

Modelización de las curvas características de dispositivos fotovoltaicos de uso espacial. Modelos explícitos.

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 diversos modelos experimentales y una valoración crítica de su capacidad para representar con exactitud las curvas reales.

Palabras clave: Paneles solares; Células solares; Modelos explícitos; Ajuste de curvas; Karmalkar; Haneefa; Das; Pindado; Cubas;

Es un buen trabajo pero tengo
serias dudas sobre vuestro ajuste
del modelo de Karmalkar y Haneefa.



Índice

1. Introducción	7
2. Metodología	7
2.1. Obtención de datos	7
2.2. Modelos explícitos	8
2.2.1. Modelo de Das	9
2.2.2. Modelo de Karmalkar & Hannefa	9
2.2.3. Modelo de Pindado & Cubas	9
2.3. Método analítico	9
2.3.1. Modelo de Das	9
2.3.2. Modelo de Karmalkar & Hannefa	10
2.3.3. Modelo de Pindado & Cubas	10
2.4. Método numérico	10
2.5. Cálculo de errores	10
3. Resultados	11
3.1. Modelo de Das	11
3.2. Modelo de Karmalkar & Hannefa	15
3.3. Modelo de Pindado & Cubas	19
3.4. Resumen de resultados	23
4. Conclusiones	27
A. Anexo I: Curvas I-V de distintos paneles y con distintos ajustes	28
A.1. Modelo de Das	28
A.2. Modelo de Karmalkar & Hannefa	32
A.3. Modelo de Pindado & Cubas	37

Índice de Figuras

1. Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	11
2. Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de Das.	12
3. Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	12
4. Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico <i>Plastic Solar Cell</i> empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	13
5. Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico <i>Plastic Solar Cell</i> empleando la resolución numérica del modelo de Das.	13
6. Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	14

7.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución numérica del modelo de Das.	14
8.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	15
9.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución numérica del modelo de Das.	15
10.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa explicada en 2.3.2.	16
11.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	16
12.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa explicada en 2.3.2.	17
13.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	17
14.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa explicada en 2.3.2.	18
15.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	18
16.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa explicada en 2.3.2.	19
17.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	19
18.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3 para las dos aproximaciones del parámetro η	20
19.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.4.	20
20.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3 para las dos aproximaciones del parámetro η	21
21.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.4.	21
22.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV-4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3 para las dos aproximaciones del parámetro η	22
23.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV-4S1P empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.4.	22
24.	Curva característica de corriente frente a potencial ajustada analíticamente para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi-MLU empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3 para las dos aproximaciones del parámetro η	23

25.	Curva característica de corriente frente a potencial ajustada numéricamente para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi-MLU empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.4.	23
26.	Error adimensionalizo frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica para todos los métodos explícitos estudiados.	25
27.	Error adimensionalizo frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell empleando la resolución analítica para todos los métodos explícitos estudiados.	25
28.	Error adimensionalizo frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV-4S1P empleando la resolución analítica para todos los métodos explícitos estudiados.	26
29.	Error adimensionalizo frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica para todos los métodos explícitos estudiados.	26
30.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	28
31.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución numérica del modelo de Das explicada en 2.4.	28
32.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	29
33.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	29
34.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	30
35.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	30
36.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	31
37.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	31
38.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico MLU empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.	32
39.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	32
40.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	33
41.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	33
42.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CESA CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	34
43.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CESA CTJ30 empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	34
44.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CESA CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	35

45.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	35
46.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.	36
47.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.. . . .	36
48.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico MLU empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.. . . .	37
49.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	37
50.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	38
51.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	38
52.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	39
53.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	39
54.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	40
55.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	40
56.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	41
57.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	41
58.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	42
59.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	42
60.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	43
61.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	43
62.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	44
63.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	44
64.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	45
65.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	45

66.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	46
67.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	46
68.	Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	47
69.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	47
70.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	48
71.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	48
72.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV-4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	49
73.	Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi-MLU empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.	49

Índice de Tablas

1.	Información relativa a los dispositivos fotovoltaicos estudiados y sus respectivos puntos característicos.	8
2.	Resultados obtenidos del ajuste a diferentes modelizaciones de la curva intensidad-voltaje de datos experimentales, para 11 casos de diferentes dispositivos fotovoltaicos.	24

1. Introducción

El estudio consiste en el ajuste de distintos modelos experimentales a las curvas características reales, obtenidas en ensayos, de varios paneles solares. Estas curvas son: $I-V$ y $P-V$.

