



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo y Validación de Algoritmos de Control
para Sistemas de Energía Solar y Almacenamiento
en el Entorno de Simulación VFlexP

Autor: Hugo Torre Martínez

Director: Andrés Tomás Martín

Co-Director: Jorge Suarez Porras

Madrid

Junio de 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título Desarrollo y Validación de Algoritmos de Control para Sistemas de Energía Solar y Almacenamiento en el Entorno de Simulación VFlexP de la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025-26 es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

X He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

Hacer una lluvia de ideas al principio del proyecto y para buscar referencias/artículos sobre ciertos temas del TFG.

Hugo Torre Martínez
Firmado: 
Fecha: 14-06-2026

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto
Andrés Tomás Martín	Jorge Suarez Porras
Fdo: Firmado por TOMAS MARTIN ANDRES - ***0522** el día 18/06/2026 con un certificado emitido por AC FNMT Usuarios	Fdo: Firmado por SUAREZ PORRAS JORGE - ***8053** el día 18/06/2026 con un certificado emitido por AC
Fecha:	Fecha:

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo y Validación de Algoritmos de Control
para Sistemas de Energía Solar y Almacenamiento
en el Entorno de Simulación VFlexP

Autor: Hugo Torre Martínez

Director: Andrés Tomás Martín

Co-Director: Jorge Suarez Porras

Madrid

Junio de 2026

Resumen

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL PARA SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR Y ALMACENAMIENTO EN EL ENTORNO DE SIMULACIÓN VFLEX

Autor: Torre Martínez, Hugo.

Director: Tomás Martín, Andrés.

Co-director: Suárez Porras, Jorge.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

La siguiente memoria trata el desarrollo y la validación en MATLAB/Simulink de un modelo de sistema fotovoltaico formado por un generador de corriente continua (panel solar) y un convertidor CC-CC con control MPPT, con el objetivo de su futura integración en la plataforma de simulación VFlexP [1] para el estudio de redes eléctricas híbridas a gran escala.

Palabras clave: generador fotovoltaico, convertidor CC-CC, MPPT, Perturb & Observe, VFlexP, MATLAB/Simulink, bloques elementales, unidades por unidad.

1. Introducción

La energía solar fotovoltaica ha tenido un crecimiento muy rápido en España, alcanzando los 32,043 *MW* de potencia instalada a principios de 2025 y convirtiéndose en la tecnología renovable con mayor capacidad del país [2]. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) fija un objetivo de 76 *GW* instalados para 2030 [3], lo que aumenta la necesidad de herramientas de simulación que puedan analizar el comportamiento de los sistemas ante la creciente aparición de la energía solar en la red.

En este contexto, VFlexP es una herramienta desarrollada en MATLAB/Simulink en el IIT de la Universidad Pontificia Comillas que permite simular sistemas eléctricos de gran escala mediante la vectorización de generadores [1]. Sin embargo, la plataforma no tiene un modelo de generador fotovoltaico de corriente continua, lo que hace que no se pueda estudiar el impacto de la generación solar en redes híbridas. Este Trabajo de Fin de Grado busca precisamente cubrir esa necesidad.

2. Definición del proyecto

El objetivo principal del trabajo es desarrollar y validar en MATLAB/Simulink un modelo de sistema fotovoltaico implementado solamente mediante bloques elementales, sin usar toolboxes externos, siguiendo el método de trabajo propio de VFlexP. El modelo se expresa en unidades por unidad (p.u.) para facilitar su escalabilidad e integración en un futuro.

El sistema que se ha modelado tiene dos subsistemas: el generador fotovoltaico, basado en el circuito equivalente de diodo simple [4] parametrizado con la hoja de especificaciones del panel Kyocera KC200GT [5]; y el convertidor CC-CC, que incorpora un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) [6] basado en una versión modificada del clásico método Perturb & Observe (P&O) [7]. No se desarrollarán en este proyecto el inversor CC-CA, la conexión a red ni los sistemas de almacenamiento en baterías.

3. Descripción del sistema

El subsistema del panel fotovoltaico resuelve la ecuación implícita del circuito equivalente de diodo simple de dos formas al mismo tiempo. Mediante una MATLAB Function con la función `fzero` para el cálculo del punto de operación en tiempo

real, y también con un bloque Algebraic Constraint para la generación de las curvas características $I-V$ y $P-V$ [8]. Ambos métodos usan los mismos parámetros del modelo a través de la máscara del sistema, lo que permite reutilizarlo para cualquier panel fotovoltaico sin tener que acceder al diagrama interno.

El convertidor CC-CC se modela mediante dos funciones de transferencia de segundo orden identificadas por ensayo de escalón, una para la relación $D \rightarrow V_{pv}$ y otra para $I_{pv} \rightarrow I_{out}$. También tiene un modelo de pérdidas de tres términos (constante, lineal y cuadrático) [9]. El algoritmo MPPT P&O incorpora una señal de referencia de potencia P_{ref} , cuando la potencia del panel supera dicha referencia, el sistema actúa como limitador de potencia (recorte de tensión) en lugar de maximizador, función muy importante para la gestión de redes con mucha generación de renovable.

4. Resultados

La validación del modelo del panel en condiciones STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$) muestra un error inferior al 0,01 % respecto a los cinco parámetros nominales del fabricante (V_{mpp} , I_{mpp} , P_{mpp} , V_{oc} , I_{sc}). El estudio paramétrico de las curvas $I-V$ y $P-V$ para distintos valores de irradiancia y temperatura confirma el comportamiento teóricamente esperado: la irradiancia afecta principalmente a la corriente y la temperatura principalmente a la tensión de circuito abierto.

Los ensayos dinámicos muestran que el algoritmo MPPT converge correctamente al punto de máxima potencia desde el valor inicial $D_0 = 0,30$, con la oscilación propia del método P&O. Los ensayos con distintos valores de P_{ref} confirman el correcto funcionamiento en ambos modos: MPPT puro cuando $P_{ref} \geq P_{mpp}$ y limitación de potencia cuando $P_{ref} < P_{mpp}$. El estudio del balance de potencias demuestra que el modelo conserva la energía en todo momento, con una eficiencia del convertidor de entre el 85 y el 90 % según el punto de operación.

5. Conclusiones

El modelo desarrollado reproduce con precisión el comportamiento eléctrico del sistema fotovoltaico, tanto en régimen permanente como dinámico, y cumple con los requisitos que necesita VFlexP al estar expresado en p.u. y estructurado mediante

subsistemas con máscaras editables. La arquitectura por módulos usada hace más fácil su extensión a otros paneles fotovoltaicos y su integración como generador vectorial en VFlexP para la simulación de redes híbridas. Similar a este proyecto, en el mismo grupo de trabajo se desarrolla un modelo equivalente para baterías que, junto con este trabajo, hará posible simular sistemas con paneles solares y baterías en VFlexP.

6. Referencias

- [1] Tomás-Martín, A.; Zuluaga-Ríos, C. D.; Suárez-Porras, J.; Kazemtabrizi, B.; García-Aguilar, J.; Sigrist, L.; García-Cerrada, A. *A vector-based flexible-complexity tool for simulation and small-signal analysis of hybrid AC/DC power systems. Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 43, p. 101817, 2025.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352467725001997>.
- [2] Red Eléctrica. *La solar fotovoltaica es ya la tecnología con más MW instalados en España*. <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2025/02/la-solar-fotovoltaica-es-ya-la-tecnologia-con-mas-MW-instalados-espana>. Último acceso: 28-05-2026.
- [3] Energía360, *La revisión del PNIEC incrementa los objetivos de implementación fotovoltaica hasta los 76 GW antes de 2030*, Noticia basada en nota de prensa de UNEF. <https://www.energia360.info/index.php/noticias/mercado-y-politica-energetica/la-revision-del-pniec-incrementa-los-objetivos-de-implementacion-fotovoltaica-hasta-los-76-gw-antes-de-2030>. Último acceso: 28-05-2026.
- [4] M. G. Villalva, J. R. Gazoli y E. R. Filho, *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, n.o 5, págs. 1198-1208, 2009. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4806084>.
- [5] Kyocera Solar, *KC200GT High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module Datasheet*. <https://www.energymatters.com.au/images/kyocera/KC200GT.pdf>. Último acceso: 19-06-2026.

- [6] Cambio Energético, *MPPT de un inversor solar: qué es y qué ventajas ofrece*. <https://www.cambioenergetico.com/blog/mppt-inversor-solar/>. Último acceso: 2026-06-01.
- [7] P. A. A. Honadia, F. I. Barro y M. Sané, *Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, n.o 4, págs. 963-973, 2005. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1461481>.
- [8] PVEducation, *IV Curve*, Página web del PVCDROM sobre operación de células solares. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>. Último acceso: 19-06-2026.
- [9] R. W. Erickson y D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, 3.a ed. Cham, Switzerland: Springer, 2020. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-43881-4>.

Abstract

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF CONTROL ALGORITHMS FOR SOLAR ENERGY AND STORAGE SYSTEMS IN THE VFLEX P SIMULATION ENVIRONMENT

Author: Torre Martínez, Hugo.

Supervisor: Tomás Martín, Andrés.

Co-supervisor: Suárez Porras, Jorge.

Collaborating Institution: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

This report deals with the development and validation in MATLAB/Simulink of a photovoltaic system model formed by a direct current generator (solar panel) and a DC-DC converter with MPPT control, with the aim of its future integration into the VFlexP [1] simulation platform for the study of large-scale hybrid electrical networks.

Keywords: photovoltaic generator, DC-DC converter, MPPT, Perturb & Observe, VFlexP, MATLAB/Simulink, elementary blocks, per-unit system.

1. Introduction

Photovoltaic solar energy has grown very quickly in Spain, reaching 32,043 *MW* of installed capacity at the beginning of 2025 and becoming the renewable technology with the highest capacity in the country [2]. The National Integrated Energy and Climate Plan (PNIEC) sets a target of 76 *GW* installed by 2030 [3], which increases the need for simulation tools that can analyse the behaviour of systems with the growing presence of solar energy in the grid.

In this context, VFlexP is a tool developed in MATLAB/Simulink at the IIT of Universidad Pontificia Comillas that allows the simulation of large-scale electrical systems through the vectorisation of generators [1]. However, the platform does not have a direct current photovoltaic generator model, which means that the impact of solar generation on hybrid networks cannot be studied. This Bachelor's Thesis aims precisely to cover this need.

2. Project definition

The main objective of this work is to develop and validate in MATLAB/Simulink a photovoltaic system model implemented only with elementary blocks, without using external toolboxes, following the working method used in VFlexP. The model is expressed in per-unit values (p.u.) to make its future scalability and integration easier.

The modelled system has two subsystems: the photovoltaic generator, based on the single-diode equivalent circuit [4] parameterised with the datasheet of the Kyocera KC200GT panel [5]; and the DC-DC converter, which includes a maximum power point tracking algorithm (MPPT) [6] based on a modified version of the classic Perturb & Observe (P&O) method [7]. The DC-AC inverter, the grid connection and the battery storage systems will not be developed in this project.

3. System description

The photovoltaic panel subsystem solves the implicit equation of the single-diode equivalent circuit in two ways at the same time. It uses a MATLAB Function with the `fzero` function to calculate the operating point in real time, and also an Algebraic Constraint block to generate the characteristic I - V and P - V curves [8]. Both methods use the same model parameters through the system mask, which

allows the model to be reused for any photovoltaic panel without having to access the internal diagram.

The DC-DC converter is modelled using two second-order transfer functions identified by step-response tests, one for the relationship $D \rightarrow V_{pv}$ and another one for $I_{pv} \rightarrow I_{out}$. It also includes a three-term loss model: constant, linear and quadratic [9]. The MPPT P&O algorithm includes a power reference signal P_{ref} . When the panel power is higher than this reference, the system works as a power limiter (voltage clipping) instead of a maximiser, which is a very important function for the management of networks with a high amount of renewable generation.

4. Results

The validation of the panel model under STC conditions ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$) shows an error lower than 0.01 % with respect to the five nominal parameters provided by the manufacturer (V_{mpp} , I_{mpp} , P_{mpp} , V_{oc} , I_{sc}). The parametric study of the I - V and P - V curves for different irradiance and temperature values confirms the theoretically expected behaviour: irradiance mainly affects the current, while temperature mainly affects the open-circuit voltage.

The dynamic tests show that the MPPT algorithm correctly converges to the maximum power point from the initial value $D_0 = 0,30$, with the typical oscillation of the P&O method. The tests with different values of P_{ref} confirm the correct operation in both modes: pure MPPT when $P_{ref} \geq P_{mpp}$ and power limitation when $P_{ref} < P_{mpp}$. The power balance study shows that the model conserves energy at all times, with a converter efficiency between 85 and 90 % depending on the operating point.

5. Conclusions

The developed model accurately reproduces the electrical behaviour of the photovoltaic system, both in steady-state and dynamic conditions, and meets the requirements needed by VFlexP because it is expressed in p.u. and structured through subsystems with editable masks. The modular architecture used makes it easier to extend the model to other photovoltaic panels and to integrate it as a vectorial generator in VFlexP for the simulation of hybrid networks. Similar to this project,

an equivalent model for batteries is being developed in the same research group. Together with this work, it will make it possible to simulate systems with solar panels and batteries in VFlexP.

6. References

- [1] Tomás-Martín, A.; Zuluaga-Ríos, C. D.; Suárez-Porras, J.; Kazemtabrizi, B.; García-Aguilar, J.; Sigrist, L.; García-Cerrada, A. *A vector-based flexible-complexity tool for simulation and small-signal analysis of hybrid AC/DC power systems. Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 43, p. 101817, 2025.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235246772501997>.
- [2] Red Eléctrica. *La solar fotovoltaica es ya la tecnología con más MW instalados en España*. <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2025/02/la-solar-fotovoltaica-es-ya-la-tecnologia-con-mas-MW-instalados-espana>. Last access: 28-05-2026.
- [3] Energía360, *La revisión del PNIEC incrementa los objetivos de implementación fotovoltaica hasta los 76 GW antes de 2030, Noticia basada en nota de prensa de UNEF*. <https://www.energia360.info/index.php/noticias/mercado-y-politica-energetica/la-revision-del-pniec-incrementa-los-objetivos-de-implementacion-fotovoltaica-hasta-los-76-gw-antes-de-2030>. Last access: 28-05-2026.
- [4] M. G. Villalva, J. R. Gazoli y E. R. Filho, *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, n.o 5, págs. 1198-1208, 2009. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4806084>.
- [5] Kyocera Solar, *KC200GT High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module Datasheet*. <https://www.energymatters.com.au/images/kyocera/KC200GT.pdf>. Last access: 19-06-2026.
- [6] Cambio Energético, *MPPT de un inversor solar: qué es y qué ventajas ofrece*. <https://www.cambioenergetico.com/blog/mppt-inversor-solar/>. Last access: 2026-06-01.

- [7] P. A. A. Honadia, F. I. Barro y M. Sané, *Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, n.o 4, págs. 963-973, 2005. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1461481>.
- [8] PVEducation, *IV Curve*, Página web del PVCDROM sobre operación de células solares. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>. Last access: 19-06-2026.
- [9] R. W. Erickson y D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, 3.a ed. Cham, Switzerland: Springer, 2020. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-43881-4>.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional y continuo durante toda mi vida. A todos mis amigos por permitirme desconectar del estudio y la universidad. Gracias a todos ellos, hacer un trabajo como este es mucho más sencillo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	5
1.4. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	5
1.5. Estructura del documento	6
2. Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica y Entorno de Simulación	8
2.1. Contexto actual y perspectivas en España	8
2.2. Principio de funcionamiento fotovoltaico	9
2.2.1. El efecto fotovoltaico	9
2.2.2. De la célula al módulo	10
2.2.3. Curvas características I-V y P-V	11
2.2.4. Influencia de la irradiancia y la temperatura	12
2.3. Tipos de instalaciones fotovoltaicas	13
2.3.1. Sistemas aislados (off-grid)	13
2.3.2. Sistemas conectados a red (on-grid)	14
2.3.3. Sistemas híbridos	14
2.4. Componentes de un sistema fotovoltaico completo	14
2.5. Desafíos de conexión a la red	16
2.5.1. Variabilidad e intermitencia	16
2.5.2. Reducción de inercia y estabilidad de la red	16
2.5.3. Grid-following vs. grid-forming	16
2.6. Redes híbridas	17
2.7. Herramientas de simulación de sistemas fotovoltaicos	18
2.8. MATLAB/Simulink: modelado mediante bloques elementales	19

2.9. VFlexP: vectorización y análisis de gran escala	20
3. Modelo del Generador Fotovoltaico y del Convertidor CC-CC	22
3.1. Modelo matemático del generador fotovoltaico	23
3.1.1. Circuito equivalente de diodo simple	23
3.1.2. Ecuación característica implícita	24
3.1.3. Fotocorriente	25
3.1.4. Corriente de saturación	25
3.1.5. Determinación de R_s y R_p	25
3.2. Panel de referencia: KC200GT	26
3.3. Implementación Simulink del generador fotovoltaico	27
3.3.1. Cálculo del punto de operación: MATLAB Function	29
3.3.2. Generación de curvas I - V y P - V : Algebraic Constraint	30
3.3.3. Estructura de bloques	31
3.3.4. Máscara del subsistema	31
3.4. Modelo del convertidor CC-CC	33
3.4.1. Arquitectura del subsistema	33
3.4.2. Función de transferencia $D \rightarrow V_{pv}$	34
3.4.3. Función de transferencia $I_{pv} \rightarrow I_{out}$ con modelo de pérdidas	35
3.5. Algoritmo MPPT: Perturb & Observe	36
3.5.1. Descripción del algoritmo	36
3.5.2. Implementación en MATLAB Function	37
3.5.3. Código del algoritmo	37
3.5.4. Máscara del subsistema Convertidor CC-CC	39
4. Resultados y Validación del Sistema	41
4.1. Curvas características del generador fotovoltaico	41
4.1.1. Validación en condiciones STC	42
4.1.2. Influencia de la irradiancia	43
4.1.3. Influencia de la temperatura	45
4.2. Respuesta dinámica del sistema con control MPPT	47
4.2.1. Señales del sistema durante la convergencia	47
4.2.2. Influencia de la referencia de potencia P_{ref}	52
4.3. Balance de potencias y modelo de pérdidas	54

4.3.1. Modelo de pérdidas del convertidor	54
4.3.2. Verificación del balance	56
4.4. Resumen de resultados	59
5. Conclusiones y Líneas Futuras	61
5.1. Conclusiones	61
5.2. Líneas futuras	63
 Appendix	 64
A. Hoja de Especificaciones: Panel KC200GT	64
 Bibliografía	 67

Índice de figuras

1.1.	Superficie solar fotovoltaica instalada anualmente en suelo (ha) [2]	2
1.2.	Arquitectura típica de un sistema fotovoltaico conectado a la red. [5]	3
2.1.	Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en España (2016–2023). Fuente: REE [2]	9
2.2.	Estructura de una célula solar de silicio y principio del efecto fotovoltaico [13].	10
2.3.	Curvas genéricas $I-V$ y $P-V$. Se indican los puntos I_{sc} , V_{oc} y MPP [15].	11
2.4.	Curvas $I-V$ y $P-V$ para distintas irradiancias y temperaturas [16].	13
2.5.	Arquitectura típica de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica [17].	15
2.6.	Arquitectura de una red híbrida solar fotovoltaica–eólica con almacenamiento en baterías [19].	18
2.7.	Modelo del sistema fotovoltaico implementado en Simulink con máscaras.	20
2.8.	Ejemplo gráfico de la vectorización de VFlexP. Bloques individuales (izquierda) frente a un solo bloque vectorial (derecha).	21
3.1.	Arquitectura de nivel superior del modelo de Simulink. El bloque Panel Fotovoltaico recibe T , G y V_{pv} y entrega I_{pv} y P_{pv} al bloque Convertidor CC-CC, que calcula V_{pv} e I_{out} .	23
3.2.	Circuito equivalente de diodo simple del generador fotovoltaico [20].	24
3.3.	Curvas $I-V$ y $P-V$ del panel KC200GT según el fabricante [21].	27
3.4.	Subsistema Panel Fotovoltaico en Simulink. Parte superior: bloque panel_op (MATLAB Function) para el punto de operación. Parte inferior: lazo algebraico con Algebraic Constraint para las curvas $I-V$ y $P-V$.	28
3.5.	Ventana de parámetros de la máscara del Panel Fotovoltaico.	32

