

Modelización de las curvas características de dispositivos fotovoltaicos de uso espacial. Modelo de circuito equivalente.

Luque López, Rafael

Mataix Caballero, Diego

Vega Mateos, Javier

Zapatero Montaña, Pablo

Abstract

Del estudio eléctrico de paneles solares, tanto en términos de corriente como de potencia generada, surgen todo tipo de modelos que tratan de aproximar las curvas características de estos componentes con objeto de tener una aproximación, tanto teórica como empírica, de su desempeño y poder hacer predicciones de la manera más fiable y exacta posible. El trabajo aquí desarrollado comprende el análisis de los modelos implícitos, basados en modelos teóricos de circuito equivalente, tanto de 1D/2R (un diodo, dos resistencias) como 2D/2R (dos diodos, dos resistencias).

Palabras clave: Paneles solares; Células solares; Modelos implícitos; Circuito equivalente; 1D2R; 2D2R; Karmalkar; Haneefa; Das; Pindado; Cubas;

Índice

1. Introducción	6
2. Metodología	7
2.1. Obtención de datos	7
2.2. Método analítico	8
2.2.1. Modelo de 1-Diodo/2-Resistencias	8
2.2.2. Modelo de 2-Diodos/2-Resistencias	10
2.3. Método numérico	12
2.4. Cálculo de errores	12
3. Resultados	13
3.1. Modelo de 1-Diodo/2-Resistencias	13
3.1.1. Método analítico	13
3.1.2. Método numérico	15
3.2. Modelo de 2-Diodo/2-Resistencias	17
3.2.1. Método analítico	18
3.2.2. Método numérico	20
3.3. Comparación de los modelos empleados	22
3.4. Comparación de resultados	24
3.5. Comentario sobre la evolución de la eficiencia de dispositivos fotovoltaicos	26
4. Conclusiones	26
A. Anexo I	28
A.1. Modelo de 1-Diodo/2-Resistencias	28
A.2. Modelo de 2-Diodo/2-Resistencias	35

Índice de Figuras

1. Modelo de circuito equivalente con un diodo y dos resistencias.	6
2. Modelo de circuito equivalente con dos diodo y dos resistencias.	6
3. Funcionamiento de un fotodiodo en condiciones de no iluminación.	9
4. Funcionamiento de un fotodiodo en condiciones de iluminación.	9
5. Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	13
6. Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	14
7. Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico <i>PlasticSolarCell</i> empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	14
8. Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	15
9. Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	15

10.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	16
11.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico <i>PlasticSolarCell</i> empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	16
12.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	17
13.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	17
14.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	18
15.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	18
16.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico <i>PlasticSolarCell</i> empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	19
17.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	19
18.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	20
19.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	20
20.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico <i>PlasticSolarCell</i> empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	21
21.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	21
22.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU 255HC empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	22
23.	Gráfica del error adimensionalizado para los modelos analíticos de 1D/2R Y 2D/2R en relación a los datos experimentales del el dispositivo fotovoltaico 3G30C.	22
24.	Gráfica del error adimensionalizado para los modelos analíticos de 1D/2R Y 2D/2R en relación a los datos experimentales del el dispositivo fotovoltaico <i>Plastic-SolarCell</i>	23
25.	Gráfica del error adimensionalizado para los modelos analíticos de 1D/2R Y 2D/2R en relación a los datos experimentales del el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P.	23
26.	Gráfica del error adimensionalizado para los modelos analíticos de 1D/2R Y 2D/2R en relación a los datos experimentales del el dispositivo fotovoltaico MitsubishiMLU 255HC	24
27.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	28
28.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	28
29.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	29
30.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	29

31.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	30
32.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	30
33.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	31
34.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	31
35.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	32
36.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	32
37.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	33
38.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.	33
39.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	34
40.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	34
41.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico MLU empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.	35
42.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	35
43.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	36
44.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	36
45.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	37
46.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	37
47.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	38
48.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	38
49.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	39
50.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	39
51.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	40

52.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	40
53.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	41
54.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	41
55.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.	42
56.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	42
57.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	43
58.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico MLU empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.	43

Índice de Tablas

1.	Información relativa a los dispositivos fotovoltaicos estudiados y sus respectivos puntos característicos.	8
2.	Error medio cuadrático y error medio cuadrático adimensionalizado obtenido para cada dispositivo fotovoltaico mediante los modelos de 1D/2R y 2D/2R empleando resolución numérica y analítica.	25
3.	Resultados de los parámetros calculados para el modelo 1D/2R.	25
4.	Resultados de los parámetros calculados para el modelo 2D/2R.	25
5.	Error medio cuadrático y error medio cuadrático adimensionalizado obtenido para cada dispositivo fotovoltaico.	26

1. Introducción

El estudio consiste en el ajuste de dos modelos teóricos de aproximación de la curva de corriente frente a potencial. Se estudian en este documento dos modelos basados en la aproximación de circuito equivalente de una célula solar, a las curvas características reales, obtenidas en ensayos, de varios paneles solares.

La extracción de las curvas reales se hará, por un lado con los datos proporcionados de antemano para los siguientes paneles: RTC, TNJ, ZTJ, 3G30C, PWP201, KC200GT2, SPV5X5 y PSC [1]. Y, por el otro, mediante la búsqueda bibliográfica para distintos fabricantes de paneles. Esto es: DHV (4S1P) [2], CESI (CTJ30) [3] y Mitsubishi (MLU) [4].

Los modelos experimentales utilizados serán, principalmente dos: Por un lado, el modelo de un diodo y dos resistencias (1D/2R) [5], dado por la Figura 1, en el que se deben ajustar 5 parámetros: I_{PV} , I_0 , R_{sh} , R_s y a . Por otro lado, el modelo de dos diodos y dos resistencias (2D/2R) [5], dado por la Figura 2, en el que se deben ajustar 7 parámetros: I_{pv} , I_{01} , I_{02} , R_{sh} , R_s , a_1 y a_2 .

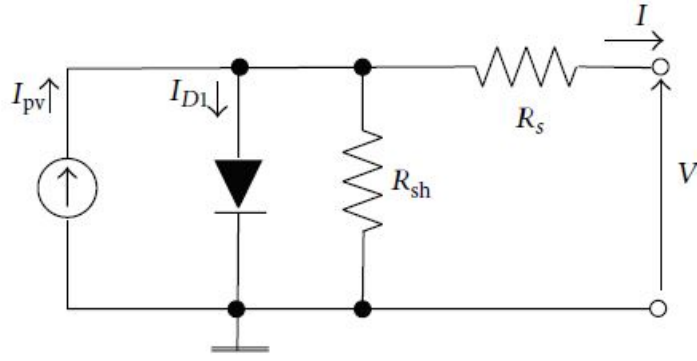


Figura 1: Modelo de circuito equivalente con un diodo y dos resistencias.

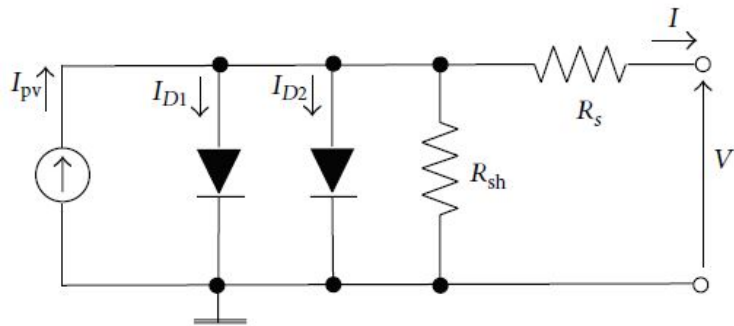


Figura 2: Modelo de circuito equivalente con dos diodo y dos resistencias.

El presente trabajo plantea el ajuste de estos modelos mediante dos estrategias: la primera, que contiene el ajuste paramétrico por métodos analíticos (mediante la aplicación de la función W de Lambert [6] [7]), y la segunda, que emplea métodos numéricos en los que se aproximan las curvas minimizando el error cuadrático medio.

Por último, se valora en este trabajo, mediante el cálculo del error relativo, las capacidades demostradas por cada modelo y se compararán estos con los modelos explícitos de Karmalkar - Haneefa, de Das y de Pindado - Cubas.

La gran mayoría de estudios sobre las curvas características se basan, por un lado, en modelos teóricos [8] [9] (y sus posibles simplificaciones) con una o dos resistencias y uno o dos diodos, y en modelos empíricos [10] [11] por el otro. Este estudio recoge un análisis comparativo entre los distintos modelos implícitos, razonando mediante la implementación de cálculo del error coherente a todos los modelos y planteando las ventajas y desventajas que surgen de cada uno.

2. Metodología

En este apartado se exponen las diferentes metodologías empleadas para la resolución del problema. En primer lugar se obtienen los datos experimentales referentes a once modelos distintos de dispositivos fotovoltaicos, se determinan sus puntos característicos y se emplean los modelos de circuito equivalente de 1D/2R [5] y de 2D/2R [5]. Esto permite la determinación de los distintos parámetros tanto analítica, a través de la *Lambert W-function*, como numéricamente. Finalmente, se determinan los errores de los modelos y se realiza un análisis comparativo entre ellos.

2.1. Obtención de datos

En primer lugar, es necesario obtener los datos experimentales de varios dispositivos fotovoltaicos. Además, para poder calcular los coeficientes de los modelos del circuito equivalente que se estudian, es necesario obtener los puntos característicos de las curvas I - V , así como los puntos:

- I_{sc} : Corriente de cortocircuito.
- I_{mp} : Corriente de en el punto de máxima potencia.
- V_{mp} : Potencial en el punto de máxima potencia.
- V_{oc} : Potencial de circuito abierto.

Los dispositivos fotovoltaicos que se consideran para este estudio, junto a sus puntos característicos, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Información relativa a los dispositivos fotovoltaicos estudiados y sus respectivos puntos característicos.

Dispositivo fotovoltaico	Tipo de tecnología	I_{sc}	I_{mp}	V_{mp}	V_{oc}
RTC France	Si	0.7605	0.6894	0.4507	0.5727
TNJ Spectrolab	GaInP2/GaAs/Ge	0.5239	0.4960	2.270	2.565
ZTJ Emcore	InGaP/InGaAs/Ge	0.4628	0.4389	2.410	2.726
Azur Space 3G30C	GaInP2/GaAs/Ge	0.5202	0.5044	2.411	2.70
Photowatt PWP 201	Si	1.032	0.9255	12.493	16.778
Kyocera KC200GT-2	Si polycrystalline	8.210	7.610	26.30	32.90
Selex Galileo SPVS X5	GaInP2/GaAs/Ge	0.5034	0.4848	12.099	13.575
Plastic Solar Cell	MDMO-PPV/PCBM	7.551	4.5378	0.5617	0.753
DHV 4S1P	N/A	0.4675	0.4593	9.818	10.999
CESA CTJ30	InGaP/GaAs/Ge	0.4730	0.4540	2.310	2.610
Mitsubishi MLU255HC	Si monocrystalline	8.890	8.180	31.20	37.80

2.2. Método analítico

2.2.1. Modelo de 1-Diodo/2-Resistencias

El modelo de circuito equivalente de 1D/2R más usado es el que se presenta en su forma más simple, con un circuito análogo representado por 1 diodo y 2 resistencias. La modelización de un panel solar está basada en el funcionamiento de un fotodiodo (semiconductor con unión p-n), cuyas actuaciones sin iluminación puede verse en la Figura 3.

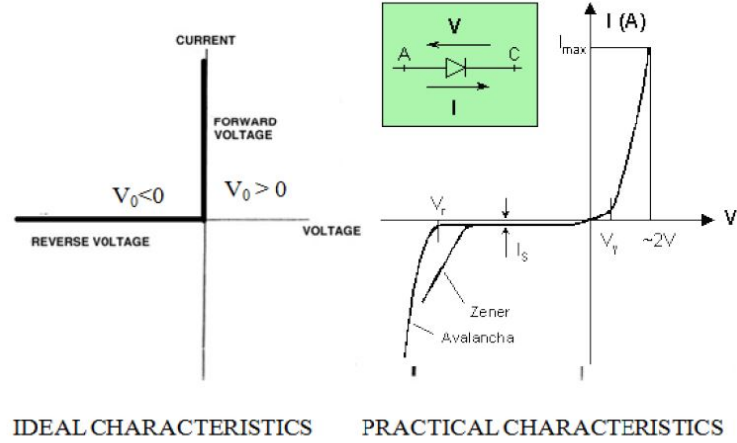


Figura 3: Funcionamiento de un fotodiodo en condiciones de no iluminación.

No obstante, su verdadera relación con paneles solares aparece cuando se ilumina, dotando de energía a los electrones de las capas más externas, y produciendo una corriente contraria a la que aparecería en el funcionamiento normal de un diodo, según se ve en la Figura 4.

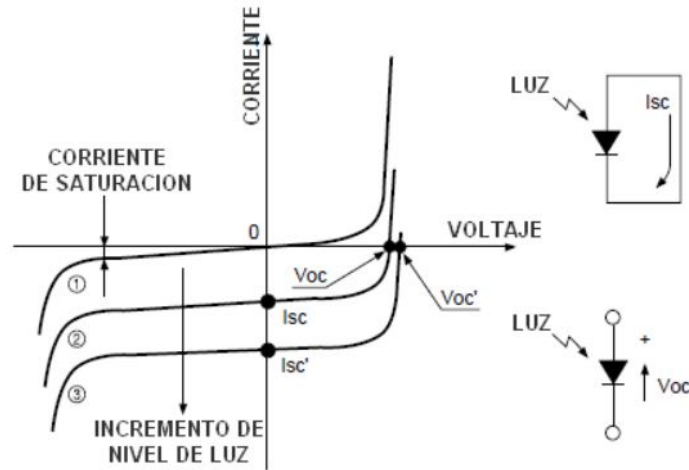


Figura 4: Funcionamiento de un fotodiodo en condiciones de iluminación.

Las curvas que representan el funcionamiento de un panel solar se sitúan en el cuarto cuadrante del gráfico de la Figura 4. El modelo de circuito que podría, entonces, plantearse para modelizar el funcionamiento de un panel solar, sería el de una fuente de corriente conectada a un fotodiodo. No obstante, hay que tener en cuenta las pérdidas asociadas, tanto a soldaduras e interconexiones como las que produce la unión p-n del fotodiodo. Por ello se introducen dos resistencias, surgiendo el modelo de un diodo, dos resistencias ilustrado anteriormente en la Figura 1.

Para llegar a la ecuación que representa el modelo, se parte del balance de corrientes, según la expresión 1.

$$I = I_{pv} - I_D - I_R, \quad (1)$$

donde I_{pv} es la corriente que produce el generador, I_D la corriente que circula por el diodo e I_R la corriente que

atraviesa la resistencia. Sabiendo que esta última corriente se puede poner como la expresión 2.

$$I_R = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

Y considerando la expresión del diodo de Shockley, finalmente se llega a la expresión 3 que define el circuito equivalente de 1D2R.

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (3)$$

donde I es la corriente, I_{pv} es la corriente del generador, I_0 la corriente de ajuste de la ecuación de Shockley, V es el potencial, V_T es el potencial térmico, a es el factor de idealidad del diodo, y R_s y R_{sh} son la resistencia en serie y en paralelo respectivamente.

Los parámetros que se busca ajustar son los siguientes:

- I_{pv} : Corriente que proporciona el generador,
- I_0 : Parámetro de la ecuación de Shockley,
- R_s : Resistencia en serie,
- R_{sh} : Resistencia en paralelo.
- a : Factor de idealidad del diodo, para el modelo de 2D/2R se emplean dos valores distintos,

Para hallarlos, se introducen en la expresión del modelo, los puntos característicos dados por el fabricante. Esto es:

- Punto de cortocircuito $[0, I_{sc}]$
- Punto de circuito abierto $[V_{oc}, 0]$
- Punto de máxima potencia $[V_{mp}, I_{mp}]$

Con la condición de contorno adicional de derivada en potencia nula para el punto de máxima potencia. Esto nos deja con un sistema de 4 ecuaciones y 5 incógnitas. Para transformarlo en un sistema determinado, estimamos el valor del parámetro menos influyente en los resultados. Así, damos un valor inicial al parámetro a entre 1 y 2 y resolvemos el sistema resultante, dado por las expresiones 4, 5, 6, 7.

$$I_{sc} = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc}R_s}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}}, \quad (4)$$

$$0 = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}, \quad (5)$$

$$I_{mp} = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}}, \quad (6)$$

$$-\frac{I_{mp}}{V_{mp}} = -\frac{I_0}{aV_T} \left(1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right) \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{aV_T} \right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right). \quad (7)$$

2.2.2. Modelo de 2-Diodos/2-Resistencias

El modelo de circuito equivalente de 2D/2R añade un nivel más de complejidad respecto al modelo de 1D/2R. En este caso se emplea un segundo diodo para representar la recombinación de los electrones en la *depletion region*. La expresión que describe el comportamiento de este modelo es una extensión de 3, y viene dado por la expresión 8.

$$I = I_{pv} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a_1 V_T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a_2 V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (8)$$

donde I es la corriente, I_{pv} es la corriente del generador, I_{01} e I_{02} las corrientes usadas en la expresión del diodo de Shockley para ambos diodos, V es el potencial, a_1 y a_2 son los factores de idealidad de los diodos, V_T es el potencial térmico, y R_s y R_{sh} son la resistencia en serie y en paralelo respectivamente.