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, SPVSX5 y PSC [1]. Y, por el otro, de 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 tres: el modelo de Karmalkar - Haneefa [5] (ajuste biparamétrico: γ y m), el modelo de Das [5] (ajuste biparamétrico: k y h) y el modelo de Pindado - Cubas [5] (ajuste mediante un único parámetro: η).

El presente trabajo se divide en dos secciones: 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 por ajuste de mínimos cuadrados.

Por último se valorará, mediante el cálculo del error relativo, el nivel de aproximación de cada modelo.

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 experimentales, 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 explícitos de Das [5], de Karmalkar & Hannefa [5] y de Pindado & Cubas [5] para obtener curvas que aproximen los datos experimentales. Esto se repite determinando los coeficientes de manera tanto analítica, a través de la *Lambert W-function*, como numérica. 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 explícitos que se estudian, es necesario obtener los puntos característicos de las curvas $I-V$, estos son:

- I_{sc} : Corriente de cortocircuito,
- I_{mp} : Corriente que proporciona la potencia máxima,

- V_{mp} : Potencial que proporciona la potencia máxima,
- V_{oc} : Potencial del circuito abierto,
- β : Relación entre el potencial de potencia máxima y el potencial de circuito abierto,
- α : Relación entre la corriente de potencia máxima y la corriente de cortocircuito.

Los dispositivos fotovoltaicos que se consideran para este estudio 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} [A]	I_{mp} [A]	V_{mp} [V]	V_{oc} [V]
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

Dimensiones

2.2. Modelos explícitos

El uso de modelos explícitos, que sean precisos y sencillos, suele ser requerido para la modelización de las curvas I - V de dispositivos fotovoltaicos. Aunque carezcan de significado físico, su ventaja respecto a modelos tales como el de 1D2R, radica en que estos requieren de una capacidad computacional menor. Estos modelos se basan principalmente en la definición de unos ciertos parámetros, que dependen del modelo implementado. En este caso, los modelos estudiados son: el modelo de Das, el modelo de Karmalkar & Hannefa y el modelo de Pindado & Cubas.

2.2.1. Modelo de Das

El modelo de Das se describe por la siguiente expresión:

$$\frac{I}{I_{sc}} = \frac{1 - \left(\frac{V}{V_{oc}}\right)^k}{1 + h \left(\frac{V}{V_{oc}}\right)}, \quad (1)$$

donde I es la corriente, I_{sc} es la corriente de cortocircuito, V es el potencial, V_{oc} es el potencial de circuito abierto, y h y k son los parámetros a determinar para ajustar este modelo.

2.2.2. Modelo de Karmalkar & Hannefa

El modelo de Karmalkar & Hannefa se expresa con la siguiente relación:

$$\frac{I}{I_{sc}} = 1 - (1 - \gamma) \left(\frac{V}{V_{oc}}\right) - \gamma \left(\frac{V}{V_{oc}}\right)^m, \quad (2)$$

donde γ y m son los parámetros que se tienen que ajustar para este modelo.

2.2.3. Modelo de Pindado & Cubas

El modelo de Pindado & Cubas, en cambio, está definido por dos tramos: un tramo hasta el potencial de potencia máxima, un segundo tramo desde este punto hasta el potencial de circuito abierto. Por lo tanto, está definido de la siguiente forma:

$$I = \begin{cases} I_{sc} \left[1 - \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) \left(\frac{V}{V_{mp}}\right)^{\frac{I_{mp}}{I_{sc} - I_{mp}}} \right] & ; V \leq V_{mp} \\ I_{mp} \frac{V_{mp}}{V} \left[1 - \left(\frac{V - V_{mp}}{V_{oc} - V_{mp}}\right)^\eta \right] & ; V \geq V_{mp} \end{cases}, \quad (3)$$

donde η es el único parámetro que ha de ajustarse en este caso. Además, es conveniente subrayar que este modelo tiene en cuenta las condiciones de máxima potencia.