3.6.	Diagrama de bloques interno del subsistema Convertidor CC-CC. Se distinguen el bloque MPPT P&O (izquierda), la cadena $D \rightarrow V_{pv}$ (centro) y la cadena $I_{pv} \rightarrow I_{out}$ con modelo de pérdidas (derecha).	34
3.7.	Diagrama de flujo del algoritmo MPPT P&O.	39
3.8.	Ventana de parámetros de la máscara del Convertidor CC-CC.	40
4.1.	Curvas $I-V$ (arriba) y $P-V$ (abajo) del modelo en condiciones STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$). El punto de máxima potencia (MPP) está marcado.	43
4.2.	Curvas $I-V$ (arriba) y $P-V$ (abajo) para $G\{200, 400, 600, 800, 1000\} \text{ W/m}^2$ a $T = 25^\circ\text{C}$. Los puntos marcados son los MPP de cada curva.	44
4.3.	Curvas $I-V$ (arriba) y $P-V$ (abajo) para $T\{15, 25, 35, 45\}^\circ\text{C}$ a $G = 1000 \text{ W/m}^2$.	46
4.4.	Respuesta dinámica del sistema en condiciones STC con $P_{ref} = 1,0 \text{ p.u.}$.	49
4.5.	Evolución temporal del ciclo de trabajo D durante la convergencia al MPP. Se ven los escalones de perturbación ($\Delta D = 0,001$) y la oscilación en régimen permanente.	51
4.6.	Comparación del régimen permanente de P_{pv} para tres valores de P_{ref} : $1,0 \text{ p.u.}$ (MPPT puro), $0,75 \text{ p.u.}$ (Recorte de tensión) y $0,9 \text{ p.u.}$ (con $G = 800 \text{ W/m}^2$ $P_{pv} < 1,0 \text{ p.u.}$).	53
4.7.	Balance de potencias durante la simulación en condiciones STC con $P_{ref} = 1,0 \text{ p.u.}$. Se cumple: $P_{pv} - P_{out} - P_{perd} = 0$ en todo momento.	57

Índice de tablas

3.1.	Especificaciones eléctricas del panel KC200GT en STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_c = 25^\circ\text{C}$). Fuente: [21].	26
3.2.	Parámetros del modelo de diodo simple para el KC200GT.	27
4.1.	Valores nominales del panel KC200GT en STC según el fabricante [21] y resultados del modelo.	42
4.2.	Puntos de máxima potencia del modelo para distintos niveles de irradiancia ($T = 25^\circ\text{C}$).	45
4.3.	Puntos de máxima potencia del modelo para distintas temperaturas ($G = 1000 \text{ W/m}^2$).	47
4.4.	Valores de régimen permanente para distintos P_{ref}	54
4.5.	Balance de potencias en régimen permanente para distintos valores de P_{ref}	58
4.6.	Resumen de la validación del sistema en condiciones STC con $P_{ref} = 1,0 \text{ p.u.}$	59

Acrónimos

<i>CC</i>	Corriente Continua
<i>CA</i>	Corriente Alterna
<i>FV</i>	Fotovoltaico
<i>MPP</i>	Maximum Power Point (Punto de Máxima Potencia)
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracking
<i>P&O</i>	Perturb and Observe
<i>STC</i>	Standard Test Conditions (Condiciones Estándar de Medida)
<i>p.u.</i>	Por Unidad
<i>FT</i>	Función de Transferencia
<i>ODS</i>	Objetivos de Desarrollo Sostenible
<i>PNIEC</i>	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
<i>REE</i>	Red Eléctrica de España
<i>IIT</i>	Instituto de Investigación Tecnológica
<i>GFL</i>	Grid-Following (seguidor de red)
<i>GFM</i>	Grid-Forming (formador de red)
<i>KC200GT</i>	Kyocera KC200GT (panel de referencia)

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La transición hacia un modelo energético más sostenible está impulsando el desarrollo y la adopción de energías renovables a escala global. Entre ellas, la energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las tecnologías de generación eléctrica con mayor crecimiento, alcanzando en España los 32,043 *MW* de potencia instalada a principios de 2025 y convirtiéndose en la tecnología con mayor capacidad instalada del país, por delante de la eólica con 32,007 *MW*, según los datos publicados por Red Eléctrica de España [1].

En cuanto a generación, la energía solar representó el 25 % del total producido en España en enero de 2025. Este crecimiento ha sido muy acelerado entre 2018 y 2023 gracias a los cambios regulatorios y a la gran reducción de costes de los módulos fotovoltaicos [2], como se ve en la Figura 1.1; y se espera que continúe, gracias al Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), que establece un objetivo de 76 *GW* de implementación solar instalada antes de 2030 [3].

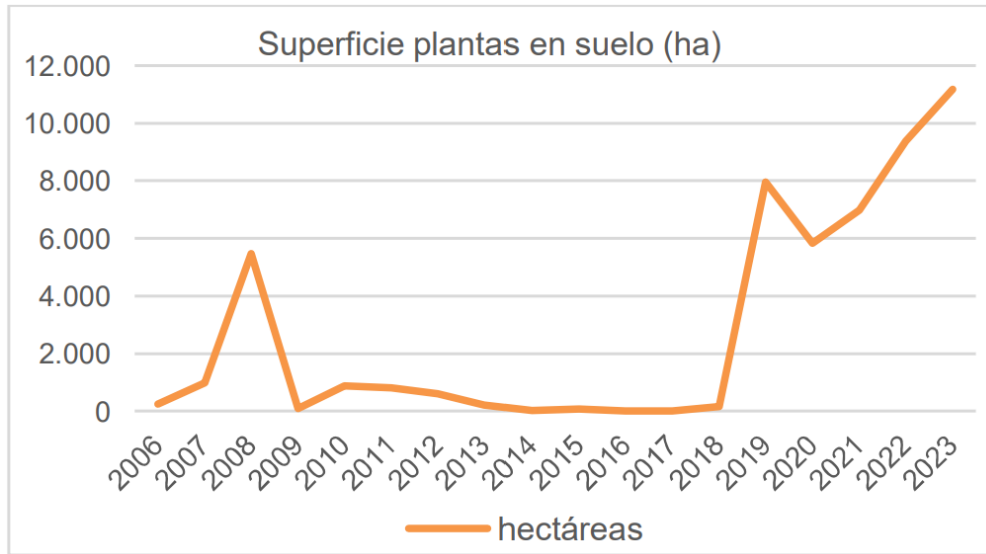


Figura 1.1: Superficie solar fotovoltaica instalada anualmente en suelo (ha) [2]

La generación solar fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico: las células solares convierten la radiación solar en corriente continua (CC), que después es procesada por un sistema de electrónica de potencia, formado por un convertidor CC-CC y un inversor CC-CA, posteriormente, es inyectada a la red. Sin embargo, la potencia de salida no es constante: depende de la irradiancia y de la temperatura de la célula, de modo que el punto de máxima potencia (MPP, Maximum Power Point) varía con las condiciones ambientales. Para operar siempre en ese punto óptimo, los convertidores CC-CC usan algoritmos de seguimiento llamados MPPT (Maximum Power Point Tracking), entre los cuales el método Perturb and Observe (P&O) es uno de los más utilizados por su simplicidad y efectividad práctica [4]. Un esquema general típico de este tipo de sistemas se ve en la Figura 1.2.

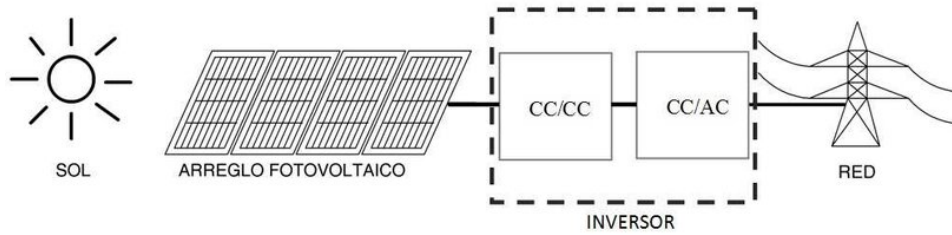


Figura 1.2: Arquitectura típica de un sistema fotovoltaico conectado a la red. [5]

El modelado y la simulación de estos sistemas son necesarios tanto en la fase de diseño como en la validación de los algoritmos de control, ya que permiten analizar el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones sin necesidad de un prototipo físico. MATLAB/Simulink, muy extendido en investigación de sistemas de potencia, es un programa muy usado en este tipo de tareas: sus bloques permiten reproducir con fidelidad las ecuaciones del circuito equivalente del panel, del convertidor y del controlador. De aquí surge justamente la motivación de este proyecto.

VFlexP es una herramienta desarrollada en MATLAB/Simulink que permite simular sistemas eléctricos de gran escala mediante la vectorización de generadores [6]. Tiene actualmente generadores de corriente alterna (eólicos y síncronos), pero le falta un modelo de generador fotovoltaico de corriente continua. El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado consiste en desarrollar y validar dicho modelo, con la idea de integrarlo en VFlexP para el estudio de redes híbridas que junten generación solar con otros tipos de generadores.

1.2. Justificación

El uso masivo de energía fotovoltaica genera fluctuaciones de potencia que dificultan el equilibrio entre generación y demanda, dado que la producción solar depende de la irradiancia, la temperatura y la nubosidad [7]. Las redes híbridas, que combinan fuentes renovables y generadores de corriente alterna, reducen esta intermitencia, pero su simulación a gran escala es compleja a nivel computacional: representar individualmente cada generador consume recursos que crecen con el número de unidades.

VFlexP resuelve este problema mediante la vectorización de modelos: un único bloque de Simulink puede representar varios generadores, permitiendo simular sistemas de gran escala sin hardware de altas prestaciones. La herramienta opera en el dominio de pequeña señal y ensayo dinámico [6], lo que permite analizar la estabilidad de la red ante perturbaciones. Sin embargo, al carecer actualmente de un modelo de generador fotovoltaico, no es posible estudiar en este entorno el impacto de la generación solar ni el comportamiento de redes híbridas que la incluyan.

Esta falta es especialmente relevante en el contexto actual, donde la sustitución progresiva de máquinas síncronas por inversores reduce la inercia del sistema y reabre el debate sobre generadores grid-following frente a grid-forming [8], haciendo necesaria la existencia de modelos detallados de generadores basados en inversores.

Por todo ello, este trabajo desarrolla en MATLAB/Simulink un modelo de sistema fotovoltaico compuesto por un generador CC (panel solar) y un convertidor CC-CC con control MPPT, ambos implementados mediante bloques elementales de Simulink. Este proyecto no abordará el inversor CC-CA, la conexión a red y los sistemas de almacenamiento.

También hay que mencionar que, aunque el título del trabajo tiene el nombre de VFlexP, la herramienta no se usa en esta memoria. La razón es que la contribución de este TFG es el primer paso necesario para esta integración, es decir, desarrollar y validar el modelo del generador fotovoltaico. Utilizar VFlexP en este momento, cuando el modelo aún no existe, no tiene mucho sentido. Una vez validado de forma

independiente en Simulink, el modelo se podrá integrar en VFlexP como trabajo futuro, tal y como se describe en el Capítulo 5.

1.3. Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivos los siguientes puntos:

1. Estudiar el funcionamiento, tipos de instalaciones y desafíos de los sistemas de energía solar fotovoltaica.
2. Comprender de manera general el entorno de simulación VFlexP y su aplicación al estudio de sistemas eléctricos de gran escala.
3. Desarrollar en Simulink un modelo de un panel solar basado en el circuito equivalente de un diodo, capaz de reproducir las curvas características I-V y P-V.
4. Desarrollar el modelo del convertidor CC-CC mediante funciones de transferencia de segundo orden, identificando la relación $D \rightarrow V_{pv}$ y la transformación $I_{pv} \rightarrow I_{out}$.
5. Implementar el algoritmo de control MPPT mediante la técnica *Perturb and Observe* (P&O) validando su convergencia al punto de máxima potencia bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura.

1.4. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Este trabajo se alinea de forma directa en varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de Naciones Unidas.

1. **ODS 7 - Energía asequible y no contaminante:** Es el que tiene la relación más directa, dado que el proyecto contribuye al avance tecnológico

en sistemas de generación solar fotovoltaica, cuyo papel es clave para alcanzar los objetivos de electrificación renovable.

2. **ODS 9 - Industria, innovación e infraestructura:** Se ve plasmado en el desarrollo de herramientas de simulación que permiten mejorar el diseño de infraestructuras energéticas.
3. **ODS 13 - Acción por el clima:** La acción de la energía solar fotovoltaica contribuye a acelerar la descarbonización del sistema eléctrico.

1.5. Estructura del documento

El presente documento se organiza de la siguiente manera.

El Capítulo 2 trata sobre el marco teórico y el entorno de trabajo. En su primera parte desarrolla el estudio de los sistemas de energía solar fotovoltaica: contexto actual y perspectivas en España, su funcionamiento, tipos de instalaciones y componentes de un sistema completo, así como los desafíos de conexión a la red (incluyendo la problemática grid-following vs. grid-forming) y el concepto de red híbrida. En su segunda parte describe el entorno de simulación usado, la metodología de modelado en MATLAB/Simulink mediante bloques elementales, el uso de máscaras y la arquitectura vectorial de VFlexP, con su aplicación al análisis de sistemas eléctricos de gran escala en régimen de pequeña señal.

El Capítulo 3 muestra el desarrollo e implementación de los modelos. Se presenta el modelo del generador fotovoltaico en Simulink: circuito equivalente de un solo diodo, implementación mediante bloques elementales con máscaras y validación de las curvas $I-V$ y $P-V$ usando a la hoja de especificaciones del panel KC200GT. Después se desarrolla el modelo del convertidor CC-CC y la implementación del algoritmo MPPT P&O, mediante una aproximación por funciones de transferencia de segundo orden cuyos parámetros se identifican mediante ensayos.

El Capítulo 4 recoge la validación global del sistema: balance de potencias, respuesta dinámica ante variaciones de irradiancia y temperatura, y convergencia del MPPT al punto de máxima potencia.

Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo y propone líneas de trabajo futuro, entre las que destaca la integración del modelo desarrollado en VFlexP para la simulación de redes híbridas de gran escala.

Capítulo 2

Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica y Entorno de Simulación

2.1. Contexto actual y perspectivas en España

La energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento enorme en la última década, siendo una de las fuentes de generación eléctrica de mayor expansión a nivel mundial. En 2023, la capacidad fotovoltaica instalada globalmente superó los 1 600 GW , con un incremento anual de más de 400 GW , cifra que representa el mayor despliegue de cualquier tecnología energética en un solo año [9].

España sigue la tendencia en este contexto. Con una irradiación global horizontal media de entre 1 500 y 1 900 kWh/m^2 al año dependiendo de la zona geográfica, es uno de los países de Europa con mayor recurso solar [10]. Este potencial se ha visto reflejado en un crecimiento sostenido de la potencia instalada: a finales de 2024, los parques fotovoltaicos españoles superaban los 23 600 MW , distribuidos en más de 63 000 instalaciones registradas en el Registro Administrativo de Instalaciones de Producción de Energía Eléctrica (RAIPEE) [2]. La Figura 2.1 muestra la evolución de esta capacidad instalada en los últimos años.

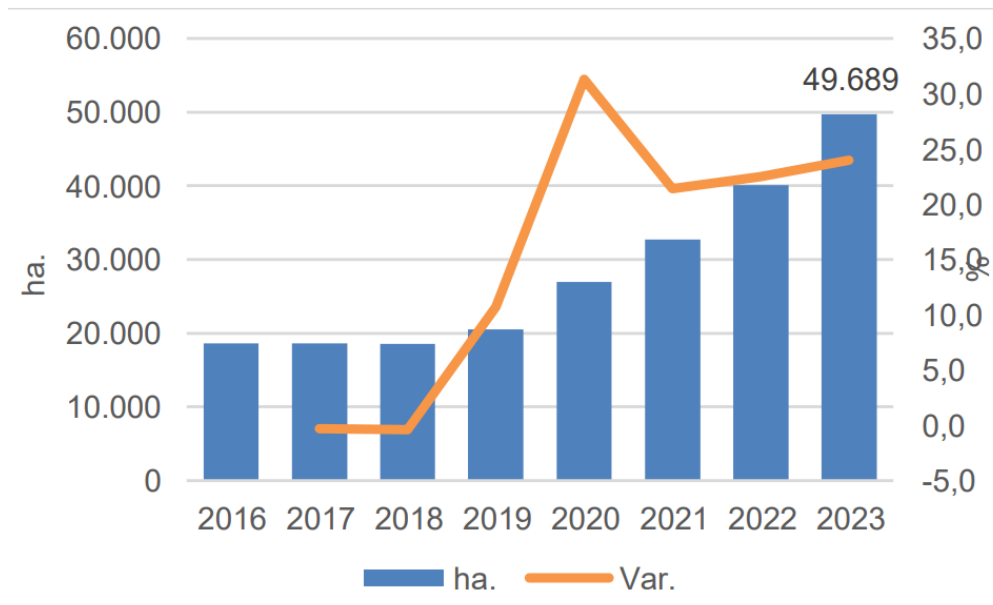


Figura 2.1: Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en España (2016–2023). Fuente: REE [2]

Las previsiones sugieren que esta tendencia continuará: el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021–2030 fija un objetivo de 76 GW de capacidad solar fotovoltaica instalada para 2030 [3], lo que supondría multiplicar por más de tres la capacidad en 2024 en un plazo de seis años. Este ritmo de implementación refuerza la necesidad de herramientas de simulación que permitan estudiar el comportamiento de la red ante la creciente penetración solar.

2.2. Principio de funcionamiento fotovoltaico

2.2.1. El efecto fotovoltaico

La conversión de la radiación solar en energía eléctrica se basa en el efecto fotovoltaico, descubierto por Edmond Becquerel en 1839 [11]. Cuando un fotón con suficiente energía incide sobre un material semiconductor, transfiere su energía a un electrón de la banda de valencia, pasándolo a la banda de conducción y dejando

un hueco en su lugar. En una unión p-n, el campo eléctrico interno de la juntura separa el par electrón-hueco generado: los electrones migran hacia la zona n y los huecos hacia la zona p, creando una diferencia de potencial que, si se cierra el circuito exterior, da lugar a una corriente eléctrica continua [12].

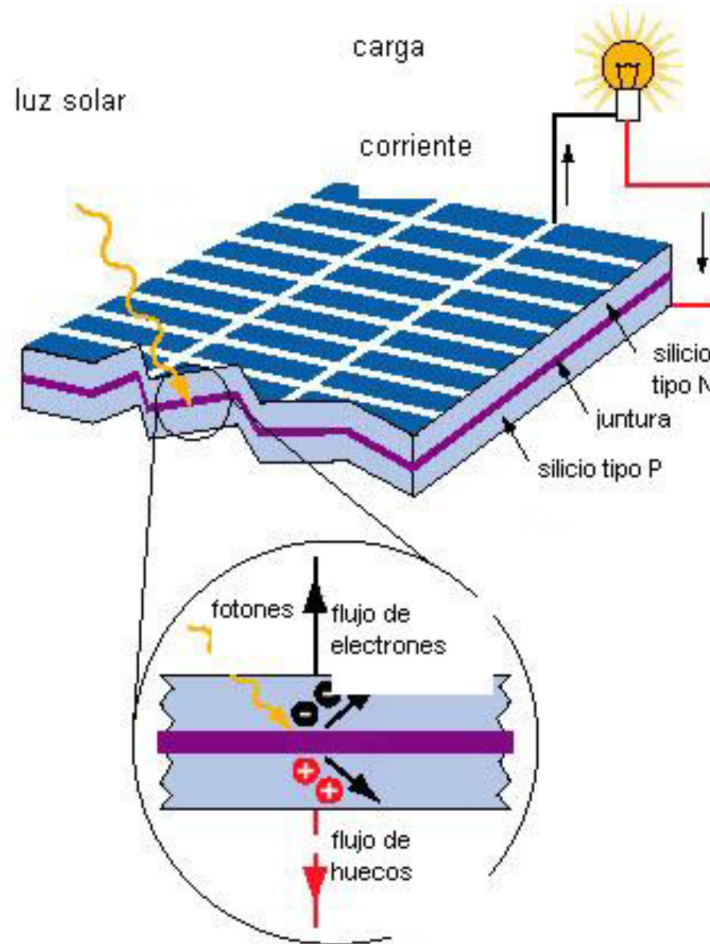


Figura 2.2: Estructura de una célula solar de silicio y principio del efecto fotovoltaico [13].