Los parámetros que se quiere ajustar en este caso son:

- I_{pv} : Corriente que proporciona el generador,
- I_{01} : Parámetro de la ecuación de Shockley para el diodo 1,
- I_{02} : Parámetro de la ecuación de Shockley para el diodo 2,
- R_s : Resistencia en serie,
- R_{sh} : Resistencia en paralelo.
- a_1 : Factor de idealidad del diodo 1,
- a_2 : Factor de idealidad del diodo 2,

Para ello y siguiendo la metodología planteada en [5], se llega a una serie de ecuaciones que, estimando inicialmente el parámetro a_2 , permiten determinar secuencialmente el valor del resto. Este sistema viene dado por las expresiones 9, 10, 11, 12, 13, 14.

$$\log \left(\frac{(R_{sh0}(I_{sc} - I_{mp}) - V_{mp}) - a_2 V_T ((R_{sh0} - V_{mp}/I_{mp}) / (V_{mp}/I_{mp} - R_s))}{(R_{sh0} I_{sc} - V_{oc}) - a_2 V_T ((R_{sh0} - R_{s0}) / (R_{s0} - R_s))} \right) - \frac{(V_{mp} + I_{mp} R_s - V_{oc}) [((R_{sh0} - V_{mp}/I_{mp}) / (V_{mp}/I_{mp} - R_s)) - ((R_{sh0} - R_{s0}) / (R_{s0} - R_s)) \exp((V_{mp} + I_{mp} R_s - V_{oc}) / a_2 V_T)]}{[R_{sh0}(I_{sc} - I_{mp}) - V_{mp}] - (R_{sh0} I_{sc} - V_{oc}) \exp((V_{mp} + I_{mp} R_s - V_{oc}) / a_2 V_T)} \quad (9)$$

$$= 0,$$

$$a_1 V_T = ([R_{sh0}(I_{sc} - I_{mp}) - V_{mp}] - (R_{sh0} I_{sc} - V_{oc}) \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s - V_{oc}}{a_2 V_T}\right)) \cdot \left(\left[\frac{(R_{sh0} - V_{mp}/I_{mp})}{(V_{mp}/I_{mp} - R_s)} - \frac{(R_{sh0} - R_{s0})}{(R_{s0} - R_s)} \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s - V_{oc}}{a_2 V_T}\right) \right]^{-1} \right), \quad (10)$$

$$I_{01} = \frac{a_1}{(a_2 - a_1)} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{a_1 V_T}\right) \cdot \frac{a_2 V_T (R_{sh0} - R_{s0}) - (R_{s0} - R_s) (R_{sh0} I_{sc} - V_{oc})}{(R_{sh0} - R_s) (R_{s0} - R_s)}, \quad (11)$$

$$I_{02} = \frac{a_2}{(a_1 - a_2)} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{a_2 V_T}\right) \cdot \frac{a_1 V_T (R_{sh0} - R_{s0}) - (R_{s0} - R_s) (R_{sh0} I_{sc} - V_{oc})}{(R_{sh0} - R_s) (R_{s0} - R_s)}, \quad (12)$$

$$R_{sh0} = R_{sh} + R_s, \quad (13)$$

$$I_{pv} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} I_{sc}. \quad (14)$$

Para la resolución de este sistema se requieren las pendientes de la curva I - V en ambos extremos, que definirán los siguientes parámetros:

$$R_{sh0} = - \left(\frac{\partial V}{\partial I} \right) \Big|_{I=I_{sc}}, \quad (15)$$

$$R_{s0} = - \left(\frac{\partial V}{\partial I} \right) \Big|_{V=V_{oc}}. \quad (16)$$

Estas pendientes se obtienen de la aplicación de un ajuste lineal a los primeros y últimos puntos experimentales de la curva. Esta aproximación, sin embargo, resulta ser excesivamente imprecisa para la resolución de algunos casos, por lo que se procederá a emplear la pendiente de la curva obtenida por el método numérico en los casos donde no se obtenga una buena primera aproximación.

Es necesario recalcar que las simplificaciones hechas para llegar a las expresiones anteriores (9 a 14) no permiten obtener formulaciones explícitas para cada parámetro. De hecho, se hace necesario la introducción de algún método iterativo para resolver la primera de las expresiones para calcular R_s . Ello introduce complicaciones en la resolución ya que requiere de condiciones iniciales realmente precisas para arrancar con el *solver*. Para algunos casos, se ajusta directamente, mientras que para otros se hace necesario introducir valores de R_s obtenidos de la resolución numérica como primer paso de iteración. En aquellas que han generado más complicaciones, la condición inicial se prueba de forma manual ya que ninguno de los dos planteamientos anteriores da resultados satisfactorios.

2.3. Método numérico

El otro método empleado para ajustar los coeficientes de los diferentes modelos es una resolución numérica del problema. Para este método de resolución se empleará un algoritmo de minimización, ya incluido en el software MATLAB mediante la función *fminsearch*. A este algoritmo se le deberá proporcionar una función de mérito a minimizar, habiendo escogido para esta función el error cuadrático medio (RMSE), definido según la expresión:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{\text{modelo},i} - I_{\text{exp},i})^2}, \quad (17)$$

donde I_{exp} representa los valores experimentales de corriente de las curvas e I_{modelo} los valores de corriente que ajustan la curva experimental mediante el método RMSE. Por tanto, en cada paso del proceso iterativo de resolución se seleccionarán unos valores para los parámetros del modelo, se calculará a continuación la intensidad para cada potencial, y a continuación se calculará el RMSE. Una vez calculado, el algoritmo de minimización empleará este dato para escoger los siguientes parámetros, hasta alcanzar un valor del error mínimo.

2.4. Cálculo de errores

Con el fin de determinar la eficacia de los métodos explícitos en ajustarse a las curvas de resultados experimentales, es necesario determinar el error en cada caso. A lo largo de este informe se emplean 3 tipos de error distintos, el RMSE, el RMSE adimensionalizado, designado por ξ , y el error adimensional, designado por ϵ y calculado haciendo uso de la expresión:

$$\epsilon = \frac{|I_{\text{modelo}} - I_{\text{exp}}|}{I_{\text{sc}}}. \quad (18)$$

Calcular el valor de ϵ permite discernir en que zonas de operación se ajusta más cada modelo en cada panel.

Por su parte, el parámetro ξ permite realizar comparaciones entre distintos dispositivos fotovoltaicos y se calcula mediante la expresión:

$$\xi = \frac{\text{RMSE}}{I_{\text{sc}}} = \frac{1}{I_{\text{sc}}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{\text{modelo},i} - I_{\text{exp},i})^2}, \quad (19)$$

3. Resultados

Una vez realizado el estudio, se presentan los resultados obtenidos para los modelos del circuito equivalente de 1D/2R y 2D/2R, mediante el método analítico y numérico, con el objetivo de determinar, a través del RMSE, que modelos, y que métodos, se ajustan mejor a los datos experimentales de los dispositivos fotovoltaicos proporcionados. En el Anexo A se presentan detalles adicionales sobre los resultados obtenidos.

3.1. Modelo de 1-Diodo/2-Resistencias

En esta sección se exponen los resultados obtenidos para el modelo de un diodo y dos resistencias. Tal y como se expone en la sección de metodología, el modelo se ajusta mediante un método analítico, y mas tarde empleando uno numérico. Para este modelo se han logrado buenos ajustes empleando ambos métodos. En primer lugar, se exponen en detalle algunos de los casos más representativos de los resultados obtenidos.

3.1.1. Método analítico

Comenzando por los resultados obtenidos en el ajuste analítico, se analiza en primer lugar el caso del dispositivo fotovoltaico **Azur Space 3G30C**. En este caso se ha obtenido un ajuste algo desviado de los datos experimentales, como puede observarse en la Figura 5, pero dentro de un error razonable, y manteniéndose en todo momento como conservativo.

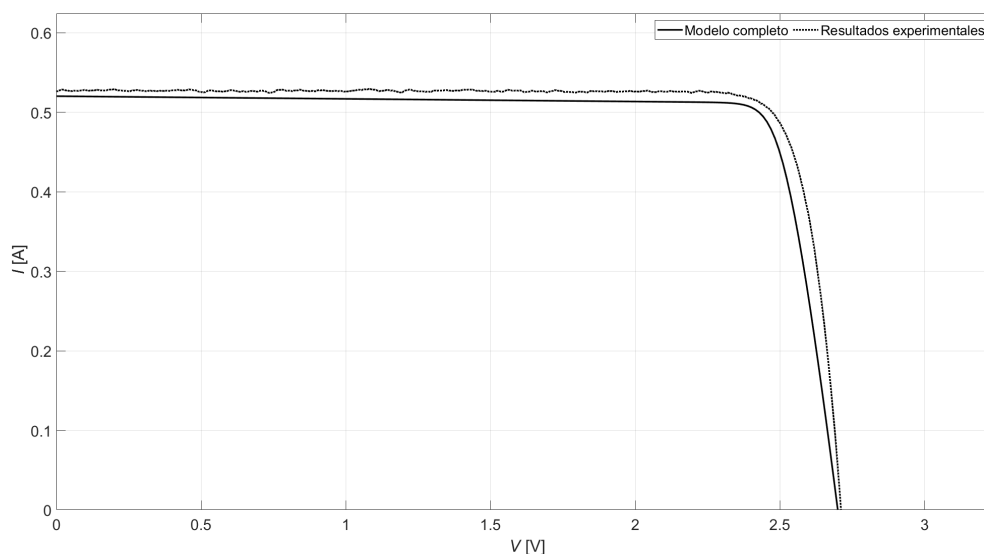


Figura 5: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

Los resultados expresados en potencia frente a potencial se exponen en la Figura 6. Aquí se observa como en torno al punto de máxima potencia existen diferencias en cuanto a valor y posición, que pueden ser relevantes en operación cerca de este punto. El error pasado este punto es sin embargo de poca relevancia en aplicaciones espaciales, siendo por tanto la zona de menor error la de mayor interés.

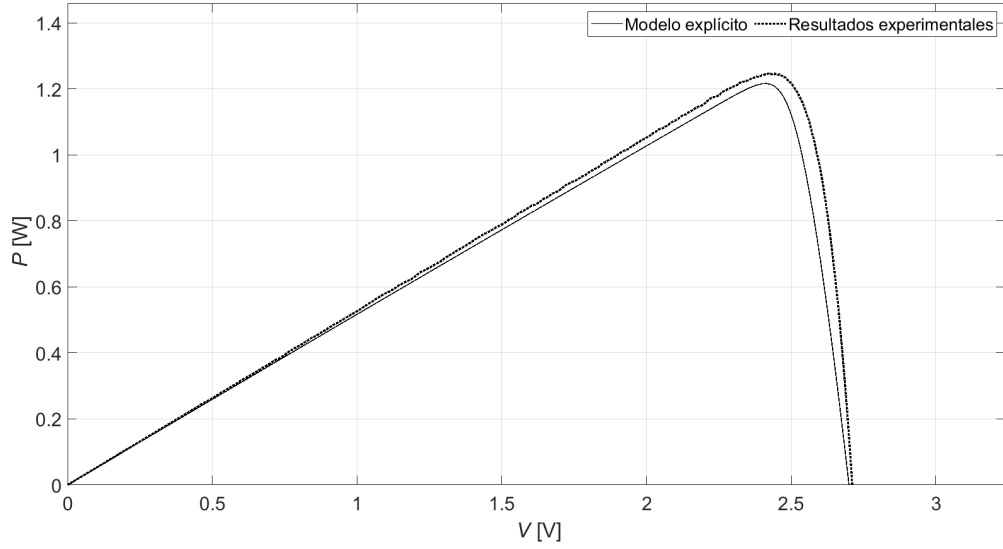


Figura 6: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para el dispositivo fotovoltaico **Plastic Solar Cell**. Este caso es de especial interés dada la inusual forma de su curva I/V . Como puede verse en la Figura 7, el modelo ajusta bien los datos experimentales, pero suaviza la curva sin seguir las oscilaciones más abruptas.

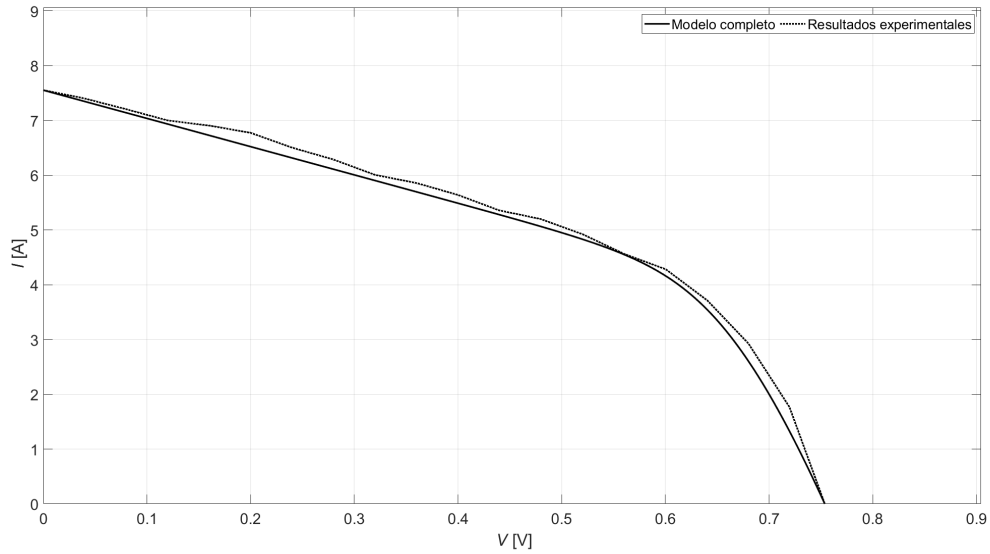


Figura 7: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico *PlasticSolarCell* empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

En el caso del dispositivo fotovoltaico **DHV 4SIP** (Figura 8), el modelo presenta un muy buen ajuste, siendo apenas distinguible de los datos experimentales. Esto se ve reflejado en el RMS obtenido para este caso, como se expone en la Tabla 2.

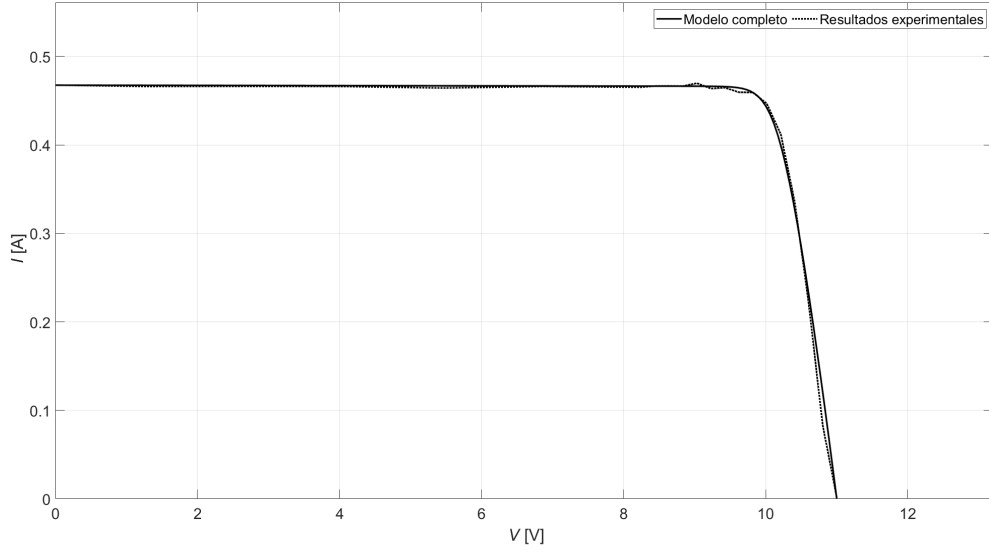


Figura 8: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

Por último, se exponen los resultados obtenidos para el caso del dispositivo fotovoltaico **Mitsubishi MLU255HC** (Figura 9). En esta ocasión pueden observarse zonas donde las curvas son coincidentes, pero se observan sin embargo las imprecisiones a lo largo tanto del tramo anterior a la zona de máxima potencia como del posterior.

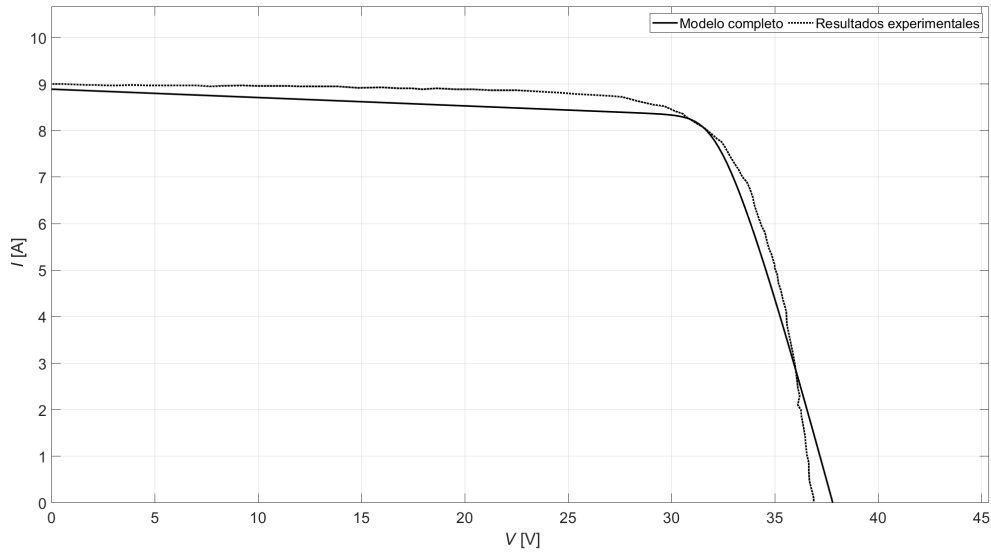


Figura 9: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

3.1.2. Método numérico

En esta sección se exponen los resultados del ajuste numérico al modelo de un diodo y dos resistencias (1D/2R). Se presentan en detalle los resultados obtenidos para los mismos casos significativos expuestos en la sección anterior. En términos generales, se observa un ajuste más preciso de la curva y un error menor.

En las Figuras 10 y 11 se presentan los resultados obtenidos para los dispositivos **Azur Space 3G30C** y **Plastic Solar Cell** respectivamente. Puede verse como el ajuste en el primer caso (Figura 10), que cuenta con gran cantidad de puntos experimentales, es muy bueno, pero esto conlleva, por supuesto, un mayor coste computacional. En el caso del dispositivo PSC (Figura 11), las dificultades son mayores, ya que se cuenta con menos puntos y una forma poco usual de la curva, sin embargo, en este caso se consigue también un buen ajuste.

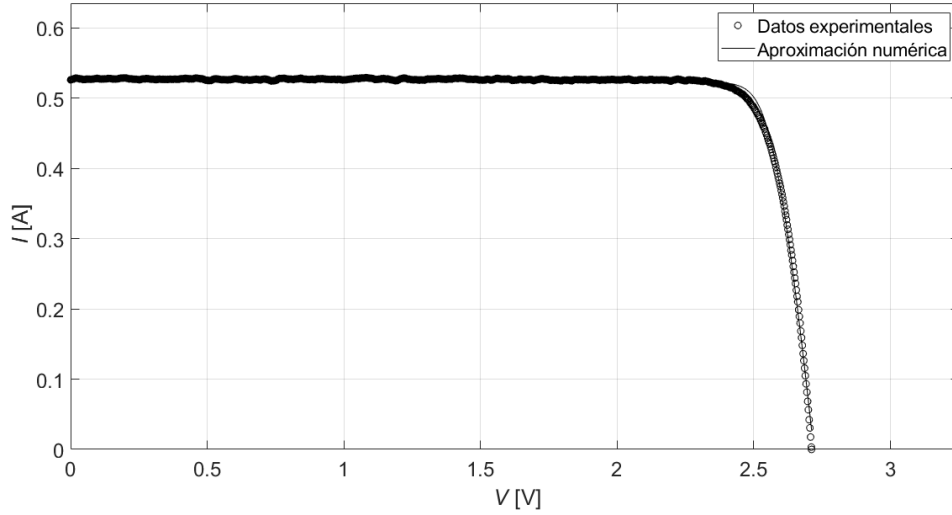


Figura 10: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

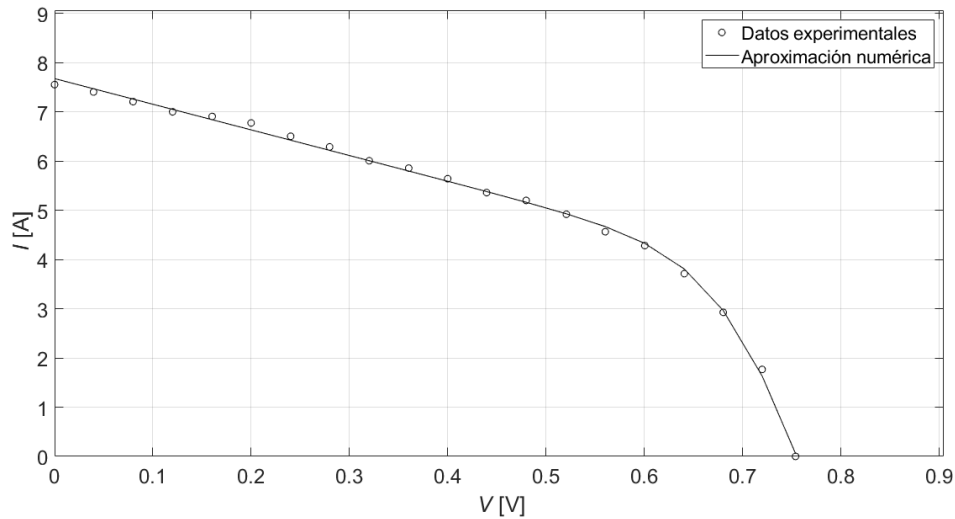


Figura 11: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PlasticSolarCell empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

Por otro lado, en las Figuras 12 y 13 se presentan los resultados obtenidos para los dispositivos **DHV 4SIP** y **Mitsubishi MLU255HC** respectivamente. En el caso del dispositivo **DHV 4SIP**, se obtiene de nuevo un muy buen ajuste dado un número relativamente bajo de puntos. No obstante, en el caso del dispositivo **Mitsubishi MLU255HC** se obtiene un resultado menos ajustado, dando un número mayor de puntos. Esto puede ser indicativo de la influencia de factores como la forma de la curva en el error obtenido en el ajuste, o bien de una cierta aleatoriedad introducida por la resolución numérica del problema, que afectará de forma distinta

a cada caso dependiendo de factores como el *solver* empleado o los valores iniciales elegidos para la resolución numérica.