2.3. Método analítico

La manera más sencilla y eficaz de determinar los parámetros requeridos por cada uno de los modelos es hacerlo de manera analítica. Para ello, se utiliza la *Lambert W-function*, y ya que para valores entre $-e^{-1} < x < 0$ hay dos soluciones, se emplea su rama W_{-1} , que toma la solución menor de la función.

2.3.1. Modelo de Das

Para el modelo de Das es posible obtener los parámetros a través de las siguientes expresiones:

$$k = \frac{W_{-1} \left(\left(\frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \ln \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right) \right)}{\ln \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)}, \quad (4)$$

$$h = \left(\frac{V_{oc}}{V_{mp}} \right) \left(\frac{I_{sc}}{I_{mp}} - \frac{1}{k} - 1 \right). \quad (5)$$

2.3.2. Modelo de Karmalkar & Hannefa

Para el modelo de Karmalkar & Hannefa es posible obtener los parámetros a través de las siguientes expresiones:

$$\gamma = \frac{2 \left(\frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) - 1}{(m-1) \left(\frac{V_{mp} V_{oc}}{V_{oc}} \right)}^m, \quad (6)$$

$$m = \frac{W_{-1} \left(- \left(\frac{V_{oc}}{V_{mp}} \right)^{\frac{1}{K}} \left(\frac{1}{K} \right) \ln \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right) \right)}{\ln \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)} + \frac{1}{K} + 1, \quad (7)$$

donde:

$$K = \frac{1 - \left(\frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) - \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)}{2 \left(\frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) - 1}. \quad (8)$$

2.3.3. Modelo de Pindado & Cubas

Para el modelo de Pindado & Cubas es posible obtener el parámetro η a través de la expresión 9.

$$\eta = \frac{I_{sc}}{I_{mp}} \left(\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{mp}} \right) \left(\frac{V_{oc} - V_{mp}}{V_{oc}} \right). \quad (9)$$

Por otro lado, y en caso de contar con más datos, se puede definir el parámetro de manera más precisa, según la expresión 10.

$$\eta = \frac{\ln(V_{mp} I_{mp} - V^* I^*) - \ln(V_{mp} I_{mp})}{\ln(V^* - V_{mp}) - \ln(V_{oc} - V_{mp})}, \quad (10)$$

donde V^* y I^* son puntos intermedios de la curva en el intervalo comprendido entre el punto de máxima potencia y el de circuito abierto.

2.4. 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:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{modelo,i} - I_{exp,i})^2} \quad (11)$$

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.

2.5. 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. Para este estudio se ha escogido el error *RMSE* adimensionalizado.

3. Resultados

Una vez realizado el estudio, se presentan los resultados obtenidos para los modelos explícitos, 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.

Por simplicidad y en aras de una mayor claridad del análisis de resultados, se han seleccionado los siguientes dispositivos fotovoltaicos para comparar: 3G30C, PSC, 4S1P y MLU. El resto se adjuntan para su consulta en Anexo A.

3.1. Modelo de Das

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el modelo de Das, tanto de manera analítica como numérica. Se expondrán en esta sección en detalle algunos de los casos de mayor interés. Por brevedad, no se expondrán todos los casos con este nivel de detalle.

En primer lugar se analiza el caso del dispositivo fotovoltaico de **Azur Space 3G30C**. El ajuste para este caso es muy bueno tanto mediante método analítico Figura 1 como numérico Figura 2. En este caso se cuenta con una gran definición en los datos experimentales, lo que puede ayudar al ajuste por el método numérico, pero también pone de manifiesto la gran diferencia de carga computacional existente entre ambos métodos, requiriendo el método numérico tiempos de computación mucho más elevados.

