30°. Fuente: elaboración propia.	66
6.7. Curva P-V (comparación) con inclinación 30°. Fuente: elaboración propia.	66

6.8. Producción mensual — comparación entre paneles (gráfica), inclinación 30°. Fuente: elaboración propia. . . . .	67
6.9. Producción mensual — comparación entre paneles (tabla), inclinación 30°. Fuente: elaboración propia. . . . .	67

# Índice de tablas

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
2.1. Comparativa resumida de herramientas de simulación fotovoltaica . . . . .	15
5.1. Distribución de regiones según el color en el mapa y su irradiación aproximada. . . . .	45



# Introducción

## Contenido

---

1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivos y contribución . . . . .	2
1.2.1. Objetivos específicos . . . . .	2
1.2.2. Contribución . . . . .	3
1.3. Estructura de la memoria . . . . .	4

---

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el desarrollo de una herramienta computacional capaz de simular sistemas fotovoltaicos y calcular sus parámetros (curvas I-V y P-V, punto de máxima potencia, producción estimada). La aplicación se desarrolla en MATLAB App Designer, con una interfaz gráfica que facilita la entrada y visualización de datos, e integra algoritmos que consideran variables clave como la irradiancia de la ubicación, el ángulo de incidencia solar y la eficiencia de los módulos.

Esta solución simplifica los cálculos propios del diseño de instalaciones solares y apoya la toma de decisiones en el ámbito de las energías renovables. El proyecto se enmarca en el creciente interés por las energías limpias y la optimización de recursos; la simulación permite predecir el comportamiento de los sistemas bajo diferentes condiciones operativas y estudiar su rentabilidad energética y económica. Además, la herramienta tiene un propósito didáctico, al facilitar que estudiantes y profesionales profundicen en el diseño y la evaluación de instalaciones fotovoltaicas, integrando conocimientos de ingeniería, programación y análisis de datos.

## 1.1. Motivación

El cambio climático y la creciente demanda energética han puesto de manifiesto la urgencia de, en primer lugar, reducir el consumo de energía y, en segundo lugar, acelerar la transición hacia fuentes renovables. En este contexto, la energía solar fotovoltaica se presenta como una de las alternativas más prometedoras por su abundancia y su reducido impacto ambiental. Además, la energía solar es un recurso disponible globalmente: el sol está presente en todo el planeta, con variaciones estacionales y geográficas que pueden modelarse, lo que favorece su despliegue a distintas escalas.

Sin embargo, el diseño y análisis de instalaciones solares requiere realizar cálculos complejos—desde la estimación de irradiación en un emplazamiento específico hasta el modelado de curvas I-V bajo distintas condiciones—. Estos procesos, cuando se realizan manualmente o con herramientas poco especializadas, pueden ser laboriosos y propensos a errores.

Ante esta situación, surge así la necesidad de una plataforma que simplifique dichos cálculos, agilice la toma de decisiones y actúe como recurso formativo. Una interfaz interactiva que reúna en un mismo entorno la gestión de datos, la simulación de rendimiento y la visualización gráfica no solo mejora la eficiencia del ingeniero solar, sino que también facilita el aprendizaje de conceptos clave para estudiantes y profesionales. Este proyecto, por tanto, nace con la voluntad de acercar la tecnología fotovoltaica a un público más amplio, reduciendo barreras técnicas, contribuyendo al despliegue de sistemas solares más eficientes y sostenibles, y permitiendo también estudiar su rentabilidad energética.

## 1.2. Objetivos y contribución

Nuestro objetivo principal es desarrollar una aplicación interactiva en MATLAB App Designer capaz de calcular y simular el rendimiento de sistemas fotovoltaicos, integrando variables clave y ofreciendo resultados visuales que faciliten la toma de decisiones en el diseño de instalaciones solares.

### 1.2.1. Objetivos específicos

1. Diseñar una interfaz gráfica intuitiva para introducir y visualizar los parámetros solares y constructivos de una instalación fotovoltaica.
2. Permitir al usuario seleccionar la ubicación geográfica de la instalación y obtener automáticamente los datos de irradiación correspondientes.
3. Ofrecer una herramienta visual para analizar mapas de irradiación media diaria con segmentación por zonas.

4. Incorporar un sistema de cálculo automático del ángulo horario y elevación solar según fecha seleccionada.
5. Integrar un catálogo editable de paneles solares donde el usuario pueda visualizar, añadir, modificar y eliminar modelos.
6. Simular el comportamiento eléctrico del sistema mediante modelado de curvas I-V y P-V de los paneles fotovoltaicos.
7. Comparar el rendimiento de dos módulos fotovoltaicos bajo las mismas condiciones.
8. Generar gráficas interactivas y estadísticas dinámicas de producción energética (diaria, mensual, anual...).
9. Implementar validaciones y alertas que ayuden al usuario a detectar errores en los datos de entrada.
10. Proporcionar un manual de usuario detallado que describa el funcionamiento completo de la aplicación.
11. Distribuir la aplicación como ejecutable independiente, ejecutable sin MATLAB mediante *MATLAB Runtime* (gratuito).

### 1.2.2. Contribución

- **Práctica.** Proporciona a diseñadores un recurso ágil para estimar el comportamiento energético de una instalación solar sin necesidad de herramientas complejas o de profundos conocimientos de programación.
- **Académica.** Ofrece un ejemplo integrador de aplicación de teoría fotovoltaica, modelado matemático y desarrollo de software; servirá como caso de estudio en cursos de energías renovables y programación. Siendo útil en la asignatura de Energías renovables de la Universidad de Málaga.
- **Didáctica.** Facilita el aprendizaje auto dirigido, al combinar gráficos interactivos y resultados numéricos que ayudan a comprender el impacto de cada variable en el rendimiento solar.
- **Facilidad de futuras ampliaciones.** Sienta las bases para futuras extensiones (por ejemplo, integración de almacenamiento, optimización de orientación automática) y demuestra la viabilidad de MATLAB App Designer como plataforma de prototipo rápido en proyectos de ingeniería energética.

### 1.3. Estructura de la memoria

El presente trabajo se organiza en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1. Introducción.** Presenta la motivación, los objetivos (generales y específicos) y la estructura de la memoria.
- **Capítulo 2. Contexto y marco teórico.** Fundamentos de energía solar fotovoltaica, parámetros solares, modelos eléctricos y curvas características.
- **Capítulo 3. Herramientas y aspectos técnicos del *software*.** Entorno de desarrollo y *toolboxes* empleados.
- **Capítulo 4. Implementación en App Designer.** Metodología de desarrollo, arquitectura de la aplicación y estructura del código fuente; incluye las funciones principales y la lógica de cálculo.
- **Capítulo 5. Manual de usuario.** Guía práctica de uso: interfaz, flujo de trabajo, cálculos disponibles, interpretación de resultados y validación/alertas en la propia app.
- **Capítulo 6. Resultados y validación.** Casos de estudio y comparación con herramientas externas.
- **Capítulo 7. Conclusiones y líneas futuras.** Síntesis de logros y propuestas de mejora.
- **Referencias.** Fuentes científicas, técnicas e institucionales.

## Contexto y marco teórico

### Contenido

---

2.1. Cambio climático y transición energética . . . . .	6
2.2. Fundamentos de física solar . . . . .	6
2.2.1. Parámetros solares . . . . .	7
2.2.2. Características de la radiación solar . . . . .	8
2.2.3. Principios de los módulos fotovoltaicos . . . . .	10
2.2.4. Modelado matemático y algoritmos de simulación . . . . .	11
2.3. Estado del arte y software de simulación fotovoltaica . . . . .	14

---

**E**n este capítulo se sitúa el proyecto en el marco de la transición energética y se establecen los fundamentos teóricos que sustentan la simulación de sistemas fotovoltaicos. De esta forma, se proporciona al lector el conocimiento necesario para comprender tanto el problema abordado como las soluciones propuestas.

## 2.1. Cambio climático y transición energética

En las últimas décadas, el incremento sostenido de gases de efecto invernadero, ha elevado la temperatura media global en algo más de 1°C respecto a la era preindustrial, alcanzando en 2024 una anomalía de 1,55°C por encima de la media de 1850-1900, según confirma la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [8]. Este calentamiento, consecuencia directa de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), provoca fenómenos adversos como el aumento del nivel del mar, la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos y la pérdida de biodiversidad. Como destaca Naomi Klein, la magnitud de estos impactos revela que no basta con pequeñas correcciones técnicas: el cambio climático exige alterar de raíz las estructuras económicas y energéticas que lo han engendrado [6]. Junto a ello, José Galindo subraya la importancia de fomentar una cultura urbana y unas políticas públicas verdes que impulsen colectivamente la transición hacia modos de vida más sostenibles y resilientes [5]. Por su parte, David Wallace-Wells [7] describe un escenario de “cascadas” climáticas —olas de calor extremo, sequías, incendios, hambrunas, desplazamientos y colapso económico— que harían del planeta un lugar prácticamente inhabitable si no se adoptan medidas drásticas.

Conscientes de esta urgencia, la transición energética se erige como la estrategia clave para sustituir progresivamente fuentes convencionales emisoras de carbono por tecnologías limpias y renovables: solar, eólica, hidráulica y biomasa. Además de mitigar el cambio climático, este cambio de matriz aporta beneficios como la seguridad de suministro, la independencia de mercados internacionales de combustibles y la generación de empleo en sectores verdes. En consonancia con la visión de Galindo, la adopción de energías renovables debe estar acompañada de un compromiso social y normativo que garantice su despliegue equitativo y eficiente [5], mientras que Klein insiste en que solo un modelo económico orientado al bien común permitirá sostener estos avances a largo plazo [6].

Dentro de este escenario, la fotovoltaica, por su madurez tecnológica, modularidad y abundancia de recursos, adquiere un papel protagonista. España ha experimentado un crecimiento exponencial de la energía solar: según el informe IEA-PVPS [3], al cierre de 2023 la capacidad instalada superó los 39,4 GW, con 9,3 GW nuevos ese año, posicionando a la fotovoltaica como la tecnología dominante en el mix energético nacional. El autoconsumo residencial e industrial alcanzó 6 955 MW (1 706 MW instalados en 2023), mientras que la fotovoltaica aportó más del 20,3% de la potencia renovable total y generó más de 37 000 GWh, contribuyendo decisivamente al cumplimiento de los objetivos del PNIEC y al avance de la transición energética en España.

## 2.2. Fundamentos de física solar

A continuación, se revisarán los fundamentos teóricos necesarios para entender el comportamiento de los sistemas solares fotovoltaicos.

### 2.2.1. Parámetros solares

Para simular con precisión la radiación que incide sobre un panel fotovoltaico, es esencial calcular la posición aparente del sol en el cielo. Esto se logra definiendo una serie de parámetros solares básicos, cuyos valores permiten estimar el ángulo de incidencia de los rayos solares, base imprescindible para el diseño y la optimización de cualquier instalación fotovoltaica.

- **Latitud ( $\phi$ ):** coordenada geográfica que define la distancia angular al ecuador. Aparece en todas las fórmulas de geometría solar y condiciona la altura máxima del sol en cada estación. Como se observa en la Figura 2.1, la latitud se mide a partir del ecuador y toma valores positivos hacia el hemisferio norte y negativos hacia el hemisferio sur. Como se aprecia en la Figura 2.1, el sistema de coordenadas geográficas (latitud y longitud) se ilustra según el esquema de referencia de [11].

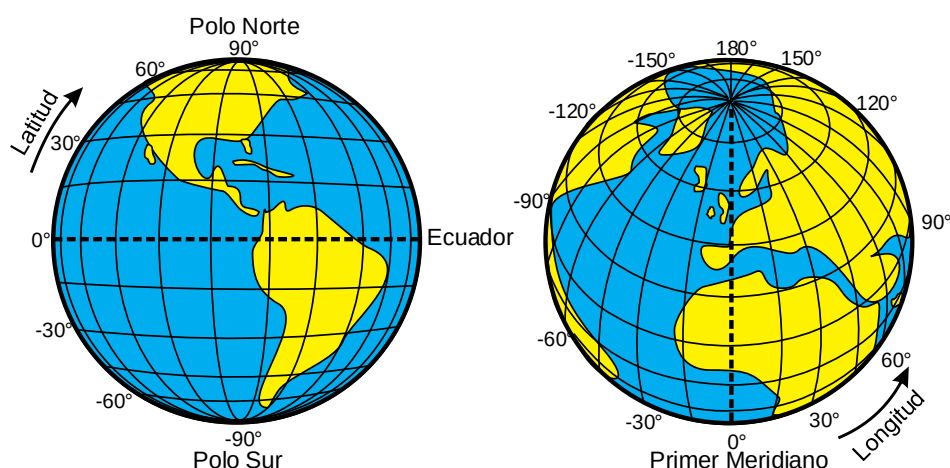


Figura 2.1: Representación de latitud y longitud. Fuente: [11]

- **Declinación solar ( $\delta$ ):** ángulo entre el plano del ecuador terrestre y el vector que une el centro de la Tierra con el sol. Se calcula a partir del día del año ( $N$ ), por ejemplo:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{360^\circ}{365} (284 + N)\right) \quad (2.1)$$

- **Ángulo horario ( $\omega$ ):** mide el tiempo solar en grados: vale  $0^\circ$  al mediodía local verdadero, avanza  $15^\circ$  por hora tras el mediodía y  $-15^\circ$  antes. Se obtiene como:

$$\omega = 15^\circ (t_{solar} - 12) \quad (2.2)$$

- **Elevación solar ( $\alpha$ ):** altura del sol sobre el horizonte, en grados. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \quad (2.3)$$

- **Azimut solar ( $\gamma$ ):** ángulo, en el plano horizontal, entre la proyección del sol y el sur (o el norte, según convención). Una forma de calcularlo es:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos \omega}{\cos \alpha}\right) \quad (2.4)$$

- **Relación entre elevación y azimut:** la elevación y el azimut están unidos por la identidad trigonométrica del vector sol-tierra. Por ejemplo, a partir de la definición de  $\alpha$  y  $\gamma$  se verifica que:

$$\tan \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos \omega} \quad (2.5)$$

Finalmente, en la Figura 2.2 se ilustra gráficamente la relación entre la elevación y el azimut, lo que facilita la comprensión de cómo varían ambos ángulos en función de la posición aparente del sol. La relación entre elevación ( $\alpha$ ) y azimut ( $\gamma$ ) que se muestra en la Figura 2.2 sigue el esquema divulgativo de [12].

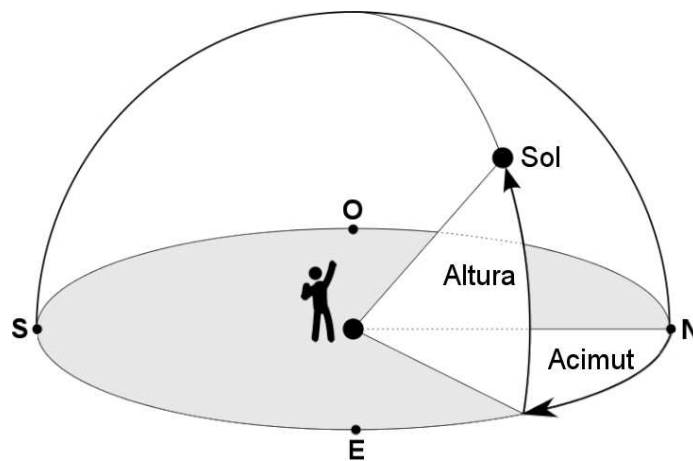


Figura 2.2: Relación entre la elevación solar y azimut. Fuente: [12]

### 2.2.2. Características de la radiación solar

La radiación solar constituye la fuente primaria de energía para los sistemas fotovoltaicos y su cuantificación precisa es esencial para el dimensionamiento y la simulación de cualquier instalación. Se describe a continuación su naturaleza y las distintas magnitudes empleadas en ingeniería solar.

La radiación solar es el flujo de energía electromagnética que emite el sol y que llega a la Tierra en forma de luz visible, radiación infrarroja y ultravioleta. Al atravesar la atmósfera, parte de esa energía se dispersa, dando lugar a los componentes directos y difusos que inciden sobre cualquier superficie.

### 2.2.2.1. Definiciones y unidades

La cuantificación de la radiación solar se basa en dos magnitudes fundamentales:

- **Irradiancia (E):** la irradiancia mide la potencia de la radiación solar que incide de manera instantánea sobre una superficie, y se expresa en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). En condiciones de cielo claro y con el sol en su cénit, la irradiancia directa sobre un plano perpendicular a los rayos solares puede alcanzar valores próximos a  $1000 W/m^2$ . Esta magnitud es clave para determinar la corriente que fluye por un panel en cada instante, pues, en primer orden, la corriente de cortocircuito de un módulo es directamente proporcional a la irradiancia.
- **Irradiación (H):** la irradiación representa la energía solar total acumulada por unidad de área durante un intervalo de tiempo, habitualmente un día completo. Se mide en vatios-hora por metro cuadrado y día ( $Wh/m^2 \cdot día$ ) o en kilovatios-hora por metro cuadrado y día ( $kWh/m^2 \cdot día$ ). Matemáticamente, la irradiación diaria se obtiene integrando la irradiancia a lo largo del período diurno:

$$H = \int_{t_{amanecer}}^{t_{atardecer}} E(t) dt \quad (2.6)$$

Además de estas dos magnitudes, la irradiación solar se descompone en tres componentes, cada una con su propia unidad de medida ( $W/m^2$ ):

- **Irradiancia Normal Directa (IND):** mide la componente directa que alcanza una superficie orientada siempre perpendicular a los rayos solares. Es crítica para sistemas con seguimiento solar.
- **Irradiancia Horizontal Difusa (IHD):** mide la radiación dispersada en la atmósfera que incide sobre un plano horizontal. En días nublados o con alta turbidez, la IHD puede superar a la componente directa.
- **Irradiancia Horizontal Global (IHG):** es la suma de la componente difusa más la directa proyectada sobre un plano horizontal:

$$IHG = IND \cos(\theta) + IHD \quad (2.7)$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre la radiación directa y la normal al plano receptor.

La diferencia entre estas tres componentes se ilustra en la Figura 2.3, que muestra de forma esquemática cómo se dispersan las tres irradiaciones sobre una placa solar fotovoltaica.

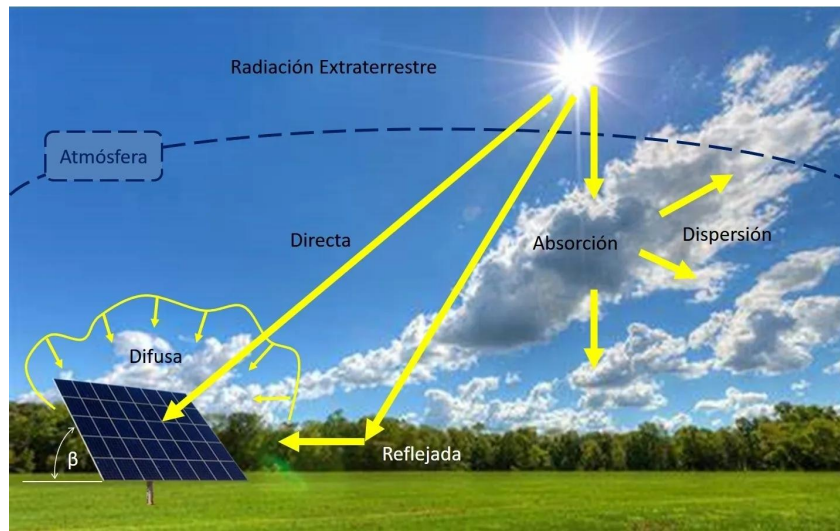


Figura 2.3: Representación tipos de irradiación. Fuente: [10]

### 2.2.2.2. Conversión de unidades y aplicación práctica

- Para pasar de Wh/m<sup>2</sup>·día a kWh/m<sup>2</sup>·día , basta con dividir entre 1000.
- En el diseño de un sistema fotovoltaico, la irradiación media diaria ( $H$ ) se multiplica por el área del panel ( $A_{panel}$ ) y su eficiencia ( $\eta$ ) para estimar la energía diaria generada:

$$E_{diaria} = HA_{panel}\eta \quad (2.8)$$

### 2.2.3. Principios de los módulos fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos están formados por una o varias celdas solares interconectadas eléctricamente y encapsuladas para protegerlas de las inclemencias ambientales. Cada celda se basa en una unión PN de silicio que convierte la energía solar en corriente eléctrica mediante el efecto fotovoltaico: cuando los fotones de la irradiación inciden sobre el semiconductor, excitan electrones y generan pares electrón-vacante que, al separarse en la unión, crean una corriente continua.