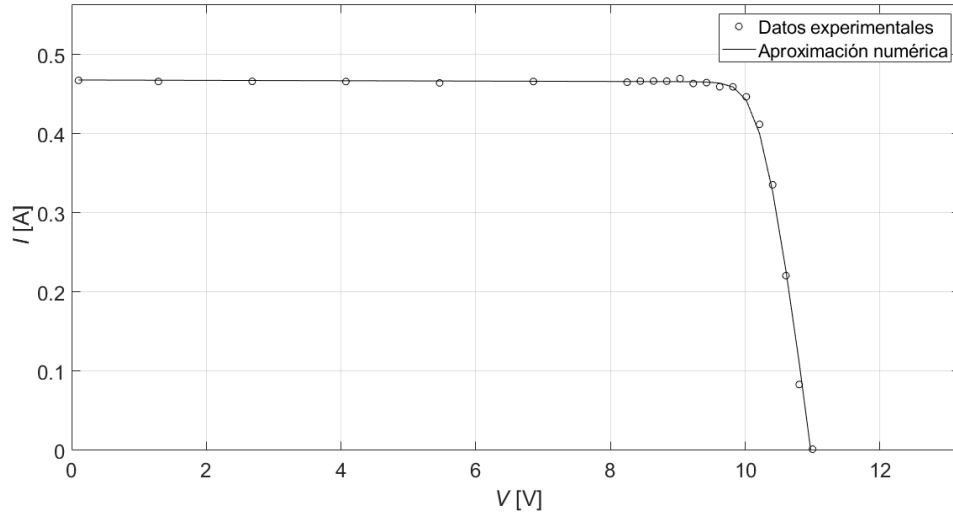


Figura 12: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

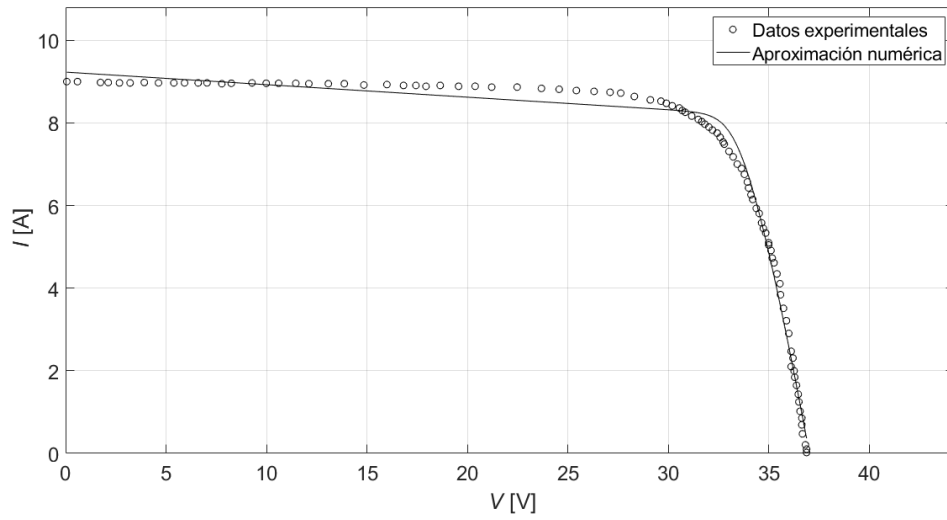


Figura 13: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

3.2. Modelo de 2-Diodo/2-Resistencias

El modelo de 2-Diodo/2-Resistencias no parece que presente una mejora suficiente respecto al modelo de 1-Diodo/2-Resistencias como para justificar el gran tiempo de computación necesario para determinar los coeficientes, especialmente de manera analítica. Se exponen a continuación en detalle algunos de los casos de mayor interés, tanto del ajuste con el método analítico como numérico.

3.2.1. Método analítico

Los resultados del método analítico para el modelo de 2-Diodos/2-Resistencias se presentan a continuación. En primer lugar, se analiza el caso del dispositivo fotovoltaico **Azur Space 3G30C**. El ajuste para este caso es muy bueno (Figura 14), siendo el modelo del circuito equivalente algo pesimista respecto a la potencia total generada por el dispositivo como puede verse en la Figura 15. Aún así, cabe mencionar que el modelo ajusta con eficacia la curva a lo largo de la zona de máxima potencia.

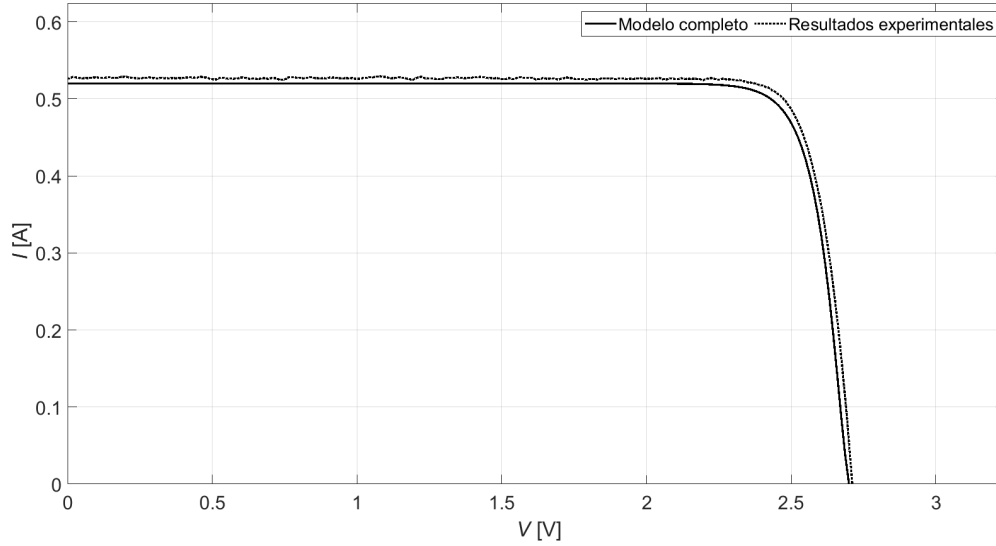


Figura 14: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

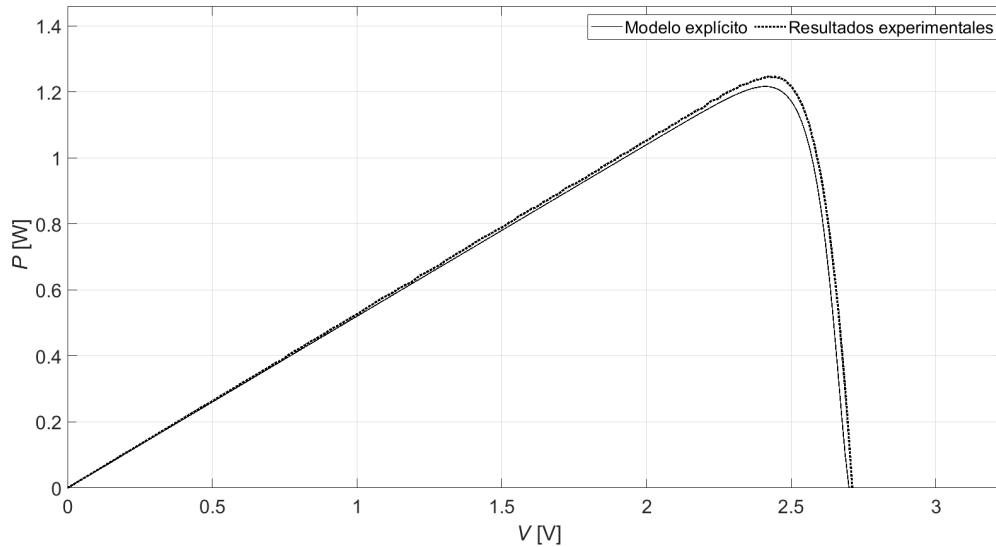


Figura 15: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para el dispositivo fotovoltaico **Plastic Solar Cell** (Figura 16). Este caso es de especial interés dada la tecnología que usa, y la inusual forma de su curva I/V , con una gran

pendiente descendiente desde el punto de cortocircuito. Como puede verse en la Figura 16, el modelo ajusta bien los datos experimentales, presentándose la mayor diferencia en los puntos previos a la zona de máxima potencia.

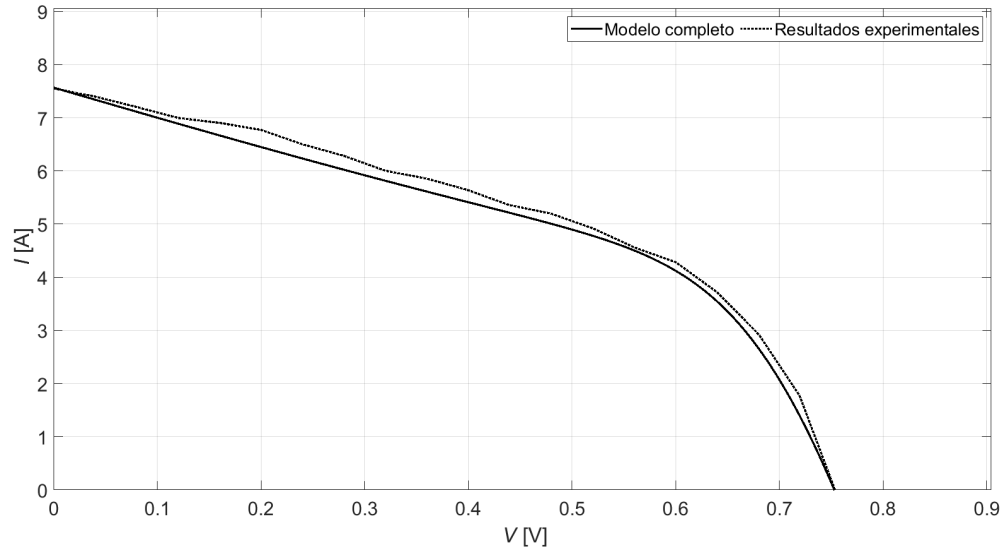


Figura 16: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico *PlasticSolarCell* empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

En el caso del dispositivo fotovoltaico **DHV 4S1P** (Figura 17), el modelo de 2-Diodo/2-Resistencias ajusta casi perfectamente la curva a los resultados experimentales, siendo el error más notable en la zona de máxima potencia, aún así, este es mínimo, como se expone en la Tabla 2.

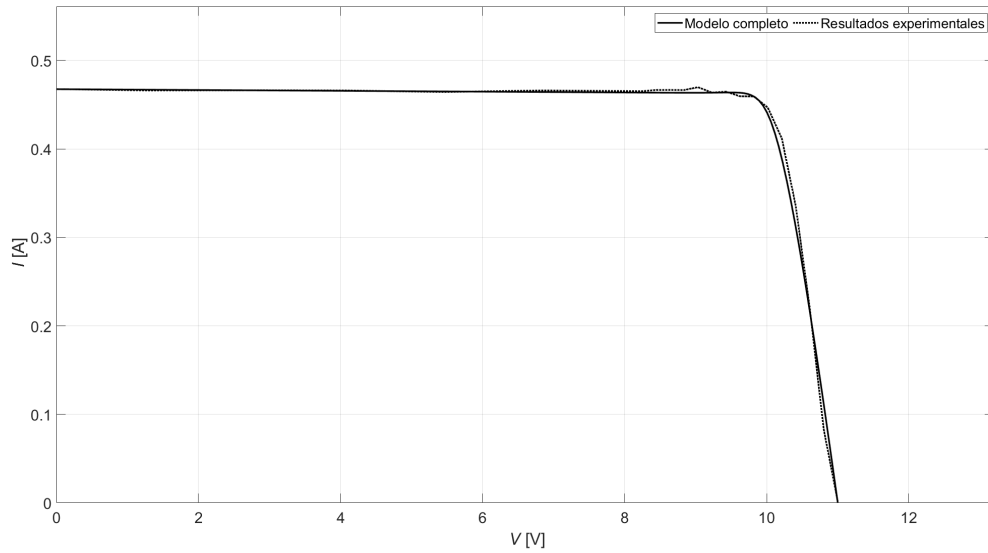


Figura 17: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

Finalmente, para el dispositivo fotovoltaico **Mitsubishi MLU255HC** (Figura 18), la mayor discordancia entre los resultados experimentales y el modelo se encuentra en la zona de circuito abierto. En este caso el V_{oc} estimado por el modelo no concuerda con el proporcionado por los datos experimentales, que es menor.

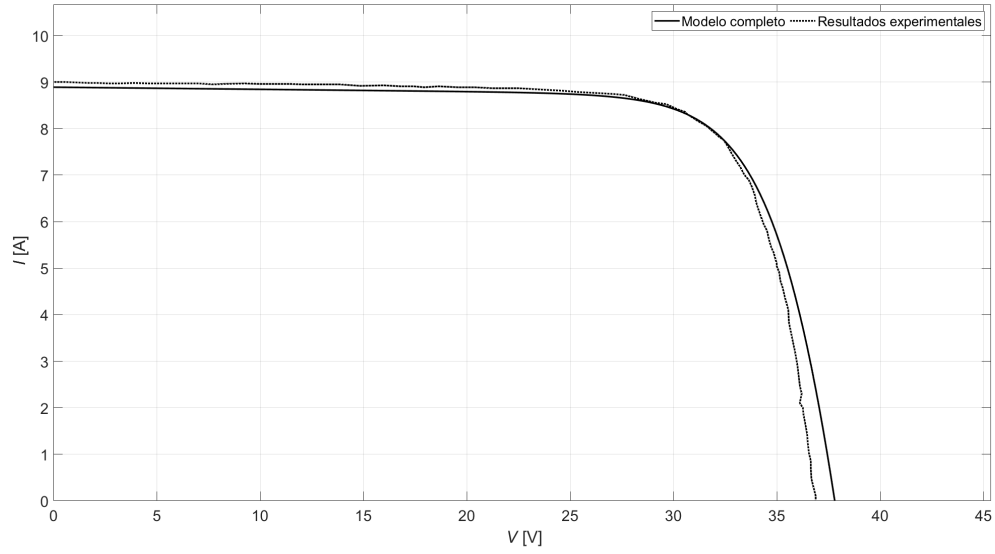


Figura 18: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

3.2.2. Método numérico

Los resultados del método numérico para el modelo de 2-Diodos/2-Resistencias se presentan a continuación. En primer lugar se analiza nuevamente el caso del dispositivo fotovoltaico **Azur Space 3G30C**. En el caso del método numérico (Figura 19), la gran cantidad de puntos experimentales ha permitido ajustar los coeficientes del modelo con mayor precisión que en el caso del método analítico, permitiendo ajustar la curva de manera muy precisa, a pesar de una mayor carga computacional, requiriendo el método numérico tiempos de computación mucho más elevados.

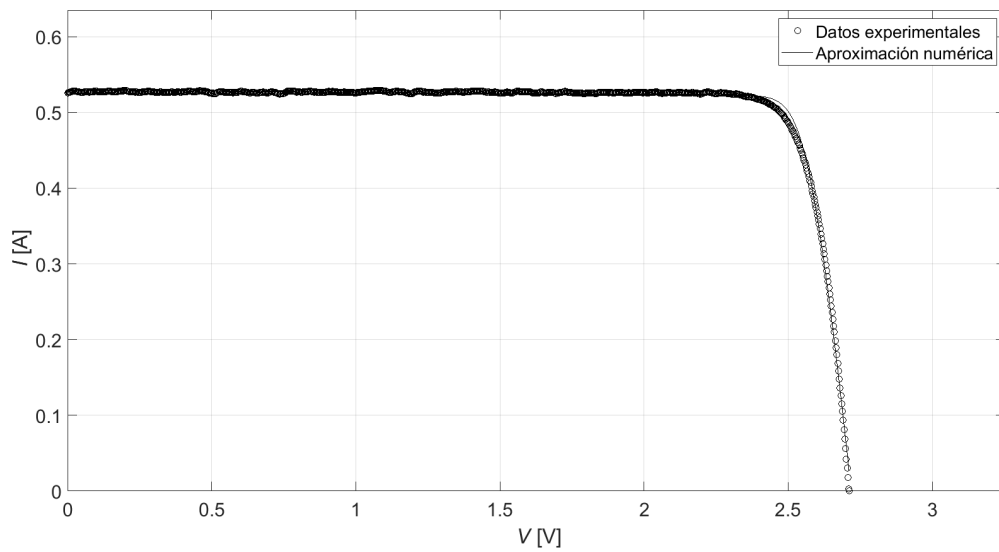


Figura 19: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

En el caso del dispositivo fotovoltaico **Plastic Solar Cell**, el método numérico (Figura 20) es capaz de ajustar la curva con mayor éxito que el método analítico (Figura 16). Mientras que en dispositivos como el **DHV 4S1P** (Figura 21) la diferencia no es tan significativa, con lo que puede considerarse innecesario el aumento de carga computacional, aunque el resultado numérico si es satisfactorio.