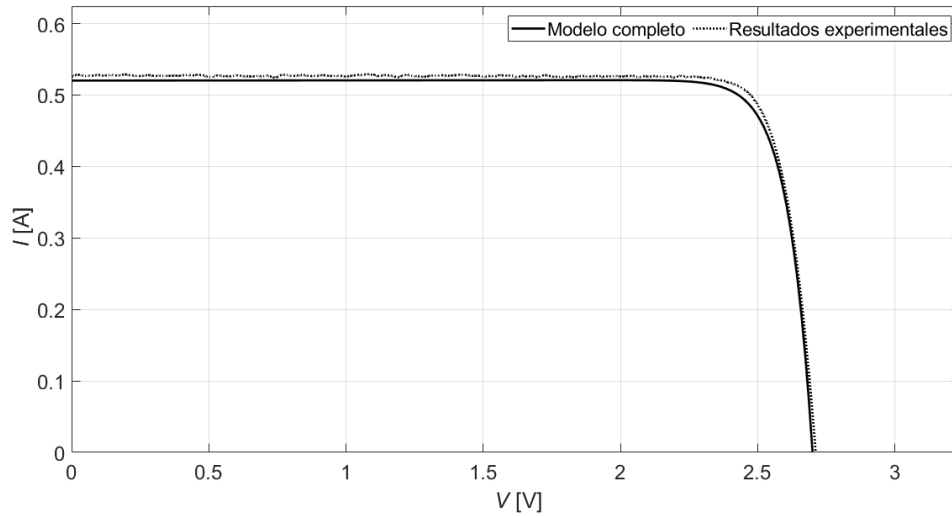


Figura 1: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

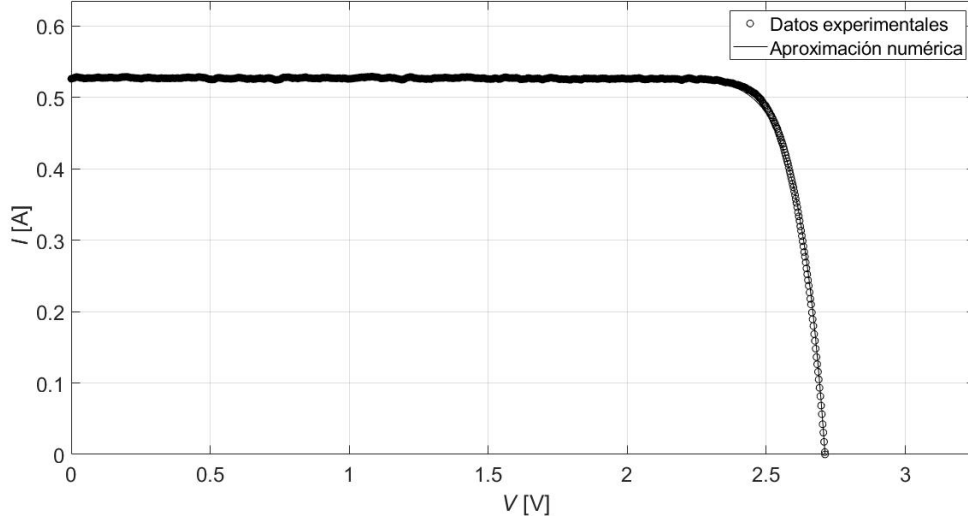


Figura 2: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de Das.

Para este mismo dispositivo fotovoltaico, se expone en la Figura 3 la potencia estimada por el modelo analítico frente a la experimental. Aquí puede observarse que la diferencia entre ambos es máxima alrededor del punto de máxima potencia, alterando tanto su valor como su posición. Esto pone de manifiesto la importancia de la precisión del modelo, especialmente en aplicaciones donde se pretenda operar en el entorno de este punto.