2.2.2. De la célula al módulo

Una sola célula solar produce normalmente una tensión de circuito abierto de entre 0,5 y 0,7 V, y una corriente de cortocircuito del orden de 8–10 A para una

superficie de $\approx 156 \text{ cm}^2$ [14]. Para obtener niveles de tensión y potencia útiles, las células se conectan en serie y en paralelo formando un módulo fotovoltaico. La conexión en serie de N_s células sube la tensión en un factor N_s , mientras que la conexión en paralelo de N_p ramas aumenta la corriente.

Un módulo comercial típico de 200 W tiene 60 células en serie, lo que proporciona una tensión de circuito abierto (V_{oc}) de $\approx 35 \text{ V}$ y una corriente de cortocircuito (I_{sc}) de $\approx 8 \text{ A}$ en condiciones estándar de medida (STC: $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_c = 25^\circ\text{C}$). Varios módulos pueden combinarse a su vez en cadenas (strings) conectadas en serie para subir la tensión, y varias cadenas en paralelo para aumentar la corriente, formando un generador fotovoltaico o array.

2.2.3. Curvas características I-V y P-V

El comportamiento eléctrico de un módulo fotovoltaico se describe mediante sus curvas características: la curva corriente-tensión (I - V) y la curva potencia-tensión (P - V), mostradas en la Figura 2.3.

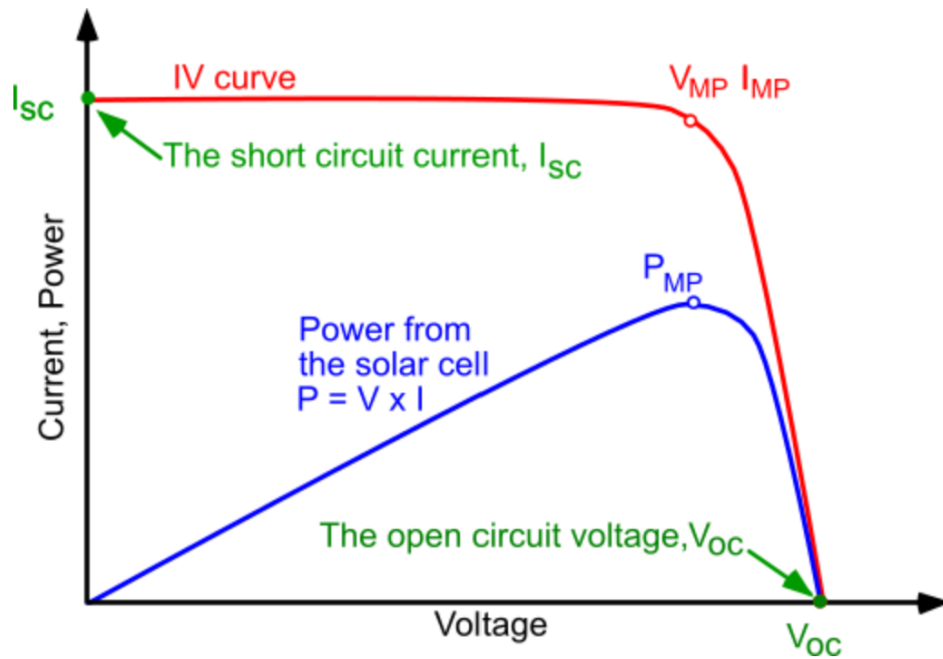


Figura 2.3: Curvas genéricas I - V y P - V . Se indican los puntos I_{sc} , V_{oc} y MPP [15].

La curva I - V tiene tres puntos importantes:

- **Corriente de cortocircuito** I_{sc} : corriente máxima entregada por el módulo cuando los terminales del panel están cortocircuitados ($V = 0$). Es prácticamente proporcional a la irradiancia.
- **Tensión de circuito abierto** V_{oc} : tensión máxima en bornes del panel cuando la corriente es nula ($I = 0$). Varía logarítmicamente con la irradiancia y disminuye con la temperatura.
- **Punto de máxima potencia** (MPP): donde se maximiza el producto $P = V \cdot I$ (V_{mpp} , I_{mpp}). Es el punto de operación óptimo del módulo.

La curva P - V muestra un único máximo global para las mismas condiciones de irradiancia. El cociente entre la potencia en el MPP y el producto $V_{oc} \cdot I_{sc}$ se llama Factor de Forma (FF) y cuantifica la calidad eléctrica del módulo:

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.1)$$

Los módulos comerciales de silicio suelen tener valores de FF entre 0,70 y 0,82.

2.2.4. Influencia de la irradiancia y la temperatura

Las condiciones ambientales afectan de diferentes formas a los parámetros del módulo:

- **Irradiancia** G : determina la corriente fotogenerada I_{pv} , que es prácticamente proporcional a G . Al aumentar la irradiancia, la curva I - V se desplaza hacia arriba y, por tanto, el MPP aumenta.
- **Temperatura de célula** T : afecta a la tensión de circuito abierto V_{oc} , que disminuye con la temperatura a razón del coeficiente $K_v < 0$. El incremento de temperatura disminuye la potencia máxima que puede alcanzar el módulo.

La influencia de G y T en las curvas características se puede ver en la Figura 2.4

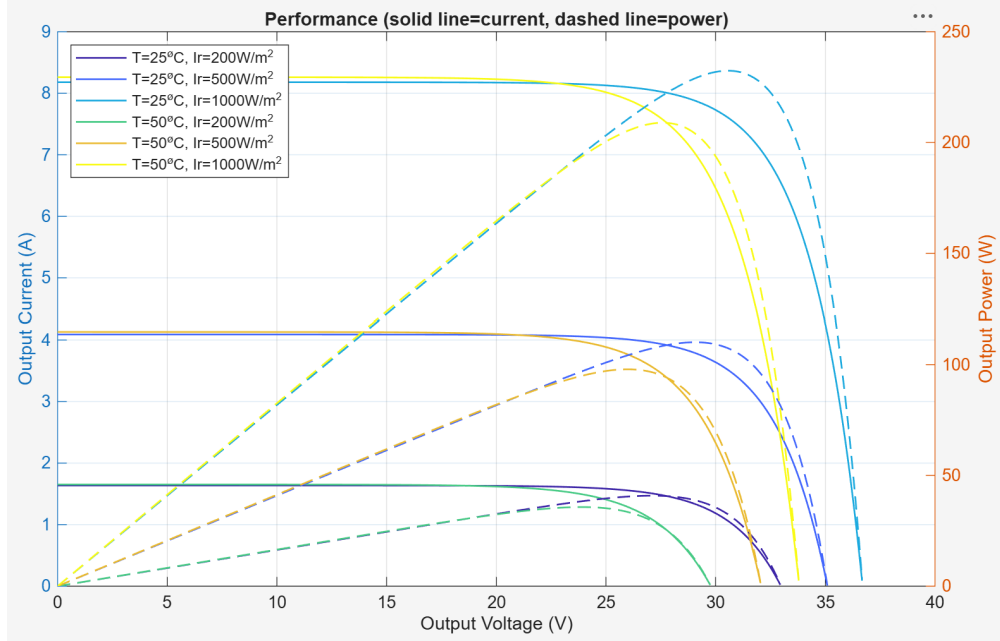


Figura 2.4: Curvas $I - V$ y $P - V$ para distintas irradiancias y temperaturas [16].

Estas variaciones hacen necesaria la existencia del algoritmo MPPT: dado que el MPP varía continuamente con las condiciones ambientales, el sistema de control debe buscarlo en tiempo real para maximizar la potencia de salida.

2.3. Tipos de instalaciones fotovoltaicas

Los sistemas fotovoltaicos se clasifican principalmente según su relación con la red eléctrica:

2.3.1. Sistemas aislados (off-grid)

Los sistemas aislados, como su nombre indica, no están conectados a la red y abastecen cargas locales de forma autónoma. Tienen un sistema de almacenamiento

de baterías para garantizar el suministro durante períodos de baja irradiancia o de noche, así como un regulador de carga que gestiona el estado de carga de las baterías. Son habituales en zonas rurales sin acceso a la red eléctrica, instalaciones de telecomunicaciones o sistemas de bombeo de agua en entornos remotos.

2.3.2. Sistemas conectados a red (on-grid)

Es la tipología más usada en instalaciones de media y gran escala. La energía generada se inyecta directamente a la red eléctrica a través de un inversor, sin almacenamiento local. Dentro de estos sistemas se distingue entre:

- **Instalaciones sobre cubierta o edificio integrado:** potencias típicas de 3–100 kW , orientadas al autoconsumo, no tienen porqué dar energía a red.
- **Plantas fotovoltaicas de gran escala (utility-scale):** potencias de varios MW a varios GW , conectadas directamente a la red de transporte o distribución.

2.3.3. Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos combinan la generación fotovoltaica con otras fuentes de energía (típicamente eólica) y/o con sistemas de almacenamiento. Su objetivo es reforzar el sistema, reducir la dependencia de una única fuente y mejorar la calidad y continuidad del suministro. Se abordan con más detalle en la Sección 2.6.

2.4. Componentes de un sistema fotovoltaico completo

La Figura 2.5 muestra la arquitectura típica de un sistema fotovoltaico conectado a la red.

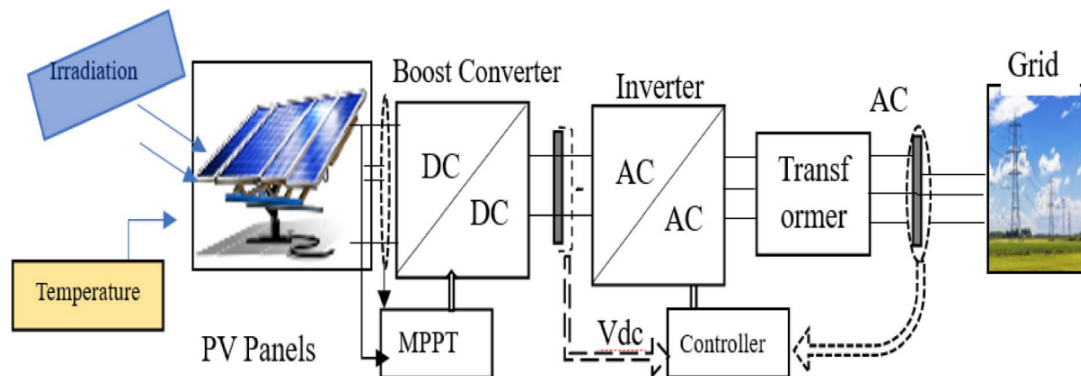


Figura 2.5: Arquitectura típica de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica [17].

Los elementos principales son:

- **Generador fotovoltaico:** formado por los módulos conectados en serie y paralelo que constituye la fuente de energía del sistema. Se desarrollará en MATLAB/Simulink más adelante.
- **Convertidor CC-CC:** eleva o reduce la tensión de salida del generador al nivel del bus de continua dependiendo del MPP (mediante el algoritmo MPPT), para que el generador trabaje en esas condiciones. Es el segundo bloque de este TFG.
- **Inversor CC-CA:** convierte la corriente continua del bus en corriente alterna con la frecuencia y tensión de la red. No se desarrollará en este TFG.
- **Filtro de red y transformador:** adaptan la forma de onda y el nivel de tensión para cumplir los requisitos de la red.
- **Sistema de monitorización y protecciones:** sensores de irradiancia y temperatura, medidores de corriente y tensión, dispositivos de protección frente a sobretensiones, cortocircuitos e isla eléctrica.

2.5. Desafíos de conexión a la red

2.5.1. Variabilidad e intermitencia

La característica que más diferencia la generación fotovoltaica de otras fuentes convencionales es su variabilidad: la potencia inyectada a la red depende de la irradiancia solar, que fluctúa a lo largo del día según un patrón predecible (ciclo día-noche), pero también de forma impredecible por el efecto de la nubosidad. Esta variabilidad introduce desafíos en la gestión del equilibrio entre generación y demanda, sobre todo con la creciente aparición de energías renovables en el sistema eléctrico.

En España, la elevada penetración de energías renovables en algunas horas del día puede llevar a situaciones de exceso de generación, con el riesgo de sobre-frecuencia y la necesidad de recortar generación. La gestión de estas situaciones requiere sistemas de control muy complejos y una mayor coordinación entre las distintas fuentes del sistema eléctrico.

2.5.2. Reducción de inercia y estabilidad de la red

Los generadores convencionales basados en máquinas síncronas contribuyen a la inercia del sistema eléctrico: su masa rotante actúa como reserva de energía cinética que disminuye las grandes variaciones de frecuencia. Al sustituirse poco a poco estas máquinas por inversores electrónicos (que no tienen masa rotante) la inercia del sistema disminuye, haciéndolo más sensible ante perturbaciones y aumentando la tasa de variación de frecuencia [8].

2.5.3. Grid-following vs. grid-forming

Los inversores fotovoltaicos se clasifican en dos grandes categorías según su estrategia de control:

- **Inversores grid-following (GFL):** siguen la tensión y la frecuencia de la

red, que actúa como referencia externa. Inyectan una corriente de referencia y necesitan que la red tenga suficiente inercia para mantenerse estable. Son la tecnología más usada en la actualidad [18].

- **Inversores grid-forming (GFM):** sintetizan internamente una tensión de referencia con amplitud y frecuencia controladas, comportándose como una fuente de tensión virtual. Son capaces de proporcionar inercia sintética y soporte de frecuencia, lo que los hace especialmente adecuados para redes con alta penetración renovable y baja inercia [8].

El debate entre ambas tecnologías es especialmente relevante en el contexto español: el sistema eléctrico peninsular experimenta cada vez más horas con baja inercia, lo que ha llevado a REE a estudiar los requisitos de conexión para inversores GFM y a incluir esta problemática en la agenda regulatoria [2]. Para el generador fotovoltaico desarrollado en este TFG, esta distinción resulta relevante por su futura integración en VFlexP, que trabaja justamente con modelos orientados al análisis de estabilidad de la red.

2.6. Redes híbridas

Las redes híbridas son sistemas que juntan múltiples fuentes de energía renovable (normalmente la energía solar fotovoltaica y la eólica) con sistemas de almacenamiento en baterías y, en ocasiones, generadores convencionales de respaldo. Su objetivo es combinar las fortalezas de cada tecnología para obtener un suministro más fuerte y continuo que el que puede dar una sola fuente renovable por su cuenta.

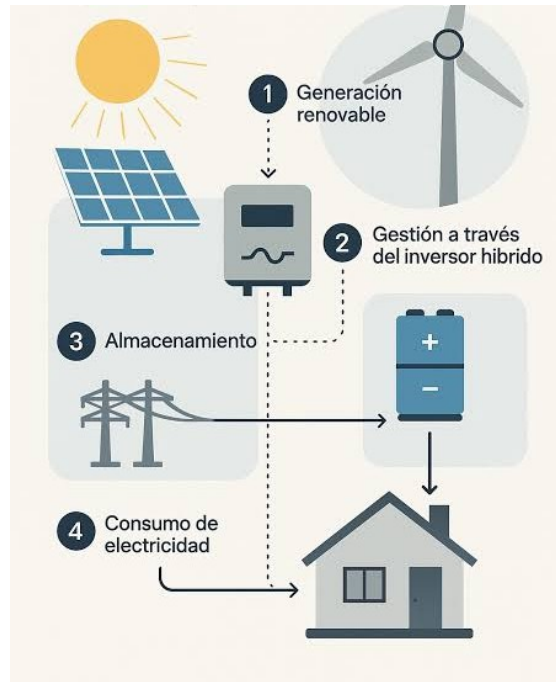


Figura 2.6: Arquitectura de una red híbrida solar fotovoltaica-eólica con almacenamiento en baterías [19].

De cara a la simulación, el reto de las redes híbridas es su escala: un sistema real puede tener cientos o miles de generadores, lo que hace imposible representarlos uno a uno en un entorno de simulación convencional. Es justo este problema el que VFlexP [6] resuelve mediante la vectorización de modelos, tal y como se describe en el Capítulo 2.9. La falta de un generador fotovoltaico en VFlexP, hace que no se puedan estudiar redes híbridas que incluyan generación solar, de ahí el objetivo de que este TFG.

2.7. Herramientas de simulación de sistemas fotovoltaicos

La simulación es una etapa muy importante en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos, ya que permite validar los modelos y los algoritmos de control antes de su implementación física. Existen diversas herramientas usadas para este fin, des-

de software comercial del sector energético, como PVsyst o SAM (System Advisor Model), hasta entornos de propósito general como MATLAB/Simulink. PVsyst y SAM son herramientas enfocadas en el dimensionamiento y la estimación de producción energética anual de instalaciones completas, pero no permiten controlar la dinámica interna de los convertidores o los algoritmos de control. MATLAB/Simulink, sin embargo, permite implementar los modelos a cualquier nivel de detalle a partir de las ecuaciones del sistema, lo que hace que sea un entorno muy usado en investigación y desarrollo de algoritmos de control para sistemas de potencia [20]. Por todo esto, se ha elegido para realizar este TFG.

2.8. MATLAB/Simulink: modelado mediante bloques elementales

Simulink es el entorno de modelado gráfico de MathWorks, integrado en MATLAB, que representa sistemas dinámicos mediante diagramas de bloques. Cada bloque encapsula una operación matemática elemental y las conexiones entre bloques representan el flujo de señales. Esto permite construir modelos de sistemas físicos de forma modular, clara y vinculada a las ecuaciones que los describen.

Para este TFG se han usado bloques elementales, la metodología que usa VFlexP. Este método consiste en implementar el modelo usando solo operaciones básicas como sumas, productos, integradores y funciones de transferencia, sin recurrir a bloques de alto nivel con comportamiento interno. Esto ayuda a la transparencia del modelo, al control total de los parámetros y la compatibilidad con el entorno VFlexP.

Para gestionar todos los bloques que hay en el diagrama, Simulink permite agrupar bloques en subsistemas y aplicarles una máscara, que crea una interfaz de parámetros editables desde el exterior. Las máscaras hacen más fácil la utilización de un mismo sistema para diferentes condiciones y el encapsulamiento del modelo, características muy importantes para la integración en VFlexP.

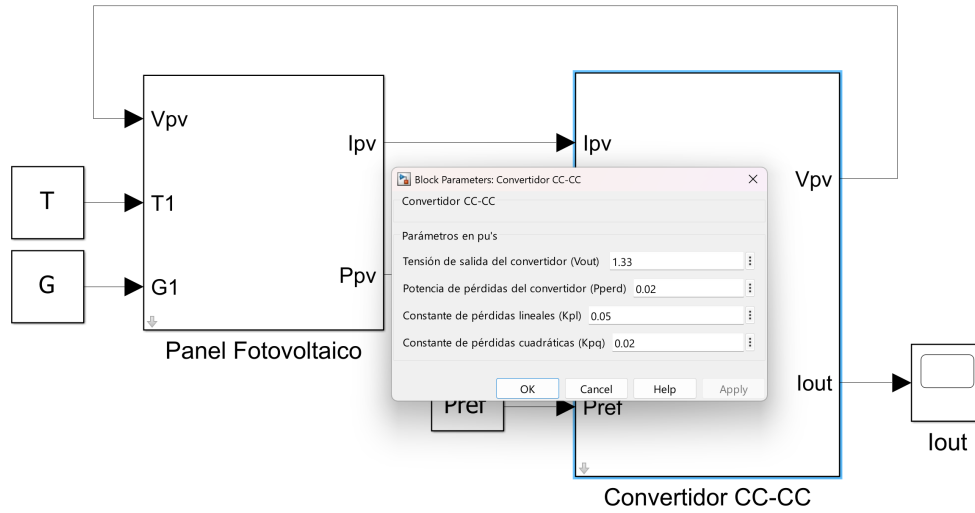


Figura 2.7: Modelo del sistema fotovoltaico implementado en Simulink con máscaras.