Desde el punto de vista eléctrico, un módulo puede modelarse con un circuito equivalente de diodo, una fuente de corriente dependiente de la irradiación y resistencias en serie y en paralelo que representan las pérdidas resistivas y las fugas. Los parámetros característicos de este modelo —corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  (A), tensión de circuito abierto  $V_{oc}$  (V), corriente en el punto de máxima potencia  $I_{mp}$  (A) y tensión en el punto de máxima potencia  $V_{mp}$  (V) —, así como el factor de llenado ( $FF$ ), definen su comportamiento y son fundamentales para la simulación.

Las curvas corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V) sintetizan el rendimiento del módulo bajo unas condiciones dadas de irradiación y temperatura. La curva I-V muestra cómo la corriente

disminuye casi linealmente al aumentar la tensión hasta alcanzar  $V_{oc}$  (V), mientras que la P-V exhibe un único máximo (punto de máxima potencia) que señala el punto óptimo de operación.

Por ejemplo, para un módulo fotovoltaico con una corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  (A) = 9,5 y una tensión de circuito abierto  $V_{oc}$  (V) = 40, la curva P-V presentará un máximo en torno a  $V_{mp}$  (V)  $\approx$  32 e  $I_{mp}$  (A)  $\approx$  9, lo que corresponde a una potencia máxima de unos  $P_{m\acute{a}x}$  (W)  $\approx$  288. Este punto define las condiciones óptimas de funcionamiento del módulo bajo la irradiancia considerada.

## 2.2.4. Modelado matemático y algoritmos de simulación

Para simular con precisión el comportamiento de un modelo fotovoltaico, es fundamental contar con un modelo matemático que describa su respuesta eléctrica ante diferentes condiciones de irradiación y temperatura, así como algoritmos numéricos que resuelvan eficientemente las curvas I-V y P-V. A continuación, se describen los elementos esenciales de este apartado.

### 2.2.4.1. Modelo de diodo (modelo de un solo diodo)

El módulo fotovoltaico se representa mediante un circuito equivalente que consta de:

- Una fuente de corriente ( $I_{ph}$ ), proporcional a la irradiación recibida.
- Un diodo que modela la unión PN del semiconductor, con corriente de saturación  $I_0$ .
- Una resistencia serie ( $R_s$ ), que engloba pérdidas por contacto y conexiones.
- Una resistencia shunt ( $R_{sh}$ ), que refleja fugas internas.

La relación corriente-tensión se expresa por la ecuación implícita:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I R_s}{n V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

donde  $n$  es el factor de idealidad del diodo y  $V_t$  la tensión térmica descrita de esta manera:

$$V_t = \frac{k T}{q} \quad (2.10)$$

donde:

- $k$  es la constante de Boltzmann,
- $T$  es la temperatura absoluta de la célula en Kelvin (K),
- $q$  es la carga del electrón.

### 2.2.4.2. Resolución de la curva I–V

Una vez definido el modelo matemático que describe el comportamiento eléctrico del módulo fotovoltaico, es necesario resolver la ecuación no lineal que relaciona la corriente y la tensión en sus bornes. Esta ecuación, que incluye términos exponenciales y variables implícitas, no puede resolverse de forma analítica para obtener  $I$  directamente como función de  $V$ , ya que la corriente aparece tanto fuera como dentro de la exponente.

La resolución de la curva I–V debe realizarse mediante métodos numéricos. La estrategia habitual consiste en recorrer un conjunto de valores de tensión dentro del rango operativo del módulo, y para cada uno de ellos, calcular el valor correspondiente de la corriente.

Además, se define el factor de llenado (*Fill Factor*,  $FF$ ) como un parámetro que mide la calidad del módulo y “rectitud” de la curva I–V. En la figura 2.4 se observa la curva I–V característica de un módulo fotovoltaico, en la que se ha marcado el  $FF$ . Se calcula como:

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.11)$$

Al repetir este proceso para distintos niveles de irradiancia o temperatura, se obtienen distintas curvas I–V que reflejan cómo se comporta el módulo en condiciones variables. La forma de la curva permite identificar puntos clave como:

- El punto de cortocircuito ( $V = 0$ ), donde la corriente es máxima.
- El punto de circuito abierto ( $I = 0$ ), donde la tensión es máxima.
- El punto de máxima potencia ( $V_{mp}, I_{mp}$ ), donde el producto  $V \cdot I$  es máximo.

Estos elementos característicos pueden observarse de forma gráfica en la Figura 2.4, donde se representa una curva I–V típica junto con el factor de llenado representado en el recuadro A. Dichas curvas son fundamentales para dimensionar y analizar el rendimiento de sistemas solares fotovoltaicos.

### 2.2.4.3. Curva P–V

La curva P–V (potencia vs voltaje) representa cómo varía la potencia eléctrica generada por un módulo fotovoltaico en función de la tensión aplicada en sus bornes. Esta curva se obtiene a partir de la curva I–V previamente modelada, simplemente multiplicando cada valor de corriente por su correspondiente valor de tensión:

$$P(V) = V \cdot I(V) \quad (2.12)$$

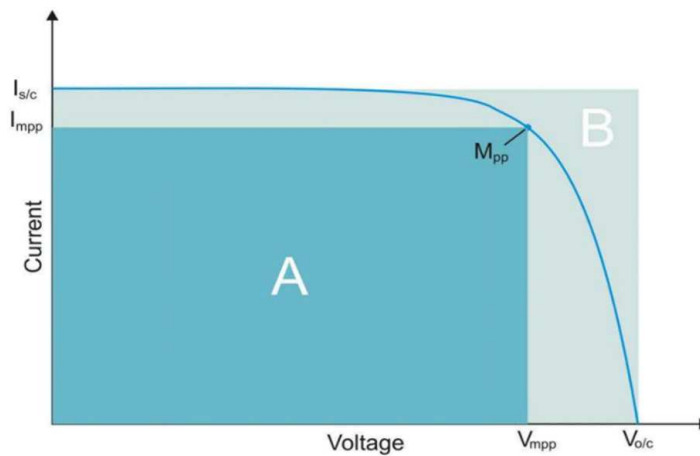


Figura 2.4: Curva I-V con factor de llenado. Fuente: [9]

La forma de esta curva es característica: la potencia crece inicialmente con el aumento de la tensión, alcanza un valor máximo, y posteriormente decrece. Este punto máximo se conoce como punto de máxima potencia o MPP (*Maximum Power Point*), y es fundamental para el diseño y control de sistemas solares, ya que representa la condición óptima de operación del panel. Los valores correspondientes a ese punto son:

- $V_{mp}$ , tensión en el punto de máxima potencia.
- $I_{mp}$ , corriente en el punto de máxima potencia.
- En el punto de máxima potencia (MPP), alcanzado cuando  $P(V)$  es máxima, la potencia correspondiente se expresa como:

$$P_{max} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (2.13)$$

donde  $V_{mp}$  es la tensión en el punto de máxima potencia e  $I_{mp}$  la corriente en dicho punto. Asimismo, el factor de llenado se define como

$$FF = \frac{P_{m\acute{a}x}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.14)$$

donde  $V_{oc}$  es la tensión de circuito abierto e  $I_{sc}$  la corriente de cortocircuito. Un valor alto de  $FF$  indica un mejor aprovechamiento de la energía solar por parte del módulo.

La representación gráfica de este comportamiento puede verse en la Figura 2.5, donde se muestran distintas curvas P-V obtenidas a diferentes horarios, lo que evidencia cómo varía la potencia máxima disponible a lo largo del día.

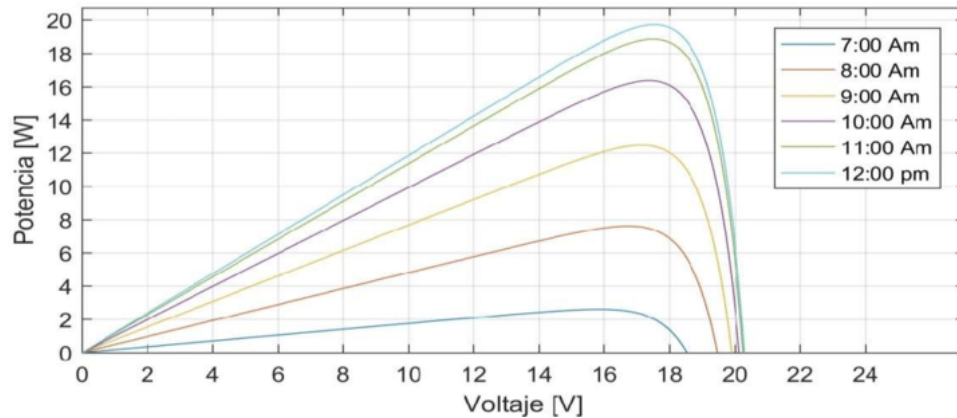


Figura 2.5: Conjunto de curvas P-V representando diferentes horarios. Fuente: [13]

### 2.3. Estado del arte y software de simulación fotovoltaica

En las últimas décadas se ha consolidado un ecosistema de herramientas para el modelado, simulación y optimización de sistemas fotovoltaicos. En el ámbito comercial destacan suites como PVsyst (y, fuera de esta comparativa, PV\*Sol), orientadas a proyectos profesionales con modelado detallado de pérdidas, sombreados y configuraciones avanzadas. Paralelamente, existen soluciones gratuitas y/o abiertas (PVGIS, SAM) y librerías académicas que permiten extender cálculos por código, como PVLib (Python/MATLAB) o *toolboxes* especializados de MATLAB, favoreciendo la experimentación con nuevos modelos de célula y flujos de cálculo propios. La investigación reciente también ha profundizado en técnicas de optimización—incluyendo algoritmos genéticos, enjambres de partículas y aprendizaje automático—para el dimensionamiento y ajuste de parámetros.

La Tabla 2.1 resume varias herramientas representativas, indicando si ofrecen interfaz visual, extensión por *scripting*, acceso a datos meteorológicos y capacidades de modelado.

En cuanto a interfaces de usuario, pocas soluciones combinan la facilidad de un entorno visual con la posibilidad de extender y personalizar los cálculos a nivel de código. MATLAB App Designer ofrece una vía intermedia: permite construir aplicaciones gráficas a medida e integrar de forma nativa cálculo numérico, procesamiento de datos y graficación, sin sacrificar la potencia de *scripting*. En este contexto, la aplicación desarrollada en este Trabajo de Fin de Grado se posiciona como herramienta didáctica y visual, útil para el aprendizaje de conceptos y la exploración interactiva del

Tabla 2.1: Comparativa resumida de herramientas de simulación fotovoltaica

Herramienta	Interfaz	Scripting	Meteo	Modelado	Licencia
PVGIS (CE)	✓ (web)	×	✓	×	Gratuita
PVsys	✓	×	✓	✓	De pago
SAM (NREL)	✓	✓ <sup>†</sup>	✓	✓	Gratuita
HOMER	✓	×	✓	✓ (híbridos)	De pago
Nuestra App (MATLAB)	✓	✓	✓ (PVGIS/GeoTIFF)	✓ <sup>‡</sup>	Gratuita (Runtime)

<sup>†</sup> Mediante automatización externa (p. ej., *PySAM/SSC*).

<sup>‡</sup> Alcance docente del TFG; no sustituye suites profesionales (p. ej., pérdidas por sombreado detalladas).

comportamiento de módulos fotovoltaicos bajo distintas condiciones, manteniendo un nivel de complejidad adecuado al objetivo académico.



# Herramientas y aspectos técnicos del software

## Contenido

---

3.1. MATLAB	18
3.1.1. Ventajas principales	18
3.1.2. Inconvenientes	18
3.1.3. Alternativas consideradas	19
3.2. App Designer	19
3.2.1. Ventajas principales	19
3.2.2. Inconvenientes	19
3.2.3. Alternativas consideradas	20
3.3. Toolboxs empleados	20
3.4. Estructura de nuestra aplicación	21
3.4.1. Organización de carpetas y archivos	21
3.4.2. Formato de datos y entrada de usuario	22
3.4.3. Visualización de resultados	22

---

**E**n este capítulo se describen las herramientas de *software* utilizadas para el desarrollo de la aplicación, así como los aspectos técnicos relacionados con su funcionamiento. Se detalla el entorno de desarrollo empleado, los paquetes y librerías necesarios, la organización de archivos, la forma en que se introducen los datos y la estructura interna de la aplicación.

El objetivo es ofrecer una visión general de los recursos tecnológicos que han hecho posible implementar una herramienta funcional, robusta y orientada a la simulación de sistemas fotovoltaicos desde una perspectiva educativa y técnica.

## 3.1. MATLAB

El entorno de programación elegido para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado ha sido MATLAB R2023b. La elección de esta herramienta responde a la necesidad de disponer de un *software* capaz de combinar cálculos numéricos complejos, representación gráfica y diseño de interfaces gráficas en un mismo entorno.

### 3.1.1. Ventajas principales

- **Potencia numérica:** MATLAB está optimizado para el cálculo matricial y el manejo de grandes volúmenes de datos, lo que lo hace muy adecuado para implementar modelos matemáticos relacionados con la energía solar fotovoltaica.
- **Facilidad de graficación:** incluye librerías integradas que permiten representar datos y curvas de forma sencilla y con alta calidad visual, algo esencial en este proyecto para mostrar resultados como las curvas I-V y P-V.
- **Integración con App Designer:** MATLAB proporciona de manera nativa una herramienta para construir aplicaciones con interfaz gráfica de usuario, lo que permite desarrollar la herramienta de simulación sin necesidad de utilizar lenguajes adicionales.
- **Amplia documentación y comunidad:** dispone de abundante material de referencia, ejemplos y foros, lo que facilita la resolución de dudas y problemas durante el desarrollo.
- **Distribución en dos modalidades:** instalable en MATLAB mediante paquete `.mlappinstall` (para usuarios que ya tienen MATLAB) y ejecutable independiente empaquetado con *MATLAB Runtime* (gratuito), de modo que puede usarse sin tener MATLAB instalado.

### 3.1.2. Inconvenientes

- **Licencia de pago:** MATLAB no es un *software* libre, y requiere licencias de uso que puedan ser costosas fuera del ámbito académico.
- **Dependencia de *toolboxes*:** muchas funcionalidades específicas, como el tratamiento de imágenes o la optimización matemática, depende de *toolboxes* adicionales que también requieren licencia.
- **Curva de aprendizaje:** aunque es más accesible que otro lenguaje de programación, requiere cierta inversión de tiempo para dominar la sintaxis y las herramientas avanzadas.

### 3.1.3. Alternativas consideradas

Existen alternativas que podrían haberse empleado, como Python, GNU Octave —*software* libre compatible con gran parte de la sintaxis de MATLAB— y el lenguaje R, muy fuerte en análisis estadístico, manejo de datos y visualización (p. ej., *dplyr*, *data.table*, *ggplot2*, *lubridate*); en el ámbito fotovoltaico, R dispone de paquetes como *solaR* e *insol* para geometría solar, radiación y estimaciones. Sin embargo, tanto Python/Octave como R habrían requerido mayor esfuerzo de configuración, integración de librerías y pruebas para alcanzar un resultado equivalente, y en el caso de R la creación de interfaces gráficas de escritorio suele apoyarse en *Shiny* (web). Por estos motivos, y considerando el tiempo disponible y los recursos académicos, se optó por MATLAB, que ofrece integración nativa con App Designer y facilita la distribución de la aplicación como ejecutable mediante *MATLAB Runtime*.

## 3.2. App Designer

Dentro de MATLAB se encuentra la herramienta App Designer, que ha sido empleada para crear la interfaz gráfica de la aplicación desarrollada en este proyecto. Su uso ha permitido integrar en un único entorno tanto la programación del código como el diseño visual, lo que facilita la interacción del usuario con los cálculos implementados. de MATLAB se encuentra la herramienta *App Designer* [1], empleada para crear la interfaz gráfica de la aplicación desarrollada en este proyecto. Su uso permite integrar en un único entorno tanto la programación del código como el diseño visual, lo que facilita la interacción del usuario con los cálculos implementados.

### 3.2.1. Ventajas principales

- **Integración directa con MATLAB:** al formar parte del propio entorno, no es necesario recurrir a librerías externas ni a lenguajes adicionales para crear interfaces gráficas.
- **Diseño visual intuitivo:** permite construir la interfaz de forma interactiva, arrastrando y colocando elementos como botones, menús, tablas y gráficos.
- **Conexión automática con *callbacks*:** cada componente gráfico puede vincularse fácilmente a una función del programa, lo que agiliza la programación de la lógica interna.
- **Compatibilidad con el ecosistema de MATLAB:** las funciones matemáticas, gráficas y de los distintos *toolboxes* pueden integrarse sin dificultad en la aplicación.

### 3.2.2. Inconvenientes

- **Limitaciones de personalización:** aunque es flexible, no ofrece la misma libertad de diseño que lenguajes de programación dedicados a interfaces gráficas como Java, C# o Python con Qt.

- **Dependencia de MATLAB:** las aplicaciones creadas solo pueden ejecutarse dentro de MATLAB o mediante un ejecutable compilado, lo que restringe su portabilidad.
- **Gestión compleja en proyectos grandes:** a medida que el número de componentes y funciones crece, la organización del código en App Designer puede volverse menos clara que en entornos de desarrollo más modulares.

### 3.2.3. Alternativas consideradas

Una alternativa habría sido implementar la interfaz en Python, que permiten mayor personalización y la posibilidad de distribuir aplicaciones independientes. Sin embargo, esta opción habría requerido integrar manualmente los cálculos numéricos y gráficos con la interfaz, incrementando el tiempo y la complejidad del desarrollo. Por este motivo, App Designer resultó ser la herramienta más adecuada para unificar la lógica de programación y la interacción con el usuario en un único entorno.

## 3.3. Toolboxes empleados

Además del entorno principal de MATLAB y de App Designer, el desarrollo de este proyecto ha requerido el uso de varios *toolboxes* especializados que han aportado funcionalidades adicionales necesarias para implementar los cálculos y procesos de la aplicación. A continuación, se describen los más relevantes y el motivo de su utilización:

- **Mapping Toolbox**

Este *toolbox* proporciona herramientas para trabajar con datos georreferenciados y mapas. Su uso ha permitido representar el mapa interactivo en el que el usuario selecciona la ubicación, así como procesar archivos en formato *GeoTIFF* que contienen información de irradiancia solar.

- *Ventaja:* integración directa con coordenadas y sistemas de referencia.
- *Inconveniente:* manejo de archivos de gran tamaño que, en ocasiones, ralentiza el rendimiento.

- **Image Processing Toolbox**

Incluye funciones para el análisis y la manipulación de imágenes. Ha sido útil para segmentar y procesar mapas de irradiancia, facilitando la asociación de valores de radiación a las coordenadas seleccionadas por el usuario.

- *Ventaja:* gran variedad de algoritmos ya implementados.
- *Inconveniente:* curva de aprendizaje alta para algunas funciones avanzadas.