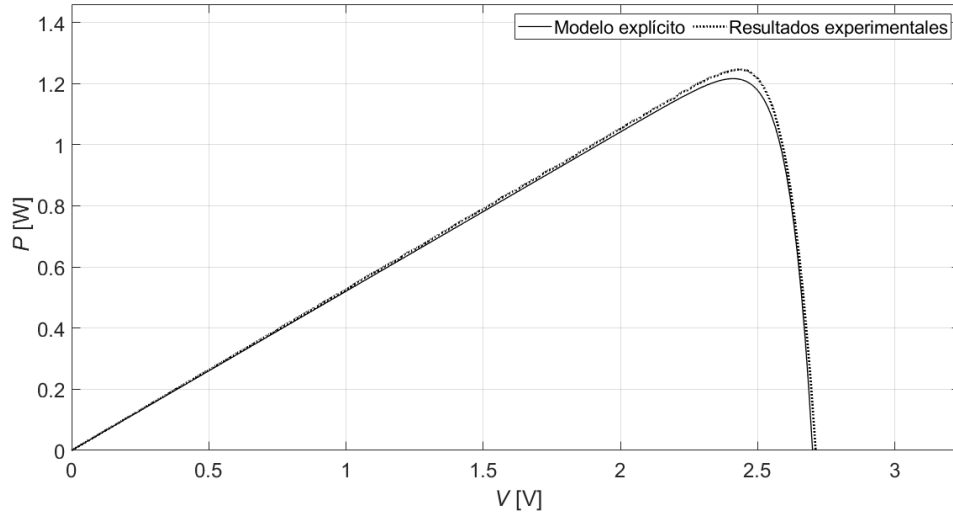


Figura 3: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para el dispositivo fotovoltaico **PSC**. Este caso es de especial interés dada la inusual forma de su curva I - V , que ha dado lugar a grandes diferencias en la calidad del ajuste para los diferentes modelos y métodos. En el caso del modelo de Das se observa un mal ajuste en determinadas zonas para una resolución analítica (Figura 4), mientras que el ajuste numérico logra mantenerse mas cerca de los datos experimentales (Figura 5).

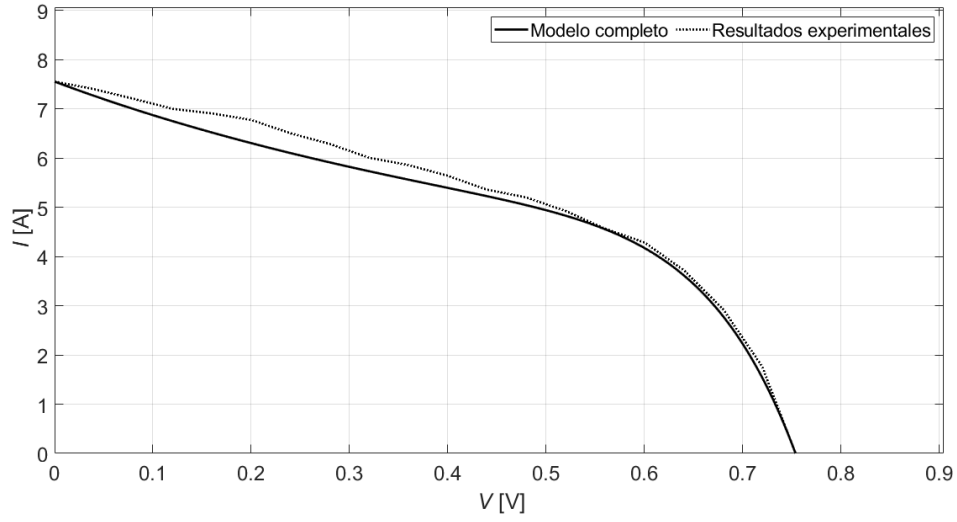


Figura 4: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico *Plastic Solar Cell* empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

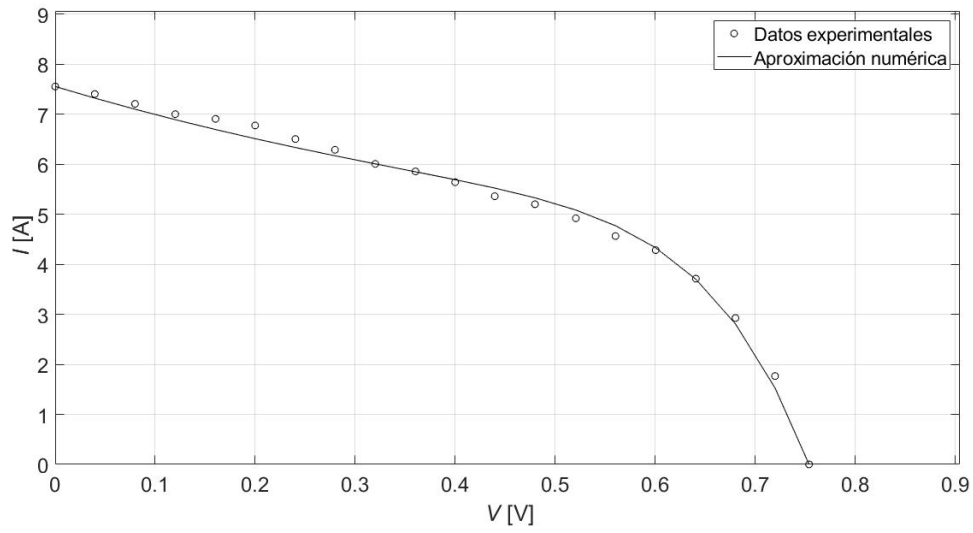


Figura 5: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico *Plastic Solar Cell* empleando la resolución numérica del modelo de Das.