2.9. VFlexP: vectorización y análisis de gran escala

VFlexP es una herramienta de simulación de sistemas eléctricos desarrollada en el IIT de la Universidad Pontificia Comillas sobre MATLAB/Simulink [6]. Su característica principal es la vectorización de generadores, en vez de replicar N veces un bloque de Simulink para representar N generadores iguales, VFlexP usa un único bloque vectorial para realizar los cálculos de todos los generadores en una sola operación. Esto permite simular sistemas muy grandes, como la red eléctrica española completa, sin necesidad de hardware muy costoso.

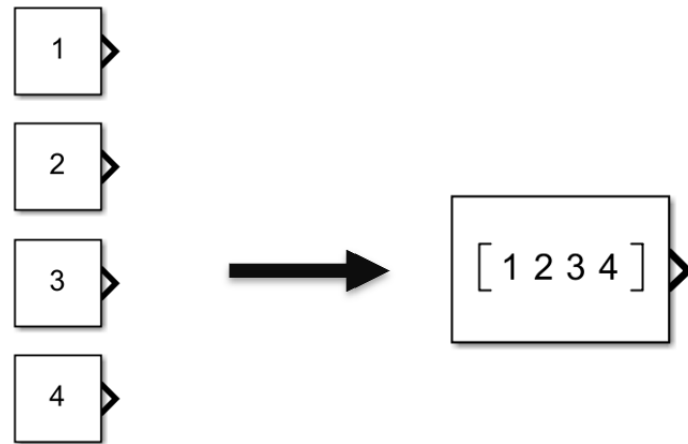


Figura 2.8: Ejemplo gráfico de la vectorización de VFlexP. Bloques individuales (izquierda) frente a un solo bloque vectorial (derecha).

VFlexP opera en el dominio de pequeña señal: los modelos representan la respuesta dinámica del sistema ante pequeñas perturbaciones en torno a un punto de operación, esto lo hace adecuado para el análisis de estabilidad de la red. Actualmente, VFlexP tiene modelos de generadores eólicos y síncronos de corriente alterna, pero le falta un modelo de generador fotovoltaico de corriente continua. El modelo desarrollado en este TFG sigue la metodología de VFlexP, bloques elementales, máscaras parametrizables y dinámicas expresadas en unidades por unidad (p.u.). Después de hará su integración en la plataforma para el estudio de redes híbridas que incluyan generación solar.

Capítulo 3

Modelo del Generador Fotovoltaico y del Convertidor CC-CC

Este capítulo desarrolla los dos bloques que forman el sistema completo: el generador fotovoltaico (panel solar) y el convertidor CC-CC con control MPPT. Ambos se implementan en MATLAB/Simulink siguiendo la filosofía de bloques elementales descrita en el Capítulo 2.8, sin dependencia de toolboxes externos ni bloques de alto nivel. La Figura 3.1 muestra la arquitectura general del modelo, en la que los dos subsistemas se comunican mediante: la intensidad I_{pv} y la potencia P_{pv} , calculadas por las ecuaciones del panel, y la realimentación de la tensión V_{pv} desde el convertidor hacia el panel.

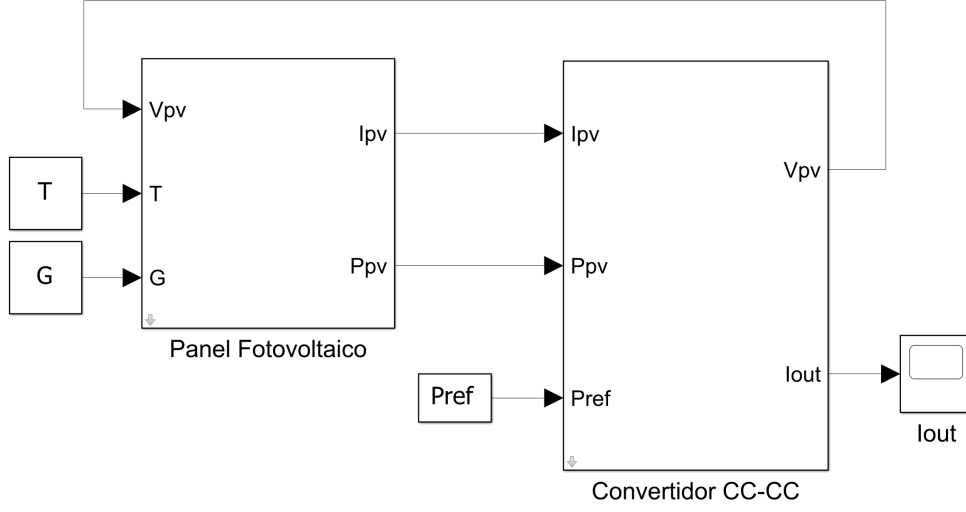


Figura 3.1: Arquitectura de nivel superior del modelo de Simulink. El bloque Panel Fotovoltaico recibe T , G y V_{pv} y entrega I_{pv} y P_{pv} al bloque Convertidor CC-CC, que calcula V_{pv} e I_{out} .

Las entradas del sistema son la irradiancia solar $G [W/m^2]$, la temperatura de célula $T [K]$ y la potencia de referencia P_{ref} (usada para el algoritmo MPPT). Las salidas son la corriente de salida del convertidor I_{out} y la tensión del panel V_{pv} , todas ellas expresadas en unidades por unidad (p.u.) respecto a los valores base del sistema.

3.1. Modelo matemático del generador fotovoltaico

3.1.1. Circuito equivalente de diodo simple

El modelo usado para el generador fotovoltaico es el circuito equivalente de diodo simple. Este modelo es muy utilizado en la literatura por su equilibrio entre precisión y complejidad, ya que es más sencillo que el modelo de diodo doble, pero aún así presenta una estimación muy fiable [20]. El circuito, representado en la Figura 3.2, tiene:

- Una fuente de corriente I_{ph} o I_{pv} (fotocorriente), proporcional a la irradiancia G .
- Un diodo ideal que modela la unión p-n de la célula.
- Una resistencia serie R_s , que representa las pérdidas en contactos, soldaduras y conexiones internas.
- Una resistencia en paralelo R_p (o shunt), que modela las corrientes de fuga internas de la célula.

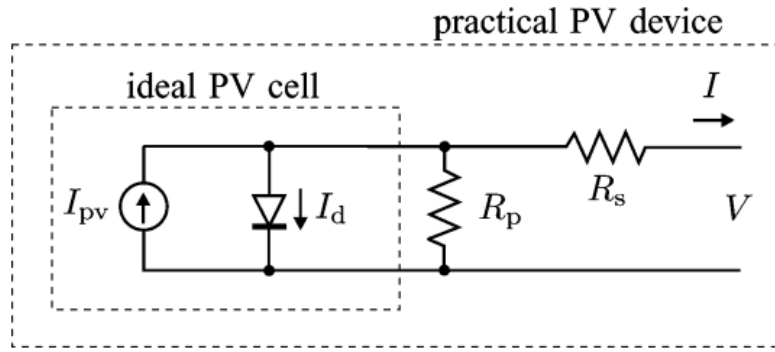


Figura 3.2: Circuito equivalente de diodo simple del generador fotovoltaico [20].

3.1.2. Ecuación característica implícita

Aplicando la ley de Kirchhoff de corrientes al circuito de la Figura 3.2, la corriente de salida del circuito sigue la ecuación:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (3.1)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (3.2)$$

donde V_T es la tensión térmica:

$$V_T = \frac{n N_s k T}{q} \quad (3.3)$$

siendo n el factor de idealidad, N_s el número de células en serie, k la constante de Boltzmann, T la temperatura de la célula en kelvin y q la carga del electrón.

La ecuación (3.2) es implícita en I_{pv} : no puede despejarse analíticamente, lo que hace necesario usar un método numérico para su resolución, tal como se detalla en la sección 3.3.

3.1.3. Fotocorriente

La fotocorriente I_{ph} depende linealmente de la irradiancia G y tiene una corrección por temperatura:

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i (T - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (3.4)$$

donde I_{sc} es la corriente de cortocircuito en condiciones STC ($T_{ref} = 298\text{ K}$, $G_{ref} = 1000\text{ W/m}^2$), K_i es el coeficiente de temperatura de la corriente, y T_{ref} y G_{ref} son la temperatura e irradiancia de referencia en STC .

3.1.4. Corriente de saturación

La corriente de saturación del diodo I_0 varía con la temperatura según la expresión:

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{E_g q}{n k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.5)$$

donde E_g es la energía de banda prohibida del semiconductor ($E_g = 1,12\text{ eV}$ para silicio) e $I_{0,ref}$ es la corriente de saturación de referencia en STC.

3.1.5. Determinación de R_s y R_p

Los parámetros R_s y R_p no aparecen en las hojas de especificaciones de los fabricantes y deben determinarse a partir de los datos eléctricos del panel. Se usa

el método iterativo propuesto por el siguiente artículo: [20], que ajusta R_s hasta que la potencia máxima del modelo coincida con la potencia máxima nominal del panel (P_{mpp}), calculando R_p analíticamente en cada iteración a partir de la condición de cortocircuito.

Para el panel de referencia KC200GT [21], los valores obtenidos mediante este procedimiento son $R_s = 0,221 \Omega$ y $R_p = 415,405 \Omega$, tal como se documenta en [20].

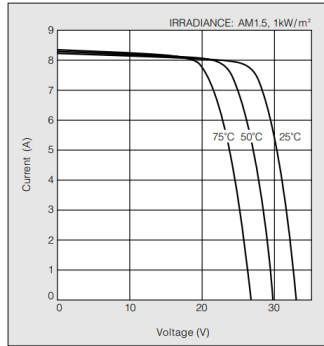
3.2. Panel de referencia: KC200GT

El panel empleado como referencia para la parametrización y validación el modelo es el Kyocera KC200GT, un módulo policristalino de silicio de 200 W de potencia nominal. Sus especificaciones eléctricas en condiciones STC se recogen en la Tabla 3.1.

Cuadro 3.1: Especificaciones eléctricas del panel KC200GT en STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_c = 25^\circ\text{C}$). Fuente: [21].

Parámetro	Descripción	Valor	Unidades
P_{mpp}	Potencia máxima	200	W
V_{mpp}	Tensión en el MPP	26,3	V
I_{mpp}	Corriente en el MPP	7,61	A
V_{oc}	Tensión de circuito abierto	32,9	V
I_{sc}	Corriente de cortocircuito	8,21	A
N_s	Células en serie	54	–
K_i	Coef. temperatura corriente	0,0032	A/K
K_v	Coef. temperatura tensión	–0,123	V/K

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various irradiance levels

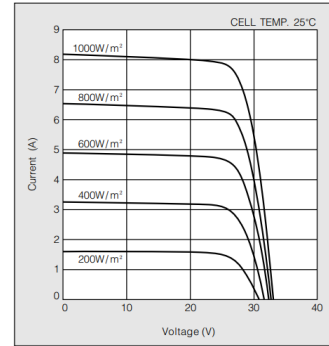


Figura 3.3: Curvas I - V y P - V del panel KC200GT según el fabricante [21].

Los parámetros del modelo de diodo simple derivados de estas especificaciones y usados en la simulación se recogen en la Tabla 3.2.

Cuadro 3.2: Parámetros del modelo de diodo simple para el KC200GT.

Parámetro	Descripción	Valor	Fuente
n	Factor de idealidad	1,3	[20]
$I_{0,ref}$	Corriente saturación ref.	10^{-8} A	[20]
E_g	Energía de banda prohibida	1,12 eV	[12]
R_s	Resistencia serie	0,221 Ω	[20]
R_p	Resistencia paralela	415,405 Ω	[20]
k	Constante de Boltzmann	$1,381 \times 10^{-23}$ J/K	–
q	Carga del electrón	$1,602 \times 10^{-19}$ C	–

3.3. Implementación Simulink del generador fotovoltaico

La ecuación (3.2) es implícita en I_{pv} , dado un valor de V_{pv} , no existe una expresión cerrada que permita calcular I_{pv} directamente. El subsistema Panel Fotovoltaico implementa la resolución numérica de dos formas complementarias y

paralelas, visibles en la Figura 3.4: la parte superior, que calcula el punto de operación a través de una MATLAB Function 3.3.1, y la parte inferior, que obtiene las curvas características $I-V$ y $P-V$ del panel, utilizando un Algebraic Constraint 3.3.2.

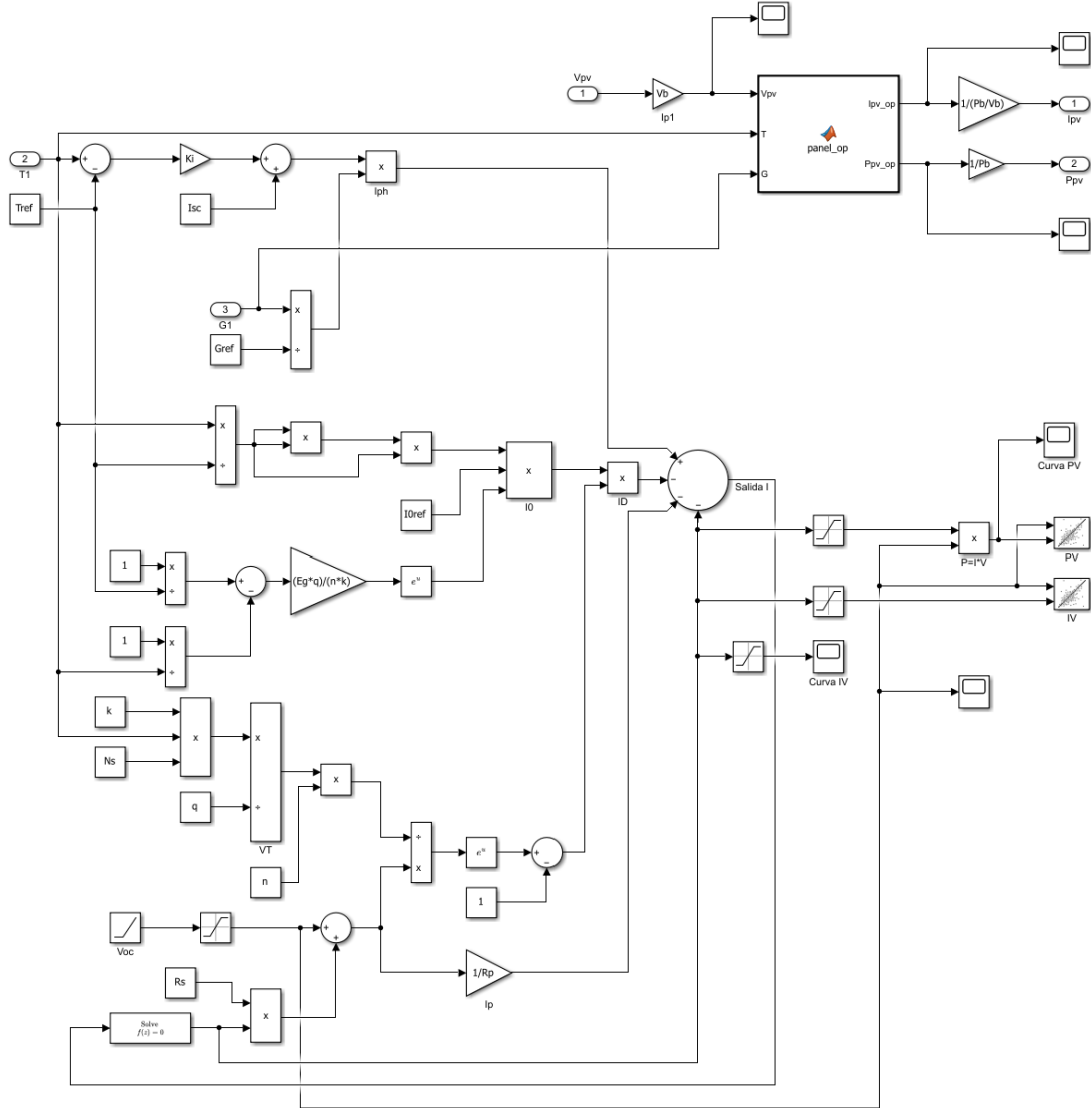


Figura 3.4: Subsistema Panel Fotovoltaico en Simulink. Parte superior: bloque panel_op (MATLAB Function) para el punto de operación. Parte inferior: lazo algebraico con Algebraic Constraint para las curvas $I-V$ y $P-V$.

Ambas partes tienen los mismos parámetros físicos del modelo (V_{oc} , I_{sc} , N_s ,

K_i , R_s , R_p , $I_{0,ref}$, n , E_g , k , q , G_{ref} y T_{ref}), introducidos a través de la máscara del sistema para poder modificarlos sin acceder al diagrama interno.

3.3.1. Cálculo del punto de operación: MATLAB Function

La parte superior calcula la corriente y potencia de operación del panel ($I_{pv,op}$, $P_{pv,op}$) a través de los valores de la temperatura T , la irradiancia G y la V_{pv} (realimentada desde el convertidor en p.u. y convertida a valor real multiplicando por la base V_b)

Dentro del bloque MATLAB Function se utiliza la función `fzero` para resolver la ecuación $f(I_{pv})$. Las salidas ($I_{pv,op}$, $P_{pv,op}$) salen en unidades reales y se convierten a p.u. mediante ganancias mostradas en el Figura 3.4:

$$I_{pv,p.u.} = \frac{I_{pv,op}}{P_b/V_b} \quad P_{pv,p.u.} = \frac{P_{pv,op}}{P_b} \quad (3.6)$$

El código del bloque MATLAB Function se muestra a continuación:

```

1 function [Ipv_op, Ppv_op] = panel_op(Vpv, T, G, Isc, Ns, n, Rs, Rp, Ki, Eg,
   ↪ I0ref)
2 k = 1.381e-23;
3 q = 1.602e-19;
4 Tref = 298;
5 Gref = 1000;
6
7 % Tension termica
8 Vt = (n * Ns * k * T) / q;
9
10 % Fotocorriente (ec. 3.4)
11 Iph = (Isc + Ki * (T - Tref)) * G / Gref;
12
13 % Corriente de saturacion (ec. 3.5)
14 I0 = I0ref * (T / Tref)^3 * exp((Eg * q) / (n * k) * (1/Tref - 1/T));
15
16 % Funcion f(I) = 0 --> ecuacion del panel
17 f = @(I) Iph - I0*(exp((Vpv + I*Rs)/Vt) - 1) - (Vpv + I*Rs)/Rp - I;
18

```

```

19 % Resolucion con fzero
20 Ipv_op = fzero(f, Iph);
21
22 % La corriente no puede ser negativa
23 if Ipv_op < 0, Ipv_op = 0; end
24
25 Ppv_op = Vpv * Ipv_op;
26 end

```

Listing 3.1: MATLAB Function del bloque panel_op: cálculo del punto de operación del panel FV.

La función recibe por puerto de entrada las variables (V_{pv} , T , G) y el resto de parámetros del modelo a través de la máscara del sistema.

3.3.2. Generación de curvas I - V y P - V : Algebraic Constraint

La parte inferior del subsistema genera las curvas características del panel, barriendo la tensión V_{pv} desde 0 hasta V_{oc} a través del bloque Ramp de Simulink. Este bloque genera una rampa de pendiente unitaria de manera que cada segundo de simulación corresponde a un voltio. Luego se encuentra el bloque Saturation, el cual limita el rango de tensión hasta V_{oc} , de manera que, si la simulación supera los V_{oc} s (32.9 s en el caso de este panel), la salida se mantiene constante en V_{oc} y la curva queda bien dibujada.