#### ▪ **Statistics and Machine Learning Toolbox**

Aunque su uso ha sido más puntual, este *toolbox* se ha empleado para aplicar técnicas de análisis y clasificación en la organización de datos.

- *Ventaja*: facilita análisis estadísticos de los resultados.
- *Inconveniente*: en este proyecto, muchas de sus capacidades no se han utilizado en profundidad.

#### ▪ **Optimization Toolbox**

Fundamental para resolver ecuaciones no lineales asociadas al modelo de un diodo y para calcular parámetros de las curvas I-V y P-V. Su uso ha simplificado procesos que, de otro modo, requerirían programar algoritmos específicos desde cero.

- *Ventaja*: rapidez y precisión en la resolución de problemas complejos.
- *Inconveniente*: dependencia de licencia adicional.

### 3.4. Estructura de nuestra aplicación

Con el fin de organizar adecuadamente el proyecto y facilitar tanto su uso como su mantenimiento, se ha definido una estructura clara para la aplicación desarrollada. Esta sección describe la disposición de archivos y carpetas, el formato de entrada de datos y la manera en que se presentan los resultados al usuario.

#### 3.4.1. Organización de carpetas y archivos

La estructura de archivos de la aplicación ha sido diseñada para facilitar su uso, portabilidad y mantenimiento. El archivo principal del proyecto es el fichero `.mlapp`, desarrollado con App Designer, que contiene tanto la interfaz gráfica como toda la lógica de funcionamiento.

Junto a este archivo, se incluyen recursos externos como:

- Imágenes en formato `.tif` o `.png` utilizadas para representar mapas de irradiación solar.
- Ficheros de configuración de paneles fotovoltaicos.

Se recomienda que todos los archivos permanezcan en el mismo directorio de trabajo de MATLAB, ya que App Designer accede directamente a recursos locales sin rutas absolutas. Esta organización permite ejecutar la aplicación sin necesidad de realizar configuraciones adicionales.

Además, App Designer permite generar un archivo ejecutable (`.EXE`) a partir de la aplicación desarrollada. Este ejecutable ofrece la posibilidad de instalar y ejecutar la herramienta en equipos que no dispongan de MATLAB, lo que amplía su accesibilidad. El proceso de instalación y uso de este fichero se detalla en el Manual de Usuario (Capítulo 5).

### 3.4.2. Formato de datos y entrada de usuario

La interacción con el usuario se realiza mediante una interfaz con varias pestañas. En ellas se introducen los datos y se configuran los parámetros de simulación a través de campos de texto, menús desplegables, botones y selecciones gráficas.

#### Datos de proyecto

- **Ubicación geográfica [Obligatorio]:** seleccionada interactivamente con un clic sobre el mapa de irradiación.
- **Fecha de estudio [Obligatorio]:** elegida desde el calendario integrado para calcular la posición solar.

#### Módulo(s) fotovoltaico(s)

- **Selección de módulo [Obligatorio]:** desde el *catálogo* (tabla editable) con, al menos, estos campos: *Modelo*, *Potencia nominal* ( $W$ ), *Eficiencia* (%), *Área* ( $m^2$ ), *Voc* ( $V$ ), *Isc* ( $A$ ), *Imp* ( $A$ ) y *Vmp* ( $V$ ).
- **Número de módulos [Obligatorio]:** cantidad de paneles a considerar en la simulación (por defecto, 1).
- **Inclinación del módulo [Obligatorio]:** ángulo respecto a la horizontal ( $^\circ$ ).

#### Comparación entre paneles

- **Panel A / Panel B [Obligatorio]:** selección de dos modelos del catálogo mediante menús desplegables independientes. La app verifica que ambos tienen parámetros completos y que se definieron ubicación y fecha antes de ejecutar la comparación.

#### Validación de datos

- La aplicación incluye controles que impiden continuar con la simulación si faltan campos obligatorios, existen valores fuera de rango o hay inconsistencias (por ejemplo, latitudes fuera de  $\pm 90^\circ$  o parámetros eléctricos no positivos).

### 3.4.3. Visualización de resultados

Una vez ejecutada la simulación, los resultados se presentan en la propia interfaz de forma clara y accesible:

- **Gráficas eléctricas:** curvas I-V (tensión  $V$  vs. corriente  $I$ ) y P-V (tensión  $V$  vs. potencia  $P$ ), con ejes etiquetados ( $V$ ), ( $A$ ) y ( $W$ ). Se marca el *punto de máxima potencia* (MPP:  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ,  $P_{m\acute{a}x}$ ).

- **Producción energética:** estimaciones diaria (*kWh/día*), mensual (*kWh/mes*) y anual (*kWh/año*), mostradas en tablas y/o gráficas de barras/líneas.
- **Comparación entre paneles:** superposición de las curvas I-V y P-V de dos módulos seleccionados, y tablas comparativas con  $P_{\text{máx}}$ ,  $FF$ , energía mensual/anual y, cuando procede, energía específica (*kWh/kWp*).
- **Magnitudes derivadas:** potencia nominal instalada  $P_{\text{inst}}$  (*kWp*) y métricas resumidas del escenario simulado.
- **Mensajes de validación/alerta:** indicaciones cuando faltan datos obligatorios o hay valores fuera de rango.

*Nota:* Las estimaciones se refieren a condiciones ideales (módulos nuevos/limpios y sin sombreados). En uso real, la producción puede disminuir por suciedad, degradación o sombras parciales.



# Implementación en App Designer

## Contenido

4.1. Funcionalidades implementadas . . . . .	26
4.2. Estructura del código y lógica interna . . . . .	27
4.3. Gestión de la localización geográfica . . . . .	28
4.4. Estructura de datos y almacenamiento en memoria . . . . .	28
4.5. Buenas prácticas de programación . . . . .	29
4.6. Implementación . . . . .	30
4.6.1. Enfoque general del proyecto . . . . .	30
4.6.2. Fases del desarrollo . . . . .	30
4.6.3. Herramientas utilizadas . . . . .	31
4.7. Arquitectura de la aplicación y organización del código . . . . .	32
4.7.1. Estructura general . . . . .	32
4.7.2. Componentes y flujo de eventos . . . . .	32
4.7.3. Funciones y <i>callbacks</i> principales . . . . .	33
4.7.4. Flujo de datos . . . . .	33
4.7.5. Validación y comprobación . . . . .	33
4.7.6. Organización del trabajo . . . . .	34
4.8. Estructura del código fuente . . . . .	35

**E**n este capítulo se describe cómo el diseño conceptual se ha traducido en una aplicación operativa en *MATLAB App Designer*. Se presenta la arquitectura general, la configuración de

los componentes de la interfaz (pestañas, controles, tablas y gráficas) y la definición de las *propiedades* que mantienen el estado de la aplicación, junto con los *métodos* que implementan los cálculos (parámetros solares, curvas I-V/P-V y producción energética).

Asimismo, se documenta la estructura del código fuente, detallando las funciones clave y la separación de responsabilidades entre la capa de interfaz y el núcleo de cálculo. Se explican las reglas de validación de entradas, el manejo de errores y mensajes al usuario, y las decisiones de diseño adoptadas para asegurar mantenibilidad, claridad y consistencia del flujo de datos. En conjunto, este capítulo permite seguir, de forma ordenada, cómo cada funcionalidad se materializa en código y en la estructura de App Designer.

## 4.1. Funcionalidades implementadas

La lógica interna de la aplicación se organiza en torno a los *callbacks* de los botones principales y a un conjunto de funciones auxiliares que encapsulan tareas específicas. A continuación, se destacan las más relevantes:

- `ObtenerdatosPVGISButtonPushed`

*Callback* asociado al botón `Obtener datos PVGIS`. Descarga o importa los datos de irradiación correspondientes a la ubicación seleccionada en el mapa y los almacena en la variable `Irr`.

- `CalcularButtonPushed`

*Callback* central de la aplicación. Ejecuta el flujo de cálculo completo, llamando a las funciones auxiliares que determinan los parámetros solares, generan las curvas I-V y P-V y calculan la producción energética.

- `PlotCurvas` (función auxiliar)

Encargada de representar las curvas I-V y P-V en los ejes de la interfaz. Recibe como entrada los valores contenidos en `Resultados` y actualiza las gráficas en tiempo real.

- `ValidarDatos` (función auxiliar)

Verifica que las entradas introducidas por el usuario sean correctas y estén dentro de los rangos físicos permitidos. En caso contrario, genera un mensaje de alerta que interrumpe el cálculo.

- `CompararPaneles` (función auxiliar)

Permite la comparación simultánea de dos módulos fotovoltaicos. Genera curvas superpuestas y tablas comparativas a partir de los parámetros almacenados en dos estructuras `Panel`.

La separación entre *callbacks* y funciones auxiliares facilita la legibilidad del código y su mantenimiento. Un programador que desee ampliar o modificar la aplicación puede localizar rápidamente qué *callback* gestiona cada evento y qué funciones realizan los cálculos o representaciones gráficas. Además, el uso de nombres descriptivos para las variables y funciones, junto con comentarios en el código, contribuye a que el *software* sea fácilmente entendible y modificable por terceros.

## 4.2. Estructura del código y lógica interna

El archivo `.mlapp` de App Designer contiene tanto el diseño visual como el código asociado a cada elemento interactivo. La lógica interna se organiza en:

- **Funciones de inicialización:** se ejecutan al abrir la aplicación. Entre ellas destacan las encargadas de cargar el mapa de irradiancia y de importar el catálogo de módulos fotovoltaicos, almacenando los datos en variables internas que se utilizarán durante la simulación.
- **Callbacks de componentes:** son los métodos vinculados a botones, menús o eventos de usuario. Por ejemplo:
  - `CalcularButtonPushed`, que lanza la secuencia de cálculos principales.
  - `ObtenerdatosPVGISButtonPushed`, que gestiona la descarga de irradiancia desde PVGIS y la guarda en memoria.
- **Funciones de cálculo:** implementan las expresiones matemáticas necesarias para la simulación. Incluyen, entre otras:
  - `CalcularParametrosSolares`, que obtiene declinación, ángulo horario, elevación y acimut.
  - `generarCurvaIV`, que simula la curva corriente-tensión con el modelo de un diodo.
  - `generarCurvaPV`, que calcula la potencia en función de la tensión y determina el punto de máxima potencia.
- **Funciones de actualización gráfica:** re-dibujan las gráficas y actualizan las tablas de resultados tras cada cálculo. Un ejemplo, es `plotCurvas`, que representan las curvas I-V y P-V y permiten superponer dos módulos distintos en el caso de una comparación.
- **Validación de datos:** comprueban que los parámetros introducidos por el usuario son correctos antes de ejecutar los cálculos. La función `validarDatos`, por ejemplo, revisa que la latitud esté entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ , que los parámetros eléctricos del módulo sean positivos y que todos los campos obligatorios estén completos. En caso contrario, se interrumpe la ejecución y se muestra un mensaje de error en la interfaz.

### 4.3. Gestión de la localización geográfica

La aplicación obtiene la ubicación a partir del mapa interactivo que se muestra en la interfaz. Cuando el usuario selecciona un punto del mapa, se registran automáticamente las coordenadas de latitud y longitud correspondientes. Estos valores se almacenan en las variables internas `lat` y `lon`, que permanece accesible durante toda la ejecución de la aplicación.

Una vez obtenidas las coordenadas, se cargan los datos de irradiancia asociados a esa localización. Para ello, la aplicación utiliza un archivo en formato GeoTIFF con información de radiación solar o bien descarga los datos desde PVGIS, dependiendo de la acción seleccionada por el usuario. Estos datos se guardan en la variable `Irr`, que constituye la base para los cálculos posteriores.

Desde el punto de vista de programación, esta información se conserva en memoria y se pasa como argumento a las funciones de cálculo, lo que permite que otros módulos de la aplicación accedan a ella sin necesidad de recalcularla o volver a cargarla. En caso de que otro programador desee modificar este comportamiento, podría sustituir el origen de datos (por ejemplo, emplear otra base de datos climática) simplemente cambiando la función que carga la irradiancia, manteniendo intacta la estructura general del programa.

### 4.4. Estructura de datos y almacenamiento en memoria

El funcionamiento interno de la aplicación se basa en una serie de estructuras de datos que permiten organizar la información de manera clara y mantenerla accesible durante todo el proceso de simulación. Estas estructuras se definen como propiedades dentro del archivo `.mlapp` y garantizan la coherencia entre los distintos cálculos y funciones.

La más relevantes son las siguientes:

- `lat/lon`: almacenan las coordenadas geográficas de la ubicación seleccionada en el mapa. Constituyen el punto de partida para los cálculos astronómicos y para la recuperación de datos de irradiancia.
- `Panel`: estructura que contiene los parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico, tales como la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), la tensión en el punto de máxima potencia ( $V_{mp}$ ) y la corriente asociada ( $I_{mp}$ ). Estos valores se cargan desde el catálogo de módulos o se introducen manualmente, y son utilizados en la generación de las curvas I-V y P-V.
- `ParametrosSolares`: agrupa los valores astronómicos calculados a partir de la fecha y la ubicación seleccionadas, incluyendo la declinación solar ( $\delta$ ), el ángulo horario ( $\omega$ ), la elevación solar ( $\alpha$ ) y el acimut ( $\gamma$ ). Esta estructura se actualiza automáticamente cada vez que el usuario cambia la fecha o la localización.

- **Resultados:** contiene las salidas principales de la simulación, como los puntos que definen las curvas I-V y P-V, así como los valores de potencia máxima y la estimación de la producción energética en diferentes escalas temporales.
- **Irr:** matriz que almacena los datos de irradiancia correspondientes a la localización seleccionada. Puede provenir de un archivo *GeoTIFF* o de la consulta a PVGIS.

La definición de estas estructuras facilita que las funciones trabajen de manera modular, ya que cada rutina recibe únicamente los datos que necesita y devuelve resultados que se integran en la estructura correspondiente. Esto no solo mejora la legibilidad del código, sino que también simplifica futuras modificaciones. Por ejemplo, un programador que desee añadir nuevos parámetros (como temperatura del módulo o pérdidas por sombreado) podría ampliar la estructura `Resultados` sin necesidad de alterar el resto de la lógica del programa.

## 4.5. Buenas prácticas de programación

Durante el desarrollo de la aplicación se han seguido una serie de buenas prácticas de programación con el objetivo de garantizar que el código sea claro, mantenible y fácilmente ampliable por otros programadores.

En primer lugar, se han utilizado nombres descriptivos para las variables, constantes y funciones, de modo que su propósito sea comprensible sin necesidad de consultar documentación adicional. Por ejemplo, se emplean denominaciones como `ParametrosSolares`, `Resultados` o `validarDatos` en lugar de abreviaturas ambiguas.

Asimismo, el código incluye comentarios explicativos en los puntos clave, que aclaran la finalidad de cada bloque y las operaciones realizadas. Esto permite que un programador que se incorpore al proyecto pueda entender la lógica de manera rápida y realizar modificaciones con menor riesgo de introducir errores.

Otra práctica adoptada ha sido la modularidad del código: en lugar de concentrar toda la lógica en un único bloque, se han definido funciones auxiliares para tareas específicas, como el cálculo de la declinación solar o la generación de curvas I-V. Esto mejora la legibilidad y facilita la reutilización de funciones en diferentes partes del programa.

Finalmente, se han aplicado reglas básicas de calidad del *software*, como la validación previa de entradas antes de iniciar los cálculos y la gestión ordenada de estructuras de datos. Estas medidas reducen la posibilidad de errores en tiempo de ejecución y aseguran que los resultados mostrados al usuario sean consistentes.

En conjunto, estas buenas prácticas convierten el código en una base sólida y transparente, que no solo cumple con la funcionalidad actual, sino que también facilita su ampliación futura por parte de otros desarrolladores.

## **4.6. Implementación**

En este capítulo se describe el enfoque seguido para el desarrollo de la aplicación, desde la definición de los requisitos iniciales hasta la validación final. Se detallan las fases del trabajo, las herramientas utilizadas y los criterios adoptados para garantizar que la implementación cumpla con los objetivos planteados. Además, se explica cómo se ha organizado el proceso y las pruebas realizadas para asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

### **4.6.1. Enfoque general del proyecto**

El desarrollo de este proyecto se ha llevado a cabo siguiendo una metodología de carácter iterativo e incremental, en la que cada fase de trabajo ha permitido avanzar hacia la consecución de los objetivos definidos en el capítulo inicial. El enfoque adoptado ha buscado combinar un fundamento teórico sólido con una implementación práctica funcional, asegurando que la herramienta desarrollada sea tanto precisa en sus cálculos como útil para el usuario final.

El proceso ha estado guiado por un ciclo continuo de análisis, diseño, implementación, validación y ajuste, de forma que en cada iteración se han evaluado los resultados parciales y se han incorporado mejoras en función de los hallazgos obtenidos. Este planteamiento ha permitido una retroalimentación constante, reduciendo el riesgo de errores acumulados y facilitando la incorporación de nuevas funcionalidades a medida que avanzaba el desarrollo.

Asimismo, se ha mantenido un equilibrio entre la perspectiva académica y la aplicada; por un lado, fundamentando las decisiones en bibliografía y principios técnicos; y por otro lado, priorizando la facilidad de uso y la utilidad real de la aplicación para el análisis de sistemas fotovoltaicos. De este modo, el trabajo combina la rigurosidad científica con un enfoque orientado a la resolución de problemas prácticos.

### **4.6.2. Fases del desarrollo**

El desarrollo del proyecto se ha organizado en una serie de fases que han permitido avanzar de manera estructurada desde la concepción inicial hasta la validación final de la aplicación. Cada fase ha contado con objetivos específicos y tareas concretas, asegurando un progreso ordenado y coherente.

#### **Fase 1 — Análisis de requisitos**

En esta primera etapa se identificaron las necesidades que debía cubrir la herramienta, tanto desde el punto de vista funcional como técnico. Se definieron los parámetros imprescindibles para la simulación fotovoltaica y se establecieron los criterios de usabilidad y precisión que debía cumplir la aplicación.

#### **Fase 2 — Revisión bibliográfica y estado del arte**

Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de bibliografía relacionada con la energía solar fotovoltaica, el modelado eléctrico de módulos y la determinación de parámetros solares. También se analizaron aplicaciones y herramientas similares, con el fin de identificar buenas prácticas y funcionalidades que pudieran adaptarse al proyecto.

#### **Fase 3 — Diseño de la solución**

A partir de la información recopilada, se diseñó la arquitectura general de la aplicación, definiendo la organización en pestañas, la disposición de componentes claves y el flujo de trabajo que seguiría el usuario. Se estableció también la estructura del código, separando funciones de cálculo, gestión de datos y generación de resultados.

#### **Fase 4 — Implementación**

Esta fase consistió en la programación de la aplicación en MATLAB App Designer. Se desarrollaron las funciones para el cálculo de parámetros solares, simulación de curvas I-V y P-V, estimación de producción energética y validación de datos de entrada. Además, se integraron los distintos *toolboxes* necesarios y se construyó la interfaz gráfica con sus componentes interactivos.

#### **Fase 5 — Validación y pruebas**

Finalmente, se realizaron pruebas de funcionamiento utilizando casos de estudio con diferentes ubicaciones, fechas y módulos fotovoltaicos. Los resultados obtenidos se compararon con estimaciones generadas por herramientas externas como PVGIS, verificando que la aplicación proporcionaba resultados coherentes y dentro de un margen de error aceptable. En esta fase, se corrigieron errores y se optimizaron algunos cálculos para mejorar el rendimiento.