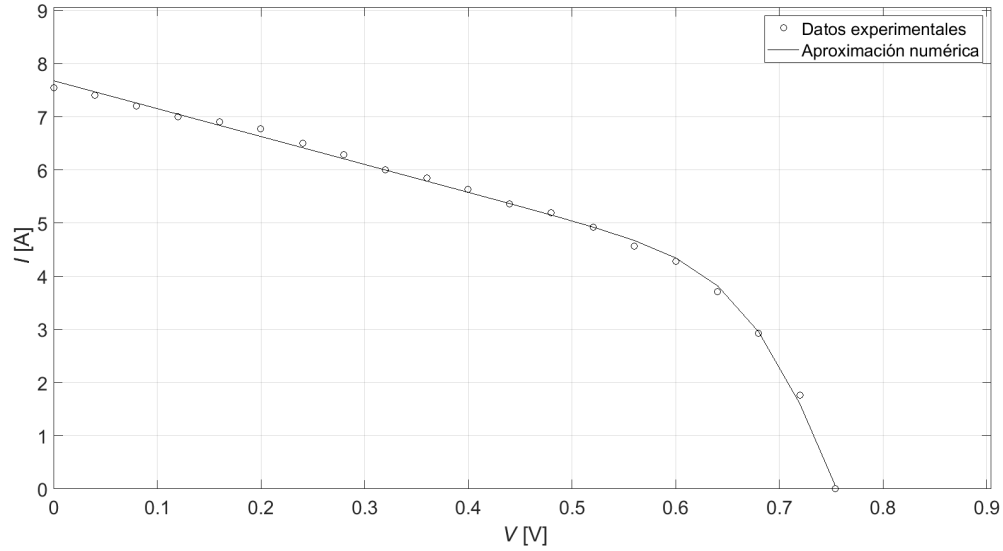


Figura 20: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico *Plastic-SolarCell* empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

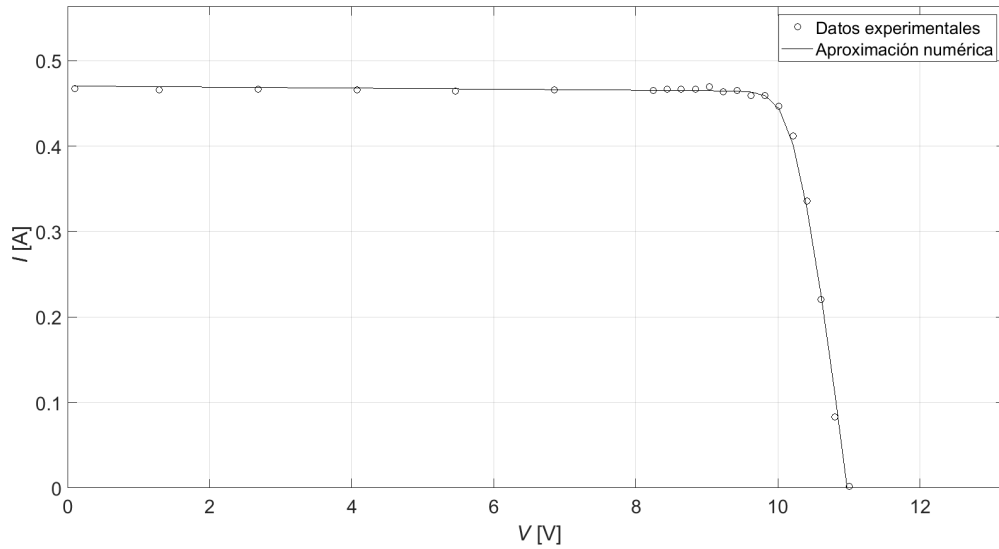


Figura 21: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

Por último, el ajuste del dispositivo **Mitsubishi MLU255HC** se presenta en la Figura 22. En este caso, el ajuste numérico no consigue mejorar significativamente los resultados obtenidos en el cálculo analítico (Figura 18), que de hecho parece aportar mejores resultados en la zona de mayor interés, a la izquierda de la zona de máxima potencia y alrededor de este punto.

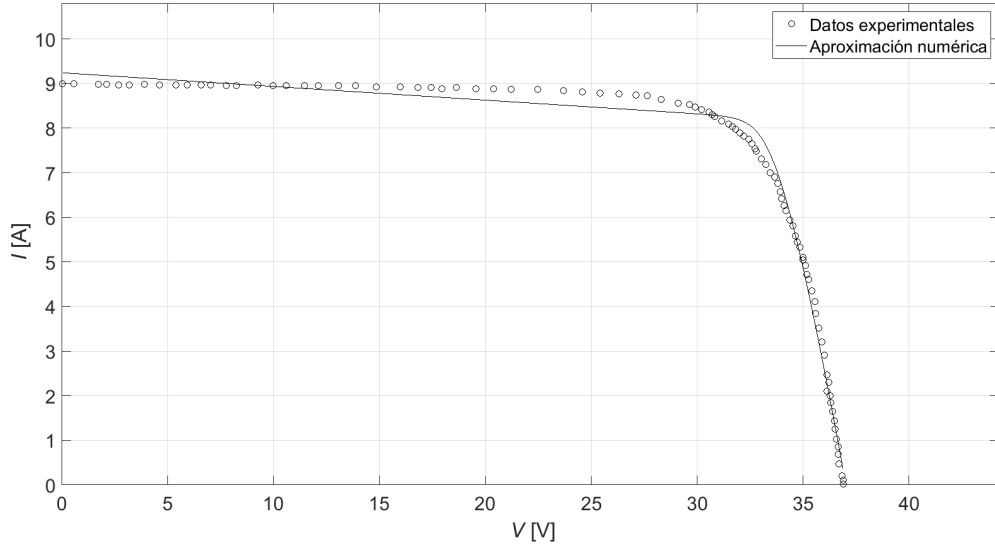


Figura 22: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU 255HC empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

3.3. Comparación de los modelos empleados

En este apartado se realiza una comparación de la precisión de los modelos estudiados. Se comparan los resultados de los modelos 1D/2R analítico y 2D/2R analítico frente a los resultados experimentales, haciendo para ello uso de ϵ .

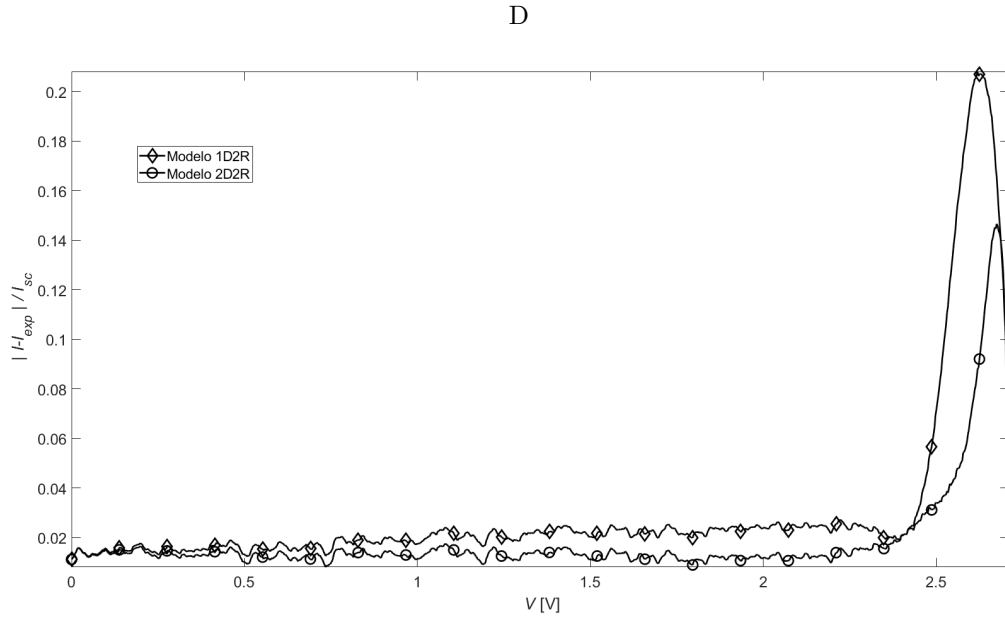


Figura 23: Gráfica del error adimensionalizado para los modelos analíticos de 1D/2R Y 2D/2R en relación a los datos experimentales del el dispositivo fotovoltaico 3G30C.

En la Figura 23, referente al dispositivo fotovoltaico 3G30C, se puede ver como ambos modelos ajustan bien la solución en el primer tramo, hasta que el voltaje supera el valor que proporciona la máxima potencia. En el último tramo los dos modelos presentan un ajuste mucho peor que antes. Es preciso mencionar que el modelo de

2D/2R presenta mejores resultados para todos los valores de voltaje.

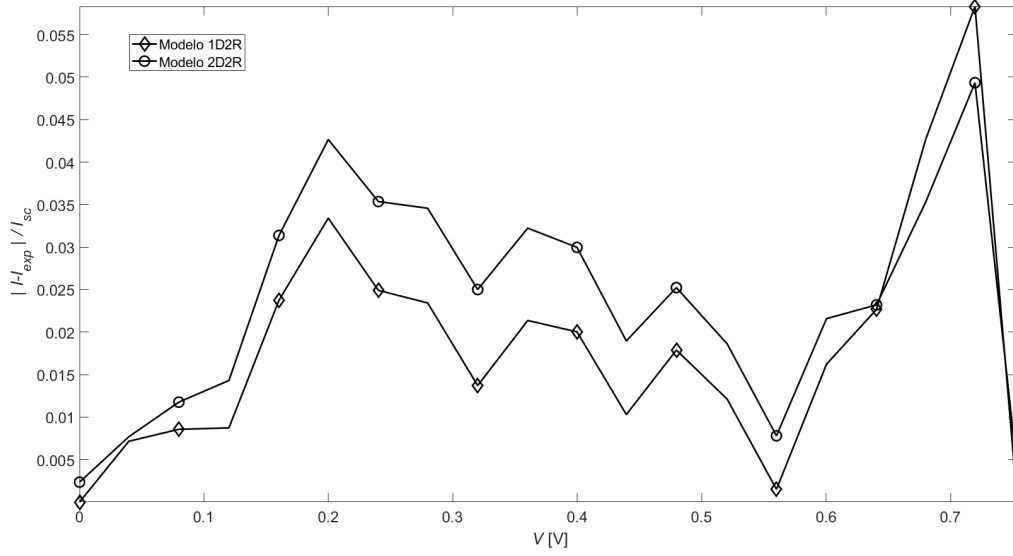


Figura 24: Gráfica del error adimensionalizado para los modelos analíticos de 1D/2R Y 2D/2R en relación a los datos experimentales del el dispositivo fotovoltaico *Plastic-SolarCell*.

En el caso del dispositivo fotovoltaico *Plastic-SollarCell*, cuyos datos se representan en la Figura 24 el modelo que ofrece mejores resultados en su ajuste analítico es el de 1 diodo y 2 resistencias, aunque ambos modelos ajustan de manera muy precisa la curva $I-V$ en todo el dominio del voltaje.

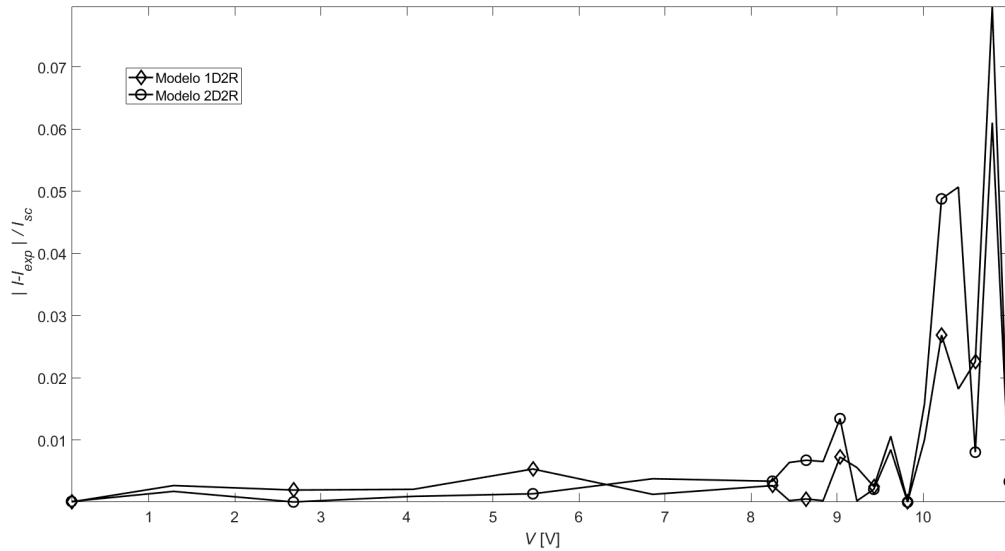


Figura 25: Gráfica del error adimensionalizado para los modelos analíticos de 1D/2R Y 2D/2R en relación a los datos experimentales del el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P.

En la Figura 25 se recoge el valor de ϵ para el caso del dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P. En este caso ambos modelos realizan un ajuste similar en cuanto a su grado de precisión, siendo los resultados obtenidos por ambos

modelos muy buenos. Dado que el modelo 1D/2R precisa de un coste computacional significativamente menor, en casos como este donde no existe diferencia en cuanto a resultados entre emplear un modelo u otro, convendría emplear el modelo de 1 diodo y dos resistencias por el ahorro en coste computacional que supone.

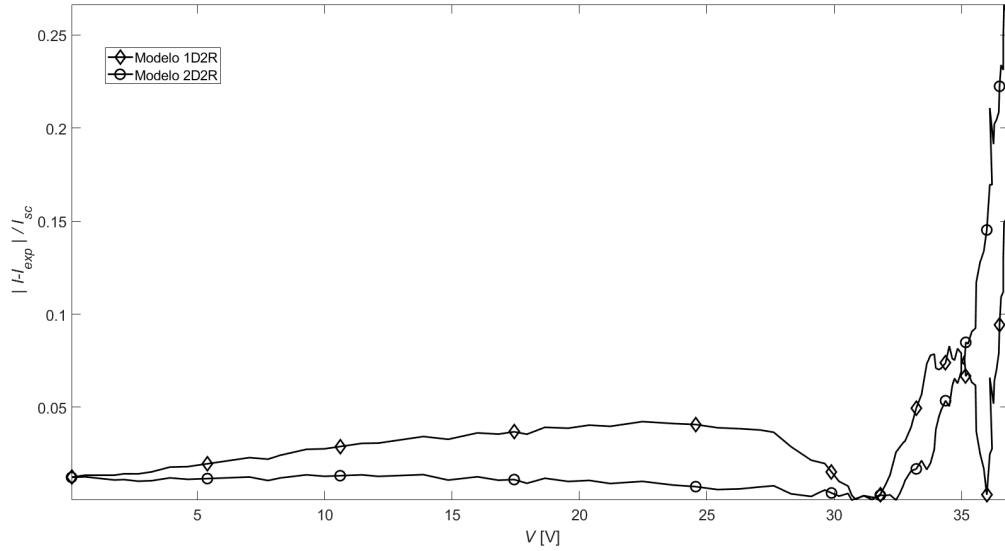


Figura 26: Gráfica del error adimensionalizado para los modelos analíticos de 1D/2R Y 2D/2R en relación a los datos experimentales del el dispositivo fotovoltaico MitsubishiMLU 255HC .

En la Figura 26 se muestra la comparación realizaba para el caso del dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU 255HC. En este caso el modelo 2D/2R ofrece mejores resultados en el primer tramo que el modelo 1D/2R. Al superar el voltaje de máxima potencia y pasar así el codo característico de las curvas I - V se ve como el error adimensional se dispara. Este comportamiento no supone sin embargo ningún problema ya que se trata de una zona más allá de la zona de operación típica, entorno al punto de máxima potencia. De hecho, esa zona de la curva I - V es una zona a evitar por la peligrosidad de daño en las baterías, por lo que nunca se operará en ella y la falta de precisión en el ajuste analítico no es un problema.

3.4. Comparación de resultados

En esta sección se exponen y comparan los resultados obtenidos para todos los modelos, métodos y dispositivos fotovoltaicos. Además, los resultados obtenidos en este estudio se contrastan y comparan con los obtenidos por el análisis mediante los modelos explícitos de explícitos de Karmalkar - Haneefa, de Das y de Pindado - Cubas.

En primer lugar, en la Tabla 2 se expone el error medio cuadrático y error medio cuadrático adimensionalizado obtenido para cada dispositivo fotovoltaico mediante los modelos de 1D/2R y 2D/2R, empleando tanto resolución numérica como analítica. Para el caso de PWP y 2D/2R resuelto de forma analítica no se han logrado resultados satisfactorios. Se puede apreciar que para todos los dispositivos fotovoltaicos estudiados los resultados obtenidos mediante los métodos numéricos tienen menos error que los obtenidos mediante el ajuste analítico.

Tabla 2: Error medio cuadrático y error medio cuadrático adimensionalizado obtenido para cada dispositivo fotovoltaico mediante los modelos de 1D/2R y 2D/2R empleando resolución numérica y analítica.

Modelo	Método de ajuste	Error	RTC	TNJ	ZTJ	3G30C	PWP	KC200	SPV	PSC	DHV 4S1P	CTJ30	MLU
1D/2R	Numérico	RMSE	$4,38 \cdot 10^{-3}$	$9,92 \cdot 10^{-3}$	$8,84 \cdot 10^{-3}$	$4,11 \cdot 10^{-3}$	$2,52 \cdot 10^{-2}$	$1,57 \cdot 10^{-1}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$	$7,49 \cdot 10^{-2}$	$8,20 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$2,44 \cdot 10^{-1}$
		ξ	$5,75 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$7,77 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-2}$	$4,23 \cdot 10^{-3}$	$9,92 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$2,71 \cdot 10^{-2}$
	Analítico	RMSE	$3,81 \cdot 10^{-3}$	$4,76 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$2,61 \cdot 10^{-2}$	$5,76 \cdot 10^{-2}$	$6,96 \cdot 10^{-1}$	$2,92 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-1}$	$9,33 \cdot 10^{-3}$	$4,12 \cdot 10^{-2}$	$5,21 \cdot 10^{-1}$
		ξ	$5,01 \cdot 10^{-3}$	$9,05 \cdot 10^{-2}$	$3,98 \cdot 10^{-2}$	$4,94 \cdot 10^{-2}$	$5,58 \cdot 10^{-2}$	$8,51 \cdot 10^{-2}$	$5,80 \cdot 10^{-2}$	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$8,53 \cdot 10^{-2}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$
2D/2R	Numérico	RMSE	$3,39 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$8,83 \cdot 10^{-3}$	$4,20 \cdot 10^{-3}$	$6,74 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-1}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$8,20 \cdot 10^{-2}$	$8,02 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$2,43 \cdot 10^{-1}$
		ξ	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$6,53 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$4,55 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$1,71 \cdot 10^{-2}$	$2,26 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$
	Analítico	RMSE	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$	$7,33 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$	-	$6,69 \cdot 10^{-1}$	$8,23 \cdot 10^{-3}$	$2,02 \cdot 10^{-1}$	$9,95 \cdot 10^{-3}$	$6,58 \cdot 10^{-2}$	$8,77 \cdot 10^{-1}$
		ξ	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$3,54 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$2,82 \cdot 10^{-2}$	-	$8,17 \cdot 10^{-2}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$	$2,68 \cdot 10^{-2}$	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-1}$	$9,75 \cdot 10^{-2}$

En las Tablas 3 y 4 se exponen los parámetros seleccionados para los modelos 1D/2R y 2D/2R respectivamente, tanto mediante ajuste numérico como analítico, y para todos los dispositivos fotovoltaicos considerados. Como puede verse en los casos analizados en detalle y en la Tabla 2, los resultados obtenidos mediante la resolución numérica son mejores en cuanto a su error respecto a los datos experimentales. Sin embargo, la ventaja de los modelos analíticos reside en la velocidad de computación que ofrecen, significativamente mayor que empleando la resolución numérica. Esta ventaja cobra importancia cuando se trata un volumen de datos significativo.