La corriente correspondiente a cada punto del barrido se obtiene resolviendo la ecuación implícita (3.2) mediante un bloque Algebraic Constraint (Solve $f(z) = 0$), que implementa la misma función residual (3.7) utilizando los mismos parámetros que la bloque panel_op:

$$f(I_{pv}) = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} - I_{pv} = 0 \quad (3.7)$$

El bloque Algebraic Constraint recibe como entrada la señal $f(I_{pv})$ (calculada a

partir del propio I_{pv} que el bloque proporciona como salida) y va iterando I_{pv} hasta que $f = 0$. Esto crea un lazo algebraico en el diagrama de bloques, que Simulink resuelve en cada paso de simulación sin necesidad de un bloque de retardo ni de código externo.

La potencia se calcula como $P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}$ y ambas señales se envían a dos bloques XY Graph de Simulink, que representan las curvas I - V y P - V durante la simulación. Estas curvas permiten verificar que el modelo genera correctamente los valores nominales del fabricante: V_{mpp} , I_{mpp} y P_{mpp} , tal como se analiza en el Capítulo 4.

3.3.3. Estructura de bloques

La Figura 3.4 muestra el diagrama de bloques interno del subsistema Panel Fotovoltaico. El modelo se divide en tres secciones funcionales:

1. **Cálculo de I_{ph}** (parte superior): implementa la ecuación (3.4) mediante bloques de suma, producto y las constantes K_i , I_{sc} , T_{ref} y G_{ref} .
2. **Cálculo de I_0 y V_T** (parte central): implementa las ecuaciones (3.5) y (3.3). La corriente I_0 se calcula mediante sumas, productos y exponenciales de las constantes E_g , q , n y k . La tensión V_T se calcula como el producto $n \cdot N_s \cdot k \cdot T / q$.
3. **Lazo algebraico para I_{pv}** (parte inferior): Aquí actúa el bloque Algebraic Constraint ya mencionado, que devuelve I_{pv} .

3.3.4. Máscara del subsistema

El subsistema Panel Fotovoltaico tiene una máscara que permite al usuario introducir los parámetros del modelo sin necesidad de acceder al diagrama de bloques interno. Los campos de la máscara incluyen todos los parámetros de las Tablas 3.1 y 3.2, así como los valores base V_b y P_b . Esta interfaz permite reutilizar el subsistema para cualquier panel fotovoltaico cambiando únicamente los valores en la máscara, sin modificar ningún bloque interno.

Block Parameters: Panel Fotovoltaico

Panel Fotovoltaico

PARÁMETROS

- Bases
 - Base de tensión (Vb) 30
 - Base de potencia (Pb) 200
- Parámetros de la hoja de datos del panel solar
 - Tensión en vacío (Voc) [V] 32.9
 - Corriente de cortocircuito (Isc) [A] 8.21
 - Número de celdas en serie (Ns) 54
 - Coefficiente de temperatura de Isc (Ki) [A/K] 0.0032
 - Coefficiente de temperatura de Voc (Kv) [A/K] -0.123
- Otros parámetros
 - Resistencia en serie del modelo equivalente (Rs) [Ω] 0.221
 - Resistencia en paralelo del modelo equivalente (Rp) [Ω] 415
 - Corriente de saturación de referencia (I0_ref) [A] 10e-8
 - Factor de idealidad (n) 1.3
 - Energía de banda prohibida (Eg) [eV] 1.12
- Constantes
 - Constante de Boltzmann (k) [J/K] 1.381e-23
 - Carga del electrón (q) [C] 1.602e-19
 - Irradiancia referencia (Gref) [W/m²] 1000
 - Temperatura referencia (Tref) [K] 298

OK Cancel Help Apply

Figura 3.5: Ventana de parámetros de la máscara del Panel Fotovoltaico.

3.4. Modelo del convertidor CC-CC

3.4.1. Arquitectura del subsistema

El subsistema Convertidor CC-CC recibe tres señales de entrada: la corriente I_{pv} y la potencia P_{pv} (procedentes del panel), y la potencia de referencia P_{ref} . Sus salidas son la tensión del panel V_{pv} , realimentada hacia el panel, y la corriente de salida del convertidor I_{out} . Internamente, el subsistema tiene tres bloques funcionales:

1. El algoritmo MPPT P&O, que calcula el ciclo de trabajo D .
2. La función de transferencia $V_{ref} \rightarrow V_{pv}$, que representa la dinámica del convertidor entre el ciclo de trabajo y la tensión del panel.
3. La función de transferencia $I_{pv} \rightarrow I_{out}$, que modela la conversión de corriente incluyendo las pérdidas del sistema.

La Figura 3.6 muestra el diagrama de bloques convertidor CC-CC.

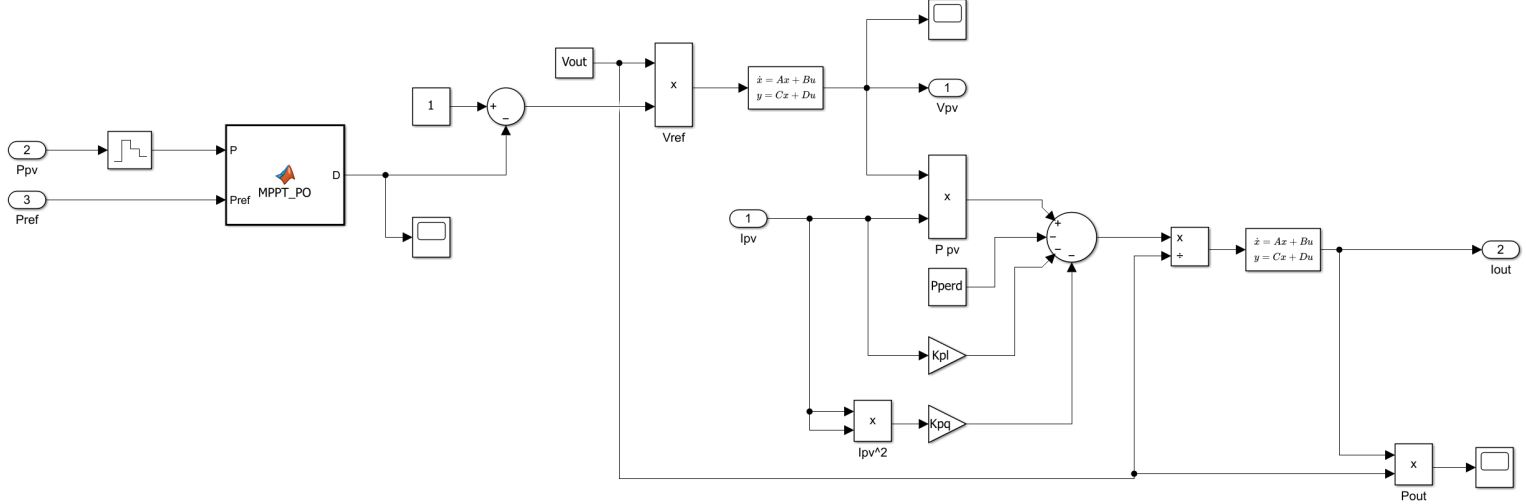


Figura 3.6: Diagrama de bloques interno del subsistema Convertidor CC-CC. Se distinguen el bloque MPPT P&O (izquierda), la cadena $D \rightarrow V_{pv}$ (centro) y la cadena $I_{pv} \rightarrow I_{out}$ con modelo de pérdidas (derecha).

Las funciones de transferencia de segundo orden del convertidor se implementan mediante bloques State-Space. Este bloque permite poner condiciones iniciales al estado interno del sistema, de modo que la tensión del panel y la corriente de salida no parten de cero, sino de un punto coherente con el ciclo de trabajo inicial ($D = 0,3$). De esta forma, la potencia del panel empieza en torno a 0,8 p.u. y el algoritmo MPPT lleva el sistema hacia el punto de máxima potencia, modelando un arranque más realista que el obtenido con estados iniciales nulos.

3.4.2. Función de transferencia $D \rightarrow V_{pv}$

El ciclo de trabajo D generado por el MPPT se emplea para calcular la tensión de referencia del panel:

$$V_{ref} = V_{out} (1 - D) \quad (3.8)$$

donde V_{out} es la tensión de salida del convertidor, que se considera constante con un valor fijado por el usuario en la máscara. La relación (3.8) deriva de la ecuación de conversión del convertidor ideal ($V_{out} = V_{pv}/(1 - D)$). El valor $D = 0$ produce $V_{pv} = V_{out}$ (circuito abierto) y $D = 1$ produce $V_{pv} = 0$ (cortocircuito), lo cual es físicamente consistente. La dinámica del convertidor entre V_{ref} y V_{pv} se modela mediante una función de transferencia de segundo orden:

$$G_V(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.9)$$

$$G_V(s) = \frac{400}{s^2 + 28s + 400} \quad (3.10)$$

Los parámetros ζ y ω_n se identifican mediante un ensayo de escalón. Se aplica un escalón en D y se ajustan ζ y ω_n hasta tener un tiempo de establecimiento y una sobreoscilación aceptables. Se selecciona $\zeta = 0,7$ como coeficiente de amortiguamiento por ser el valor que ofrece un buen equilibrio entre rapidez y oscilación [22], y $\omega_n = 20 \text{ rad/s}$, lo que produce un tiempo de establecimiento $t_s \approx 4/(\zeta \omega_n) \approx 0,29 \text{ s}$.

3.4.3. Función de transferencia $I_{pv} \rightarrow I_{out}$ con modelo de pérdidas

La corriente de salida del convertidor I_{out} se obtiene a partir de I_{pv} teniendo en cuenta las pérdidas del sistema. El modelo considera tres tipos de pérdidas:

- **Pérdidas constantes** P_{perd} : pérdidas fijas independientes de la corriente (pérdidas en el núcleo del inductor, circuitos de control, etc.).
- **Pérdidas lineales** K_{pl} : proporcionales a la potencia del panel P_{pv} (pérdidas resistivas lineales).

- **Pérdidas cuadráticas** K_{pq} : proporcionales al cuadrado de la corriente I_{pv}^2 (pérdidas en resistencias de conducción de los semiconductores).

La potencia entregada a la salida del convertidor es:

$$P_{out} = P_{pv} - P_{perd} - K_{pl} P_{pv} - K_{pq} I_{pv}^2 \quad (3.11)$$

y la corriente de salida de referencia se obtiene como $I_{out,ref} = P_{out}/V_{out}$. A este valor se le aplica una segunda función de transferencia de segundo orden con los mismos parámetros ζ y ω_n que la anterior para reproducir la dinámica:

$$G_I(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.12)$$

$$G_I(s) = \frac{400}{s^2 + 28s + 400} \quad (3.13)$$

3.5. Algoritmo MPPT: Perturb & Observe

3.5.1. Descripción del algoritmo

El algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia⁴ es una versión modificada del método Perturb & Observe (P&O) [23], ya que este incorpora una señal de referencia de potencia P_{ref} . Esto es diferente del P&O clásico, que solo maximiza la potencia extraída, ya que este usa una potencia deseada por el usuario. El algoritmo modificado opera en dos modos:

- **Modo de seguimiento MPPT** ($P < P_{ref}$): el sistema aún no ha alcanzado la potencia de referencia. El algoritmo aplica la lógica clásica de P&O: compara la potencia actual P con la potencia en el paso anterior P_{old} y mantiene o invierte la dirección de perturbación de D .
- **Modo de limitación de potencia** ($P \geq P_{ref}$): el sistema ha alcanzado o

superado la referencia. El algoritmo ajusta D para mantener P igual a P_{ref} , actuando como un regulador de potencia.

El ciclo de trabajo D se satura entre 0,05 y 0,95 para evitar condiciones extremas de operación del convertidor. Se empieza con un valor genérico de $D_0 = 0,30$.

3.5.2. Implementación en MATLAB Function

El algoritmo está dentro del bloque MATLAB Function del subsistema Convertidor CC-CC. Las variables D , P_{old} y la dirección de perturbación dir se declaran como variables persistent, lo que hace que conserven su valor entre llamadas sucesivas de la función sin necesidad de bloques Unit Delay externos. El bloque Zero-Order Hold de la Figura 3.6 controla la frecuencia de actualización del algoritmo: el MPPT recalcula D en cada pulso, lo que fija el período de perturbación y evita que el algoritmo actualice D en cada iteración (que puede ser mucho más rápido).

3.5.3. Código del algoritmo

A continuación se muestra el código completo de la función MPPT_PO.

```

1 function D = MPPT_PO(P, Pref)
2 persistent Dold
3 persistent Pold
4 persistent dir
5 if isempty(Dold)
6     Dold = 0.30;
7     Pold = P;
8     dir = 1;
9 end
10 step = 0.001;
11 if P < Pref
12     % Modo MPPT: búsqueda del punto de máxima potencia
13     if P > Pold
14         Dold = Dold + dir*step;
15     else

```

```

16         dir = -dir;
17         Dold = Dold + dir*step;
18     end
19 else
20     % Modo de limitacion: hacer que P valga Pref
21     error = Pref - P;
22     if error
23         Dold = Dold + step;
24     else
25         Dold = Dold - step;
26     end
27 end
28 % Saturacion del ciclo de trabajo
29 Dold = max(0.05, min(0.95, Dold));
30 Pold = P;
31 D    = Dold;

```

Listing 3.2: Función MPPT_PO: P&O

La Figura 3.7 muestra el diagrama de flujo del algoritmo, donde se ven los dos modos de operación.

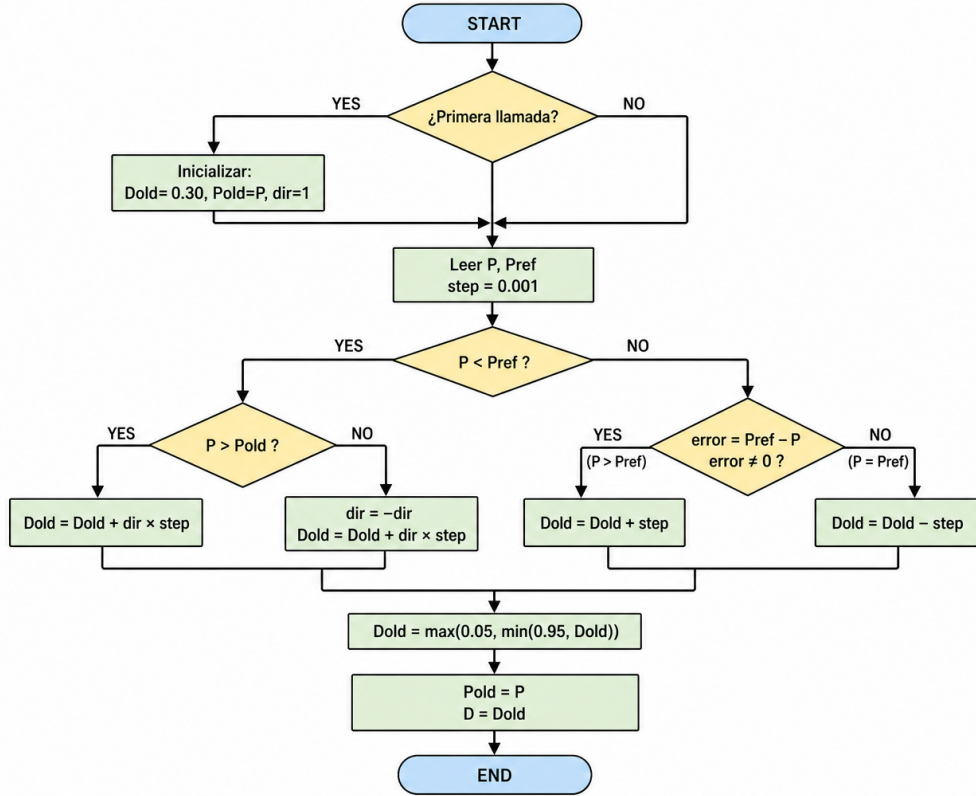


Figura 3.7: Diagrama de flujo del algoritmo MPPT P&O.

El uso de P_{ref} permite la función de recorte de potencia. Es decir, cuando la potencia disponible del panel supera la demanda del sistema ($P > P_{ref}$), el convertidor no opera en el MPP sino que limita la potencia al valor de referencia. Esto es muy importante para la integración en VFlexP, donde el balance de potencias de la red puede necesitar que un generador opere por debajo de su máxima capacidad.

3.5.4. Máscara del subsistema Convertidor CC-CC

Al igual que el subsistema del panel, el bloque Convertidor CC-CC tiene una máscara que permite editar los parámetros del modelo sin necesidad de acceder al diagrama de bloques interno. La Figura 3.8 muestra la ventana de la máscara. Los parámetros de la máscara son los mencionados en la sección 3.4.3, todos en p.u.. Este diseño hace que el modelo sea adaptable a diferentes pérdidas o distintas

tensiones de salida, cambiando únicamente los valores en la máscara.

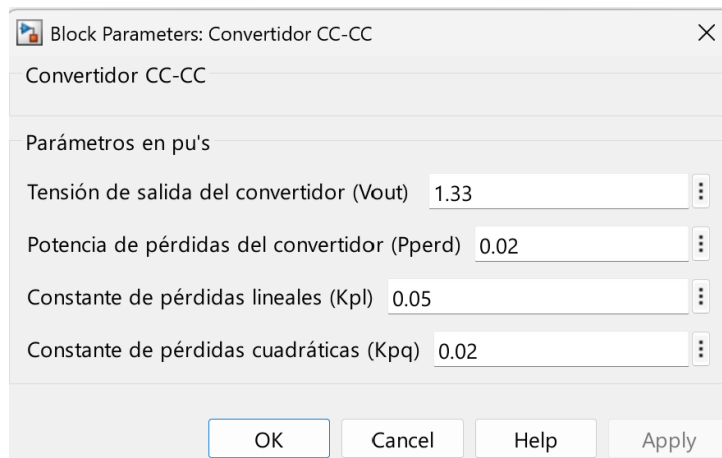


Figura 3.8: Ventana de parámetros de la máscara del Convertidor CC-CC.

Capítulo 4

Resultados y Validación del Sistema

Este capítulo presenta los resultados obtenidos con el modelo desarrollado en el Capítulo 3 y tiene tres partes. Primero, las curvas características del panel (I - V y P - V) se comparan con los datos de la hoja de especificaciones del KC200GT [21] para distintos valores de irradiancia y temperatura. Siguiente, la respuesta dinámica del sistema completo (panel más convertidor con control MPPT) se analiza mediante las formas de onda de las señales principales. Finalmente, se realiza un balance de potencias que tiene en cuenta las pérdidas del convertidor y verifica la conservación de energía en el sistema.

Todos los resultados se expresan en unidades por unidad (p.u.) respecto a los valores base $P_b = 200\text{ W}$ y $V_b = 30\text{ V}$, a no ser que se indique lo contrario. Los valores en reales se pueden volver a calcular haciendo las conversiones inversas a las ecuaciones (3.6).

4.1. Curvas características del generador fotovoltaico

Las curvas I - V y P - V describen el comportamiento del generador fotovoltaico, muestran en una gráfica toda la información sobre cómo actúa el panel ante una irradiancia y temperatura dadas. Es necesario que dichas curvas estén bien

reproducidas, para demostrar la validez del modelo.

Las curvas se obtienen mediante la parte inferior del subsistema Panel Fotovoltaico descrita en la Sección 3.3.2. Un bloque Ramp barre la tensión de 0 a V_{oc} durante los 32,9 s de simulación, y el bloque Algebraic Constraint resuelve la ecuación implícita (3.2) en cada instante, calculando las variables (V_{pv}, I_{pv}) . La potencia se calcula como $P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}$ para después representar las curvas

4.1.1. Validación en condiciones STC

Las condiciones estándar de medida (STC, Standard Test Conditions) son el punto de referencia típico para comparar modelos con los datos del fabricante: irradiancia $G = 1000 \text{ W/m}^2$ y temperatura de célula $T = 25^\circ\text{C}$ (298 K). El panel KC200GT tiene en STC los valores nominales recogidos en la Tabla 4.1.