### **4.6.3. Herramientas utilizadas**

El desarrollo de la aplicación se ha llevado a cabo empleando una serie de herramientas informáticas y recursos técnicos que han permitido implementar tanto la interfaz gráfica como los cálculos asociados al modelado fotovoltaico. Las principales herramientas utilizadas han sido las siguientes:

#### **MATLAB R2023b**

Entorno de programación elegido como base del proyecto por su versatilidad, su capacidad para integrar cálculos numéricos y gráficos, y por disponer de App Designer como herramienta para la

creación de interfaces gráficas interactivas.

### **App Designer**

Módulo de MATLAB destinado al desarrollo de aplicaciones con interfaz gráfica de usuario. Ha permitido organizar la aplicación en pestañas, insertar componentes (botones, menús, tablas, gráficos, etc.) y vincular cada elemento con el código correspondiente.

### **Toolboxes de MATLAB**

El detalle de versiones mínimas y dependencias se resume aquí y se especifica íntegro en la Sección 3.3 del Capítulo 3.

### **Fuentes de datos externas**

Se ha recurrido a información en formato digital para alimentar la aplicación con datos reales de irradiancia y módulos fotovoltaicos.

- Mapas de irradiancia en formato *GeoTIFF*, procedentes de bases de datos oficiales.
- Catálogos de módulos fotovoltaicos, empleados como referencia para introducir parámetros eléctricos realistas.

El uso combinado de estas herramientas ha permitido construir una aplicación robusta, con capacidad de cálculo suficiente y una interfaz clara que facilita la interacción con el usuario.

## **4.7. Arquitectura de la aplicación y organización del código**

### **4.7.1. Estructura general**

La aplicación sigue una arquitectura ligera basada en *App Designer*, con separación entre: (i) interfaz (pestañas, controles y figuras) y (ii) lógica (funciones de cálculo y validación).

### **4.7.2. Componentes y flujo de eventos**

El flujo típico es:

1. **Inicialización** (*startupFcn*): carga de mapa/recursos y catálogo de módulos.
2. **Selección de ubicación y fecha**: acciones de la pestaña *Estudio solar* (la lógica de descarga PVGIS se dispara bajo demanda).
3. **Simulación del módulo**: en *Estudio solar panel*, al pulsar *Calcular* se generan curvas I-V/P-V y producción.

4. **Comparación:** en *Comparación entre paneles*, se simulan dos modelos y se superponen resultados.

### 4.7.3. Funciones y *callbacks* principales

Se listan las funciones clave con su responsabilidad. Los nombres aparecen en monoespaciado usando . . . .

- `startupFcn`: inicializa la app (mapas, catálogo, estados por defecto).
- `ObtenerdatosPVGISButtonPushed`: solicita y procesa irradiación mensual desde PVGIS.
- `CalcularButtonPushed`: valida entradas y genera curvas I-V/P-V y producción.
- `CompararPanelesButtonPushed`: ejecuta la comparación de Panel A y B y compone la salida conjunta.
- `validarDatos`: comprueba rangos y campos obligatorios; bloquea la ejecución si hay inconsistencias.
- `calcularParametrosSolares`: computa declinación, ángulo horario, elevación y acimut.
- `generarCurvaIV`, `generarCurvaPV`: crean series I-V y P-V para el módulo.
- `plotCurvas`: dibuja curvas y marca el MPP ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ,  $P_{máx}$ ).
- `compararPaneles`: prepara tablas/gráficas comparativas y métricas (p. ej.,  $FF$ , kWh/kWp).

### 4.7.4. Flujo de datos

- **Entradas:** ubicación/fecha (Estudio solar), módulo + nº de módulos + inclinación (Estudio solar panel).
- **Datos externos:** irradiación (mensual) desde PVGIS cuando se solicita.
- **Cálculos:** parámetros solares, curvas I-V/P-V, producción diaria y mensual.
- **Salidas:** gráficas y tablas en interfaz.

### 4.7.5. Validación y comprobación

Una parte esencial del desarrollo del proyecto ha sido la validación de la aplicación, con el fin de garantizar que los cálculos realizados y los resultados obtenidos sean coherentes y fiables. Por ello, se han establecido distintos niveles de comprobación.

#### Validación teórica

En una primera etapa, se verificó que las fórmulas implementadas en MATLAB coincidieran con las expresiones matemáticas descritas en el capítulo de fundamentos teóricos. Se comprobó, por ejemplo, la correcta implementación de la declinación solar, el ángulo horario y el modelo de diodo en la simulación de curvas.

#### **Validación mediante casos de estudio**

Se definieron ejemplos representativos en los que se evaluó el comportamiento de la aplicación al variar parámetros como ubicación geográfica, fecha o características del módulo fotovoltaico. Los resultados obtenidos se analizaron para confirmar que las tendencias mostradas (variación de la irradiancia, formas de las curvas I-V y P-V, etc.) eran las esperadas desde un punto de vista físico.

#### **Comparación con herramientas externas**

Se llevó a cabo una validación cruzada con estimaciones obtenidas a partir de PVGIS [2] (*Photovoltaic Geographical Information System*), una de las plataformas de referencia en la simulación fotovoltaica. La comparación de resultados mostró diferencias dentro de un margen razonable, lo que confirma la consistencia del simulador desarrollado.

#### **Comprobaciones de consistencia interna**

Además de las comparaciones externas, se evaluó la coherencia de los resultados entre diferentes ejecuciones. Por ejemplo, se verificó que un aumento de irradiancia produjera un incremento proporcional en la potencia máxima y que la variación de temperatura afectara de forma adecuada a la tensión y corriente de salida.

En conjunto, estas comprobaciones permiten concluir que la aplicación responde de forma correcta a las condiciones de entrada y que los cálculos implementados reproducen adecuadamente el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos en distintos escenarios.

### **4.7.6. Organización del trabajo**

El desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo siguiendo una organización flexible basada en ciclos interactivos de trabajo. Cada fase — desde el análisis de requisitos y la revisión bibliográfica hasta el diseño, implementación y validación — se abordó de forma progresiva, realizando pruebas intermedias que permitieron detectar errores y aplicar mejoras continuas. Esta dinámica favoreció un avance equilibrado entre la parte teórica y la práctica, culminando con la validación de la aplicación y la elaboración de la documentación final.

## 4.8. Estructura del código fuente

La aplicación se organiza separando interfaz (pestañas y controles de App Designer) y lógica (funciones de cálculo, validación y graficación). A continuación se muestran fragmentos representativos del código, con su propósito y ubicación. El archivo principal es

`Programaparalasiluacionesistemasfotovoltaicos.m`.

### Clase principal y propiedades

El *Código 4.1* define la clase de la app y sus propiedades públicas (componentes de interfaz) y privadas (estado y datos).

```

1  classdef Programaparasiluacionesistemasfotovoltaicos < matlab.apps.AppBase
2      % Programaparasiluacionesistemasfotovoltaicos - Clase principal de la aplicacin.
3      % Gestiona la interfaz (UI) y coordina la lgica de clculo.
4      % -----
5      % Propiedades pblicas: referencian controles de la UI (pestaas, ejes)
6      properties (Access = public)
7          UIFigure          matlab.ui.Figure
8          TabGroup          matlab.ui.container.TabGroup
9          EstudiosolarTab   matlab.ui.container.Tab
10         % ...
11         UIAxesCompIV      matlab.ui.control.UIAxes % eje comp. I-V
12     end
13
14     % Propiedades privadas: estado interno y recursos cargados
15     properties (Access = private)
16         geoData          % Imagen georreferenciada (matriz)
17         mapRef           % Referencia espacial del raster
18         Latitud          % Latitud seleccionada
19         Longitud         % Longitud seleccionada
20         PanelCatalog     % Tabla con el catlogo de mdulos
21         LastHm           % Vector de energia mensual (kWh) desde PVGIS
22         LastMes          % Celdas con nombres de meses
23         % ...
24     end
25 end

```

Código 4.1: Clase principal y propiedades

### Inicialización de recursos

El *Código 4.2* ejecuta la inicialización: valores por defecto, carga del mapa georreferenciado en el eje correspondiente y construcción del catálogo mínimo de módulos.

```

1  function startupFcn(app)

```

```

2      % STARTUPFCN - Inicializa la aplicacin y carga recursos.
3      % - Fija valores por defecto de controles.
4      % - Carga raster georreferenciado y lo muestra en el eje del mapa.
5      % - Crea un catalogo mnimo de mdulos para empezar.
6
7      % Valor por defecto para nmero de mdulos
8      app.NmerodeplacassolaresEditField.Value = 1;
9
10     % Cargar imagen georreferenciada (raster) y su referencia espacial
11     [A, R] = readgeoraster('ME2000000_Fisico_PeninsulaYBaleares_20190807.tif');
12     app.geoData = A;
13     app.mapRef = R;
14     imshow(A, 'Parent', app.UIAxes5); % Dibuja el mapa base en la UI
15
16     % Catlogo mnimo de paneles (nombre, potencia, eficiencia, rea)
17     app.PanelCatalog = table(...
18         {'Hiku (Canadian Solar)'; 'TSM-NEG21C.20 (Vertex N)'; 'HI-MO 5 (Longi)'}, ...
19         [325; 685; 505], ...
20         [17.6; 22.10; 16.0], ...
21         [1.85; 3.11; 1.80], ...
22         'VariableNames', {'Nombre', 'Potencia (W)', 'Eficiencia (%)', 'Area (m)'} ...
23     );
24     end

```

Código 4.2: Función de inicialización startupFcn

## Cálculo del módulo seleccionado

El *Código 4.3* valida entradas, genera las curvas I-V y P-V, y estima la energía diaria de referencia para el módulo elegido.

```

1     function CALCULARButtonPushed(app, ~)
2         % CALCULARBUTTONPUSHED - Ejecuta la simulacin del mdulo seleccionado.
3         % Salidas: curvas I-V y P-V en sus ejes; estimacin de energia diaria.
4
5         % Entradas de la UI
6         nMod = app.NmerodeplacassolaresEditField.Value; % n de mdulos
7         Hmed = app.RadiacinmediadiariakWhmdaEditField.Value; % kWh/mda
8
9         % ndice del panel seleccionado en el catalogo
10        rowIdx = app.CatalogoPaneles.Selection(1,1);
11        panelData = app.PanelCatalog(rowIdx, :);
12
13        % Parmetros elctricos bsicos (simplificado)
14        Voc = panelData.('Voc (V)'); % tensin de circuito abierto
15        Isc = panelData.('Isc (A)'); % corriente de cortocircuito
16

```

```

17 % Malla de tensiones y ley de corriente (modelo simple para demo)
18 V = linspace(0, Voc, 200);
19 I = Isc .* (1 - (V ./ Voc).^1.5); % corriente decreciente con V
20
21 % Curva I-V
22 plot(app.CurvaIV, V, I, 'b', 'LineWidth', 1.5);
23 xlabel(app.CurvaIV,'Voltaje (V)'); ylabel(app.CurvaIV,'Corriente (A)');
24
25 % Curva P-V
26 P = V .* I;
27 plot(app.CurvaPV, V, P, 'r', 'LineWidth', 1.5);
28 xlabel(app.CurvaPV,'Voltaje (V)'); ylabel(app.CurvaPV,'Potencia (W)');
29
30 % Estimacin muy bsica de energia diaria (rea como ejemplo)
31 t = 0:0.2:24; % horas del da (ejemplo)
32 Phr = interp1(linspace(0,24,numel(P)), P, t, 'linear','extrap');
33 E_diaria = trapz(t, max(Phr,0)) / 1000; % kWh (ejemplo educativo)
34
35 app.EnergadiariakWhEditField.Value = E_diaria;
36 end

```

Código 4.3: Callback del botón Calcular

## Comparación entre paneles

El [Código 4.4](#) calcula la producción mensual aproximada de *Panel A* y *Panel B* a partir de la irradiación mensual y la eficiencia del catálogo, y representa la comparación.

```

1 function CompararPanelesButtonPushed(app, ~)
2     % COMPARARPANELESBUTTONPUSHED - Compara dos mdulos (A y B).
3     % Requiere: irradiacin mensual (app.LastHm) y catlogo con eficiencias.
4
5     nameA = app.PanelADropDown.Value;
6     nameB = app.PanelBDropDown.Value;
7
8     effA = app.PanelCatalog{strcmp(app.PanelCatalog.Nombre,nameA), 'Eficiencia (%)'} / 100;
9     effB = app.PanelCatalog{strcmp(app.PanelCatalog.Nombre,nameB), 'Eficiencia (%)'} / 100;
10
11     % Energia mensual aproximada (kWh) a partir de Hm y eficiencia (demo)
12     E_A = app.LastHm * effA;
13     E_B = app.LastHm * effB;
14
15     % Grfica comparativa en barras agrupadas
16     bar(app.UIAxesCompProd, [E_A(:), E_B(:)], 'grouped');
17     legend(app.UIAxesCompProd, nameA, nameB, 'Location','northwest');
18     xlabel(app.UIAxesCompProd,'Mes'); ylabel(app.UIAxesCompProd,'Energia (kWh)');
19 end

```

Código 4.4: Callback CompararPanelesButtonPushed

## Descarga de datos desde PVGIS

El *Código 4.5* muestra la función que solicita a PVGIS la producción mensual para 1 kWp y guarda los vectores de meses y energía en la app.

```
1 function fetchPVGISMonthly(app, lat, lon, startYear, endYear)
2     % FETCHPVGISMONTHLY - Descarga energia mensual desde PVGIS (1 kWp).
3     % Entradas: lat, lon (WGS84), startYear, endYear.
4     % Salida: app.LastHm (kWh/mes) y app.LastMes (meses).
5
6     url = sprintf(['https://re.jrc.ec.europa.eu/api/PVcalc?' ...
7         'lat=%.5f&lon=%.5f&startyear=%d&endyear=%d&peakpower=1&loss=0&outputformat=json'], ...
8         lat, lon, startYear, endYear);
9
10    opts = weboptions('ContentType','json','Timeout',30);
11    data = webread(url, opts); % llamada HTTP; puede fallar sin conexin
12
13    mon = data.outputs.monthly;
14    app.LastHm = [mon.E_m]; % vector de kWh por mes
15    app.LastMes = {mon.month}; % nombres de meses
16 end
```

Código 4.5: Función de descarga de datos PVGIS

# Manual de usuario

## Contenido

---

5.1.	Requisitos previos e instalación . . . . .	40
5.1.1.	Requisitos e instalación . . . . .	40
5.1.2.	Instrucciones para arrancar la App . . . . .	41
5.2.	Descripción general de la interfaz . . . . .	42
5.3.	Estudio solar . . . . .	42
5.3.1.	Vista general . . . . .	42
5.3.2.	Mapa georreferenciado . . . . .	43
5.3.3.	Mapa de irradiación media diaria . . . . .	45
5.3.4.	Cálculo horario y elevación solar . . . . .	46
5.3.5.	Visualización de resultados . . . . .	46
5.3.6.	Controles y botones . . . . .	48
5.3.7.	Validación y errores comunes . . . . .	48
5.4.	Estudio solar panel . . . . .	49
5.4.1.	Vista general . . . . .	49
5.4.2.	Catálogo de paneles . . . . .	50
5.4.3.	Visualización de resultados . . . . .	52
5.4.4.	Controles y botones . . . . .	54
5.4.5.	Validación y errores comunes . . . . .	55
5.5.	Comparación entre paneles . . . . .	55
5.5.1.	Vista general . . . . .	55

5.5.2. Selección de Panel A y Panel B . . . . .	56
5.5.3. Visualización de resultados . . . . .	57
5.5.4. Controles y botones . . . . .	58
5.5.5. Validación y errores comunes . . . . .	58

---

Se ofrece una guía práctica para aprovechar al máximo la aplicación fotovoltaica desarrollada en MATLAB App Designer. A través de instrucciones paso a paso, el manual explica cómo instalar y lanzar la herramienta. Asimismo, se describen las acciones disponibles y se acompañan de ejemplos e imágenes para facilitar la comprensión. Finalmente, se incluyen recomendaciones para resolver incidencias comunes y consejos para interpretar correctamente las gráficas y tablas generadas. Con esta documentación, cualquier usuario podrá dominar la aplicación y realizar simulaciones precisas.

## 5.1. Requisitos previos e instalación

Antes de comenzar a trabajar con la aplicación, es necesario asegurarse de contar con el entorno y las dependencias adecuadas. En esta sección se detallan el *software* y los *toolboxes* requeridos, así como los pasos para descargar, configurar y arrancar la herramienta sin errores. A continuación, se explica cómo organizar el proyecto en el directorio de MATLAB, comprobar y añadir las librerías necesarias, y lanzar la aplicación desde App Designer o la línea de comandos. De este modo, se garantiza un arranque fluido y sin contratiempos, permitiendo al usuario centrarse directamente en el análisis fotovoltaico.

### 5.1.1. Requisitos e instalación

La aplicación puede usarse de dos maneras: (A) dentro de MATLAB y (B) sin MATLAB mediante *MATLAB Runtime* (gratuito). A continuación se detallan los requisitos y los pasos de instalación en cada caso.

#### A) Uso con MATLAB (desarrollo/ejecución dentro de MATLAB) Requisitos

- MATLAB R2023b o superior.
- App Designer (integrado en MATLAB).
- *Toolboxes*: *Mapping Toolbox* (mapa/GeoTIFF), *Image Processing Toolbox* (lectura/manipulación de imágenes), *Optimization Toolbox* (ajustes/calibración) y *Statistics and Machine Learning Toolbox* (clasificación de zonas mediante k-means).

#### Instalación/ejecución

1. Instalar MATLAB y los *Toolboxes* anteriores.
2. Opción 1 (desarrollo): abrir el fichero `.mlapp` en App Designer y pulsar Run.
3. Opción 2 (uso): instalar el paquete `.mlappinstall` y lanzar la App desde APPS.

## B) Uso sin MATLAB (ejecutable con *MATLAB Runtime*) Requisitos

- *MATLAB Runtime* R2023b (misma versión con la que se compiló la App).

### Instalación/ejecución

1. Instalar *MATLAB Runtime* R2023b (gratuito).
2. Ejecutar el instalador/EXE de la aplicación y seguir el asistente.
3. Abrir la App desde el acceso directo creado (o el ejecutable instalado).

*Nota de compatibilidad:* el *Runtime* debe ser de la misma versión que la usada al compilar la App.

### 5.1.2. Instrucciones para arrancar la App

Dependiendo de la opción de instalación seleccionada, se describe a continuación la manera de ejecutarse:

#### 1. Ejecución desde MATLAB (archivo `.mlapp`)

- Abrir MATLAB (versión R2023b o superior).
- Situar el archivo `Programaparasimulaciondesistemasfotovoltaicos.mlapp` y los recursos asociados (mapa GeoTIFF, imagen PNG y catálogo de paneles) en el mismo directorio de trabajo.
- En la ventana de *Current Folder* de MATLAB, hace doble clic sobre `Programaparasimulaciondesistemasfotovoltaicos.mlapp`.
- MATLAB abrirá automáticamente App Designer y, desde ahí, se puede ejecutar la aplicación pulsando el botón Run.

#### 2. Ejecución desde la aplicación compilada (`.exe`)

- Instalar previamente MATLAB Runtime R2023b, disponible de forma gratuita en la página oficial de MathWorks.
- Descargar e instalar la aplicación compilada siguiendo el asistente del instalador.
- Una vez completada la instalación, ejecutar el programa desde el acceso directo generado en el menú de inicio o en el escritorio.

Este MATLAB Runtime R2023b, incluye todas las librerías necesarias para que la aplicación funcione como si estuviera dentro de MATLAB, pero sin que el usuario tenga que tener la aplicación completa de MATLAB.

## 5.2. Descripción general de la interfaz

La interfaz ha sido diseñada con un enfoque orientado a la usabilidad, de modo que el usuario pueda realizar simulaciones fotovoltaicas de manera intuitiva y ordenada. Su organización facilita seguir un flujo lógico de trabajo: introducir datos, ejecutar el cálculo y visualizar los resultados.