En tercer lugar, se analizan los resultados para el dispositivo fotovoltaico **DHV 4S1P**. De nuevo se obtiene un ajuste razonable, que se expone en las Figuras 6 y 7. Sin embargo, puede observarse que ni mediante ajuste analítico ni mediante ajuste numérico el modelo se ajusta totalmente a la forma de esta curva.

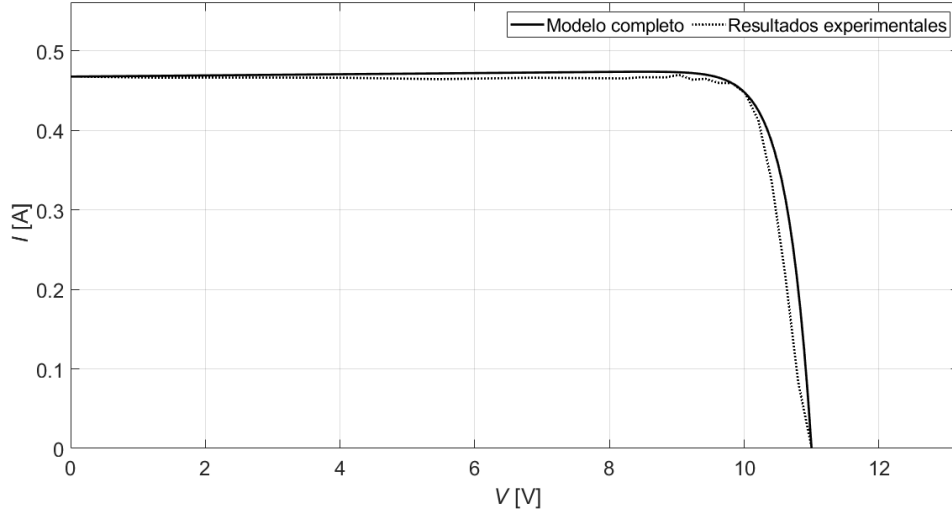


Figura 6: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

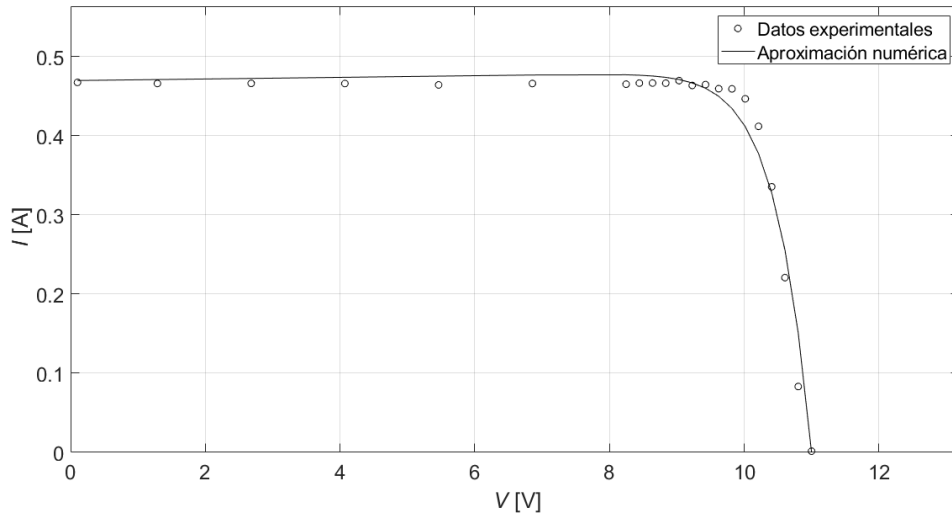


Figura 7: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución numérica del modelo de Das.