Cuadro 4.1: Valores nominales del panel KC200GT en STC según el fabricante [21] y resultados del modelo.

Magnitud	Símbolo	Fabricante	Modelo	Error [%]
Potencia máxima	P_{mpp}	200 W	199,8 W	$\approx 0,00$
Tensión en el MPP	V_{mpp}	26,30 V	26,32 V	$\approx 0,00$
Corriente en el MPP	I_{mpp}	7,61 A	7,59 A	$\approx 0,00$
Tensión de c.a.	V_{oc}	32,90 V	32,85 V	$\approx 0,00$
Corriente de c.c.	I_{sc}	8,21 A	8,21 A	0,00

El modelo reproduce exactamente los cinco puntos de la hoja de especificaciones, lo que confirma que el método del artículo [20] para determinar R_s y R_p , es correcto y que la implementación en Simulink es fiel al modelo matemático. Las curvas I - V y P - V en STC se muestran en la Figura 4.1.

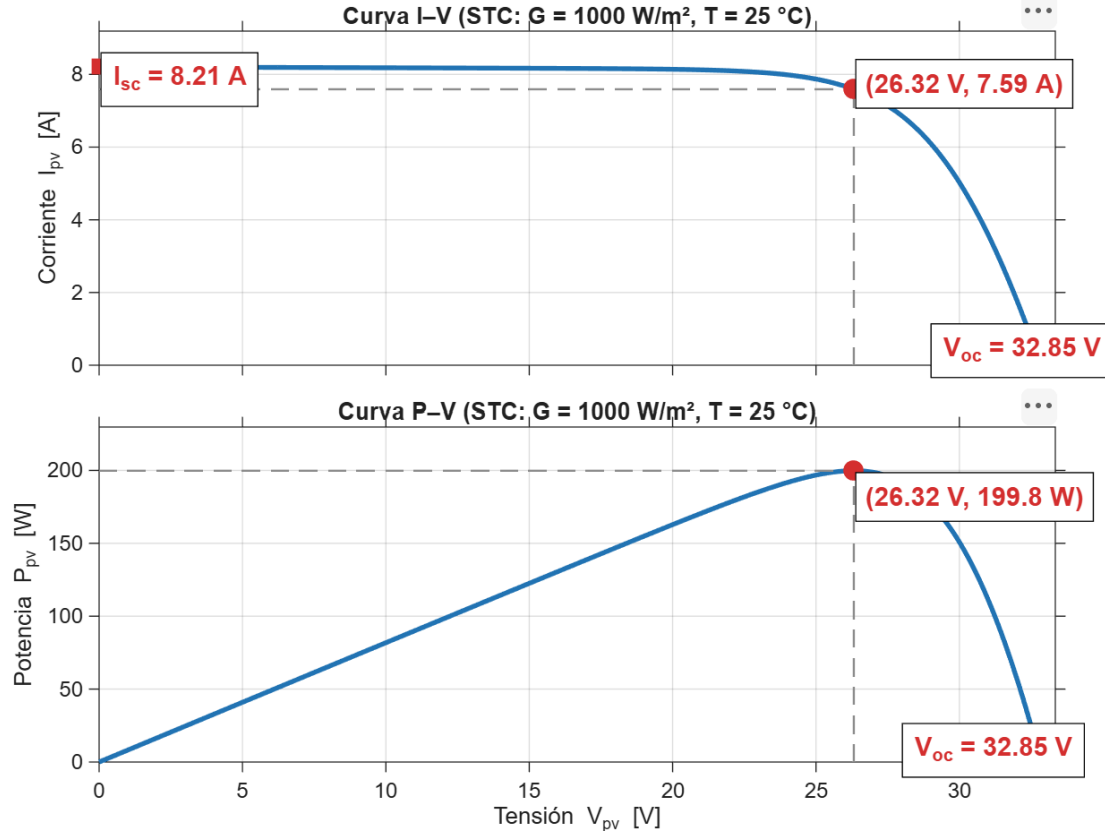


Figura 4.1: Curvas I - V (arriba) y P - V (abajo) del modelo en condiciones STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). El punto de máxima potencia (MPP) está marcado.

La forma de la curva I - V es la esperada para un módulo fotovoltaico de silicio: corriente prácticamente constante en la zona de baja tensión (zona de fuente de corriente), caída pronunciada cerca de V_{oc} y punto de cortocircuito bien definido en $V = 0$. La curva P - V presenta un máximo claro en $V_{mpp} = 26,32 \text{ V}$, que es el punto que el algoritmo MPPT busca.

4.1.2. Influencia de la irradiancia

La irradiancia solar es el factor de más afecta a la corriente fotogenerada I_{ph} y, por tanto, a la potencia de salida del panel. Según la ecuación (3.4), I_{ph} es proporcional a G , por lo que una reducción del 50 % en la irradiancia genera una reducción del 50 % en la corriente de cortocircuito.

La Figura 4.2 muestra las curvas I - V y P - V del modelo para cinco valores de irradiancia entre 200 y 1000 W/m^2 a temperatura constante $T = 25^\circ C$.

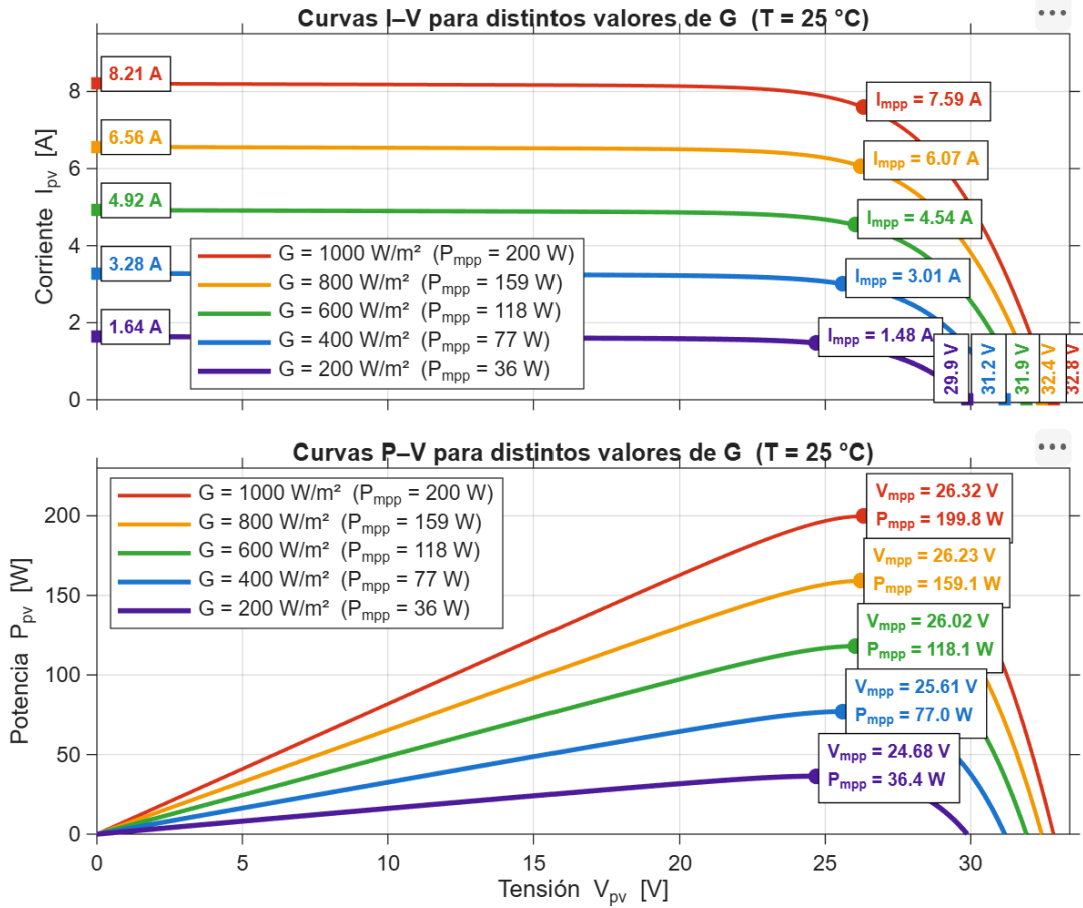


Figura 4.2: Curvas I - V (arriba) y P - V (abajo) para $G \in \{200, 400, 600, 800, 1000\} W/m^2$ a $T = 25^\circ C$. Los puntos marcados son los MPP de cada curva.

Se observan los comportamientos esperados teóricamente:

- La **corriente de cortocircuito** I_{sc} varía prácticamente de forma lineal con G , a $200 W/m^2$ se obtiene $I_{sc} \approx 1,64 A$ frente a los $8,21 A$ en STC, una relación muy próxima a 1:5.
- La **tensión de circuito abierto** V_{oc} varía de forma logarítmica con G : el

descenso es mucho más moderado que el de la corriente (de $32,9\text{ V}$ en STC a aproximadamente $29,9\text{ V}$ a 200 W/m^2).

- La **potencia máxima** P_{mpp} disminuye al reducirse la irradiancia. A 500 W/m^2 se obtiene más o menos la mitad de la potencia nominal, y a 200 W/m^2 la potencia disponible es inferior al 10 % de la nominal.
- La **posición del MPP** se desplaza hacia tensiones un poco menores al disminuir G , lo que justifica la necesidad de un algoritmo MPPT que siga ese desplazamiento.

Cuadro 4.2: Puntos de máxima potencia del modelo para distintos niveles de irradiancia ($T = 25^\circ\text{C}$).

$G [\text{W/m}^2]$	$I_{sc} [\text{A}]$	$V_{oc} [\text{V}]$	$V_{mpp} [\text{V}]$	$I_{mpp} [\text{A}]$	$P_{mpp} [\text{W}]$
1000	8,21	32,8	26,32	7,59	199,8
800	6,56	32,4	26,23	6,07	159,1
600	4,92	31,9	26,02	4,54	118,1
400	3,28	31,2	25,61	3,01	77,0
200	1,64	29,9	24,68	1,48	36,4

4.1.3. Influencia de la temperatura

La temperatura de la célula afecta sobre todo a la tensión de circuito abierto V_{oc} , que decrece con el coeficiente $K_v = -0,123\text{ V/K}$ (véase Tabla 3.1). El efecto sobre la corriente de cortocircuito es mucho menor, con un coeficiente positivo $K_i = 0,0032\text{ A/K}$.

La Figura 4.3 muestra las curvas para cuatro temperaturas entre 15°C y 45°C a irradiancia constante $G = 1000\text{ W/m}^2$.

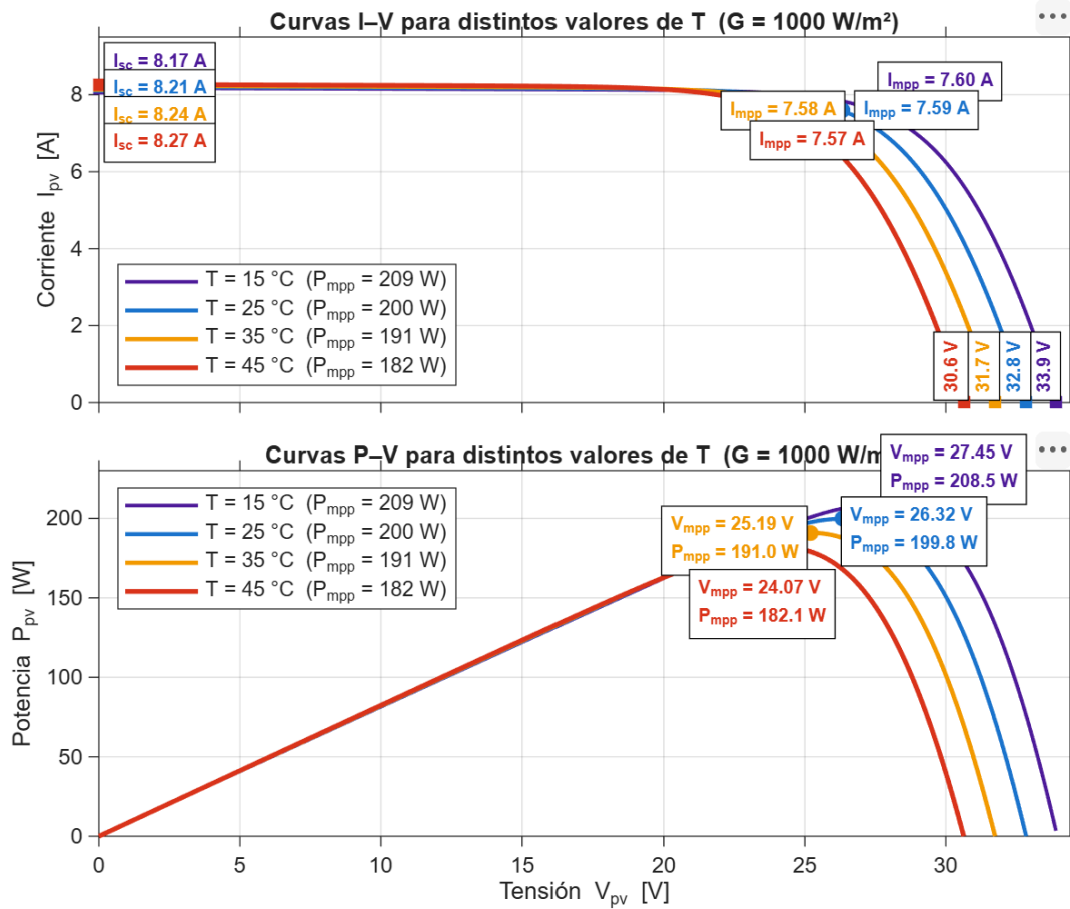


Figura 4.3: Curvas I - V (arriba) y P - V (abajo) para $T\{15, 25, 35, 45\}$ °C a $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

Se observa que:

- La **tensión de circuito abierto** disminuye con la temperatura, entre 15 °C y 45 °C, el descenso es de aproximadamente $30 \times 0,123 \approx 3,7 \text{ V}$.
- La **corriente de cortocircuito** disminuye muy poco con la temperatura (coeficiente positivo K_i), es casi imperceptible.
- La **potencia máxima** disminuye al aumentar la temperatura. A 45 °C la potencia disponible es un 10 % inferior a la de 15 °C.

- El MPP se desplaza a tensiones menores al aumentar T , lo que de nuevo hace necesaria la actuación del seguimiento del MPPT.

Cuadro 4.3: Puntos de máxima potencia del modelo para distintas temperaturas ($G = 1000 \text{ W/m}^2$).

T [°C]	V_{oc} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	P_{mpp} [W]
15	33,9	27,5	7,6	208,5
25	32,9	26,3	7,59	199,8
35	31,7	25,2	7,58	191,0
45	30,6	24,1	7,57	182,1

4.2. Respuesta dinámica del sistema con control MPPT

Una vez validado el modelo estático del panel, se analiza la evolución dinámica del sistema completo. El objetivo del algoritmo MPPT P&O (descrito en la sección 3.5), es hacer converger el ciclo de trabajo D hacia el valor que maximiza la potencia de salida del panel, o llevarla hacia el valor de la potencia de referencia P_{ref} .

La simulación se ejecuta con el mismo tiempo de ejecución que el barrido de curvas (32,9 s), aunque para el análisis dinámico solo interesa la fase transitoria inicial en la que el MPPT busca el óptimo. Las condiciones de partida son STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ °C}$) y el ciclo de trabajo inicial es $D_0 = 0,30$, valor fijado en la inicialización de la función MPPT_PO (Código 3.2).

4.2.1. Señales del sistema durante la convergencia

La Figura 4.4 muestra la evolución temporal de las cinco señales principales del sistema durante la convergencia al MPP: tensión del panel V_{pv} , corriente del

panel I_{pv} , potencia del panel P_{pv} , corriente de salida del convertidor I_{out} y ciclo de trabajo D .

Respuesta dinamica del sistema con control MPPT (STC, Pref = 1.0 p.u.)

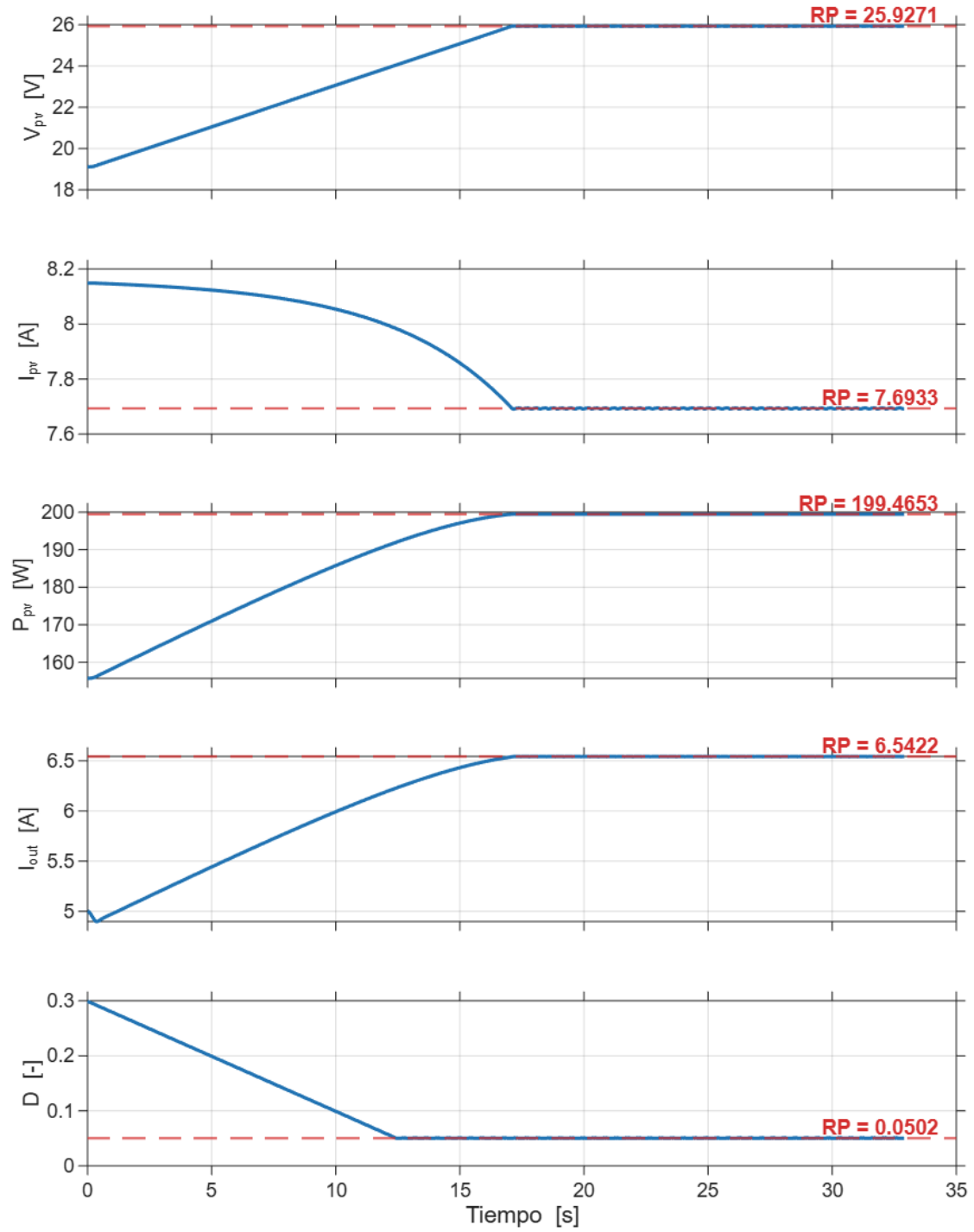


Figura 4.4: Respuesta dinámica del sistema en condiciones STC con $P_{ref} = 1,0 p.u.$

Se observan dos fases en la respuesta:

1. **Fase de búsqueda:** el algoritmo MPPT perturba D en pasos de $\Delta D = 0,001$ por iteración hasta alcanzar el punto del MPP. Durante esta fase, todas las señales evolucionan suavemente hasta su régimen permanente. La velocidad de convergencia depende de la frecuencia de actualización del MPPT y del paso ΔD .
2. **Fase de oscilación en régimen permanente:** una vez alcanzado el MPP, el algoritmo no se detiene exactamente en él (es un extremo de la curva P - V), y oscila alrededor de este con amplitud $\pm \Delta D = \pm 0,001$. Esta oscilación es propia del método P&O y produce una pequeña ondulación en P_{pv} , V_{pv} e I_{pv} en torno a sus valores de régimen.