Por otro lado, aunque la resolución analítica del modelo 1D/2R ha resultado moderadamente sencilla, en el caso del modelo 2D/2R, obtener una solución suficientemente buena para cada dispositivo fotovoltaico ha resultado en un proceso de gran complejidad. De hecho, como ya se ha dicho, no se ha podido obtener una solución aceptable para el dispositivo fotovoltaico PWP.

Tabla 3: Resultados de los parámetros calculados para el modelo 1D/2R.

Método de ajuste	Parámetros	RTC	TNJ	ZTJ	3G30C	PWP	KC200	SPV	PSC	DHV 4S1P	CTJ30	MLU
Numérico	I_{pv}	$7,73 \cdot 10^{-1}$	$5,39 \cdot 10^{-1}$	$4,73 \cdot 10^{-1}$	$5,29 \cdot 10^{-1}$	1,08	8,37	$5,02 \cdot 10^{-1}$	8,07	$4,68 \cdot 10^{-1}$	$4,82 \cdot 10^{-1}$	9,32
	I_0	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$4,11 \cdot 10^{-33}$	$3,15 \cdot 10^{-35}$	$4,52 \cdot 10^{-34}$	$1,59 \cdot 10^{-30}$	$7,67 \cdot 10^{-31}$	$2,32 \cdot 10^{-34}$	$2,54 \cdot 10^{-4}$	$6,73 \cdot 10^{-35}$	$3,23 \cdot 10^{-33}$	$1,74 \cdot 10^{-31}$
	R_s	$4,88 \cdot 10^{-2}$	$2,92 \cdot 10^{-1}$	$3,26 \cdot 10^{-1}$	$2,09 \cdot 10^{-1}$	3,18	$4,83 \cdot 10^{-1}$	$8,52 \cdot 10^{-1}$	$9,45 \cdot 10^{-3}$	1,21	$2,94 \cdot 10^{-1}$	$3,23 \cdot 10^{-1}$
	R_{sh}	$1,33 \cdot 10^1$	$6,58 \cdot 10^1$	$1,05 \cdot 10^2$	$3,82 \cdot 10^2$	$1,25 \cdot 10^2$	$4,89 \cdot 10^1$	$8,11 \cdot 10^2$	$1,82 \cdot 10^{-1}$	$4,30 \cdot 10^3$	$1,30 \cdot 10^2$	$3,26 \cdot 10^1$
	a	1,23	1,36	1,34	1,38	1,36	1,38	1,37	1,54	1,36	1,37	1,30
Analítico	I_{pv}	$7,62 \cdot 10^{-1}$	$5,25 \cdot 10^{-1}$	$4,64 \cdot 10^{-1}$	$5,21 \cdot 10^{-1}$	1,06	8,30	$5,04 \cdot 10^{-1}$	8,22	$4,68 \cdot 10^{-1}$	$4,74 \cdot 10^{-1}$	8,98
	I_0	$5,91 \cdot 10^{-4}$	$8,03 \cdot 10^{-33}$	$7,17 \cdot 10^{-35}$	$1,73 \cdot 10^{-34}$	$1,83 \cdot 10^{-30}$	$3,28 \cdot 10^{-31}$	$1,08 \cdot 10^{-34}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$3,79 \cdot 10^{-35}$	$2,04 \cdot 10^{-33}$	$4,79 \cdot 10^{-31}$
	R_s	$4,60 \cdot 10^{-2}$	$3,02 \cdot 10^{-1}$	$3,84 \cdot 10^{-1}$	$2,82 \cdot 10^{-1}$	3,65	$6,33 \cdot 10^{-1}$	1,53	$1,57 \cdot 10^{-2}$	1,29	$3,40 \cdot 10^{-1}$	$5,50 \cdot 10^{-1}$
	R_{sh}	$3,06 \cdot 10^1$	$1,13 \cdot 10^2$	$1,39 \cdot 10^2$	$2,99 \cdot 10^2$	$1,45 \cdot 10^2$	$5,81 \cdot 10^1$	$1,06 \cdot 10^3$	$1,78 \cdot 10^{-1}$	$8,00 \cdot 10^3$	$1,95 \cdot 10^2$	$5,52 \cdot 10^1$
	a	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35

Tabla 4: Resultados de los parámetros calculados para el modelo 2D/2R.

Método de ajuste	Parámetros	RTC	TNJ	ZTJ	3G30C	PWP	KC200	SPV	PSC	DHV 4S1P	CTJ30	MLU
Numérico	I_{pv}	$7,68 \cdot 10^{-1}$	$5,38 \cdot 10^{-1}$	$4,73 \cdot 10^{-1}$	$5,29 \cdot 10^{-1}$	1,00	8,38	$5,01 \cdot 10^{-1}$	8,18	$4,71 \cdot 10^{-1}$	$4,82 \cdot 10^{-1}$	9,33
	I_{01}	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-33}$	$3,69 \cdot 10^{-35}$	$7,10 \cdot 10^{-35}$	$3,50 \cdot 10^{-31}$	$4,00 \cdot 10^{-30}$	$1,29 \cdot 10^{-35}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-35}$	$1,48 \cdot 10^{-33}$	$-2,15 \cdot 10^{-31}$
	I_{02}	$9,71 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-34}$	$4,62 \cdot 10^{-36}$	$4,66 \cdot 10^{-35}$	$4,05 \cdot 10^{-43}$	$-5,94 \cdot 10^{-30}$	$9,85 \cdot 10^{-35}$	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-37}$	$-1,64 \cdot 10^{-33}$	$3,03 \cdot 10^{-31}$
	R_s	$5,00 \cdot 10^{-2}$	$2,98 \cdot 10^{-1}$	$3,24 \cdot 10^{-1}$	$2,12 \cdot 10^{-1}$	2,07	$4,80 \cdot 10^{-1}$	$8,69 \cdot 10^{-1}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	1,25	$2,96 \cdot 10^{-1}$	$3,22 \cdot 10^{-1}$
	R_{sh}	$1,78 \cdot 10^1$	$6,57 \cdot 10^1$	$1,07 \cdot 10^2$	$3,83 \cdot 10^2$	$2,65 \cdot 10^2$	$4,70 \cdot 10^1$	$9,72 \cdot 10^2$	$1,79 \cdot 10^{-1}$	$1,63 \cdot 10^3$	$1,29 \cdot 10^2$	$3,23 \cdot 10^1$
	a_1	1,47	1,65	1,34	1,35	1,33	1,41	1,34	1,33	1,80	1,36	1,44
	a_2	1,22	1,30	1,40	1,35	$9,39 \cdot 10^{-1}$	$2,60 \cdot 10^1$	1,36	1,39	1,25	1,51	1,31
	I_{pv}	$7,62 \cdot 10^{-1}$	$5,24 \cdot 10^{-1}$	$4,63 \cdot 10^{-1}$	$5,20 \cdot 10^{-1}$	-	8,30	$5,04 \cdot 10^{-1}$	8,03	$4,68 \cdot 10^{-1}$	$4,76 \cdot 10^{-1}$	8,89
	I_{01}	$1,57 \cdot 10^{-15}$	$6,37 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-4}$	$3,63 \cdot 10^{-17}$	-	$8,76 \cdot 10^{-4}$	$7,17 \cdot 10^{-64}$	$-5,16 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-37}$	$1,17 \cdot 10^{-26}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$
	I_{02}	$2,41 \cdot 10^8$	$-7,83 \cdot 10^{-4}$	$-2,98 \cdot 10^{-4}$	$-2,71 \cdot 10^{-4}$	-	$-8,76 \cdot 10^7$	$3,44 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^8$	$-9,04 \cdot 10^{-25}$	$-7,23 \cdot 10^{-23}$	$-3,41 \cdot 10^{-22}$
Analítico	R_s	$8,58 \cdot 10^{-2}$	$-2,42 \cdot 10^{-1}$	$-2,47 \cdot 10^{-1}$	$-5,34 \cdot 10^{-2}$	-	$5,28 \cdot 10^{-1}$	$9,77 \cdot 10^{-1}$	$9,98 \cdot 10^{-3}$	1,47	$5,08 \cdot 10^{-1}$	$7,62 \cdot 10^{-2}$
	R_{sh}	$3,79 \cdot 10^1$	$9,35 \cdot 10^2$	$1,10 \cdot 10^3$	$6,54 \cdot 10^3$	-	$4,60 \cdot 10^1$	$9,70 \cdot 10^2$	$1,57 \cdot 10^{-1}$	$2,14 \cdot 10^3$	$7,53 \cdot 10^1$	$2,15 \cdot 10^2$
	a_1	$6,57 \cdot 10^{-1}$	4,73	4,81	2,72	-	2,00	$7,25 \cdot 10^{-1}$	9,35	1,27	1,69	5,52
	a_2	2,00	2,00	2,00	2,00	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	I_{pv}	$7,62 \cdot 10^{-1}$	$5,24 \cdot 10^{-1}$	$4,63 \cdot 10^{-1}$	$5,20 \cdot 10^{-1}$	-	8,30	$5,04 \cdot 10^{-1}$	8,03	$4,68 \cdot 10^{-1}$	$4,76 \cdot 10^{-1}$	8,89
	I_{01}	$1,57 \cdot 10^{-15}$	$6,37 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-4}$	$3,63 \cdot 10^{-17}$	-	$8,76 \cdot 10^{-4}$	$7,17 \cdot 10^{-64}$	$-5,16 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-37}$	$1,17 \cdot 10^{-26}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$

Para finalizar se realiza una comparación entre los resultados obtenidos mediante el empleo de modelos explícitos, [12], y mediante el empleo de modelos implícitos. En la Tabla 5 se recogen los errores asociados a los resultados obtenidos con los modelos explícitos estudiado en [12].

En cuanto a la calidad de los ajustes realizados, se puede ver como para algunos dispositivos fotovoltaicos, e.g. dispositivo RTC, los mejores resultados se han obtenido con los modelos explícitos y como para otros, e.g. DHV 4S1P, se han obtenido con los modelos implícitos. En general, los modelos explícitos han arrojado resultados suficientemente buenos, requiriendo capacidades de computo muy inferiores a las requeridas por los modelos implícitos, por lo que, se considera que deben ser la primera opción. Solamente en circunstancias en las que no se consiga un ajuste suficientemente fino con los modelos explícitos convendría emplear los modelos implícitos.

Tabla 5: Error medio cuadrático y error medio cuadrático adimensionalizado obtenido para cada dispositivo fotovoltaico.

Modelo	Método de ajuste		RTC	TNJ	ZTJ	3G30C	PWP	KC200	SPV	PSC	DHV 4S1P	CTJ30	MLU
Das	Numérico	RMSE	6,00·10 ⁻³	6,00·10 ⁻³	2,00·10 ⁻³	3,00·10 ⁻³	1,00·10 ⁻²	1,20·10 ⁻¹	5,00·10 ⁻³	1,37·10 ⁻¹	2,20·10 ⁻²	1,40·10 ⁻²	7,60·10 ⁻²
		ξ	7,68·10 ⁻³	1,14·10 ⁻²	4,73·10 ⁻³	5,36·10 ⁻³	9,89·10 ⁻³	1,47·10 ⁻²	1,01·10 ⁻²	1,81·10 ⁻²	4,69·10 ⁻²	2,88·10 ⁻²	8,46·10 ⁻³
	Analítico	RMSE	9,00·10 ⁻³	2,00·10 ⁻²	4,00·10 ⁻³	5,00·10 ⁻³	1,50·10 ⁻²	1,33·10 ⁻¹	8,00·10 ⁻³	2,42·10 ⁻¹	3,60·10 ⁻²	3,10·10 ⁻²	2,22·10 ⁻¹
		ξ	1,15·10 ⁻²	3,81·10 ⁻²	9,47·10 ⁻³	8,93·10 ⁻³	1,48·10 ⁻²	1,63·10 ⁻²	1,61·10 ⁻²	3,20·10 ⁻²	7,68·10 ⁻²	6,38·10 ⁻²	2,47·10 ⁻²
K&H	Numérico	RMSE	6,00·10 ⁻³	6,00·10 ⁻³	2,00·10 ⁻³	3,00·10 ⁻³	1,00·10 ⁻²	1,20·10 ⁻¹	5,00·10 ⁻³	7,20·10 ⁻²	2,20·10 ⁻²	1,40·10 ⁻²	7,60·10 ⁻²
		ξ	7,87·10 ⁻³	1,13·10 ⁻²	4,35·10 ⁻³	5,56·10 ⁻³	9,66·10 ⁻³	1,47·10 ⁻²	9,79·10 ⁻³	9,54·10 ⁻³	4,67·10 ⁻²	2,90·10 ⁻²	8,44·10 ⁻³
	Analítico	RMSE	7,20·10 ⁻²	2,40·10 ⁻²	2,80·10 ⁻²	2,40·10 ⁻²	1,40·10 ⁻¹	9,06·10 ⁻¹	2,10·10 ⁻²	1,63	1,05·10 ⁻¹	1,19·10 ⁻¹	1,70
		ξ	9,45·10 ⁻²	4,54·10 ⁻²	6,09·10 ⁻²	4,45·10 ⁻²	1,35·10 ⁻¹	1,11·10 ⁻¹	4,11·10 ⁻²	2,16·10 ⁻¹	2,23·10 ⁻¹	2,46·10 ⁻¹	1,89·10 ⁻¹
P&C	Numérico	RMSE	3,00·10 ⁻³	4,00·10 ⁻³	3,00·10 ⁻³	3,00·10 ⁻³	7,00·10 ⁻³	8,80·10 ⁻²	8,00·10 ⁻³	8,00·10 ⁻²	1,20·10 ⁻²	1,20·10 ⁻²	8,80·10 ⁻²
		ξ	4,20·10 ⁻³	7,91·10 ⁻³	6,22·10 ⁻³	5,36·10 ⁻³	7,00·10 ⁻³	1,07·10 ⁻²	1,56·10 ⁻²	1,06·10 ⁻²	2,58·10 ⁻²	2,59·10 ⁻²	9,90·10 ⁻³
	Analítico	RMSE	3,00·10 ⁻³	1,40·10 ⁻²	1,10·10 ⁻²	7,00·10 ⁻³	1,40·10 ⁻²	2,68·10 ⁻¹	1,00·10 ⁻²	3,51·10 ⁻¹	6,10·10 ⁻²	2,10·10 ⁻²	4,54·10 ⁻¹
		ξ	4,20·10 ⁻³	2,77·10 ⁻²	2,28·10 ⁻²	1,25·10 ⁻²	1,40·10 ⁻²	3,26·10 ⁻²	1,95·10 ⁻²	4,65·10 ⁻²	1,31·10 ⁻¹	4,53·10 ⁻²	5,11·10 ⁻²

3.5. Comentario sobre la evolución de la eficiencia de dispositivos fotovoltaicos

Cabe destacar el avance de las tecnologías que supone una mejora significativa en la eficiencia de los dispositivos fotovoltaicos. De hecho, la eficiencia de estos dispositivos, recogidos por estudios en el año 2020 [13], y comparando con la eficiencia que se reportaba en el año 2018 [14], se aprecia un aumento de la eficiencia para algunos tipos de tecnologías, incluso considerando el corto periodo de tiempo entre ambos. En el caso de los dispositivos fotovoltaicos que implementan tecnologías tales como los *multijunctions with c-Si* u otros paneles de silicio, no se presenta un incremento de eficiencia. Mientras que en el caso de los dispositivos fotovoltaicos de *perovskite* dentro de la categoría de *other multijunctions*, se aprecia un salto considerable de la eficiencia.

4. Conclusiones

En este estudio se han obtenido modelos ajustados a la curva intensidad/voltaje de los dispositivos fotovoltaicos propuestos. Además, se ha realizado una comparación entre diferentes modelizaciones de estas curvas.

Los parámetros obtenidos mediante el ajuste de las curvas de los diferentes dispositivos fotovoltaicos se recogen en las Tablas 3 y 4. La Tabla 3 presenta los resultados para el modelo de 1R/2D, para ajuste analítico y numérico. La Tabla 4 recoge estos mismos datos para el caso de 2R/2D. El RMSE y RMSE adimensionalizado obtenido en cada caso respecto a los datos experimentales se resume en la Tabla 2. Estos errores han sido muy bajos en la mayoría de los casos, considerando que se han obtenido modelos válidos para todas las combinaciones de modelos, métodos de ajuste y dispositivos, con una única excepción. La variabilidad entre los resultados es sin embargo de gran interés.

En cuanto a la comparación de los diferentes métodos de resolución, los resultados obtenidos mediante la resolución numérica logran generalmente un error (RSME) más bajo respecto a los datos experimentales. Sin embargo, la ventaja de los modelos analíticos reside en la velocidad de computación que ofrecen, por lo que se consideran de interés para aplicaciones espaciales, donde no se requieren grandes precisiones y la velocidad de cálculo puede ser relevante.

Por último, se puede apreciar como los resultados no sugieren que un modelo, ya sea explícito o implícito sea más eficaz para todos los casos. En general, los modelos implícitos, que requieren una capacidad computacional mayor a las requeridas por los modelos explícitos han proporcionado buenos resultados, aunque se considera que no deben ser la primera opción, ya que los modelos explícitos arrojan resultados suficientemente buenos. Solamente en circunstancias en las que no se consiga un ajuste suficientemente preciso con los modelos explícitos convendría estudiar el uso de modelos implícitos.

Referencias

- [1] I-V curves database for different solar panel cells.
- [2] I-V curves database for different DHV solar panel cells.
- [3] Thin triple-junction solar cell for space applications (CTJ30-Thin).
URL www.cesi.it
- [4] Photovoltaic modules (MLU).
URL www.mitsubishielectricsolar.com
- [5] S. Pindado, J. Cubas, F. Sorribes-Palmer, On the analytical approach to present engineering problems: Photovoltaic systems behavior, wind speed sensors performance, and high-speed train pressure wave effects in tunnels, *Mathematical Problems in Engineering* (2015).
- [6] D. A. Barry, J.-Y. Parlange, L. Li, H. Prommer, C. J. Cunningham, F. Stagnitti, Analytical approximations for real values of the lambert w-function (2000).
- [7] S. Pindado, E. Roibas-Millan, J. Cubas, J. M. Alvarez, D. Alfonso-Corcuera, J. L. Cubero-Estalrich, A. Gonzalez-Estrada, M. Sanabria-Pinzon, R. Jado-Puente, Simplified lambert w-function math equations when applied to photovoltaic systems modeling, *IEEE Transactions on Industry Applications* (2021).
- [8] E. Saloux, A. Teyssedou, M. Sorin, Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point, *Solar Energy* 85 (2011) 713–722.
- [9] S. X. Lun, C. J. Du, T. T. Guo, S. Wang, J. S. Sang, J. P. Li, A new explicit i-v model of a solar cell based on taylor’s series expansion, *Solar Energy* 94 (2013) 221–232.
- [10] M. Babescu, C. Sorandaru, S. Musuroi, M. Svoboda, N. V. Olarescu, An approach on mathematical modeling of photovoltaic solar panels, *SACI 2013 - 8th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Proceedings* (2013) 239–243.
- [11] K. Leban, E. Ritchie, Selecting the accurate solar panel simulation model (2008).
URL <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/818>
- [12] J. V. Mateos, R. L. López, D. M. Caballero, P. Z. Montaña, Modelización de las curvas características de dispositivos fotovoltaicos de uso espacial. Modelos explícitos. (2021).