El diseño combina elementos gráficos y controles interactivos distribuidos en diferentes pestañas, cada una destinada a un bloque funcional específico. Esta estructura permite agrupar las funciones relacionadas y reducir la complejidad visual, mejorando así la experiencia de uso.

En la parte superior se encuentran elementos de control global, como botones principales y, en su caso, una barra de menú. El área central está destinada a la interacción directa con la herramienta, ya sea para la introducción de parámetros, la selección de ubicación o la visualización de resultados. La disposición de estos elementos ha sido planificada para minimizar errores de introducción de datos y facilitar la navegación.

La aplicación está organizada en distintas pestañas que permiten al usuario acceder de forma ordenada a las diferentes funcionalidades. Esta estructura facilita la navegación y guía el flujo de trabajo. Las principales pestañas *Estudio solar*, *Estudio solar panel* y *Comparación entre paneles*.

## 5.3. Estudio solar

### 5.3.1. Vista general

Como se muestra en la Figura 5.1, esta pestaña constituye el punto de partida de la simulación. En ella se muestran dos mapas: el mapa de irradiación media diaria (Figura 5.3), coloreado por zonas, y el mapa georreferenciado interactivo (Figura 5.2), que permite seleccionar una ubicación concreta dentro del territorio y ampliar la vista mediante los controles de zoom. Con ello, dispone de campos para consultar la latitud y longitud, así como de un selector de fecha y un intervalo temporal (inicio y fin) con los que obtener los datos de PVGIS.

La aplicación genera a partir de esta información parámetros solares básicos, tales como el ángulo horario y la elevación solar, presentados en tablas para su consulta. También incluye un botón específico (*Obtener datos PVGIS*) que descarga de forma automática los valores de irradiación

mensural de la base de datos PVGIS, mostrándolos tanto en formato de tabla como en formato de gráfica de producción fotovoltaica estimada para 1 kWp.

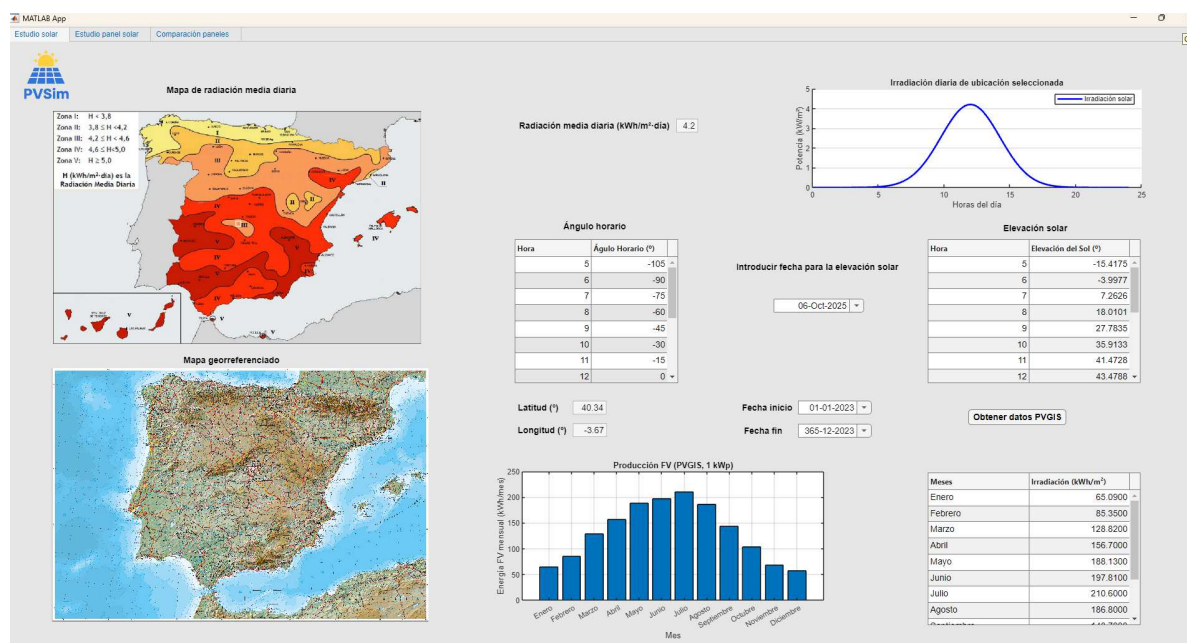


Figura 5.1: Pestaña Estudio solar. Fuente: elaboración propia.

### 5.3.2. Mapa georreferenciado

Como se muestra en la Figura 5.2, para identificar la ubicación geográfica en la que se van a calcular los parámetros solares la aplicación incorpora un mapa georreferenciado interactivo con datos del Instituto Geográfico Nacional [4]. A continuación, se describen los pasos que el usuario debe seguir:

#### 1. Seleccionar la pestaña *Estudio solar*

En el panel de pestañas de la aplicación, haga clic en *Estudio solar* para acceder al mapa georreferenciado.

#### 2. Hacer clic sobre el mapa georreferenciado

Sitúe el cursor sobre el mapa georreferenciado (Figura 5.2) y pulse con el ratón en la posición que corresponda a su lugar de interés (por ejemplo, la ciudad o provincia deseada).

##### ▪ Ampliar el mapa (precisión del clic)

Para afinar la selección de la ubicación, utilice los controles de la barra situada sobre el mapa georreferenciado (Figura 5.2):

- a) **Zoom In (lupa con +):** actívelo y haga clic sobre la zona a ampliar o arrastre un rectángulo alrededor del área de interés.

- b) **Pan (mano)**: desplácese por el mapa arrastrando sin cambiar el nivel de zoom.
- c) **Zoom Out (lupa con -)**: retroceda a una vista más amplia si se ha acercado demasiado.
- d) **Home (casa)**: restaure la vista inicial del mapa en cualquier momento.

### 3. Visualizar las coordenadas

Tras el clic, la aplicación transformará automáticamente las coordenadas de píxel en coordenadas geográficas (latitud y longitud). Se mostrará una ventana emergente (alerta) con los valores de *Latitud* y *Longitud* en grados decimales.

### 4. Campos de edición bloqueados

Los campos numéricos de *Latitud* y *Longitud* permanecen deshabilitados para evitar edición manual accidental.

### 5. Validación y siguientes pasos

Asegúrese de que los valores de latitud y longitud son razonables (latitud en  $[-90^\circ, 90^\circ]$  y longitud en  $[-180^\circ, 180^\circ]$ ). Una vez capturadas las coordenadas, pulse el botón *Obtener datos PVGIS* para descargar datos de irradiación o avance al apartado de cálculos de radiación y energía.

**Nota:** si pulsa fuera del área de la imagen, aparecerá una alerta indicándolo. En ese caso, haga clic nuevamente sobre la zona geográfica deseada.



Figura 5.2: Mapa georreferenciado. Fuente: Instituto Geográfico Nacional [4].

### 5.3.3. Mapa de irradiación media diaria

Como se muestra en la Figura 5.3, en la pestaña *Estudio solar* se muestra el mapa de irradiación media diaria dividido en zonas de color: cada tonalidad (amarillo claro, amarillo intenso, naranja, rojo y marrón) representa un rango de radiación (H) en kWh/m<sup>2</sup>·día.

Cuando el usuario hace clic sobre cualquier punto del mapa de irradiación media diaria (Figura 5.3), la aplicación lee el color del píxel y lo compara con los cinco colores de referencia predefinidos. Inmediatamente aparece una ventana emergente que indica la irradiación media diaria (valor H) asignada a esa zona de color, y ese valor se copia también en el campo Radiación media diaria (kWh/m<sup>2</sup> · día). A partir de ese H, podrá generar el perfil horario y calcular la producción energética.

Color en el mapa	Región	H (kWh/m <sup>2</sup> · día) aproximado
Amarillo claro	I	3.6
Amarillo intenso	II	4.0
Naranja	III	4.4
Rojo	IV	4.8
Marrón oscuro	V	5.2

Tabla 5.1: Distribución de regiones según el color en el mapa y su irradiación aproximada.

Evite hacer clic en áreas grises o negras (sin asignar); si lo hace, recibirá un aviso pidiéndole que seleccione una región coloreada. Para máxima precisión, seleccione una zona bien delimitada dentro de un único color, no en los bordes donde se mezclan dos tonos.

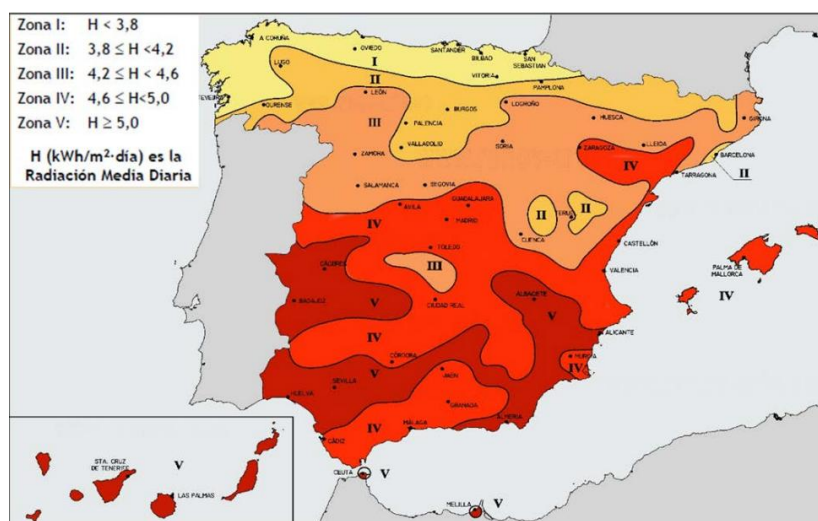


Figura 5.3: Mapa de irradiación media diaria. Fuente: [14].

### 5.3.4. Cálculo horario y elevación solar

En este apartado se puede consultar, de forma automática, el ángulo horario y la elevación del sol para cada hora del día de una fecha dada. Como se muestra en la Figura 5.5, esta vista presenta dos tablas y un selector de fecha.

Pasos para usarlo:

1. **Elegir la fecha:** en el selector de fecha *Introducir fecha deseada*, elija la fecha para la que desea ver los resultados de la tabla de elevación solar.
2. **Consultar el ángulo horario:** la tabla *Ángulo horario* aparece directamente (sin acciones adicionales) y muestra, para cada hora del día, el ángulo horario correspondiente.
3. **Ver la elevación solar:** al seleccionar la fecha, se rellena automáticamente la tabla *Elevación solar* con dos columnas: *Hora* y *Elevación del sol (°)* (ángulo sobre el horizonte). Valores próximos a 0° indican el sol en el horizonte; los máximos (en torno al mediodía solar) reflejan la mayor altura.

### 5.3.5. Visualización de resultados

#### Radiación media diaria e irradiación

Como se muestra en la Figura 5.4, la pestaña presenta dos elementos:

- **Radiación media diaria (H)** — Campo numérico (izquierda) que muestra el valor de radiación diaria seleccionado/obtenido, en  $kWh/m^2 \cdot día$ . En el ejemplo,  $H = 4,2$ .
- **Irradiación diaria de la ubicación seleccionada** — Gráfica (derecha) que representa la *irradiación instantánea*  $E(t)$  a lo largo del día (potencia por unidad de área). El eje horizontal son las horas del día (0–24) y el eje vertical la irradiancia en  $kW/m^2$ .

*Interpretación:* valores cercanos a cero al inicio y final del día, pico en las horas centrales y una forma suave indican un día despejado idealizado. Esta visualización no incorpora efectos de nubosidad, temperatura ni sombras locales.

*Validación y avisos:* si el campo de radiación está vacío, fuera de rango o no se ha seleccionado zona válida en el mapa, la aplicación muestra un aviso solicitando introducir un valor realista (típicamente entre 2 y 7  $kWh/m^2 \cdot día$ ) o repetir la selección.

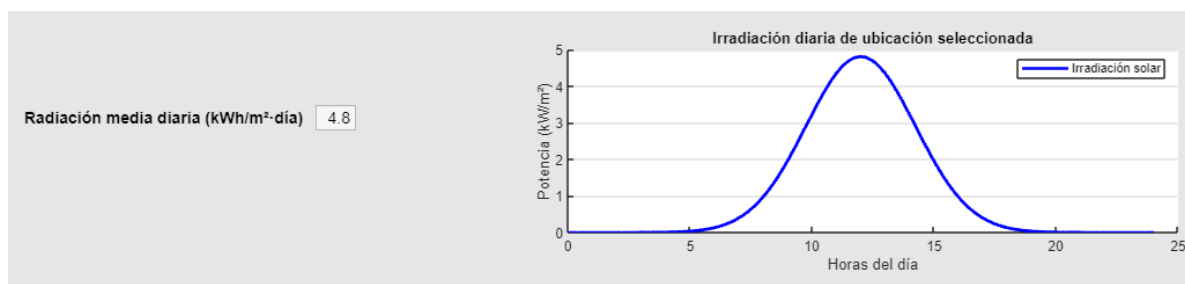


Figura 5.4: Radiación media diaria y irradiación diaria. Fuente: Elaboración propia.

### Ángulo horario y elevación solar

Véase en la Figura 5.5, las dos tablas y el selector de fecha.

- **Ángulo horario** ( $\omega$ ): tabla de la izquierda. Se rellena automáticamente al iniciar la aplicación con los valores por hora del día (5–12 en el ejemplo).
- **Elevación solar** ( $\alpha$ ): tabla de la derecha.

*Interpretación rápida:* el valor de  $\omega$  indica el desfase respecto al mediodía solar y la tabla de  $\alpha$  muestra la altura aparente del sol a lo largo del día; el máximo suele darse cerca del mediodía solar y depende de la fecha (declinación). Para la elevación solar tras seleccionar la fecha, se calcula  $\alpha$  hora a hora (valores en grados), mostrando negativos antes del amanecer y positivos cuando el sol está sobre el horizonte.

*Validación y avisos:* si no se selecciona fecha, la tabla de elevación permanece vacía y la aplicación solicita elegir una fecha válida.



Figura 5.5: Ángulo horario y elevación solar. Fuente: Elaboración propia.

### Datos PVGIS (radiación y producción mensual)

Como se muestra en la Figura 5.6, al pulsar el botón **Obtener datos PVGIS** la aplicación descarga los valores mensuales desde el servicio PVGIS y los presenta en dos formatos:

- **Gráfica de barras (izquierda):** *Producción FV (PVGIS, 1 kWp)*. Muestra la energía eléctrica mensual estimada para un generador de 1kWp en la ubicación seleccionada, en kWh/mes. Este valor procede del perfil mensual de PVGIS y se usa como referencia para escalados posteriores.
- **Tabla (derecha):** lista cada mes y el valor mensual asociado. Si la tabla está configurada como *Irradiación (kWh/m<sup>2</sup>)*, representa la energía solar incidente mensual; si está configurada como *Energía (kWh)*, refleja la producción para 1kWp.

*Interpretación:* el patrón es estacional, con mínimos en invierno y máximos en verano. Estos datos sirven como base para los cálculos de la pestaña *Estudio panel solar*, donde se escalan según la potencia nominal del módulo y el número de paneles.

*Requisitos y validación:* Se requiere conexión a Internet para la descarga. Si falla la petición, se muestra un aviso indicando que no se han podido obtener datos y se mantiene la información anterior. La ubicación debe estar definida previamente desde el mapa. Si no hay coordenadas válidas, la aplicación solicita seleccionarlas antes de consultar PVGIS [2].

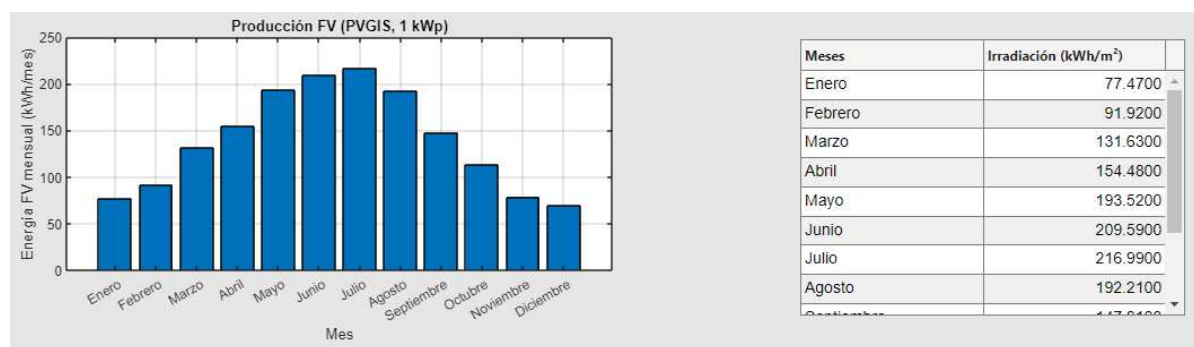


Figura 5.6: Datos obtenidos de PVGIS. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.6. Controles y botones

- **Obtener datos PVGIS:** descarga los valores de irradiación mensual para la ubicación y el intervalo definidos. Requiere latitud/longitud válidas y fecha/intervalo coherentes.

*Errores típicos y solución:* sin conexión o respuesta de PVGIS → comprobar Internet y reintentar; coordenadas/fechas inválidas → corregir en los campos o seleccionar de nuevo en el mapa.

- **Controles de mapa (zoom/desplazamiento):** permiten ajustar la vista para seleccionar con precisión la ubicación.

### 5.3.7. Validación y errores comunes

- **No se ha seleccionado ubicación.** *Solución:* haga clic en el mapa georreferenciado hasta que aparezcan latitud/longitud en los campos de texto.

- **Fecha o intervalo temporal sin definir / incoherente (fin < inicio).** *Solución:* seleccione una fecha válida o corrija el intervalo (mismo día o fin posterior al inicio).
- **Coordenadas fuera de rango** (latitud  $\notin [-90^\circ, 90^\circ]$ , longitud  $\notin [-180^\circ, 180^\circ]$ ) o con formato inválido. *Solución:* corrija manualmente o vuelva a seleccionar en el mapa; use separador decimal coherente.
- **Fallo al obtener datos de PVGIS / sin conexión.** *Solución:* compruebe la conexión a Internet y reintente con `Obtener datos PVGIS`. Si persiste, pruebe otra fecha/ubicación o reabra la aplicación.
- **Mapa no cargado / capa inválida.** *Solución:* reinicie la app o verifique que el recurso del mapa de irradiación está disponible.

## 5.4. Estudio solar panel

### 5.4.1. Vista general

Como se muestra en la Figura 5.7, en esta pestaña el usuario puede seleccionar un módulo fotovoltaico del catálogo, cuyo contenido inicial incluye varios modelos de referencia. El catálogo es completamente editable: se pueden modificar los parámetros técnicos de un panel existente, agregar un nuevo modelo mediante el botón `Agregar panel`, o eliminar entradas con el botón `Eliminar panel`.

Una vez elegido el panel y definidos parámetros adicionales como el número de módulos y la inclinación del módulo, se puede lanzar el cálculo pulsando el botón `Calcular`. Los resultados se muestran de manera gráfica y numérica: se obtienen las curvas I-V y P-V, la producción fotovoltaica diaria, la producción mensual estimada y el valor de energía diaria.

De esta forma, esta pestaña permite evaluar el rendimiento de un panel concreto bajo las condiciones de irradiación establecidas en la pestaña `Estudio solar`.