Análisis de la tensión V_{pv}

La tensión del panel converge desde su valor inicial (dado por $D_0 = 0,30$, $V_{pv,0} = V_{out}(1 - D_0) = V_{out} \cdot 0,70$) hasta $V_{mpp} = 25,9 V$ ($0,863 p.u.$). La dinámica esta regida por la función de transferencia $G_V(s)$ (3.10), cuya respuesta de segundo orden con $\zeta = 0,7$ hace que la transición sea suave sin mucha sobreoscilación.

Análisis de la corriente I_{pv}

La corriente del panel sigue la evolución de V_{pv} a través de la curva I - V . Mientras V_{pv} aumenta desde su valor inicial hasta V_{mpp} , I_{pv} decrece un poco hasta alcanzar $I_{mpp} = 7,69 A$ ($1,153 p.u.$). El comportamiento es consistente con la forma de la curva I - V en la zona próxima al MPP, donde la corriente es casi constante.

Análisis de la potencia P_{pv}

La potencia del panel converge hasta $P_{mpp} = 199,5 W$ ($0,997 p.u.$). La curva de convergencia sigue la curva P - V del panel de forma dinámica. En la fase de búsqueda, una perturbación de D genera un pequeño escalón en P_{pv} cuyo signo indica al algoritmo la dirección correcta del MPP.

Análisis de la corriente de salida I_{out}

La corriente de salida del convertidor I_{out} converge hacia su valor de régimen permanente determinado por el balance de potencias (Sección 4.3). La función de transferencia $G_I(s)$ (3.13) tiene la misma dinámica de segundo orden que $G_V(s)$, por ello, I_{out} tiene un tiempo de establecimiento similar al de V_{pv} .

Análisis del ciclo de trabajo D

La Figura 4.5 muestra la evolución del ciclo de trabajo D por separado para ver mejor el proceso de búsqueda del MPPT. El valor final converge hacia $D = 1 - V_{mpp}/V_{out}$, que sale de igualar $V_{ref} = V_{mpp}$ y según la relación (3.8).

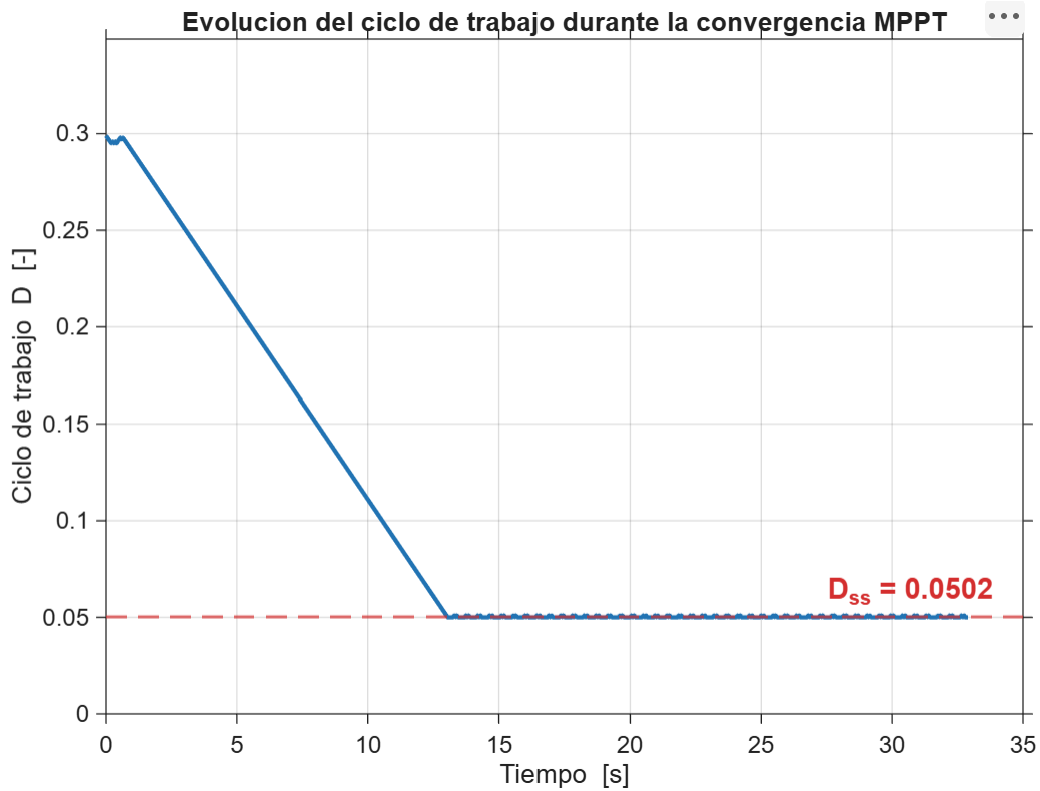


Figura 4.5: Evolución temporal del ciclo de trabajo D durante la convergencia al MPP. Se ven los escalones de perturbación ($\Delta D = 0,001$) y la oscilación en régimen permanente.

4.2.2. Influencia de la referencia de potencia P_{ref}

La diferencia entre el algoritmo usado en este proyecto y el P&O clásico, es el uso de la señal de referencia P_{ref} . Esta señal permite operar el sistema en dos modos distintos (Sección 3.5):

La Figura 4.6 compara la respuesta de P_{pv} para tres valores de P_{ref} :

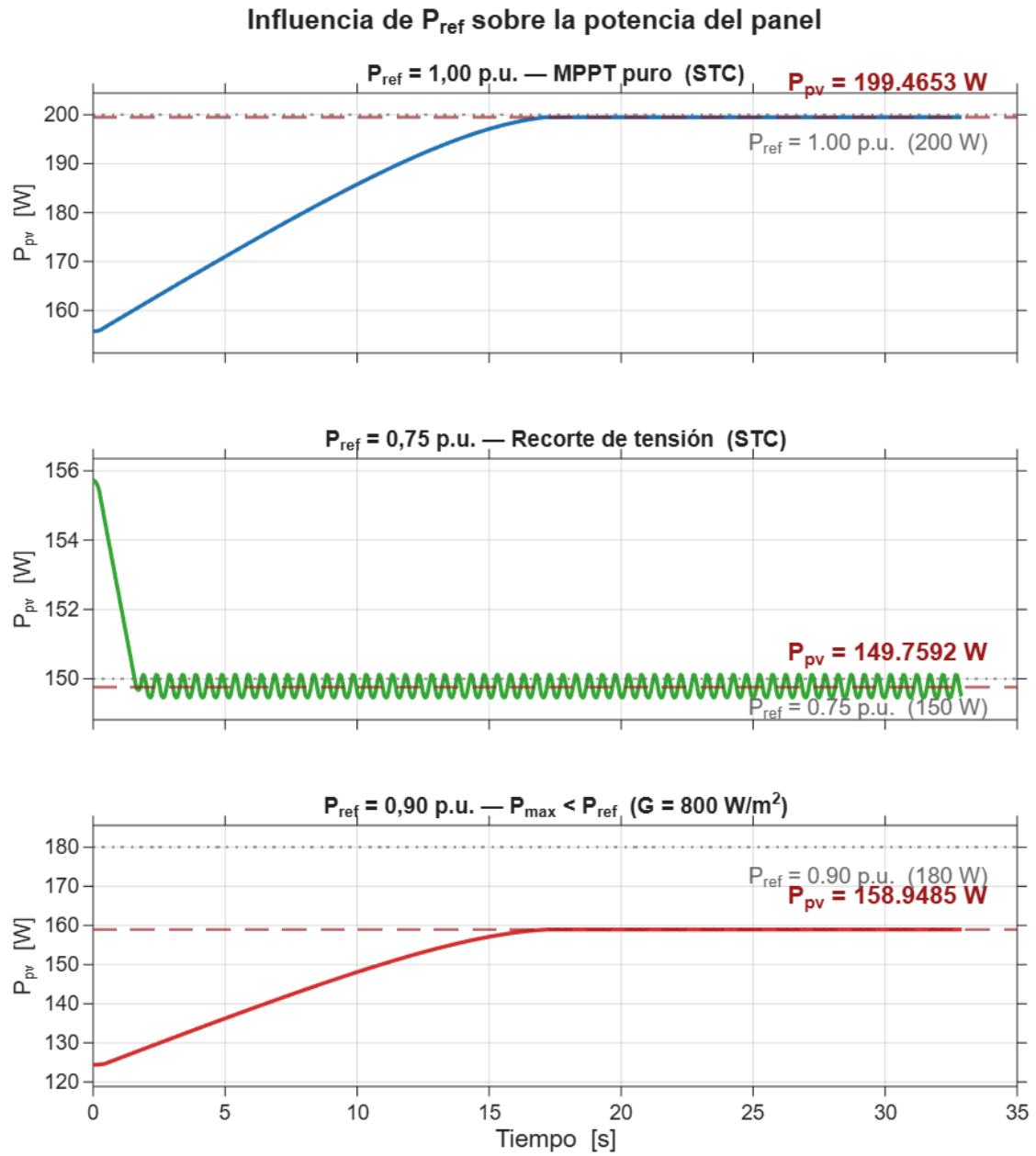


Figura 4.6: Comparación del régimen permanente de P_{pv} para tres valores de P_{ref} : $1,0$ p.u. (MPPT puro), $0,75$ p.u. (Recorte de tensión) y $0,9$ p.u. (con $G = 800$ W/m² $P_{pv} < 1,0$ p.u.).

Las pequeñas oscilaciones que se ven en la Figura 4.6, se deben a la acción del algoritmo MPPT, que se queda oscilando en los valores óptimos. En las gráficas

de $P_{ref} = 1,0 p.u.$ y $P_{ref} = 0,9 p.u.$ (con $G = 800 W/m^2$) no se aprecian dichas oscilaciones por la escala de la gráfica, pero también están presentes.

Cuadro 4.4: Valores de régimen permanente para distintos P_{ref} .

P_{ref} [p.u.]	P_{pv} [p.u.]	Régimen
1,00	1,00	MPPT puro
0,75	0,75	Recorte de tensión
0,9	0,8	Máximo MPP posible

La función del recorte de tensión es importante para la integración en VFlexP. En una red eléctrica real, el operador del sistema puede necesitar que un generador solar no inyecte su máxima potencia posible, o por límites de red, o para participar en servicios de regulación de frecuencia. La señal P_{ref} da este mecanismo de limitación sin necesidad tener el modelo interno del convertidor. En el caso de que se pusiese una P_{ref} mayor que la que el generador puede dar en unas condiciones determinadas, la potencia de salida no llegaría a ese límite, si no que se quedaría en su MPP.

4.3. Balance de potencias y modelo de pérdidas

El balance de potencias verifica que la energía se conserva en el sistema. La potencia entregada por el panel (P_{pv}) debe ser igual a la suma de la potencia en la salida del convertidor (P_{out}) más las pérdidas totales (P_{perd}):

$$P_{pv} = P_{out} + P_{perd} \quad (4.1)$$

4.3.1. Modelo de pérdidas del convertidor

El modelo de pérdidas usado en la ecuación (3.11) muestra los componentes de pérdidas típicos de un convertidor. Esta ecuación presenta una componente constante (P_{perd}), que modela pérdidas fijas de control y conmutación; una componente

lineal en P_{pv} (K_{pl}), que muestra las pérdidas dependientes del punto de operación, y una componente cuadrática en I_{pv} (K_{pq}), que representa las pérdidas resistivas [22].

Los coeficientes usados ($P_{perd} = 0,02$ p.u., $K_{pl} = 0,05$ y $K_{pq} = 0,02$ p.u.) no vienen de una tabla concreta del fabricante, sino que se han elegido para reproducir una eficiencia del orden del 90 % en el MPP. Son valores coherentes con los rangos de eficiencia típicos de convertidores con pérdidas resistivas y de conmutación en aplicaciones fotovoltaicas de potencia parecida [24].

$$P_{perd,c} = P_{perd} = 0,02 \text{ p.u.} \quad (4,0 \text{ W}) \quad (4.2)$$

$$P_{perd,l} = K_{pl} \cdot P_{pv} = 0,05 \text{ p.u.} \times \frac{199,5}{200} = 0,05 \text{ p.u.} \quad (10,0 \text{ W}) \quad (4.3)$$

$$P_{perd,q} = K_{pq} \cdot I_{pv}^2 = 0,02 \text{ p.u.} \times \frac{7,693^2}{6,67^2} = 0,0266 \text{ p.u.} \quad (5,32 \text{ W}) \quad (4.4)$$

$$P_{perd} = 4,0 + 10,0 + 5,32 = 19,32 \text{ W} \quad (4.5)$$

La potencia de salida del convertidor es:

$$P_{out} = P_{pv} - P_{perd} = 199,5 - 19,32 = 180,18 \text{ W} \quad (4.6)$$

Y la eficiencia global del convertidor en el MPP:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{pv}} = \frac{180,18}{199,5} \approx 90,32 \% \quad (4.7)$$

Este valor es coherente con las eficiencias típicas de convertidores en aplicaciones fotovoltaicas de potencia similar, que están entre el 90 % y el 97 % dependiendo del punto de operación y los componentes empleados [22].

4.3.2. Verificación del balance

La Figura 4.7 muestra las tres potencias del balance (P_{pv} , P_{out} y P_{perd}) en función del tiempo durante la simulación. Cuando el MPPT converge al punto de máxima potencia, las tres señales se estabilizan en sus valores de régimen permanente y la igualdad (4.1) se verifica en todo momento.

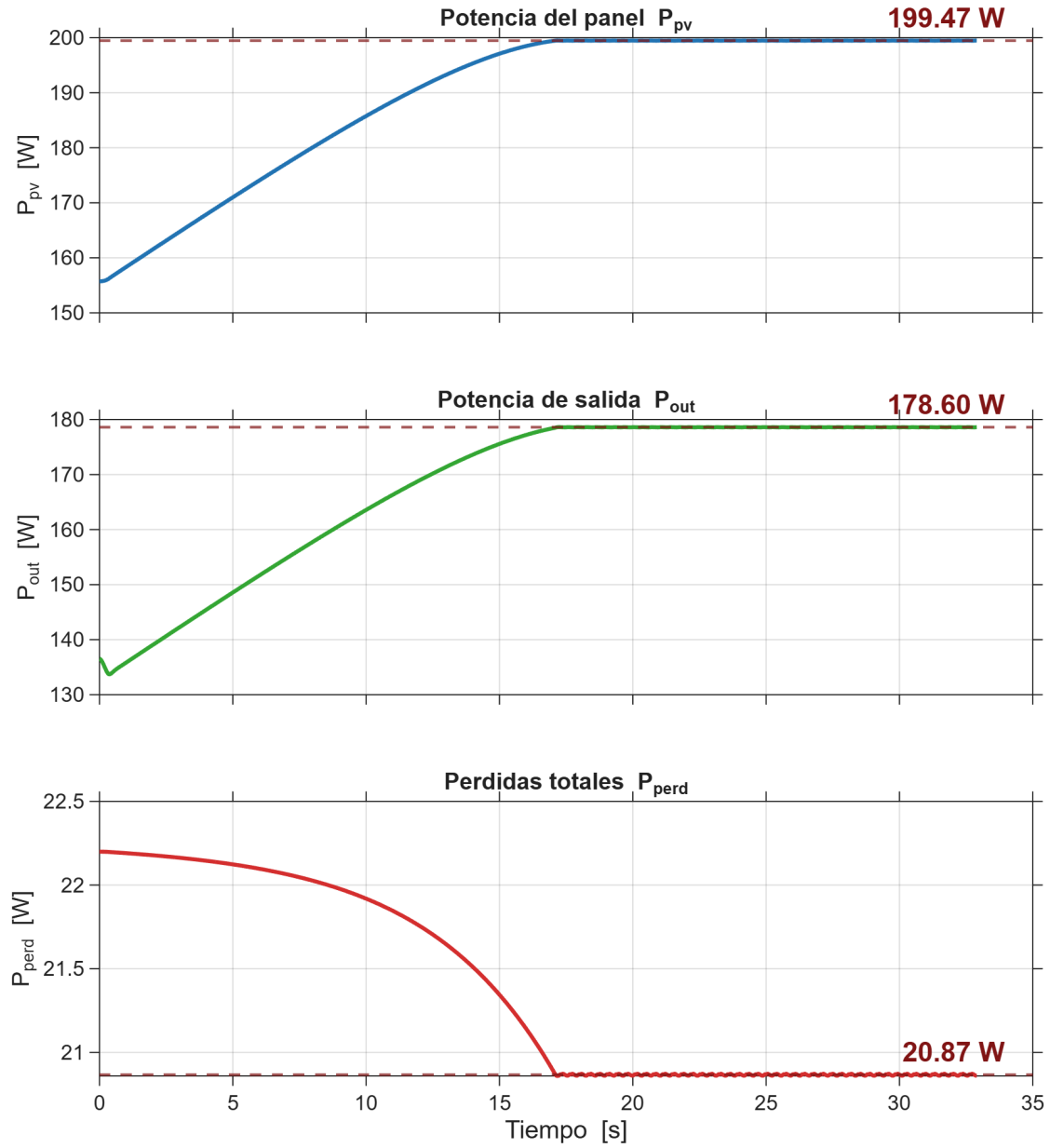


Figura 4.7: Balance de potencias durante la simulación en condiciones STC con $P_{ref} = 1,0 p.u.$. Se cumple: $P_{pv} - P_{out} - P_{perd} = 0$ en todo momento.

Los valores de la Figura 4.7, no coinciden exactamente con los calculados teóricamente en 4.3.1, por las pequeñas oscilaciones del algoritmo MPPT en el punto de máxima potencia 4.5.

La Tabla 4.5 recoge los valores de régimen permanente del balance de potencias para los tres escenarios de P_{ref} estudiados en la Sección 4.2.2.

Cuadro 4.5: Balance de potencias en régimen permanente para distintos valores de P_{ref} .

P_{ref} [p.u.]	P_{pv} [W]	P_{perd} [W]	P_{out} [W]	η [%]
1,00	199,5	19,32	180,18	90,32
0,75	149,7	22,2	127,5	85,17
0,9	158,9	16,6	142,3	89,55

Los valores de rendimiento difieren un poco entre ensayos por varias razones:

1. **Pérdidas constantes y potencia de operación.** El convertidor tiene una componente de pérdidas fija $P_{perd,c}$ independiente del punto de operación. Al reducir P_{pv} ($P_{ref} = 0,75$), estas pérdidas son una fracción mayor de la potencia entregada, lo que baja el rendimiento. Este es el comportamiento típico de la curva η - P de cualquier convertidor de potencia [22].
2. **Oscilaciones del MPPT.** El algoritmo P&O oscila alrededor del MPP. La pérdida cuadrática es $K_{pq} \cdot I_{pv}^2$ y, como I_{pv} oscila alrededor de un valor medio, cuando sube un poco la pérdida, sube más de lo que baja cuando baja esa misma cantidad (porque el cuadrado es una función convexa). Esto hace que haya una pequeña diferencia en el rendimiento.
3. **Composición de las pérdidas según el punto de operación.** En el ensayo con $G = 800 \text{ W/m}^2$, la corriente I_{pv} es menor que en STC, reduciendo las pérdidas cuadráticas en términos absolutos. Esta reducción y el mayor peso relativo de las pérdidas constantes producen un rendimiento intermedio entre los otros dos escenarios.