- [13] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao, Solar cell efficiency tables (version 56), Progress in Photovoltaics: Research and Applications 28 (2020) 629–638.
- [14] M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A. W. Ho-Baillie, Solar cell efficiency tables (version 53), Progress in Photovoltaics: Research and Applications 27 (2019) 3–12.

A. Anexo I

A.1. Modelo de 1-Diodo/2-Resistencias

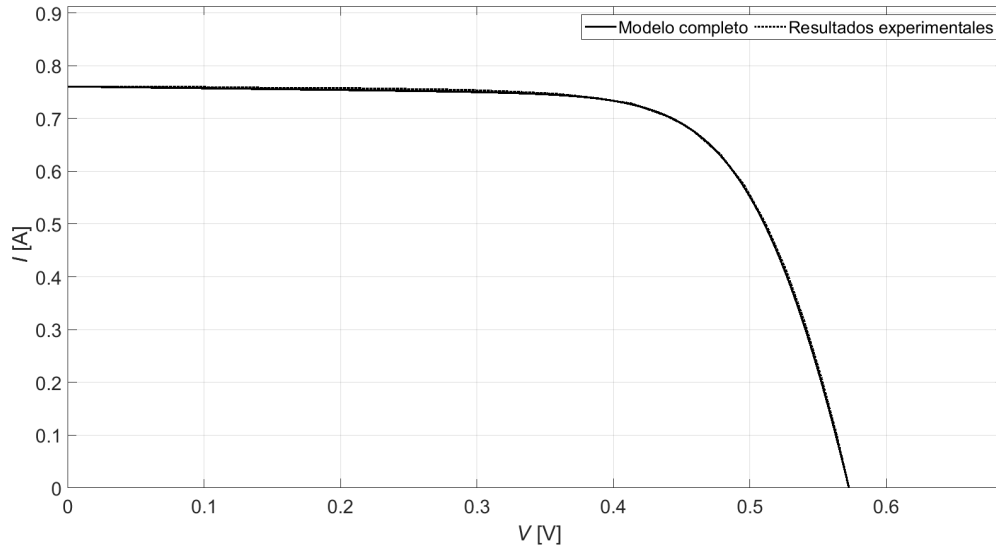


Figura 27: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

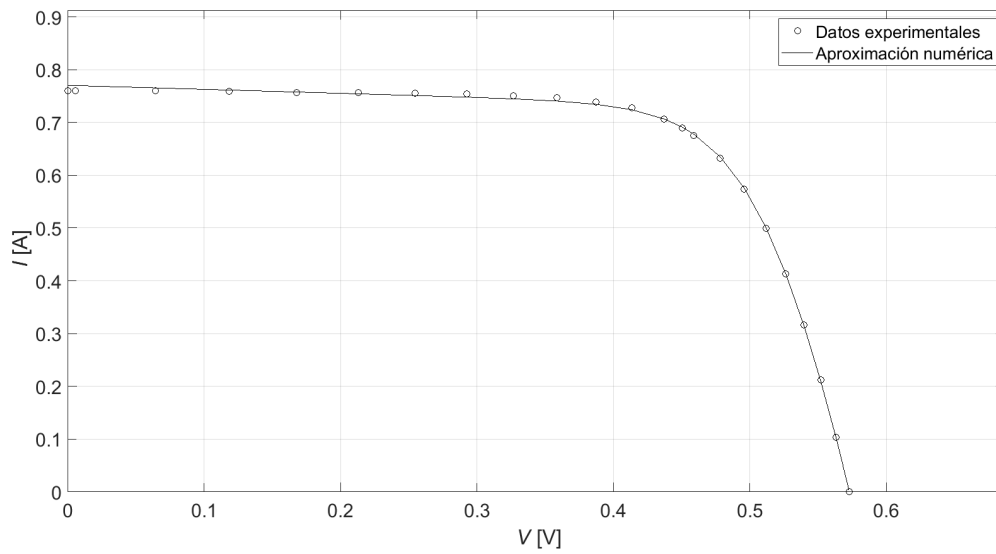


Figura 28: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

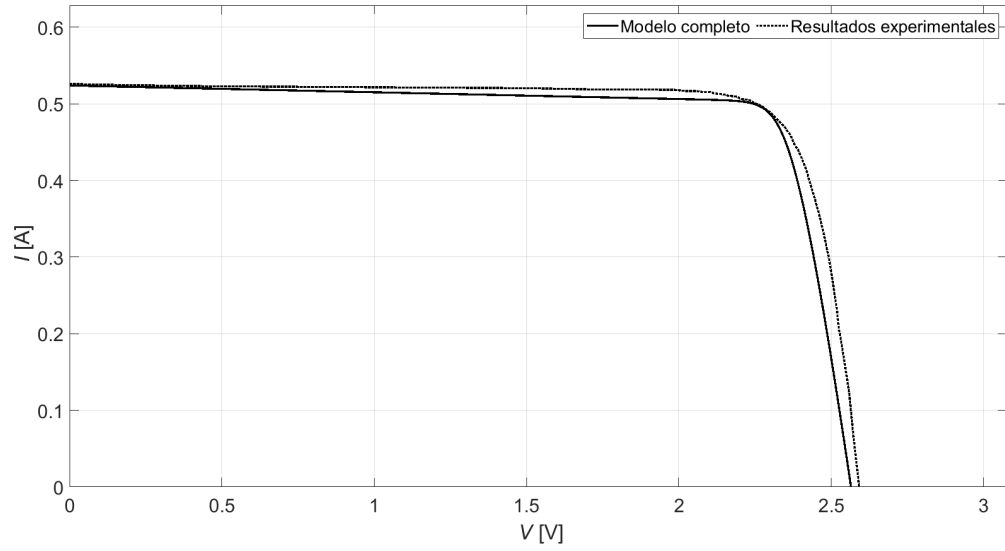


Figura 29: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

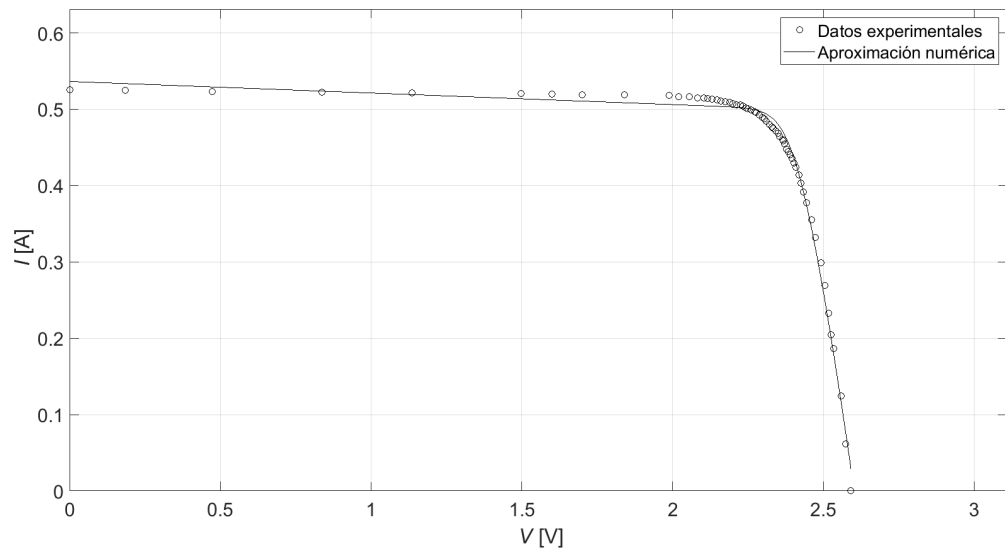


Figura 30: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

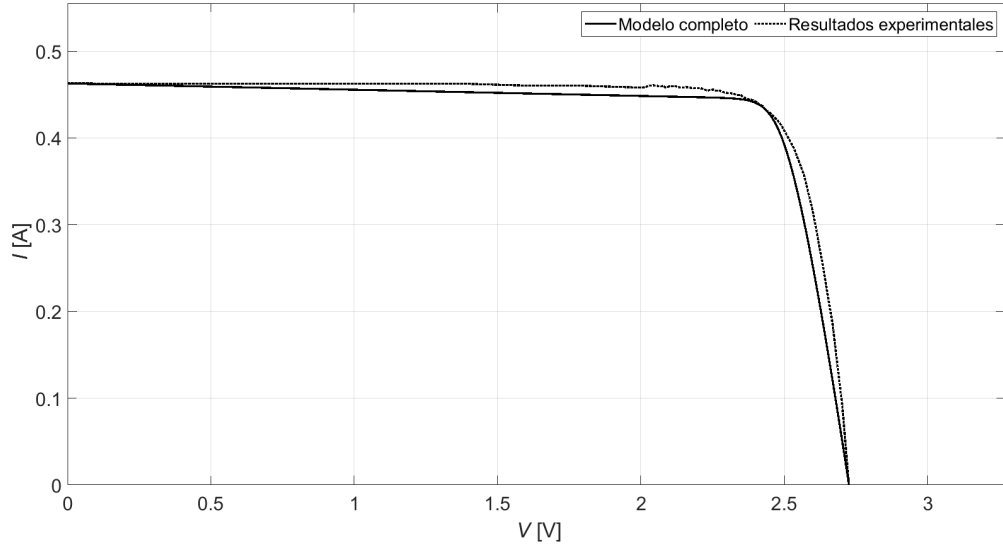


Figura 31: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

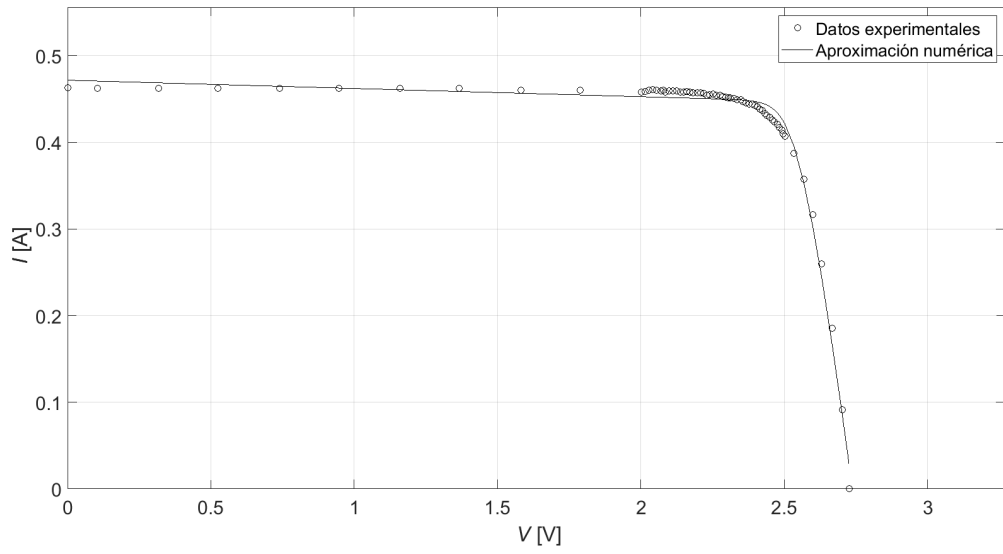


Figura 32: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

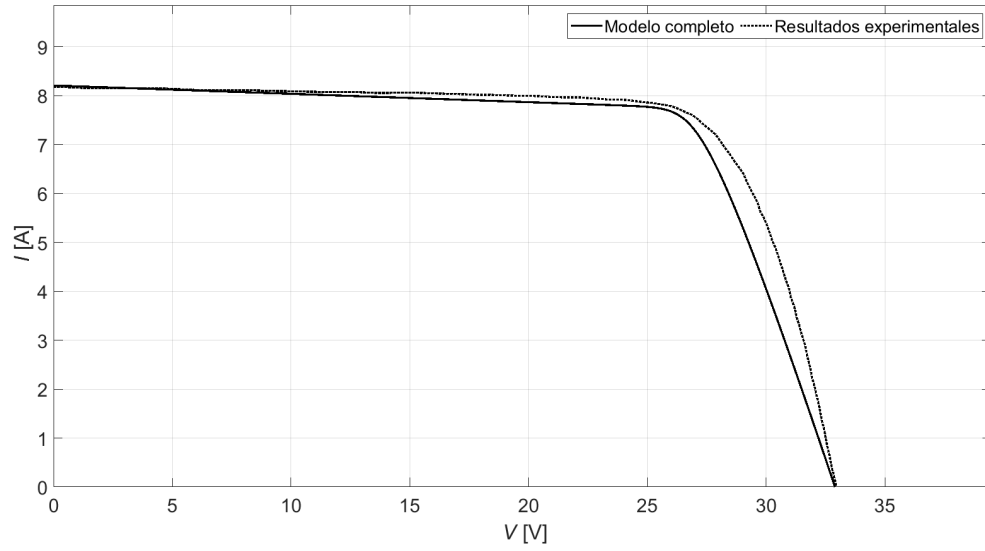


Figura 33: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

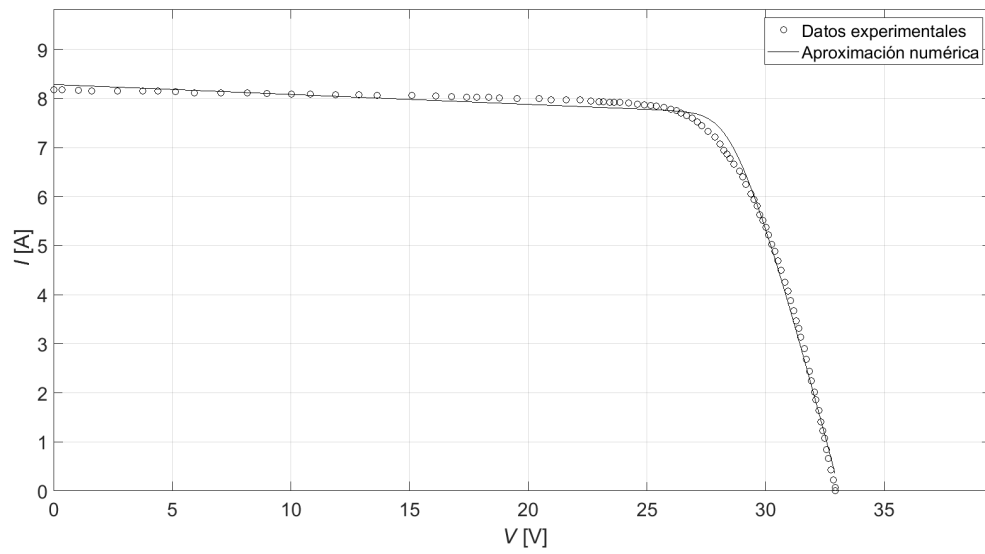


Figura 34: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

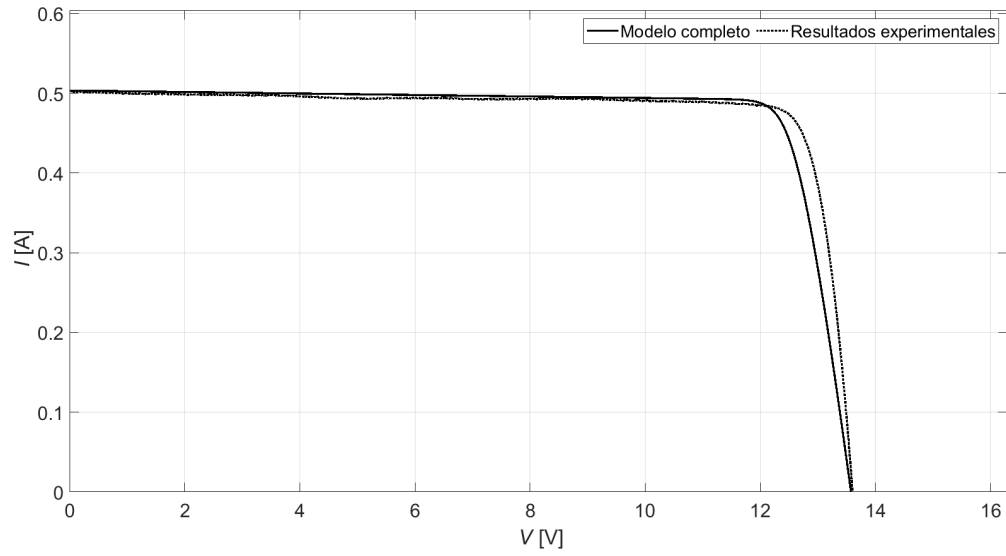


Figura 35: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

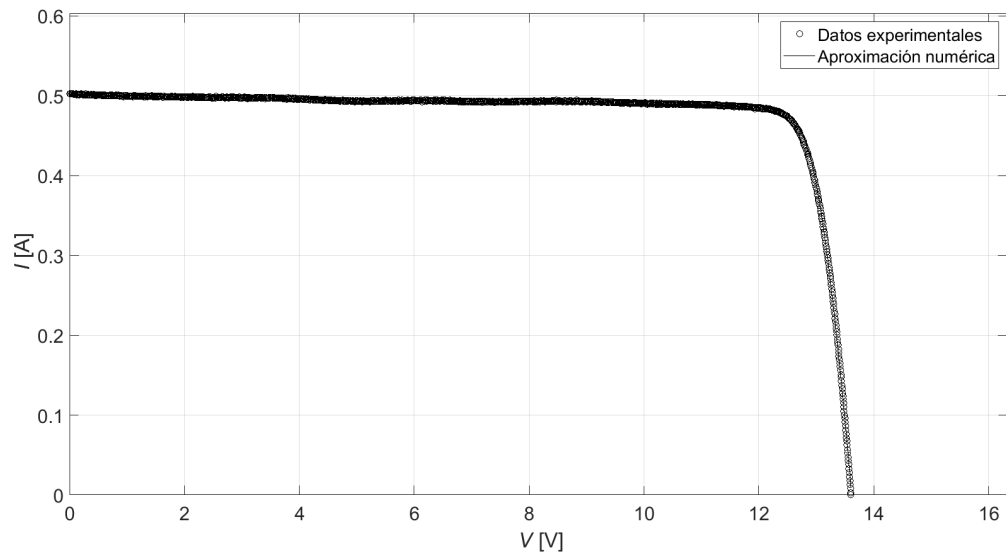


Figura 36: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

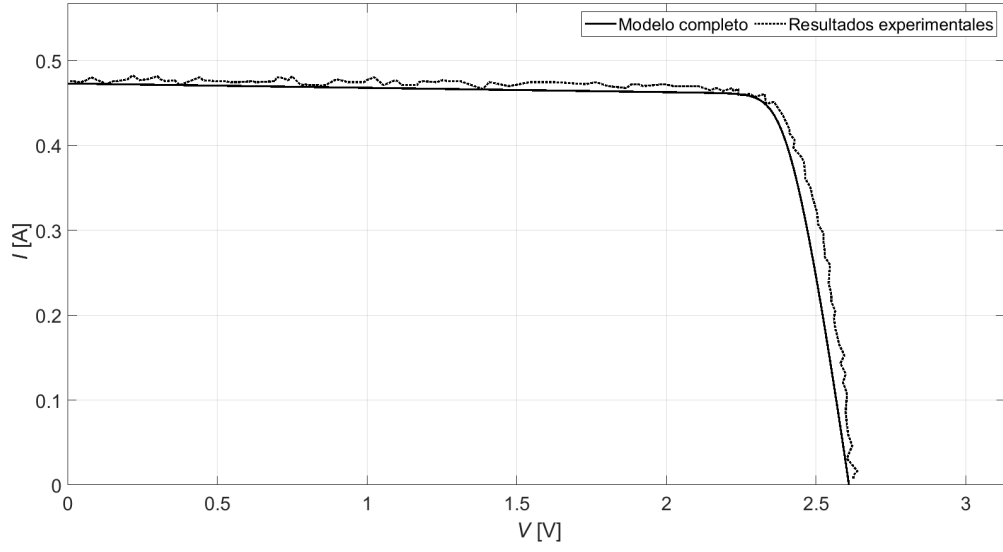


Figura 37: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

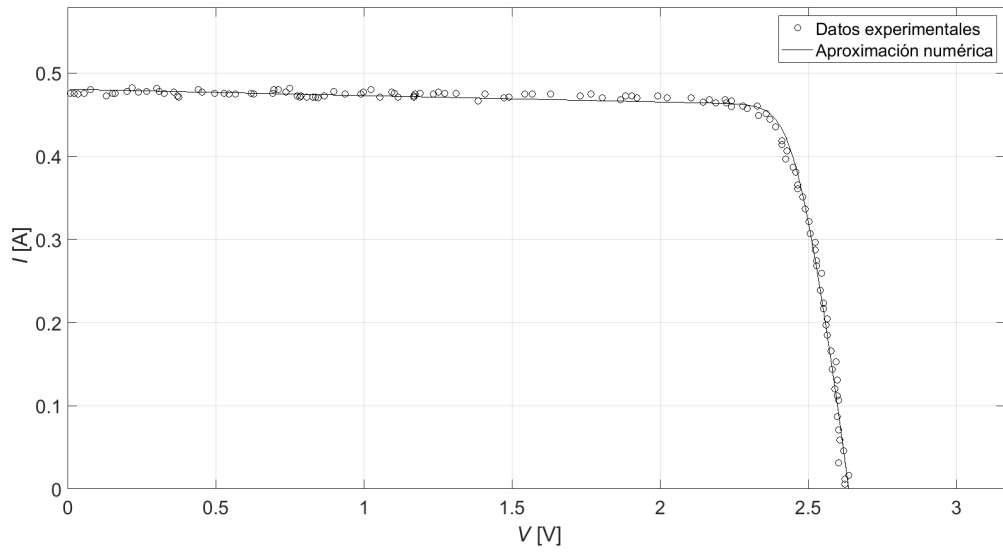


Figura 38: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución numérica del modelo de 1D/2R.