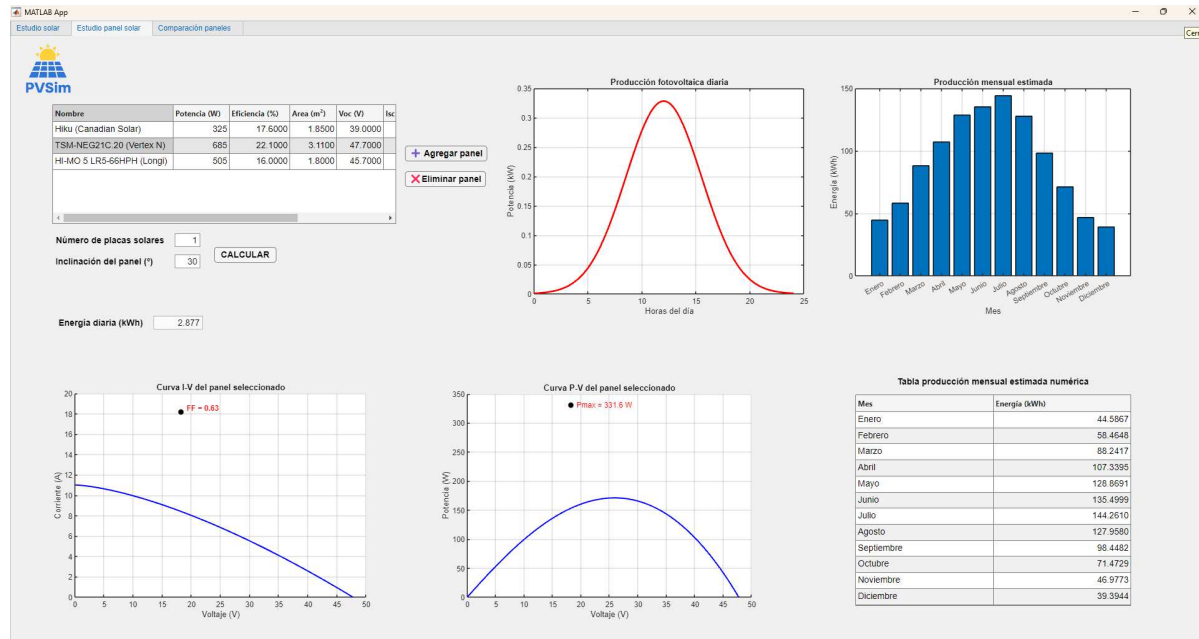


Figura 5.7: Pestaña Estudio solar panel. Fuente: elaboración propia.

## 5.4.2. Catálogo de paneles

En esta sección, el usuario aprende a gestionar el conjunto de módulos fotovoltaicos disponibles en la aplicación. El catálogo permite visualizar, añadir, editar, eliminar y seleccionar el panel que se empleará en los cálculos posteriores.

### 5.4.2.1. Visualizar listado de ejemplos por defecto

Al acceder a la pestaña *Estudio panel solar*, la aplicación mostrará de forma automática una tabla llamada Paneles solares con todos los módulos cargados en el catálogo. Cada fila corresponde a un panel distinto y las columnas muestran sus características principales: Modelo, Potencia (W), Eficiencia, Área (m<sup>2</sup>), Voc (V), Isc (A), Imp (A) y Vmp (V). El usuario puede desplazarse vertical y horizontalmente para inspeccionar todos los registros, y el diseño de la tabla permite ordenar o buscar valores directamente, facilitando una rápida comparación entre diferentes modelos antes de seleccionarlos para el análisis.

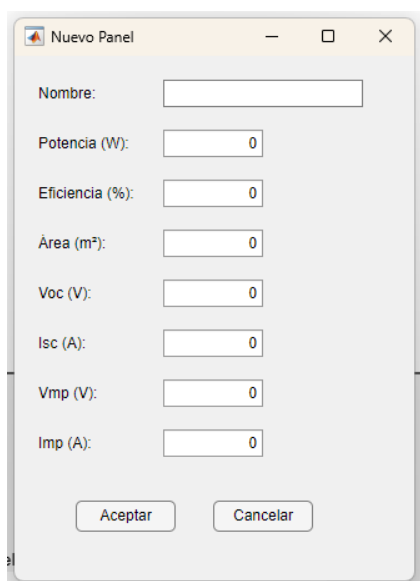
### 5.4.2.2. Añadir un nuevo panel

Para añadir un nuevo panel, se pulsará el botón *Agregar Panel* situado junto al catálogo, tras lo cual se abrirá automáticamente un cuadro de diálogo modal con un sencillo formulario (Figura 5.8). En él deberá completar los siguientes campos obligatorios; cada uno acepta únicamente el tipo de dato indicado y, si introduce un valor erróneo, aparecerá una alerta que le pedirá corregirlo. Una vez rellenado todo, pulse *Aceptar* y observe cómo el nuevo módulo se incorpora al final de la tabla de

catálogo. A continuación podrá verificar sus datos y, si lo desea, modificar cualquier celda haciendo doble clic sobre ella. De esta manera, el catálogo se mantiene siempre actualizado y listo para ser utilizado en los cálculos posteriores.

### Ventana Agregar panel

Como se muestra en la Figura 5.8, esta ventana permite crear un nuevo módulo en el catálogo introduciendo sus parámetros principales.



The image shows a dialog box titled "Nuevo Panel" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). The dialog contains eight input fields, each with a label and a value of 0:

- Nombre: [ ]
- Potencia (W): [ 0 ]
- Eficiencia (%): [ 0 ]
- Área (m<sup>2</sup>): [ 0 ]
- Voc (V): [ 0 ]
- Isc (A): [ 0 ]
- Vmp (V): [ 0 ]
- Imp (A): [ 0 ]

At the bottom of the dialog are two buttons: "Aceptar" and "Cancelar".

Figura 5.8: Ventana Nuevo panel. Fuente: elaboración propia.

### Campos del formulario

- **Modelo:** nombre/comercial del módulo (p. ej., ABC-400M).
- **Potencia nominal  $P_{\text{nom}}$  (W):** potencia en STC.
- **Eficiencia (%)**: si se conoce de la ficha técnica.
- **Área (m<sup>2</sup>):** superficie del módulo.
- **Tensión de circuito abierto  $V_{\text{oc}}$  (V).**
- **Corriente de cortocircuito  $I_{\text{sc}}$  (A).**
- **Tensión en MPP  $V_{\text{mp}}$  (V).**
- **Corriente en MPP  $I_{\text{mp}}$  (A).**

### 5.4.2.3. Editar/eliminar un panel existente

Para editar las propiedades de un panel que ya forma parte del catálogo, haga doble clic sobre la celda correspondiente en la tabla de *Paneles solares*. El valor pasará a modo edición; modifíquelo y pulse Enter para guardar el cambio. Si introduce un dato no válido (por ejemplo, texto en un campo numérico), la aplicación mostrará una ventana emergente solicitando corregir el valor antes de continuar.

Para eliminar un panel completo, siga estos pasos:

1. Seleccione la fila del módulo que desea borrar haciendo clic en cualquier celda de esa fila.
2. Pulse el botón **Eliminar panel** situado junto al catálogo.
3. En la ventana de confirmación, haga clic en **OK** para confirmar la eliminación o en **Cancelar** para abortar la acción.
4. Al aceptar, la fila desaparecerá de la tabla de *Paneles solares* y el catálogo se actualizará inmediatamente, guardando los cambios en el archivo de datos.

**Advertencia (eliminación irreversible):** una vez eliminado, el panel no puede recuperarse desde la aplicación; no existe papelera ni opción de deshacer. Si necesita restaurarlo, deberá volver a crearlo con **Agregar panel** o cargar una copia de seguridad del catálogo, si dispone de ella. Los cambios persisten entre sesiones.

### 5.4.2.4. Seleccionar el panel para los cálculos

Antes de lanzar cualquier simulación, debe indicar cuál de los módulos del catálogo se empleará en los cálculos. Para ello, bastará con hacer clic en cualquier celda de la fila correspondiente al panel deseado; la fila se resaltará para confirmar la selección. A partir de ese momento, todos los parámetros de ese módulo (potencia, eficiencia, área, Voc, Isc, Imp, Vmp) se cargarán automáticamente en memoria y se utilizarán como datos de entrada al pulsar el botón **CALCULAR**. Si no hay ninguna fila seleccionada, la aplicación mostrará una alerta solicitando que primero elija un panel. De este modo se garantiza que los resultados correspondan siempre al módulo escogido por el usuario.

### 5.4.3. Visualización de resultados

Los valores mostrados son una estimación teórica bajo condiciones ideales. La producción real puede verse afectada por nubosidad, suciedad, temperatura superior a la prevista o degradación de los módulos; por tanto, deben interpretarse como orientativos.

#### **Curvas eléctricas (I-V y P-V)**

Como se muestra en la Figura 5.9, tras pulsar el botón **Calcular** la aplicación genera las curvas I-V (corriente  $I$  frente a tensión  $V$ ) y P-V (potencia  $P$  frente a tensión  $V$ ) del módulo seleccionado. Los ejes se etiquetan con sus unidades ( $V$ ), ( $A$ ) y ( $W$ ) y se destaca el *punto de máxima potencia* (MPP), indicando sus valores  $V_{mp}$  ( $V$ ),  $I_{mp}$  ( $A$ ) y  $P_{m\acute{a}x}$  ( $W$ ), junto con el factor de llenado  $FF$ .

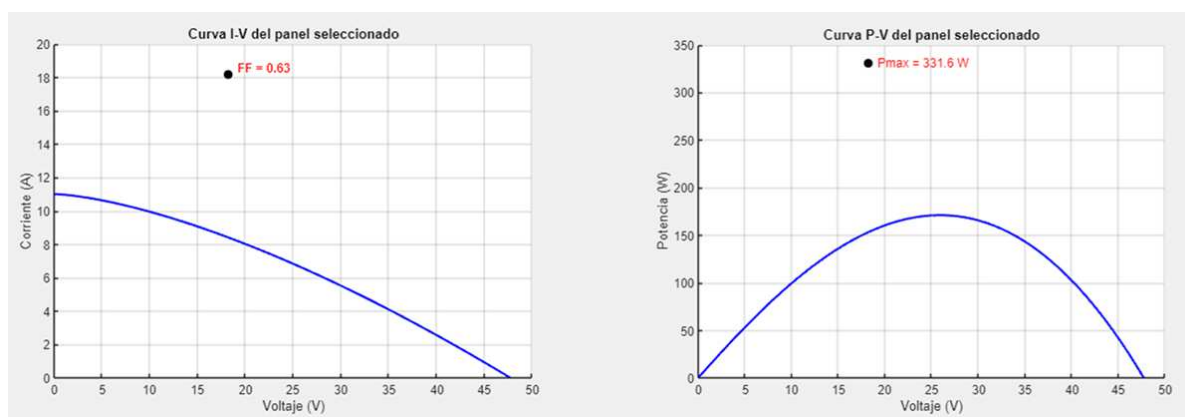


Figura 5.9: Curvas eléctricas I-V y P-V para el módulo seleccionado. Fuente: elaboración propia.

### Producción diaria

Como se muestra en la Figura 5.10, en esta pestaña se representa la potencia generada a lo largo de un día tipo en función de la hora solar. El valor integrado de esta curva se refleja en el campo *Energía diaria (kWh)*.

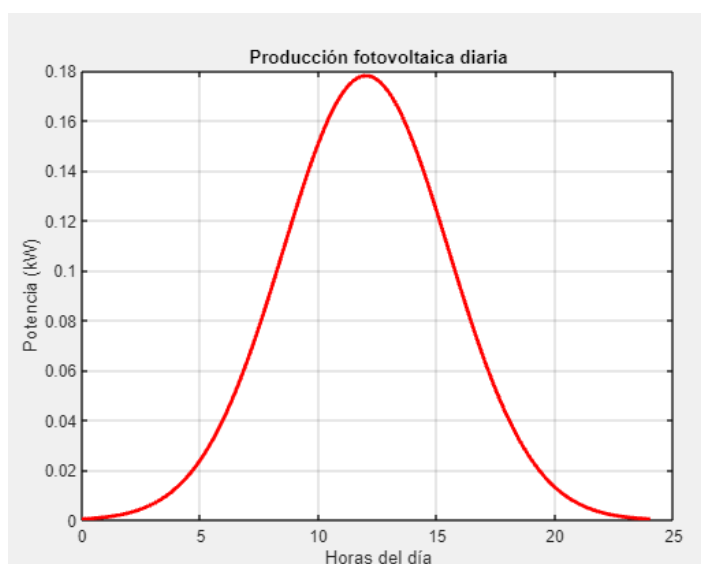


Figura 5.10: Ejemplo de curva de producción fotovoltaica diaria. Fuente: elaboración propia.

### Producción mensual

Como se muestra en la Figura 5.11 (gráfica) y en la Figura 5.12 (tabla), si previamente se han descargado los datos de irradiación desde PVGIS, la aplicación estima la energía producida cada

mes. Los resultados se presentan en un gráfico de barras y en una tabla con los valores mensuales (*kWh/mes*) y el total anual (*kWh/año*).

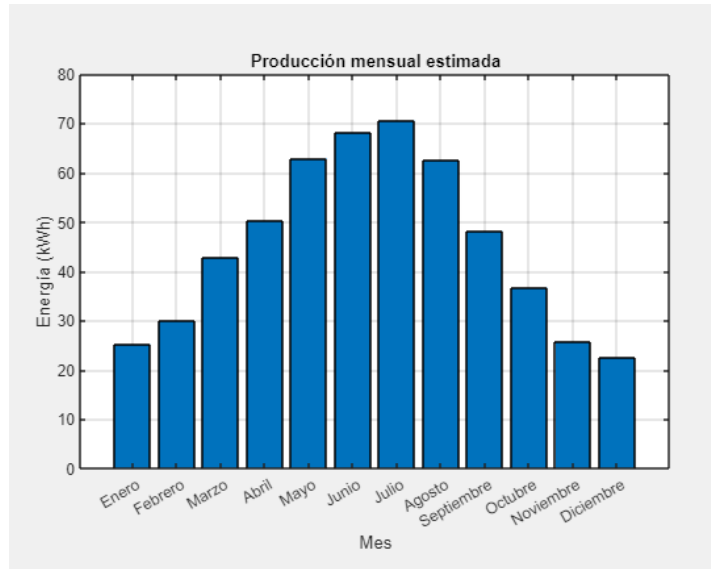


Figura 5.11: Ejemplo de producción mensual estimada (gráfica). Fuente: elaboración propia.

Mes	Energía (kWh)
Enero	25.1777
Febrero	29.8740
Marzo	42.7797
Abril	50.2060
Mayo	62.8940
Junio	68.1168
Julio	70.5218
Agosto	62.4683
Septiembre	48.0383
Octubre	36.7380
Noviembre	25.6262
Diciembre	22.5095

Figura 5.12: Ejemplo de producción mensual estimada (Tabla). Fuente: elaboración propia.

#### 5.4.4. Controles y botones

- **Agregar** panel: crea una nueva entrada en el catálogo.
- **Guardar**: valida los datos y añade el módulo al catálogo.
- **Cancelar**: cierra la ventana sin guardar cambios.

- **Eliminar panel:** borra la fila seleccionada del catálogo (pide confirmación si lo implementaste).
- **Calcular:** ejecuta la simulación del módulo seleccionado con el número de módulos y la inclinación indicados.

Requiere que ubicación/fecha estén definidas en *Estudio solar*. *Errores típicos y solución:* módulo no seleccionado o datos incompletos → completar catálogo o elegir otro modelo; número de módulos no entero positivo → introducir un entero  $\geq 1$ ; inclinación fuera de  $[0^\circ, 90^\circ]$  → corregir valor.

#### 5.4.5. Validación y errores comunes

- **No se ha seleccionado un módulo del catálogo.** *Solución:* elija un modelo en el desplegable o añádalo con `Agregar panel`.
- **Parámetros del módulo incompletos** (p. ej., faltan  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  o potencia nominal). *Solución:* complete los campos en el catálogo según la ficha técnica o seleccione otro modelo.
- **Número de módulos inválido** (no entero positivo). *Solución:* introduzca un entero  $\geq 1$ .
- **Inclinación fuera de rango** (fuera de  $[0^\circ, 90^\circ]$ ) o no numérica. *Solución:* corrija el valor al intervalo permitido.
- **Condiciones de irradiación sin definir** (no se ejecutó la configuración en *Estudio solar*). *Solución:* defina ubicación y fecha en *Estudio solar* y, después, pulse `Calcular`.

## 5.5. Comparación entre paneles

### 5.5.1. Vista general

Como se muestra en la Figura 5.13, en esta pestaña el usuario selecciona dos módulos del catálogo (*Panel A* y *Panel B*) para comparar su comportamiento bajo las mismas condiciones de irradiancia e inclinación definidas en la pestaña de *Estudio solar*. La interfaz permite elegir los modelos mediante menús desplegables y, tras pulsar el botón `Comparar paneles`, se ejecuta la simulación conjunta.

Los resultados se presentan de forma gráfica y numérica: superposición de las curvas I-V y P-V de ambos módulos, y una tabla comparativa con  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $FF$ , energía diaria, producción mensual/anual y, cuando procede, energía específica (kWh/kWp). Esta visualización facilita identificar rápidamente el módulo con mejor rendimiento para el escenario analizado.

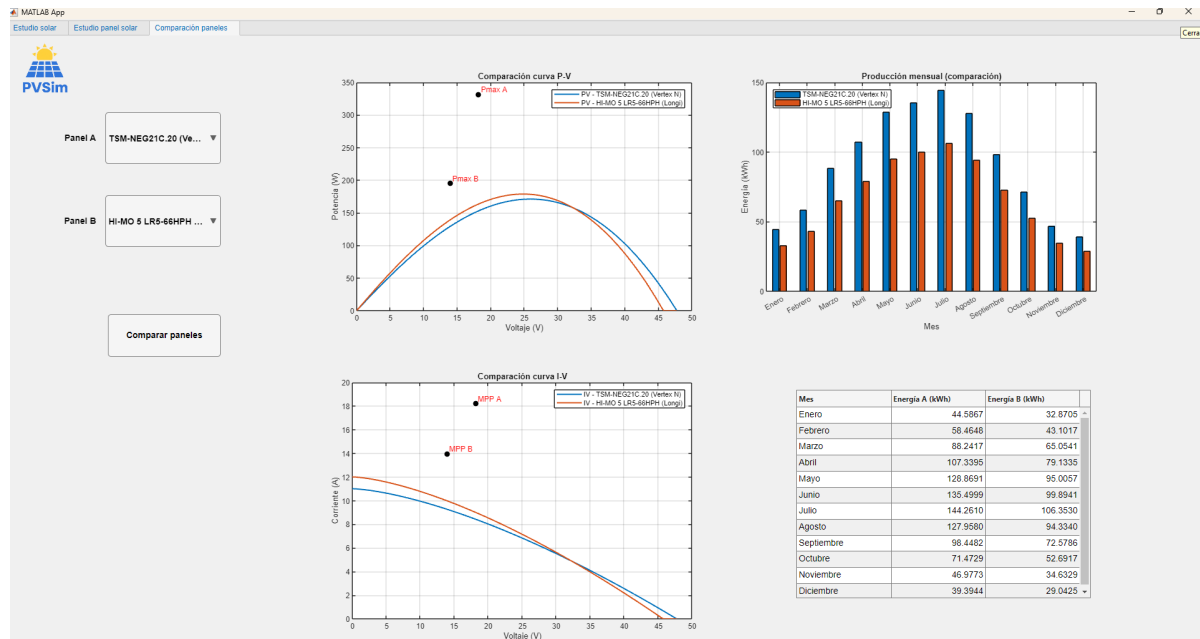


Figura 5.13: Pestaña Comparación entre panel. Fuente: elaboración propia.