4.4. Resumen de resultados

La Tabla 4.6 recoge un resumen de la validación de todo el sistema. Compara los valores obtenidos en la simulación con los valores de referencia del fabricante y los predichos por el modelo analítico.

Cuadro 4.6: Resumen de la validación del sistema en condiciones STC con $P_{ref} = 1,0 p.u.$

Variable	Referencia	Simulación	Unidades	Error
Tensión MPP	26,3	26,32	V	<0,01 %
Corriente MPP	7,61	7,59	A	<0,01 %
Potencia MPP	200,0	199,8	W	<0,01 %
V_{oc}	32,9	32,85	V	<0,01 %
I_{sc}	8,21	8,21	A	0,0 %
Eficiencia	—	99,9	%	—

Los resultados muestran que:

1. El **modelo del panel** reproduce con exactitud (<0,01 % de error) todos los parámetros eléctricos de la hoja de especificaciones del KC200GT, lo que valida la implementación del circuito equivalente de diodo simple y el método de identificación de R_s y R_p 4.1.
2. Las **curvas $I-V$ y $P-V$** muestran la dependencia con G y T esperada por la teoría, con la corriente dominada por la irradiancia y la tensión afectada sobre todo por la temperatura 4.2 4.3.
3. El **algoritmo MPPT P&O** converge al punto de máxima potencia con la oscilación típica de este método. La función del recorte de tensión funciona correctamente, sacando a la salida la potencia P_{ref} cuando ésta es menor que P_{mpp} 4.6.
4. El **balance de potencias** se cumple en todo momento, con una eficiencia del convertidor del 90 % en el punto de máxima potencia 4.3.1.

El modelo está listo para su uso como componente en el entorno VFlexP, siendo la base para el uso de generadores fotovoltaicos en simulaciones de redes eléctricas de gran escala.

Capítulo 5

Conclusiones y Líneas Futuras

5.1. Conclusiones

Este Trabajo de Fin de Grado ha desarrollado y validado un modelo de sistema fotovoltaico en MATLAB/Simulink. Este modelo está compuesto por un generador CC (panel solar KC200GT) y un convertidor CC-CC con control MPPT, con el objetivo de integrarlo en la plataforma de simulación VFlexP. A continuación se recogen las principales conclusiones.

1. **Modelado del generador fotovoltaico.** Se ha implementado el circuito equivalente de diodo simple del panel KC200GT mediante bloques elementales de Simulink, sin usar toolboxes externos. La ecuación implícita del modelo se resuelve de dos formas al mismo tiempo: mediante un bloque Algebraic Constraint para el barrido de curvas $I-V$ y $P-V$, y mediante una MATLAB Function con fzero para el cálculo del punto de operación. Ambos métodos usan los mismos parámetros a través de la máscara del subsistema, haciendo que el sistema sea coherente y fácil de reutilizar.
2. **Validación del modelo del panel.** Las curvas $I-V$ y $P-V$ en condiciones STC reproducen con un error inferior al 0,01 % los cinco parámetros nominales del fabricante (V_{mpp} , I_{mpp} , P_{mpp} , V_{oc} , I_{sc}), validando la implementación y el método de identificación de R_s y R_p explicado en [20]. El estudio de

las variables G y T , muestra que la irradiancia afecta principalmente a la corriente y la temperatura, principalmente a la tensión, lo cual se ajusta con lo esperado teóricamente.

3. **Modelo del convertidor CC-CC.** El convertidor se ha modelado mediante dos funciones de transferencia de segundo orden identificadas por ensayo de escalón, una para la relación $D \rightarrow V_{pv}$ y otra para $I_{pv} \rightarrow I_{out}$. También tiene incorporado un modelo de pérdidas de tres términos (constante, lineal y cuadrático). El modelo es suficientemente fiel para reproducir la dinámica del sistema y obtener una eficiencia del convertidor en torno al 85-90 % según el punto de operación.
4. **Algoritmo MPPT P&O.** Se ha implementado una versión modificada del algoritmo *Perturb & Observe* que incorpora una referencia de potencia P_{ref} . Cuando la potencia del panel P_{pv} supera P_{ref} , el algoritmo limita la inyección en lugar de maximizarla (recorte de tensión), una función muy relevante para la gestión de redes eléctricas. Los ensayos con distintos valores de P_{ref} confirman que el algoritmo opera correctamente en ambos modos: MPPT puro cuando $P_{ref} \geq P_{mpp}$, y limitación de potencia cuando $P_{ref} < P_{mpp}$.
5. **Balance de potencias.** La verificación del balance de energía para diferentes escenarios demuestra que el modelo conserva la energía en todo momento. Las variaciones de rendimiento que se ven entre ensayos ($\approx 85-90\%$) se justifican por el peso relativo de las pérdidas constantes a distintos valores de potencia como se ha mencionado anteriormente 4.4.
6. **Compatibilidad con VFlexP.** El modelo se expresa en unidades por unidad (p.u.) con bases $P_b = 200\text{ W}$ y $V_b = 30\text{ V}$, lo cual es necesario para su futura integración en VFlexP como generador fotovoltaico vectorial. La arquitectura de subsistemas con máscaras hace posible parametrizar el modelo para cualquier panel fotovoltaico sin tocar el diagrama interno.

5.2. Líneas futuras

El trabajo desarrollado constituye una base sólida sobre la que se pueden plantear diversas extensiones. Las más relevantes se enumeran a continuación.

1. **Integración en VFlexP.** La siguiente paso es la integración del modelo en la plataforma VFlexP [6] como generador fotovoltaico vectorial, de modo que un único bloque pueda representar N paneles idénticos sin coste computacional adicional. Esto permite simular el impacto de la generación solar en redes eléctricas de gran escala y estudiar escenarios con mucha presencia de renovables.
2. **Integración de almacenamiento en baterías.** En el contexto del mismo grupo de trabajo, se está desarrollando un modelo equivalente para un sistema de baterías, con una arquitectura similar a la de este trabajo: la batería actúa como generador de tensión continua conectado a su propio convertidor CC-CC. La integración de ambos modelos en VFlexP permitiría simular redes híbridas solar-batería, desarrollando modos de gestión de energía y estudiando la combinación entre la generación discontinua del panel y la capacidad de almacenamiento y entrega de energía de la batería.
3. **Extensiones del modelo.** A más largo plazo, el modelo se finalizará con la conexión del inversor CC-CA (ya existente en VFlexP) para completar la cadena de conversión. Otras modificaciones posibles son la mejora del modelo de pérdidas del convertidor mediante ensayos a distintos niveles de carga, o la comparación del algoritmo P&O con otras estrategias de control MPPT. Además, una validación experimental en un banco de ensayos permitiría comparar los resultados de simulación con medidas reales.

Apéndice A

Hoja de Especificaciones: Panel KC200GT

A continuación se muestra la hoja de especificaciones técnicas (datasheet) del módulo fotovoltaico policristalino Kyocera KC200GT [21], usado como referencia para la parametrización y validación del modelo desarrollado en este trabajo.

THE NEW VALUE FRONTIER



KC200GT

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL
PHOTOVOLTAIC MODULE



LISTED

HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module.

The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.

These cells are encapsulated between a tempered glass cover

and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.

The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.

Equipped with plug-in connectors.



APPLICATIONS

KC200GT is ideal for grid tie system applications.

- Residential roof top systems
- Large commercial grid tie systems
- Water Pumping systems
- High Voltage stand alone systems
- etc.

QUALIFICATIONS

● **MODULE** : UL1703 certified

● **FACTORY** : ISO9001 and ISO 14001

QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.

- Thermal cycling test
- Thermal shock test
- Thermal / Freezing and high humidity cycling test
- Electrical isolation test
- Hail impact test
- Mechanical, wind and twist loading test
- Salt mist test
- Light and water-exposure test
- Field exposure test

LIMITED WARRANTY

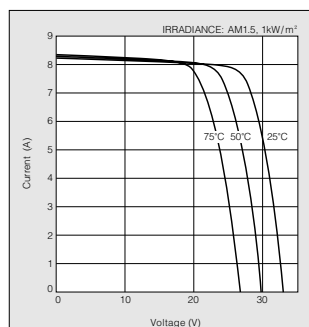
※ 1 year limited warranty on material and workmanship

※ 20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

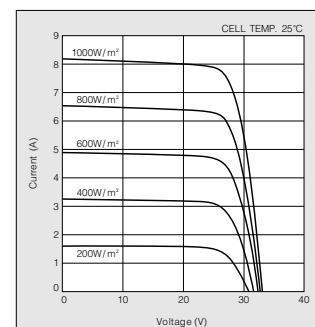
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic
Module KC200GT at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic
Module KC200GT at various irradiance levels



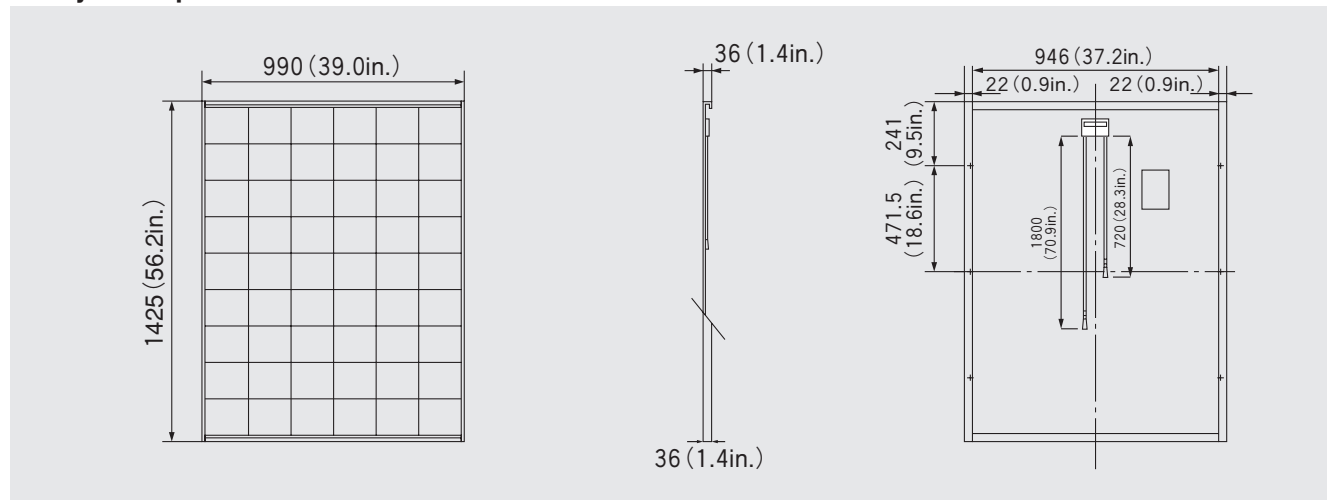
MODEL
KC200GT

SPECIFICATIONS

KC200GT

Physical Specifications

Unit : mm (in.)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (Pmax)	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	26.3V
Maximum Power Current (Imp)	7.61A
Open Circuit Voltage (Voc)	32.9V
Short Circuit Current (Isc)	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	−1.23×10 ^{−1} V/°C
Temperature Coefficient of Isc	3.18×10 ^{−3} A/°C
*STC : Irradiance 1000W/m ² , AM1.5 spectrum, module temperature 25°C	
Electrical Performance at 800W/m ² , NOCT, AM1.5	
Maximum Power (Pmax)	142W
Maximum Power Voltage (Vmpp)	23.2V
Maximum Power Current (Imp)	6.13A
Open Circuit Voltage (Voc)	29.9V
Short Circuit Current (Isc)	6.62A

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C

Cells	
Number per Module	54
Module Characteristics	
Length × Width × Depth	1425mm(56.2in.)×990mm(39.0in.)×36mm(1.4in.)
Weight	18.5kg(40.7lbs.)
Cable	(+)/720mm(28.3in.), (−)/1800mm(70.9in.)
Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	113.6mm(4.5in.)×76mm(3.0in.)×9mm(0.4in.)
IP Code	IP65
Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	7.8%

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m² to 200W/m² (module temperature 25°C)

Please contact our office for further information



KYOCERA Corporation

KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION
6 Takeda Tobadono-cho
Fushimi-ku, Kyoto
612-8501, Japan
TEL: (81)75-604-3476 FAX: (81)75-604-3475
<http://www.kyocera.com>

KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acoma Drive
Scottsdale, AZ 85260, USA
TEL: (1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX: (1)480-483-6431
<http://www.kyocerasolar.com>

KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Guignard 661, Loja A
22790-200, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brazil
TEL: (55)21-2437-8525 FAX: (55)21-2437-2338
<http://www.kyocerasolar.com.br>

KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde
N.S.W. 2113, Australia
TEL: (61)2-9870-3948 FAX: (61)2-9888-9588
<http://www.kyocerasolar.com.au/>

KYOCERA Fineceramics GmbH

Fritz Muller strasse 107, D-73730 Esslingen, Germany
TEL: (49)711-93934-917 FAX: (49)711-93934-950
<http://www.kyocerasolar.de/>

KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #13-03/05
Central Plaza, Singapore 168730
TEL: (65)6271-0500 FAX: (65)6271-0600

KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong
TEL: (852)2-7237183 FAX: (852)2-7244501

KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan
TEL: (886)2-2555-3609 FAX: (886)2-2559-4131

KYOCERA(Tianjin) Sales & Trading Corporation

19F, Tower C HeQiao Building 8A GuangHua Rd.,
Chao Yang District, Beijing 100026, China
TEL: (86)10-6583-2270 FAX: (86)10-6583-2250

Bibliografía

- [1] Red Eléctrica, *La solar fotovoltaica es ya la tecnología con más MW instalados en España*, Nota de prensa, 4 de febrero de 2025. Último acceso: 2026-05-28, Red Eléctrica, 2025. dirección: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2025/02/la-solar-fotovoltaica-es-ya-la-tecnologia-con-mas-MW-instalados-espana>.
- [2] Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística, *Extensión de los parques fotovoltaicos en España*, AgrInfo nº 37, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España, 2024. dirección: https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/ministerio/servicios/servicios-de-informacion/analisis-y-prospectiva/ayp-serie-agrinfo/ayp_37-parquefotovoltaico.pdf.
- [3] Energía360, *La revisión del PNIEC incrementa los objetivos de implementación fotovoltaica hasta los 76 GW antes de 2030*, Noticia basada en nota de prensa de UNEF. Último acceso: 2026-05-28, Energía360, 2023. dirección: <https://www.energia360.info/index.php/noticias/mercado-y-politica-energetica/la-revision-del-pniec-incrementa-los-objetivos-de-implementacion-fotovoltaica-hasta-los-76-gw-antes-de-2030>.
- [4] Cambio Energético, *MPPT de un inversor solar: qué es y qué ventajas ofrece*, Entrada de blog. Último acceso: 2026-06-01, Cambio Energético. dirección: <https://www.cambioenergetico.com/blog/mppt-inversor-solar/>.
- [5] G. Leiva, M. Cáceres y A. Busso, «Convertidor CC-CC en configuración puente completo con seguimiento de punto de máxima potencia para uso

en sistemas fotovoltaicos,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 16, págs. 04.47-04.53, 2012, Recibido: 13 de agosto de 2012; aceptado: 2 de octubre de 2012. ISSN 0329-5184. dirección: https://www.researchgate.net/publication/281819407_CONVERTIDOR_CC-CC_EN_CONFIGURACION_PUENTE_COMPLETO_CON_SEGUIMIENTO_DE_PUNTO_DE_MAXIMA_POTENCIA_PARA_USO_EN_SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS.

- [6] A. Tomás-Martín, C. D. Zuluaga-Ríos, J. Suárez-Porras, B. Kazemtabrizi, J. García-Aguilar, L. Sigrist y A. García-Cerrada, «A vector-based flexible-complexity tool for simulation and small-signal analysis of hybrid AC/DC power systems,» *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 43, pág. 101 817, 2025. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352467725001997>.
- [7] International Energy Agency, *Harnessing Variable Renewables: A Guide to the Balancing Challenge*, Publicado el 23 de mayo de 2011. Licencia CC BY 4.0. Último acceso: 19-06-2026, International Energy Agency, Paris, France, 2011. dirección: <https://www.iea.org/reports/harnessing-variable-renewables>.
- [8] R. W. Kenyon, A. Hoke, J. Tan y B.-M. Hodge, «Grid-Following Inverters and Synchronous Condensers: A Grid-Forming Pair?» En *2020 Clemson University Power Systems Conference (PSC)*, 2020. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9131310>.
- [9] International Energy Agency, *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030*, Último acceso: 19-06-2026, 2024. dirección: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.
- [10] European Commission, Joint Research Centre, *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*, Herramienta web PVGIS, versión de producción 5.3. Último acceso: 02-06-2026, European Commission, Joint Research Centre. dirección: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
- [11] B. Zaidi, «Introductory Chapter: Introduction to Photovoltaic Effect,» en *Solar Panels and Photovoltaic Materials*, B. Zaidi, ed., London, United King-

- dom: IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.74389. dirección: <https://www.intechopen.com/chapters/59428>.
- [12] A. Luque y S. Hegedus, eds., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2.^a ed. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2011, ISBN: 978-0-470-72169-8. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470974704>.
 - [13] Mercado Eléctrico, *¿Cómo funciona el silicio en una celda solar?* Entrada de blog publicada el 22 de octubre de 2012. Último acceso: 01-06-2026, Mercado Eléctrico, 2012. dirección: <https://mercadoelectrico.wordpress.com/2012/10/22/como-funciona-el-silicio-en-una-celda-solar/>.
 - [14] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis y A. W. Y. Ho-Baillie, «Solar cell efficiency tables (version 54),» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 27, n.º 7, págs. 565-575, 2019. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.3171>.
 - [15] PVEducation, *IV Curve*, Página web del PVCDROM sobre operación de células solares. Último acceso: 19-06-2026, PVEducation. dirección: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>.
 - [16] MathWorks, *Solar Panel Parameterization Validation*, Documentación de MATLAB y Simulink. Último acceso: 19-06-2026, MathWorks. dirección: <https://es.mathworks.com/help/sps/ug/solar-panel-parameterization-validation.html>.
 - [17] P. C. Babu, S. S. Kshatri, C. R. S. R. Reddy, G. N. Kumar, A. Alanazi y M. A. Ibrahim, «Performance comparison of MPPT controllers in a grid-connected PV system: LCOE and payback period approaches,» *Scientific Reports*, vol. 16, pág. 9030, 2026. dirección: <https://www.nature.com/articles/s41598-026-39500-9>.
 - [18] V. V. Babu, J. P. Roselyn, C. Nithya y P. Sundaravadivel, «Development of Grid-Forming and Grid-Following Inverter Control in Microgrid Network Ensuring Grid Stability and Frequency Response,» *Electronics*, vol. 13, n.º 10, pág. 1958, 2024. dirección: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/10/1958>.

- [19] Energía y Calor Extremadura, *Qué es una instalación híbrida y cómo funciona*, Entrada de blog. último acceso: 19-06-2026, Energía y Calor Extremadura. dirección: <https://energiaycalorextremadura.es/blog/que-es-una-instalacion-hibrida-y-como-funciona>.
- [20] M. G. Villalva, J. R. Gazoli y E. R. Filho, «Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, n.º 5, págs. 1198-1208, 2009. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4806084>.
- [21] Kyocera Solar, *KC200GT High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module Datasheet*, Último acceso: 19-06-2026. dirección: <https://www.energymatters.com.au/images/kyocera/KC200GT.pdf>.
- [22] R. W. Erickson y D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, 3.ª ed. Cham, Switzerland: Springer, 2020, ISBN: 978-3-030-43881-4. dirección: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-43881-4>.
- [23] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo y M. Vitelli, «Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, n.º 4, págs. 963-973, 2005. DOI: 10.1109/TPEL.2005.850975.
- [24] P. A. A. Honadia, F. I. Barro y M. Sané, «Performance Analysis of a Boost Converter with Components Losses,» *Energy and Power Engineering*, vol. 10, n.º 9, págs. 399-413, 2018. dirección: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=87581>.