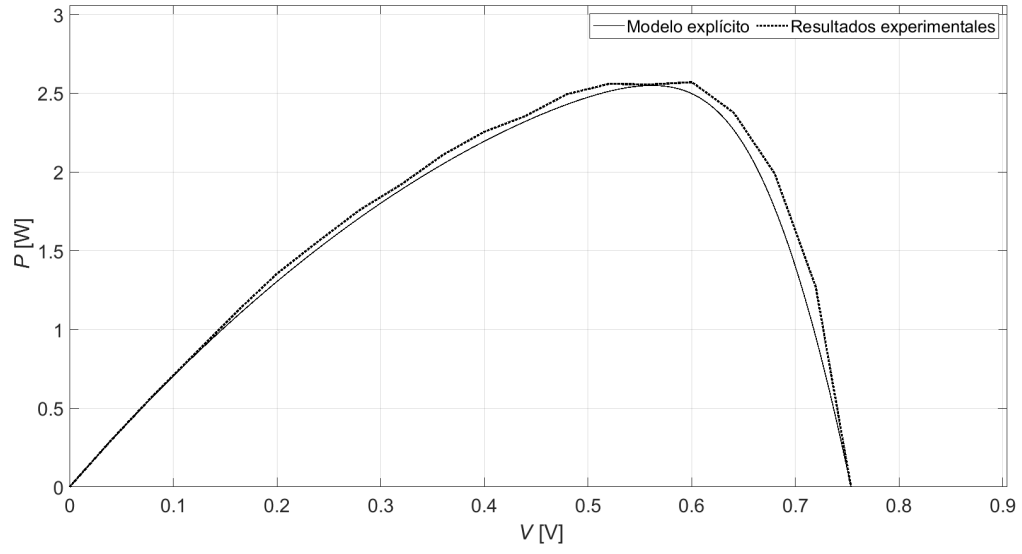


Figura 39: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

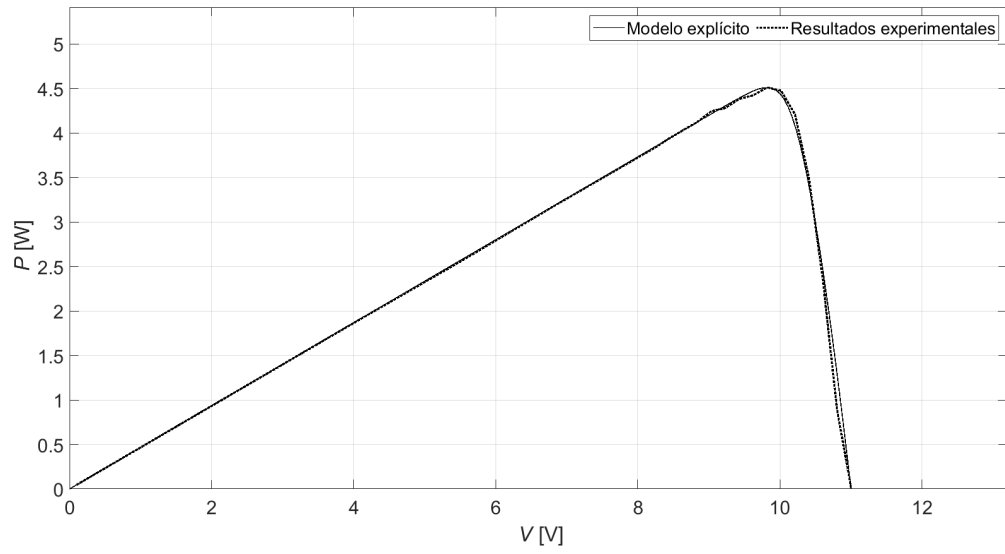


Figura 40: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

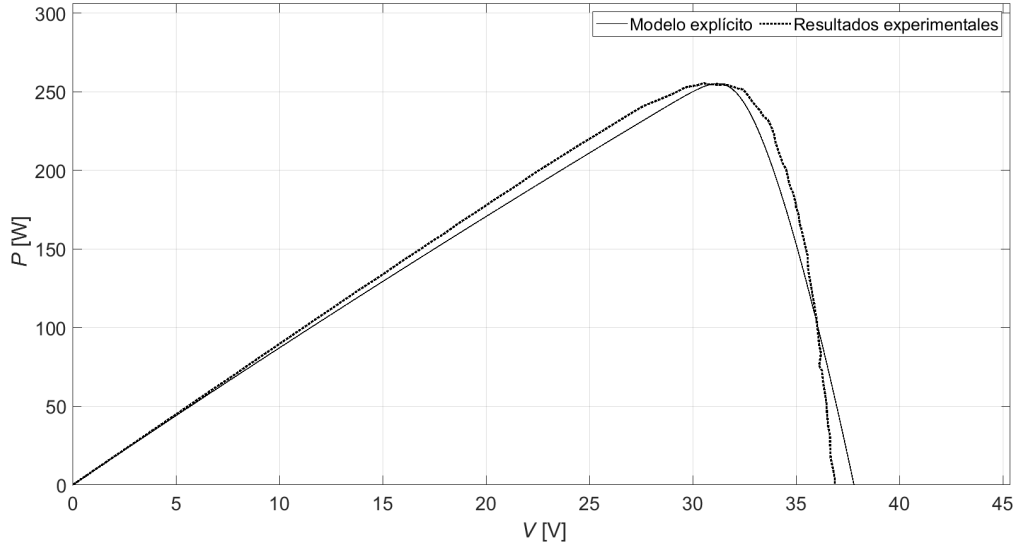


Figura 41: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico MLU empleando la resolución analítica del modelo de 1D/2R.