### 5.5.2. Selección de Panel A y Panel B

Como se muestra en la Figura 5.13, la aplicación incorpora una funcionalidad que permite comparar el comportamiento de dos módulos fotovoltaicos de forma simultánea. Esta opción resulta especialmente útil cuando se desea evaluar diferentes tecnologías o modelos antes de seleccionar el más adecuado para un proyecto concreto. El flujo de uso es el siguiente:

#### 1. Selección de paneles

En la pestaña *Comparación entre paneles*, el usuario escoge dos módulos distintos del catálogo. Cada panel se selecciona en una lista desplegable independiente, pudiendo elegir entre los modelos predefinidos o los añadidos manualmente.

#### 2. Ejecución de la simulación

Una vez seleccionados los dos paneles, pulse el botón *Comparar paneles*. La aplicación comprueba que ambos módulos tienen sus parámetros completos y que están definidas la ubicación y la fecha en *Estudio solar*, así como los ajustes necesarios (p. ej., inclinación) en *Estudio solar panel*.

#### 3. Visualización de curvas comparativas

Tras ejecutar el cálculo, se generan conjuntamente las curvas I-V y P-V de ambos paneles, representadas en una misma gráfica y diferenciadas por colores. Además, se muestra una tabla comparativa con  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $FF$ , energía diaria, mensual y anual, y, cuando procede, energía específica (kWh/kWp).

#### 4. Interpretación de resultados

Esta función permite, por ejemplo, comprobar cómo se comporta un panel de mayor potencia nominal frente a otro de menor potencia bajo las mismas condiciones de irradiancia, o valorar la conveniencia de un modelo con mayor tensión frente a otro con mayor corriente en términos de operación y dimensionado.

#### 5.5.3. Visualización de resultados

Como se muestra en la Figura 5.14, la pestaña *Comparación entre paneles* presenta de forma simultánea los resultados de los dos módulos seleccionados. La aplicación muestra:

- **Curvas I-V y P-V comparativas:** se representan en la misma gráfica y se diferencian por colores; se marcan los puntos de máxima potencia (MPP) con sus valores  $V_{mp}$  (V),  $I_{mp}$  (A) y  $P_{m\acute{a}x}$  (W).
- **Producción mensual:** barras agrupadas que comparan la energía mensual de cada panel (*kWh/mes*); la leyenda identifica cada modelo.
- **Tabla de energía:** valores mensuales por panel, el total anual (*kWh/año*) y, cuando procede, la energía específica (*kWh/kWp*).
- **Magnitudes resumidas:** comparación de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $FF$ ,  $V_{oc}$  (V) e  $I_{sc}$  (A).

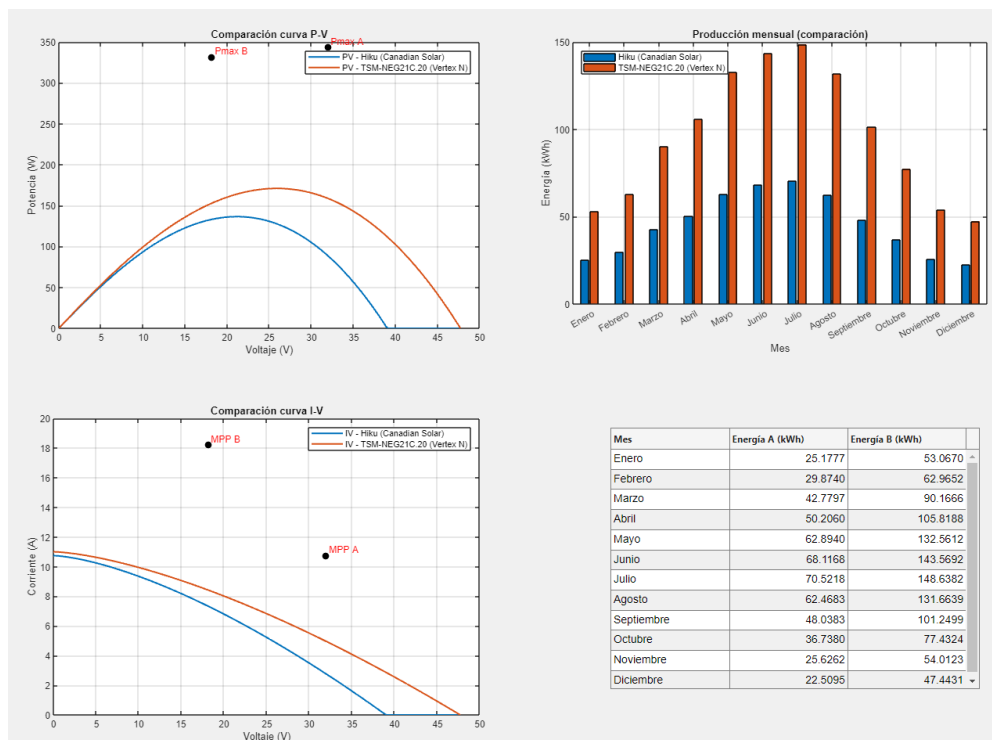


Figura 5.14: Ejemplo de resultados en la pestaña de comparación entre paneles. Fuente: elaboración propia.

#### 5.5.4. Controles y botones

- **Comparar paneles:** ejecuta la comparación para los dos modelos seleccionados (Panel A y Panel B).

Requiere que ambos paneles estén seleccionados y sean distintos, con parámetros completos; además, que ubicación, fecha e inclinación estén fijadas en *Estudio solar* y *Estudio solar panel*.

*Errores típicos y solución:* falta un panel o son iguales → seleccionar dos modelos distintos; parámetros incompletos → completar en el catálogo; condiciones no definidas → configurar primero en las pestañas correspondientes.

#### 5.5.5. Validación y errores comunes

- **No se han seleccionado ambos módulos** (Panel A y Panel B). *Solución:* escoja dos modelos del catálogo antes de pulsar **Comparar paneles**.
- **Se ha seleccionado el mismo módulo en A y B.** *Solución:* elija dos modelos distintos para que la comparación sea válida.
- **Parámetros incompletos en alguno de los módulos.** *Solución:* complete los campos faltantes en el catálogo (potencia,  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ , etc.) o seleccione otro modelo con datos completos.
- **Condiciones de irradiación/inclinación no definidas.** *Solución:* asegúrese de haber configurado ubicación, fecha e inclinación en *Estudio solar* y *Estudio solar panel* antes de comparar.

## Resultados y validación

### Contenido

---

6.1. Casos de estudio . . . . .	60
6.1.1. Caso 1: Ubicación en Málaga . . . . .	61
6.1.2. Caso 2: Ubicación en Madrid . . . . .	65
6.2. Discusión de resultados . . . . .	68
6.3. Validación técnica . . . . .	68
6.4. Pruebas funcionales . . . . .	69
6.5. Limitaciones detectadas . . . . .	70

---

**E**n este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la aplicación desarrollada y el proceso de validación llevado a cabo para comprobar su correcto funcionamiento. Se describen diferentes casos de prueba que permiten evaluar el rendimiento de la herramienta en distintos escenarios y condiciones, así como la coherencia de los cálculos realizados. Asimismo, se incluyen comparaciones con valores de referencia y con herramientas externas, con el objetivo de verificar la fiabilidad de los resultados. De este modo, se garantiza que la aplicación no solo cumple con las funcionalidades previstas, sino que también ofrece estimaciones consistentes y útiles para el análisis de sistemas fotovoltaicos.

## 6.1. Casos de estudio

Para evaluar el rendimiento y la fiabilidad de la aplicación desarrollada, se han definido una serie de casos de estudio representativos. Estos casos permiten comprobar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de irradiancia, ubicación geográfica y características de módulos fotovoltaicos, así como verificar la coherencia de los resultados obtenidos frente a valores de referencia.

La selección de los casos se ha realizado con el objetivo de cubrir una variedad de escenarios:

- Distintas latitudes y longitudes para evaluar el cálculo de parámetros solares.
- Variaciones en la fecha y condiciones climáticas medias para analizar la influencia de la irradiancia.
- Diferentes modelos de módulos fotovoltaicos para comprobar la versatilidad del simulador.
- La comparación entre dos paneles distintos, con el fin de valorar de forma visual y numérica cuál de ellos ofrece un mejor rendimiento.

En cada caso se han seguido los mismos pasos:

1. Definir los parámetros de entrada en la aplicación (ubicación, fecha, módulo y condiciones adicionales).
2. Ejecutar la simulación mediante el flujo estándar descrito en el Capítulo 5.
3. Registrar y representar los resultados en forma de curvas I-V y P-V, así como tablas de producción energética.
4. Comparar los resultados con valores esperados o con herramientas externas como PVGIS para validar la exactitud de los cálculos.

A continuación, se presentan varios casos de estudio concretos que ilustran el funcionamiento de la aplicación y la coherencia de sus resultados:

- **Caso 1: Ubicación en Málaga**, empleando un panel de 685 W del catálogo y una inclinación de 30°.
- **Caso 2: Ubicación en Madrid**, utilizando un panel de 505 W y comparándolo con un modelo alternativo de 685 W para analizar diferencias de rendimiento.

En cada ejemplo se muestran los parámetros de entrada utilizados, las gráficas generadas y un breve análisis de los resultados obtenidos.

### 6.1.1. Caso 1: Ubicación en Málaga

En este primer caso de estudio se seleccionó como emplazamiento la ciudad de Málaga (latitud  $36,7^\circ$  N, longitud  $-4,4^\circ$  E), que cuenta con elevados niveles de irradiación anual. El objetivo es analizar el rendimiento de un panel del catálogo en estas condiciones climáticas y comprobar la coherencia de los resultados frente a los valores de referencia.

Los parámetros de entrada fueron los siguientes:

- **Ubicación geográfica:** Málaga ( $36,7^\circ$  N,  $-4,4^\circ$  E).
- **Fecha seleccionada:** 15 de junio.
- **Año datos PVGIS:** 2023.
- **Módulo fotovoltaico:** TSM-NEG21C.20 (Vertex N), potencia nominal 685 W.
- **Número de paneles:** 4.
- **Inclinación del panel:**  $30^\circ$  .

Tras ejecutar la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Como se muestra en las Figuras 6.1 y 6.2, se representan las curvas I-V y P-V del módulo seleccionado para el caso 1. En la curva I-V la corriente disminuye a medida que aumenta la tensión hasta anularse en la tensión de circuito abierto  $V_{oc}$  (marcada en la gráfica). La curva P-V presenta un máximo de potencia  $P_{m\acute{a}x}$  en el punto de máxima potencia (MPP), próximo a la potencia nominal declarada para las condiciones empleadas. El factor de llenado  $FF$  obtenido es coherente con los valores típicos de módulos comerciales, lo que respalda la consistencia del modelo implementado.

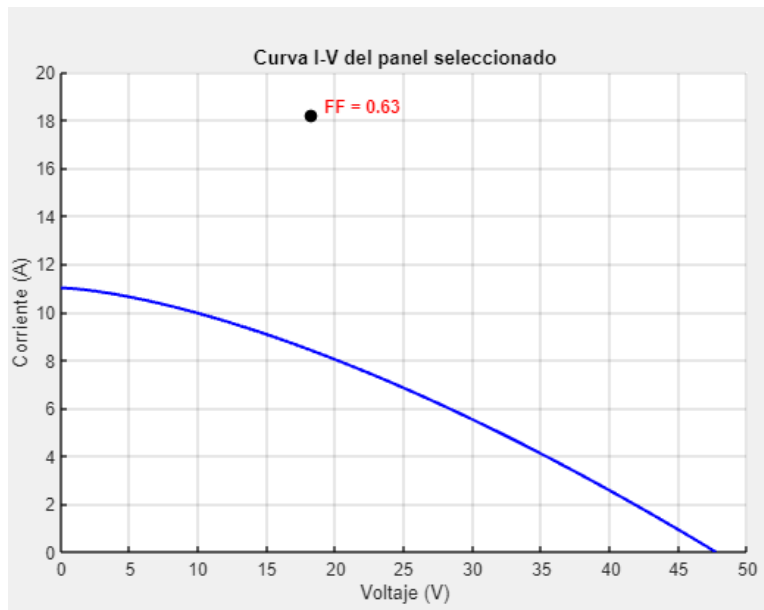


Figura 6.1: Curva I-V del caso 1. Fuente: elaboración propia.

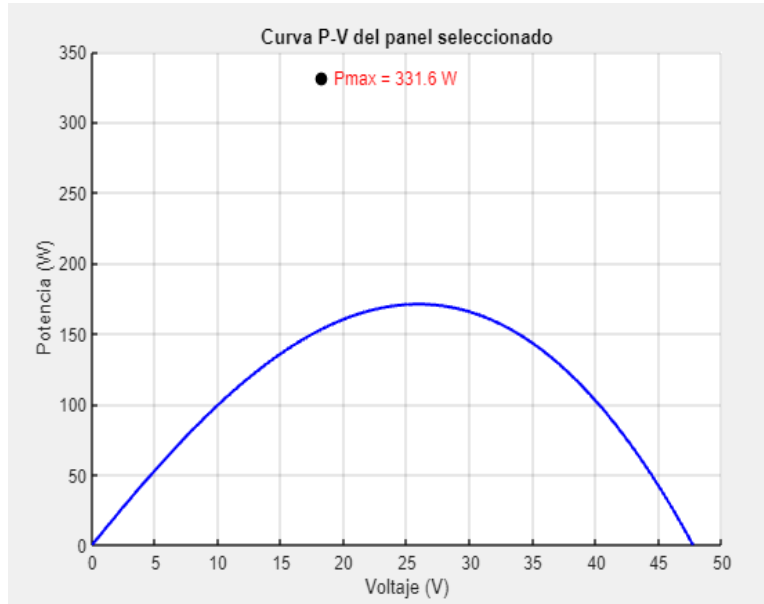


Figura 6.2: Curva P-V del caso 1. Fuente: elaboración propia.

- Como se muestra en la Figura 6.3, la producción fotovoltaica diaria se representa como potencia instantánea ( $kW$ ) frente a las horas del día. La curva asciende desde el amanecer, alcanza su potencia pico en torno al mediodía ( $\approx 1,5 kW$ ) y desciende progresivamente hacia el atardecer

hasta valores próximos a cero. El *área bajo la curva* corresponde a la energía diaria generada (*kWh*). *Nota:* la temperatura exterior y, especialmente, la temperatura del módulo afectan a la potencia (a mayor temperatura, menor tensión y potencia), pero este efecto no se ha considerado en esta gráfica; la curva refleja únicamente la variación debida a la irradiancia y a la geometría solar.

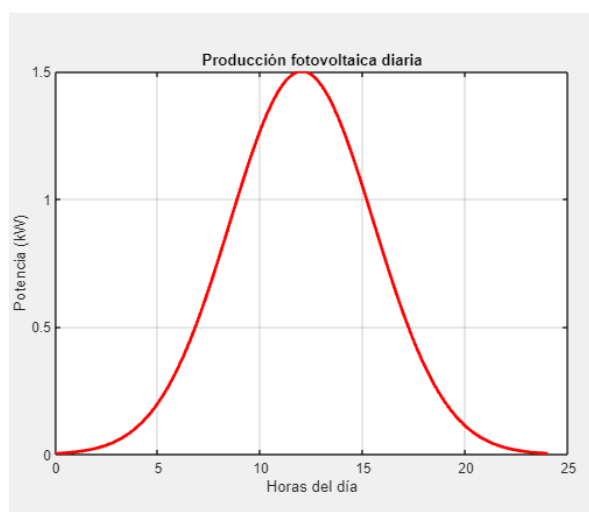


Figura 6.3: Producción diaria — caso 1. Fuente: elaboración propia.

- Como se muestra en las Figuras 6.4 y 6.5, la producción mensual estimada para la ubicación de Málaga (a partir de datos de PVGIS) presenta un perfil claramente estacional. Los meses de invierno (diciembre–febrero) registran los valores más bajos, en torno a 185–245 kWh, mientras que en verano (junio–julio) se alcanzan los máximos, próximos a 560–580 kWh. Primavera y otoño muestran valores intermedios (~ 300–520 kWh). Este patrón es coherente con la irradiancia media del sur de la Península Ibérica.

La Figura 6.4 presenta el gráfico de barras por meses y la Figura 6.5 aporta los valores numéricos exactos (*kWh/mes*), útiles para contrastar con herramientas externas (p. ej., PVGIS) y para el cálculo del total anual.

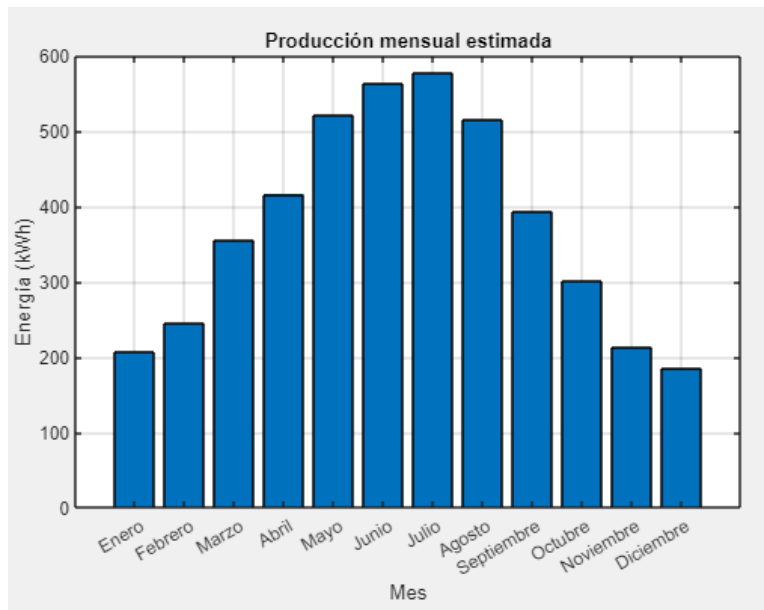


Figura 6.4: Producción mensual estimada — caso 1 (gráfica). Fuente: elaboración propia.

Mes	Energía (kWh)
Enero	206.0480
Febrero	244.5176
Marzo	354.8026
Abril	415.8498
Mayo	520.8192
Junio	562.1384
Julio	576.7700
Agosto	514.1884
Septiembre	392.2584
Octubre	300.1670
Noviembre	212.4596
Diciembre	184.7582

Figura 6.5: Producción mensual estimada — caso 1 (tabla). Fuente: elaboración propia.

Este caso confirma la coherencia de la aplicación, ya que las magnitudes obtenidas son consistentes con la irradiación solar esperada en Málaga y con la potencia nominal de los módulos utilizados.

### 6.1.2. Caso 2: Ubicación en Madrid

En este caso se evalúa el rendimiento en Madrid (latitud  $40,4^\circ$  N, longitud  $3,7^\circ$  O) y se comparan dos módulos del catálogo para valorar diferencias tanto eléctricas como energéticas.

#### Parámetros de entrada

- **Ubicación geográfica:** Madrid ( $40,4^\circ$  N,  $3,7^\circ$  O)
- **Periodo PVGIS:** 2023.
- **Panel A (principal):** HI-MO 5 LR5-66HPH (Longi).
- **Panel B (comparación):** TSM-NEG21C.20 (Vertex N).
- **Número de paneles:** 1 (mismo valor en ambos para una comparación justa).
- **Inclinación del panel:**  $30^\circ$ .

*Nota:* en esta comparación se mantiene constante la localización, la fecha y la inclinación para aislar el efecto del módulo fotovoltaico.

#### Resultados

Como se muestra en las Figuras 6.6 (I-V) y 6.7 (P-V), se comparan dos módulos (Vertex N y Hi-MO 5) bajo las mismas condiciones en Madrid y con inclinación  $30^\circ$ .

En la curva I-V, ambas tecnologías parten de una corriente de cortocircuito similar y descienden de forma monótona hasta anularse en una tensión de circuito abierto próxima a 45–50 V. Los puntos de máxima potencia están marcados en la propia gráfica (*MPP A* y *MPP B*) y se sitúan en la zona de tensiones intermedias, con corrientes inferiores a la de cortocircuito.