A.2. Modelo de 2-Diodo/2-Resistencias

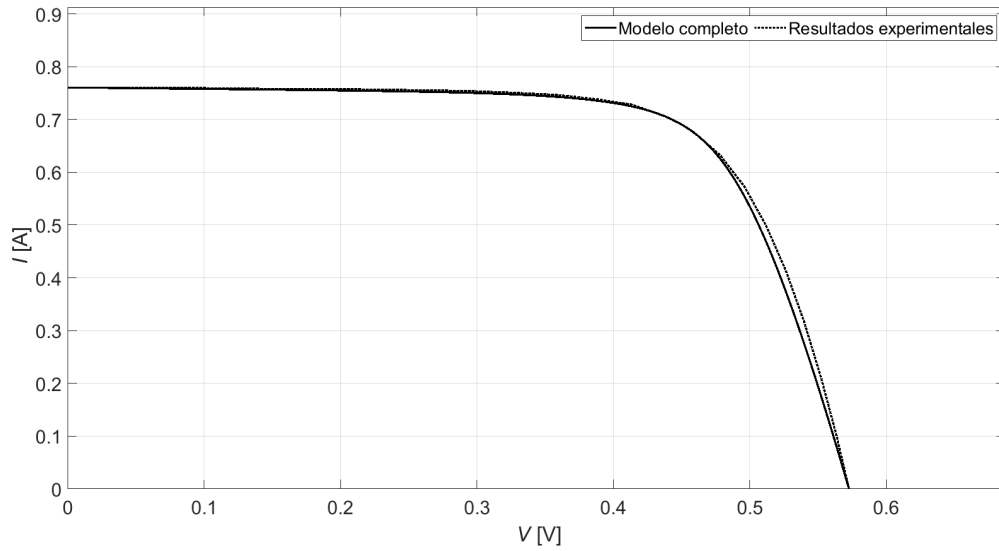


Figura 42: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

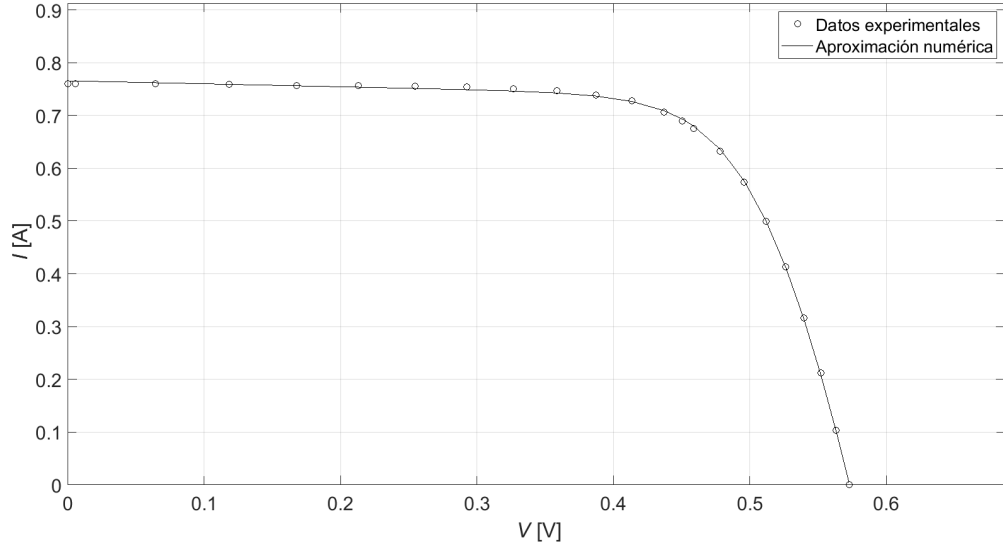


Figura 43: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

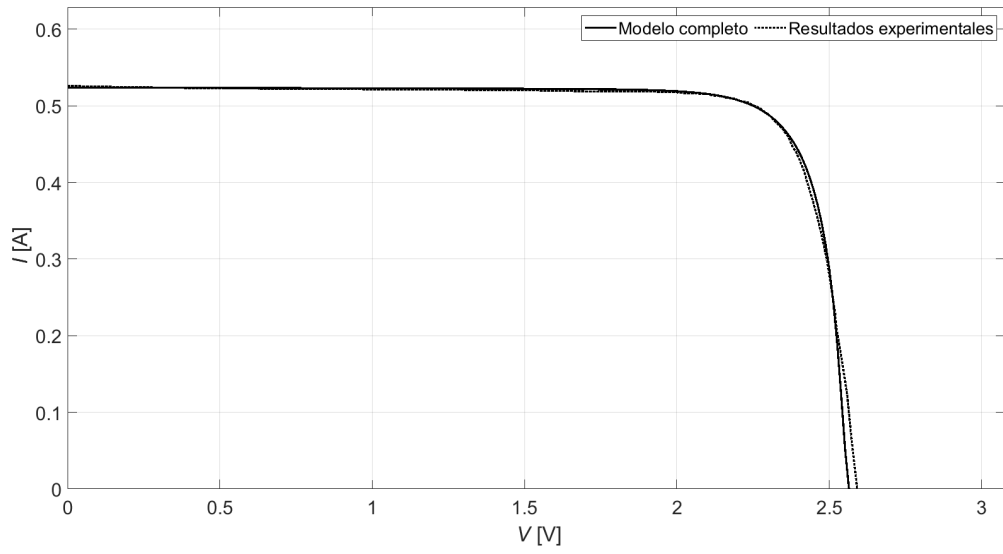


Figura 44: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

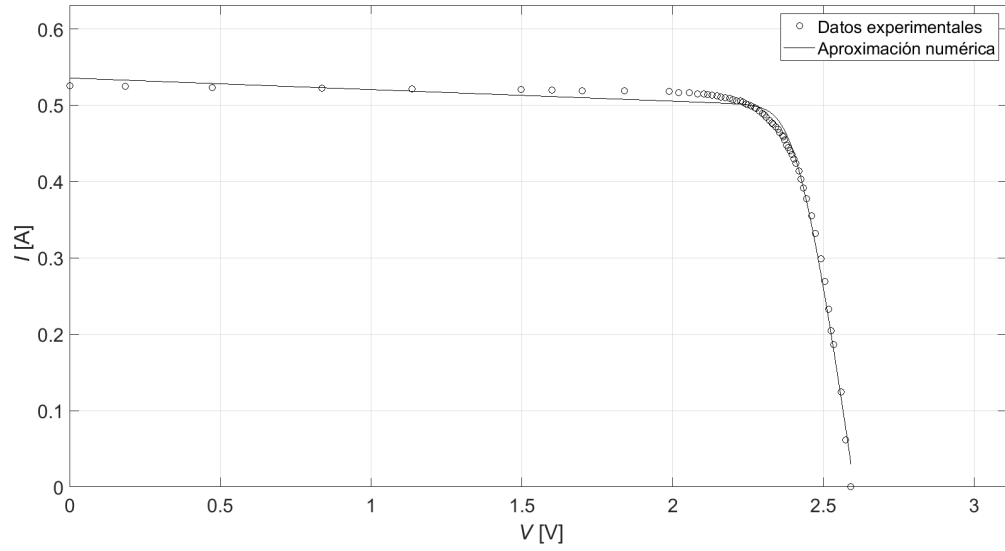


Figura 45: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

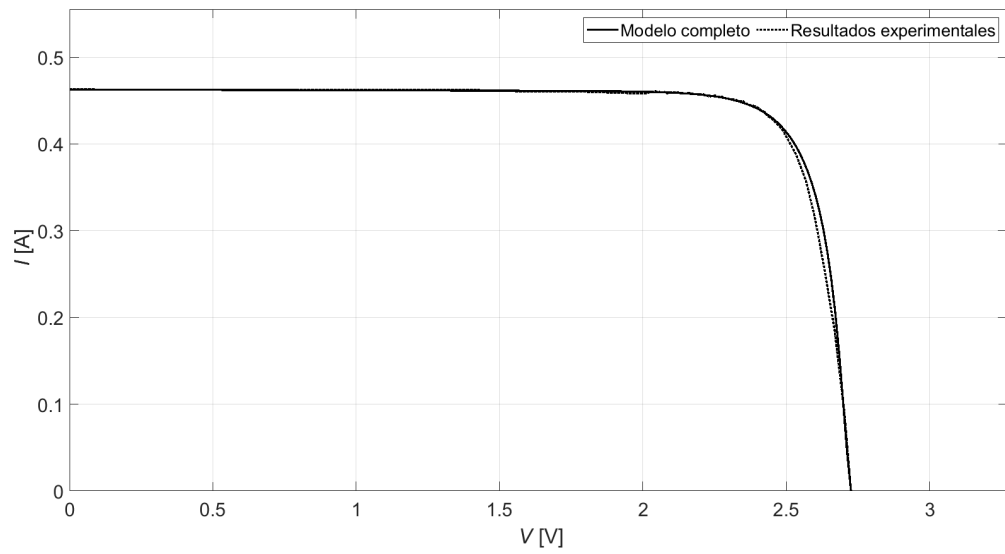


Figura 46: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

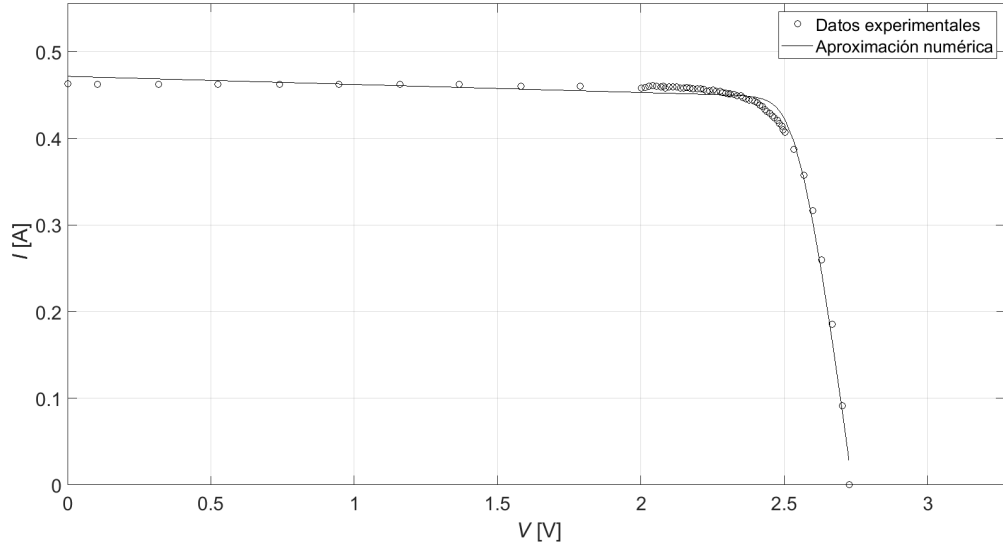


Figura 47: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

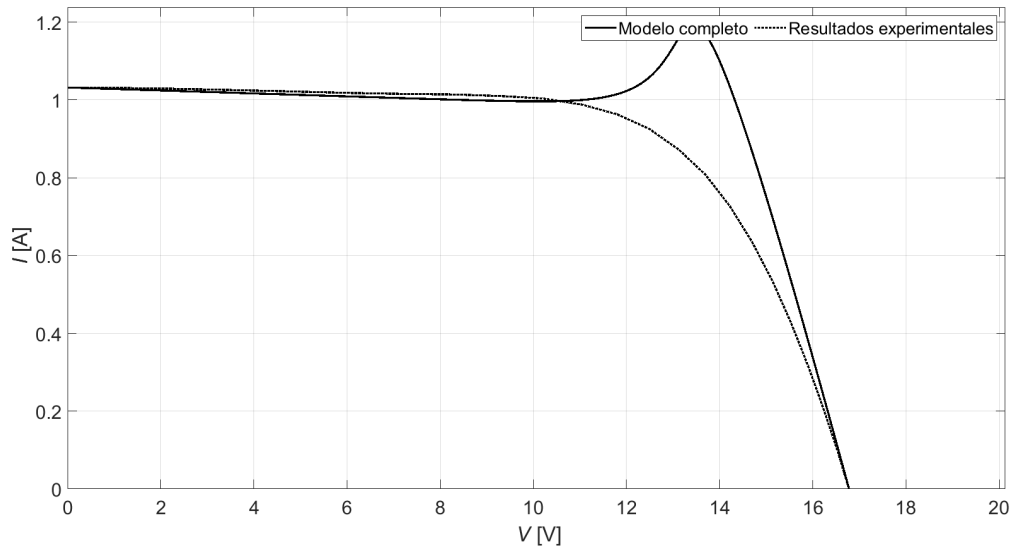


Figura 48: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

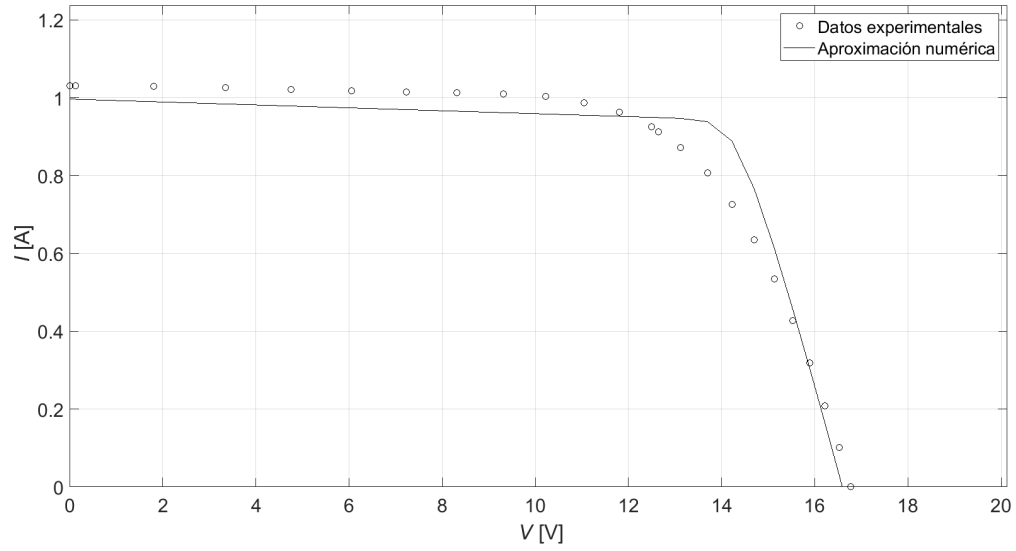


Figura 49: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

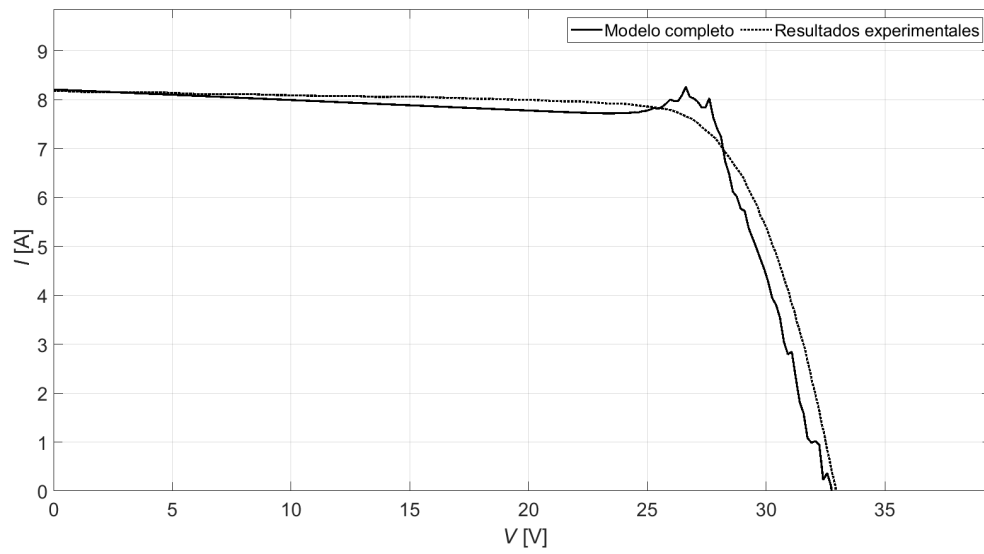


Figura 50: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

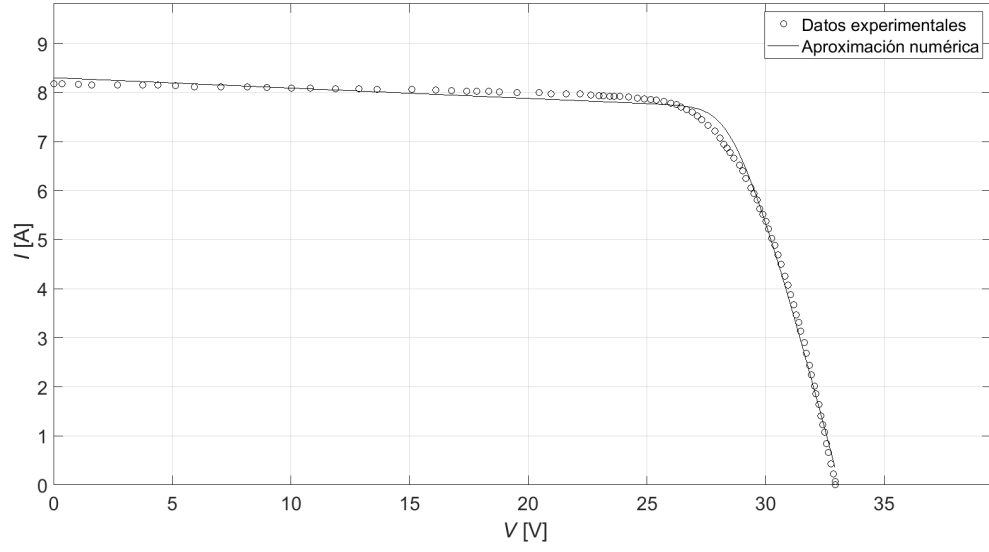


Figura 51: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

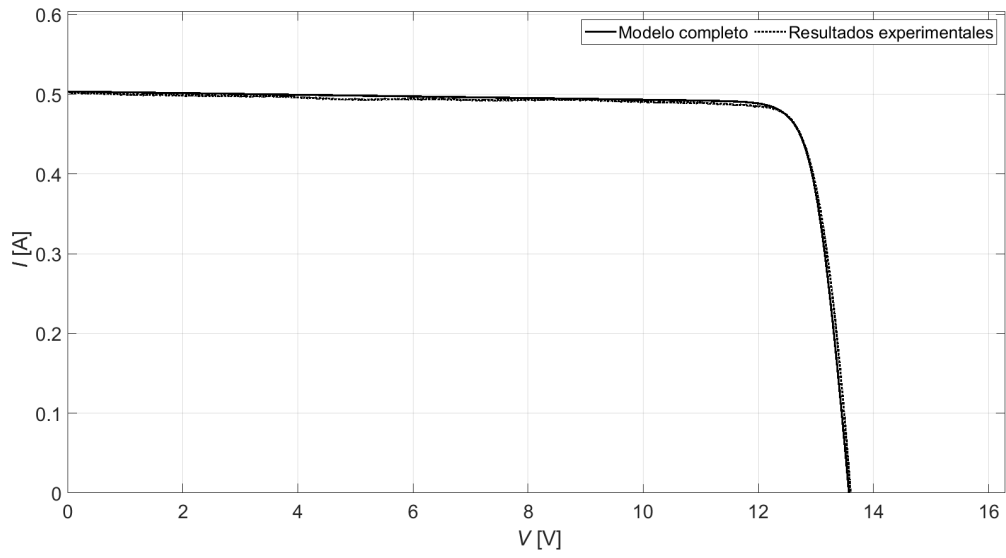


Figura 52: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

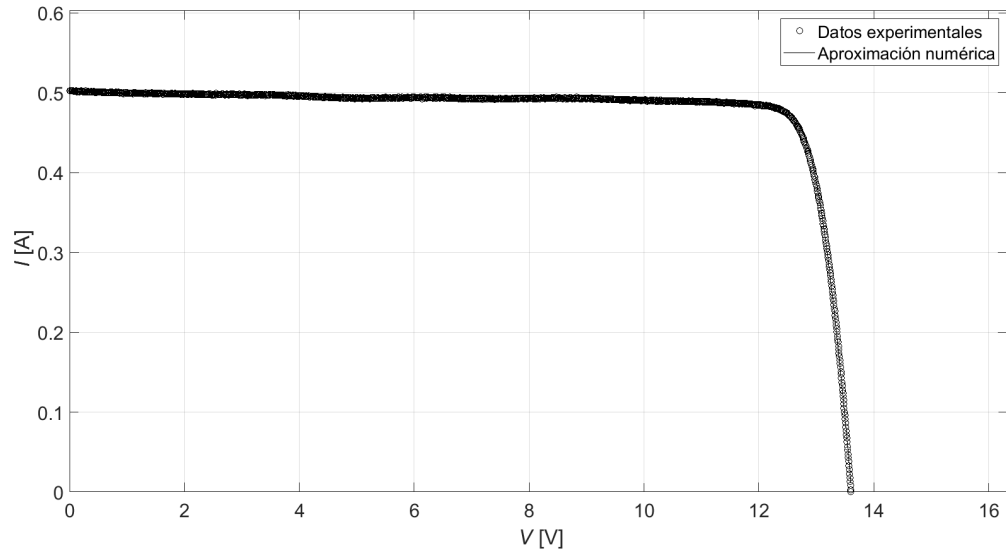


Figura 53: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

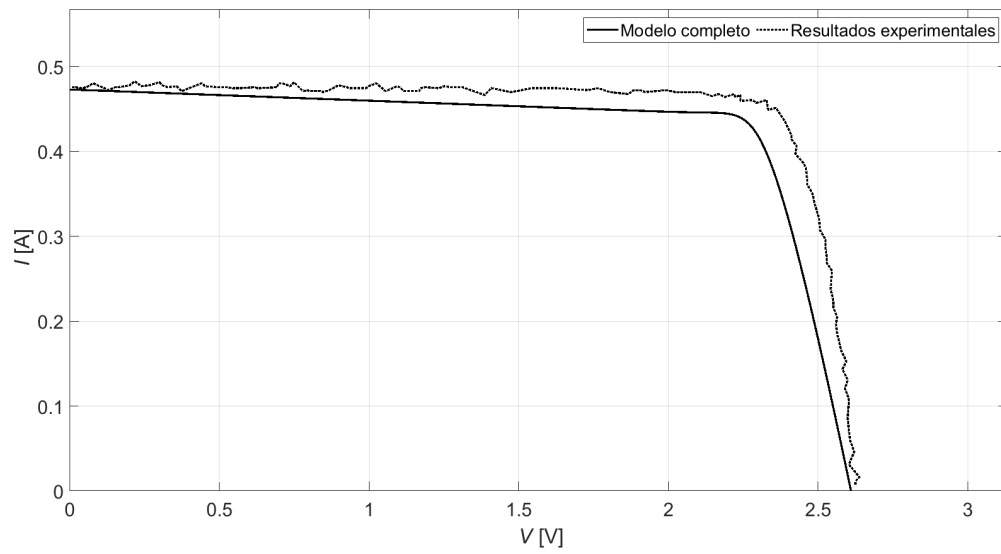


Figura 54: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

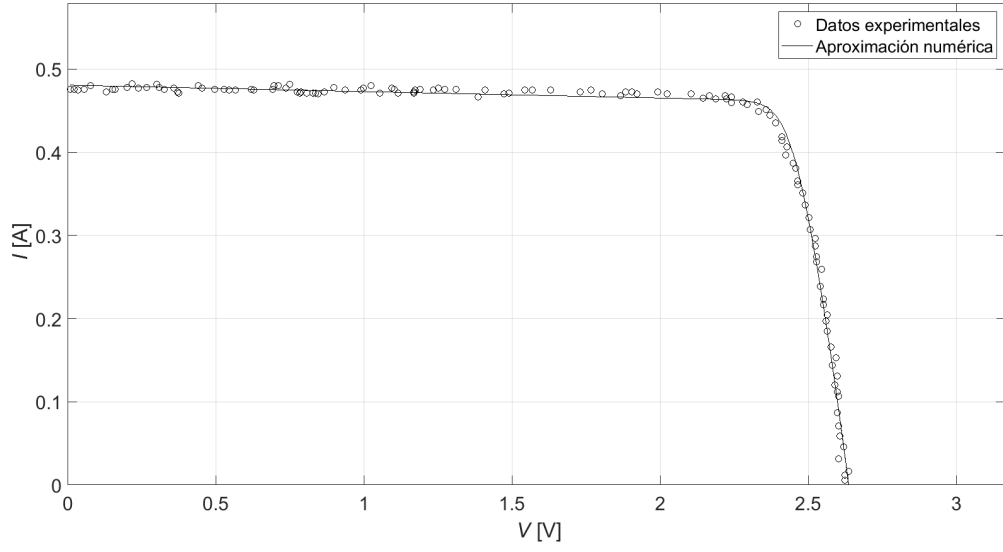


Figura 55: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución numérica del modelo de 2D/2R.

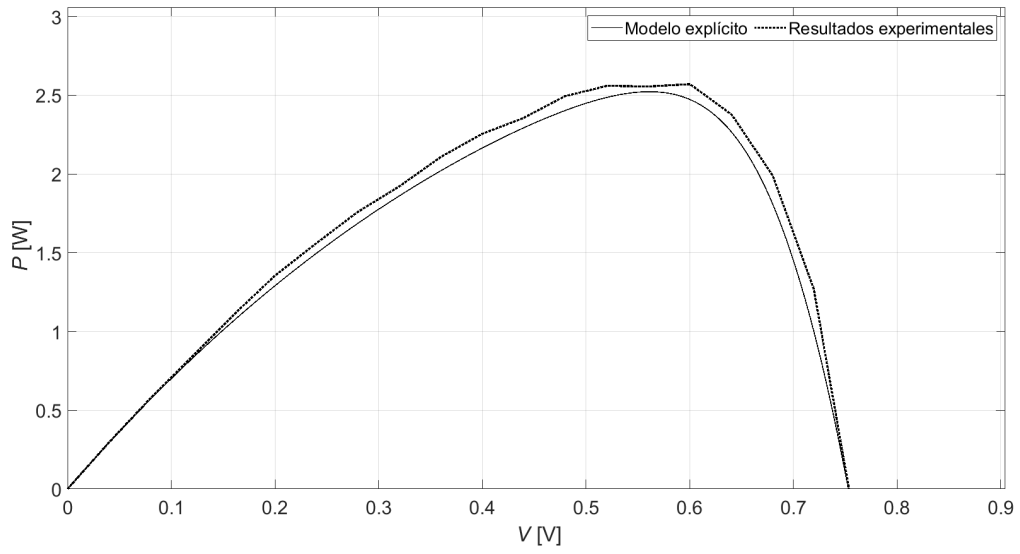


Figura 56: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

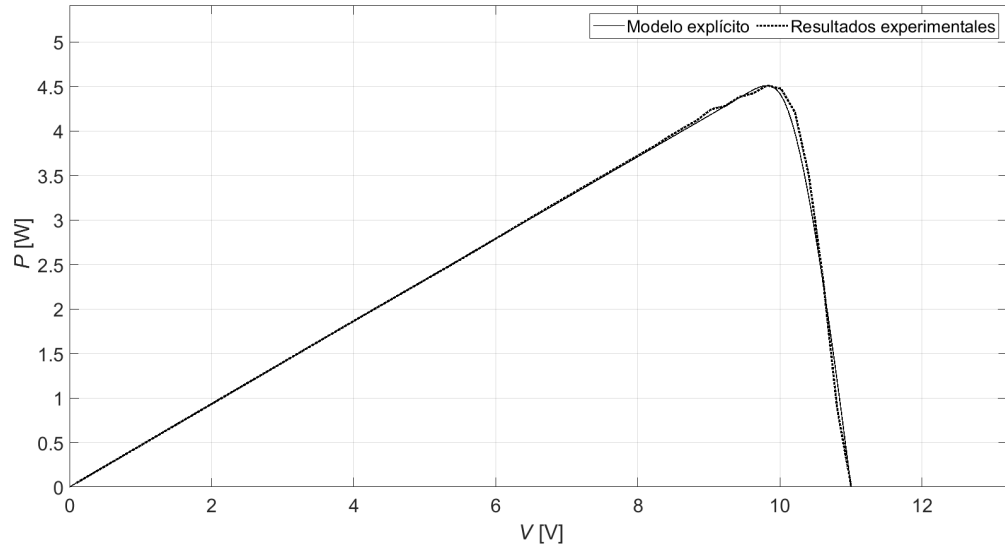


Figura 57: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.

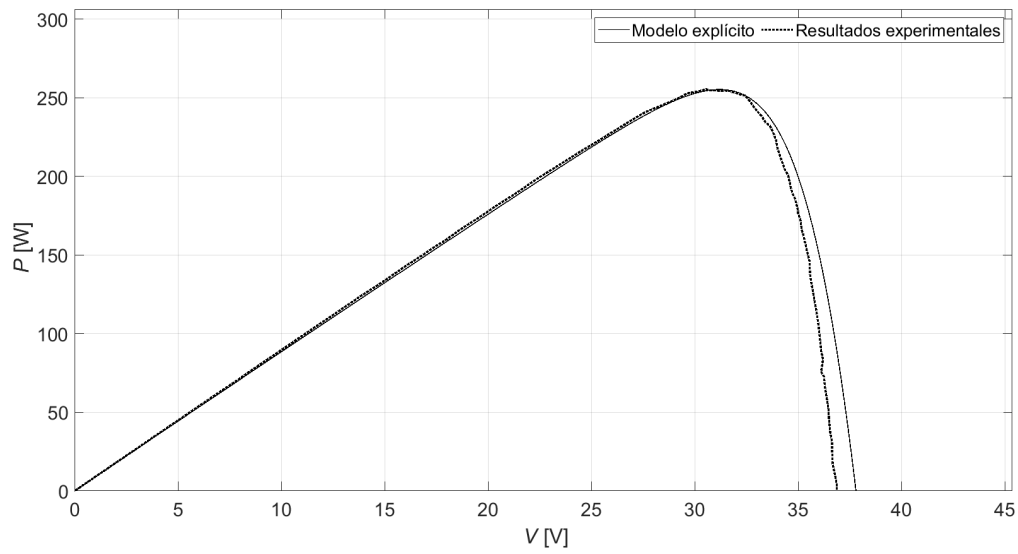


Figura 58: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico MLU empleando la resolución analítica del modelo de 2D/2R.