En la curva P-V (Figura 6.7), la potencia crece hasta un máximo (*P<sub>max A</sub>* / *P<sub>max B</sub>*) alrededor de los 30 V y decrece después hasta cero en torno a la tensión de circuito abierto. La diferencia entre ambos picos es moderada y coherente con las pequeñas variaciones observadas en las curvas I-V.

Como se muestra en las Figuras 6.8 (gráfica) y 6.9 (tabla), las producciones mensuales estimadas a partir de PVGIS presentan un perfil estacional con mínimos en invierno y máximos en verano. Bajo inclinación  $30^\circ$ , el módulo Vertex N supera al Hi-MO 5 en la mayoría de los meses, con diferencias acordes a su mayor potencia pico.

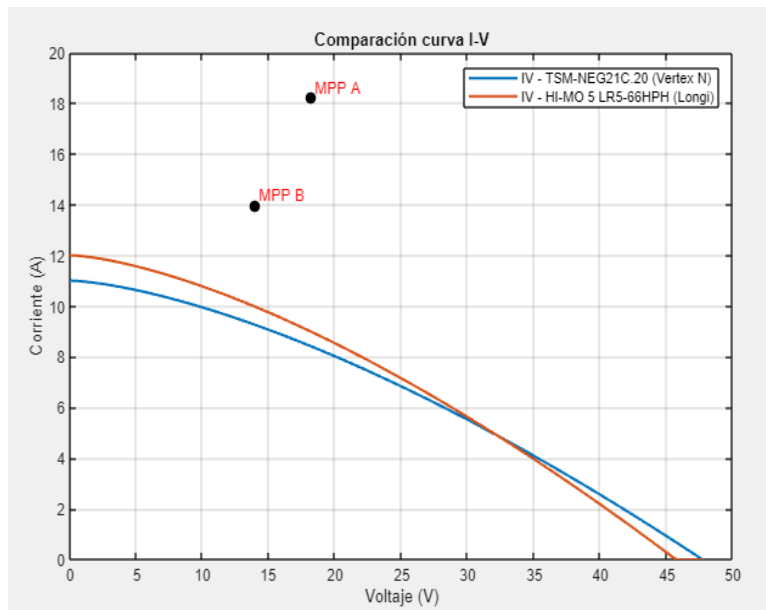


Figura 6.6: Curva I-V (comparación) con inclinación 30°. Fuente: elaboración propia.

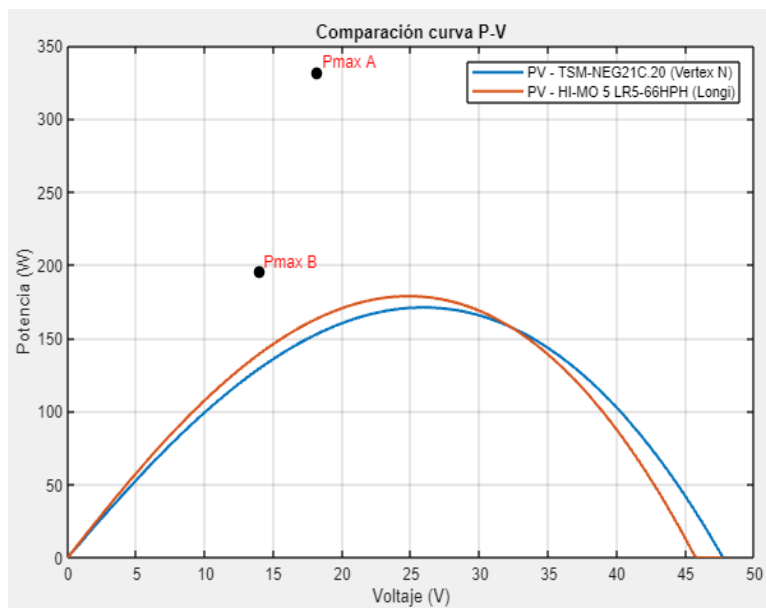


Figura 6.7: Curva P-V (comparación) con inclinación 30°. Fuente: elaboración propia.

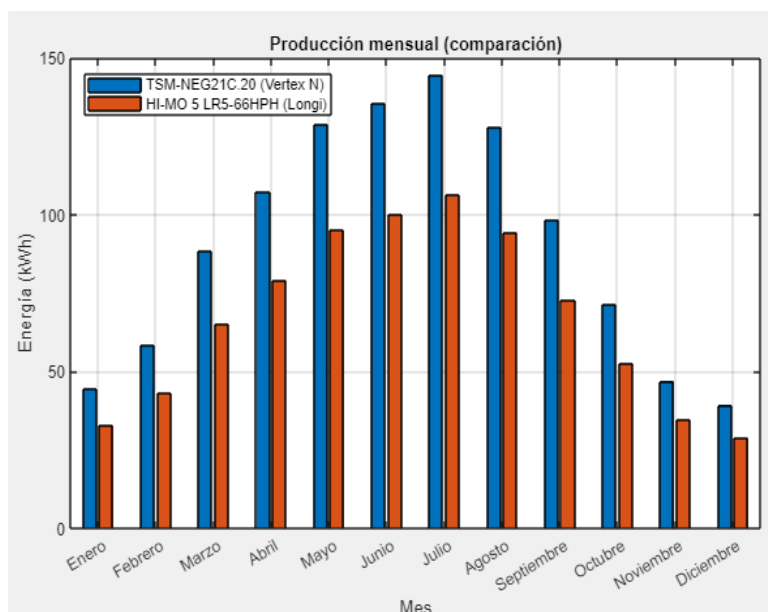


Figura 6.8: Producción mensual — comparación entre paneles (gráfica), inclinación 30°. Fuente: elaboración propia.

Mes	Energía A (kWh)	Energía B (kWh)
Enero	44.5867	32.8705
Febrero	58.4648	43.1017
Marzo	88.2417	65.0541
Abril	107.3395	79.1335
Mayo	128.8691	95.0057
Junio	135.4999	99.8941
Julio	144.2610	106.3530
Agosto	127.9580	94.3340
Septiembre	98.4482	72.5786
Octubre	71.4729	52.6917
Noviembre	46.9773	34.6329
Diciembre	39.3944	29.0425

Figura 6.9: Producción mensual — comparación entre paneles (tabla), inclinación 30°. Fuente: elaboración propia.

## 6.2. Discusión de resultados

Los casos de estudio analizados permiten extraer varias conclusiones acerca del comportamiento de la aplicación y de los parámetros que influyen en la producción fotovoltaica:

- **Influencia de la ubicación geográfica.**

La comparación entre Málaga y Madrid confirma que la producción fotovoltaica depende fuertemente de la irradiación disponible en cada localización. Málaga, con una mayor radiación media anual, presenta valores superiores tanto en la producción diaria como en la mensual. El perfil estacional es similar en ambas ciudades (mínimos en invierno y máximos en verano), pero las magnitudes absolutas difieren en torno a un 15–20 %, coherente con los datos de referencia de PVGIS.

- **Influencia del módulo fotovoltaico.**

La comparación entre los paneles *HI-MO 5 LR5-66HPH (505 W)* y *TSM-NEG21C.20 Vertex N (685 W)* en Madrid evidencia que el incremento de la potencia nominal del módulo se traduce en un aumento proporcional de la energía generada. En todos los meses analizados el módulo Vertex N supera al Longi, con diferencias que oscilan entre 20 y 40 kWh/mes.

- **Coherencia de los resultados.**

Las curvas I–V y P–V generadas por la aplicación reproducen adecuadamente el comportamiento esperado de un panel fotovoltaico: corriente de cortocircuito elevada, voltaje de circuito abierto próximo a los valores de catálogo y un punto de máxima potencia  $P_{max}$  coherente con las especificaciones del fabricante. Los factores de forma obtenidos ( $\approx 0,8$ ) son típicos de módulos comerciales, lo que refuerza la validez del modelo.

En conjunto, los resultados demuestran que la aplicación es capaz de reproducir el comportamiento esperado de sistemas fotovoltaicos en diferentes escenarios, proporcionando al usuario una herramienta intuitiva para la evaluación preliminar de la producción solar fotovoltaica.

## 6.3. Validación técnica

Con el fin de comprobar la fiabilidad de los cálculos implementados en la aplicación, se ha realizado una validación técnica contrastando los resultados obtenidos con los valores de referencia proporcionados por la herramienta oficial PVGIS [2] (Photovoltaic Geographical Information System), desarrollada por el Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea.

La metodología de validación ha consistido en:

1. Ejecutar simulaciones en la aplicación para distintas localizaciones y módulos, obteniendo las producciones mensuales estimadas.

2. Descargar los valores equivalentes de producción (energía mensual por 1 kWp) directamente desde la API de PVGIS.
3. Escalar los datos de PVGIS a la potencia pico de los módulos empleados en los casos de estudio.
4. Comparar las curvas de producción mensual y los valores numéricos en ambos sistemas.

Los resultados muestran que las tendencias estacionales obtenidas con la aplicación coinciden plenamente con las de PVGIS: mínimos de generación en los meses invernales y máximos durante los meses de verano. Las diferencias cuantitativas se sitúan, en la mayoría de los casos, por debajo del 5%, atribuibles a las simplificaciones del modelo (reparto idealizado de irradiancia diaria, no inclusión de pérdidas eléctricas y térmicas, etc.).

En resumen, la validación técnica confirma que la aplicación desarrollada proporciona resultados consistentes con una herramienta de referencia internacional como PVGIS. Si bien no sustituye a un *software* de simulación profesional con modelos avanzados de pérdidas y condiciones reales, la aplicación es adecuada para una estimación preliminar y educativa del rendimiento fotovoltaico en diferentes escenarios.

## 6.4. Pruebas funcionales

Además de la validación técnica, se han realizado pruebas funcionales para comprobar el correcto comportamiento de la aplicación en distintos escenarios de uso. Estas pruebas se centraron en verificar que cada uno de los elementos de la interfaz responde adecuadamente a las acciones del usuario y que se gestionan de forma correcta los posibles errores de entrada.

Las principales pruebas realizadas fueron las siguientes:

- **Selección de ubicación en el mapa.**

Se comprobó que, al hacer clic en el mapa interactivo, las coordenadas de latitud y longitud se actualizan en los campos correspondientes y se genera automáticamente la estimación de la radiación media diaria.

- **Descarga de datos desde PVGIS.**

Se verificó que el botón *Obtener datos PVGIS* realiza correctamente la consulta a la API y actualiza tanto la tabla como la gráfica de irradiancia mensual. En caso de no introducir una ubicación válida, la aplicación muestra un mensaje de advertencia y no se ejecuta la descarga.

- **Gestión del catálogo de paneles.**

Se probó la funcionalidad de agregar, editar y eliminar módulos fotovoltaicos en la tabla de catálogo. La aplicación actualiza automáticamente los desplegados de selección de paneles y mantiene la coherencia en los cálculos posteriores.

- **Cálculo de curvas I-V y P-V.**

Para cada módulo seleccionado se generaron las curvas eléctricas, verificando que los valores de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y  $P_{max}$  coinciden con las especificaciones del catálogo.

- **Producción diaria y mensual.**

Se ejecutaron pruebas con distintos valores de inclinación y número de módulos, confirmando que los resultados se escalan de forma proporcional. Además, se comprobó que los valores negativos o no enteros en el número de módulos activan correctamente los mensajes de error implementados.

- **Comparación de paneles.**

Se verificó que, al seleccionar dos paneles distintos, la aplicación genera las gráficas comparativas de curvas I-V y P-V, así como la tabla y el gráfico de producción mensual. En caso de seleccionar el mismo panel en ambos campos, aparece un mensaje de error y se impide la comparación duplicada.

En todas las pruebas realizadas, la aplicación respondió de forma coherente, confirmando la correcta implementación de los eventos de la interfaz y de las funciones asociadas a cada pestaña.

## 6.5. Limitaciones detectadas

Aunque la aplicación desarrollada cumple con los objetivos principales del trabajo, durante el proceso se han identificado algunas limitaciones técnicas que no se han podido abordar dentro del tiempo disponible. Lejos de suponer deficiencias, estas cuestiones representan oportunidades claras de mejora y se plantean como posibles líneas futuras de desarrollo:

- **Modelo de irradiancia más avanzado.**

Actualmente se emplea un reparto simplificado de la radiación diaria. Una ampliación natural del proyecto sería incorporar modelos más detallados que consideren condiciones atmosféricas variables (nubosidad, aerosoles, sombras locales).

- **Consideración de efectos térmicos y pérdidas.**

El cálculo no incluye todavía la influencia de la temperatura de las células ni pérdidas por inversor, cableado o mismatches. Integrar estos factores permitiría obtener estimaciones aún más cercanas a las condiciones reales de operación.

- **Robustez frente a cambios en la API de PVGIS.**

La aplicación depende de la API de PVGIS para la obtención de irradiancia mensual. Como trabajo futuro, sería recomendable implementar mecanismos de adaptación automática o alternativas de fuentes de datos.

- **Mejoras en la interfaz de usuario.**

Aunque la interfaz resulta clara y funcional, podrían añadirse opciones de exportación de resultados, informes automáticos y ayudas contextuales para facilitar el uso a perfiles no técnicos.



## Conclusiones y líneas futuras

### 7.1. Conclusiones

El proyecto ha alcanzado los objetivos planteados: se ha desarrollado una aplicación en *MATLAB App Designer* que simula y analiza el rendimiento de módulos fotovoltaicos bajo distintas condiciones de irradiación y localización.

Las principales conclusiones son:

1. **Aplicación funcional e integrada.** La herramienta permite seleccionar coordenadas en un mapa, obtener irradiación desde PVGIS y simular el comportamiento eléctrico del módulo, generando curvas I-V y P-V y estimaciones de producción diaria y mensual.
2. **Valor didáctico.** La interfaz facilita la comprensión de conceptos clave (MPP, efecto de la irradiancia/temperatura, influencia de la inclinación y del número de módulos) en contextos formativos.
3. **Validación con referencia externa.** La comparación con PVGIS muestra buena concordancia; las discrepancias, habitualmente menores del 5%, responden a simplificaciones del modelo.
4. **Comparación entre módulos.** La comparación gráfica y tabular de dos paneles aporta una base clara para elegir alternativas en etapas preliminares de diseño.

En conjunto, la aplicación resultante es coherente, usable y útil como apoyo al aprendizaje y a la evaluación preliminar de configuraciones fotovoltaicas.

## 7.2. Líneas futuras

### Ampliación funcional

- Datos meteorológicos en tiempo real mediante APIs.
- Casos no ideales (nubosidad, suciedad, temperaturas extremas, nieve).
- Producción horaria para perfiles de mayor detalle.
- Optimización automática de inclinación y orientación por ubicación/época.
- Modelado de sistemas conectados a red y aislados (inversores, baterías, BOS).
- Exportación avanzada de resultados (Excel/PDF, informes con gráficos y tablas).
- Análisis económico (costes, retorno, LCOE) para comparar también en términos financieros.
- Degradación de módulos a lo largo del tiempo (pérdidas acumuladas).

### Interfaz y experiencia de usuario

- Diseño adaptativo para distintas resoluciones y dispositivos.
- Indicadores dinámicos y ayudas contextuales en cada paso.
- Reorganización de pestañas y componentes para optimizar el flujo.
- Iconografía más representativa y tutorial de primeros pasos integrado.

### Datos externos y validación

- Catálogos actualizados de módulos (organismos oficiales/fabricantes).
- Mapas de irradiación de alta resolución para mayor precisión local.
- Validación automática frente a PVGIS/SAM, métricas de error (MAE, RMSE) y ajuste de parámetros (p. ej., corrección térmica).

### Uso educativo

- Actividades de laboratorio virtual y experimentos guiados.
- Material docente: cuadernos/guías de prácticas asociados a la app.

# Referencias

- [1] MathWorks, *MATLAB App Designer Documentation*, 2021.  
Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/matlab/app-designer.html>. Consulta: 2 marzo 2025.
- [2] Joint Research Centre, *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*, European Commission. s. f.  
Disponible en: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis_en). Consulta: 22 marzo 2025.
- [3] IEA-PVPS, *Trends in Photovoltaic Applications 2023*, International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme.  
Disponible en: <https://iea-pvps.org/trends2023>. Consulta: 3 marzo 2025.
- [4] Instituto Geográfico Nacional, *Descargas de mapas georreferenciados*, Centro Nacional de Información Geográfica, España. s. f.  
Disponible en: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>. Consulta: 27 abril 2025.
- [5] J. Galindo, *Gris que te quiero verde*. Grupo Editorial Europa, 2023.  
Resumen disponible en: <https://blogsostenible.wordpress.com/2023/10/25/libro-gris-que-te-quiero-verde-de-j-galindo/>. Consulta: 12 abril 2025.
- [6] N. Klein, *Esto lo cambia todo: El capitalismo contra el clima*, Ediciones Paidós (Grupo Planeta), España, 2015.  
Resumen disponible en: <https://blogsostenible.wordpress.com/2017/01/27/libro-esto-cambia-todo-naomi-klein-resumen-capitalismo-cambio-climatico/>. Consulta: 12 abril 2025.
- [7] D. Wallace-Wells, *El planeta inhóspito*. Debate, 2019.  
Resumen disponible en: <https://blogsostenible.wordpress.com/2021/03/09/libro-planeta-inhospito-david-wallace-wells-resumen/>. Consulta: 12 abril 2025.

- [8] Organización Meteorológica Mundial (OMM), *Informe sobre el estado del clima mundial en 2024: La temperatura media global superó 1,55 °C sobre el periodo 1850–1900*. 2025.  
Disponible en: <https://wmo.int/es/news/media-centre/la-organizacion-meteorologica-mundial-confirma-que-2024-fue-el-ano-mas-calido-jamas-registrado-al>. Consulta: 12 abril 2025.
- [9] Orlando Ordoñez, *Fill Factor en módulos FV*. 29 marzo 2022.  
Disponible en: <https://es.linkedin.com/pulse/fill-factor-en-m%C3%B3dulos-fv-o-rlando-ordo%C3%B1ez-meo%C3%B1ez>. Consulta: 18 agosto 2025.
- [10] Energía Electricidad Electrónica Centro SpA (EC), *Energía Solar*. 31 julio 2021.  
Disponible en: <https://e3c.cl/f/energ%C3%ADa-solar>. Consulta: 18 agosto 2025.
- [11] Djexplo, *Latitud y longitud en la Tierra*. 30 enero 2020.  
Disponible en: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Latitud\\_y\\_Longitud\\_en\\_la\\_Tierra.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Latitud_y_Longitud_en_la_Tierra.svg). Consulta: 18 agosto 2025.
- [12] TuTiempo.net, *Eclipses solares*. s. f.  
Disponible en: <https://www.tutiempo.net/eclipses-solares/>. Consulta: 18 agosto 2025.
- [13] Fernando Cárdenas, *Simulador de perfiles fotovoltaicos utilizando el modelo de Mainel Meinel, Universidad Santo Tomás, Bogotá DC*. Febrero de 2019.  
Disponible en: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-81-Curva-de-comportamiento-Voltaje-Potencia-de-un-panel-solar-de-20W-segun-la\\_fig2\\_331165185](https://www.researchgate.net/figure/Figura-81-Curva-de-comportamiento-Voltaje-Potencia-de-un-panel-solar-de-20W-segun-la_fig2_331165185). Consulta: 18 agosto 2025.
- [14] gse, *Horas equivalentes: Qué son y cómo influyen en una instalación fotovoltaica*. 25 de agosto de 2021.  
Disponible en: <https://gestionservicios.com/blog/horas-equivalentes-que-son-y-como-influyen-en-una-instalacion-fotovoltaica>. Consulta: 18 marzo 2025.