Como último ejemplo se tomará el caso del dispositivo fotovoltaico **Mitsubishi MLU255HC**. Para el caso de la aproximación analítica, dada por la Figura 8, el ajuste empieza a desviarse de la curva experimental a partir del punto de máxima potencia. Por contra y una vez más, el modelo numérico, representado en la Figura 9, ofrece las mejores aproximaciones.

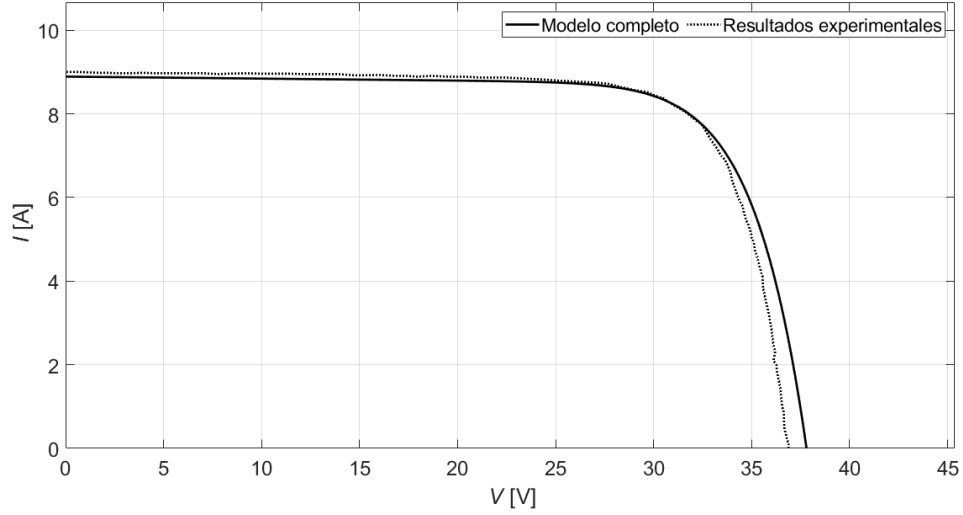


Figura 8: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

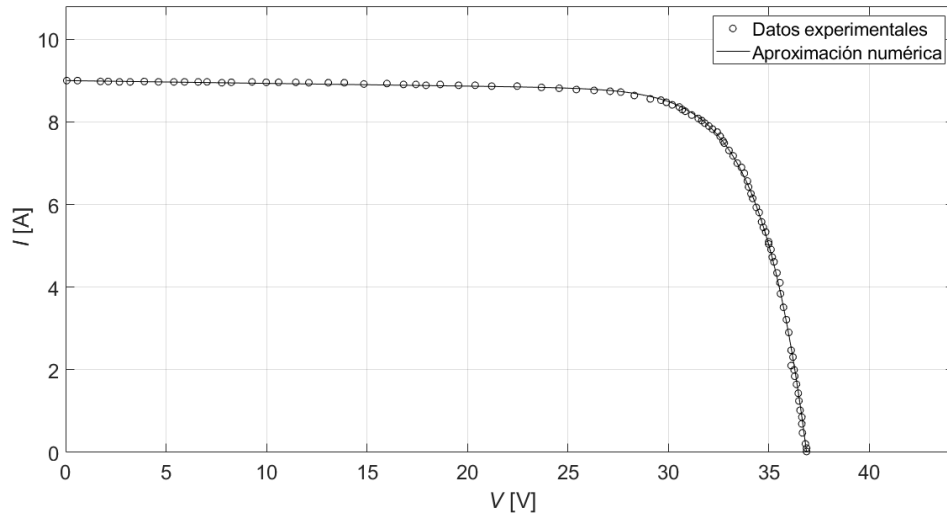


Figura 9: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución numérica del modelo de Das.

3.2. Modelo de Karmalkar & Hannefa

Se presente a continuación el detalle de algunos de los cálculos realizados mediante el modelo de Karmalkar y Hannefa. Se exponen en detalle algunos de los casos de mayor interés, tanto del ajuste con el método analítico como numérico.

En primer lugar se analiza nuevamente el caso del dispositivo fotovoltaico **Azur Space 3G30C**. El ajuste para este caso no es muy bueno para el caso del método analítico (Figura 10), siendo el modelo simplificado el que se ajusta mejor a la curva. En el caso del método numérico (Figura 11), 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.

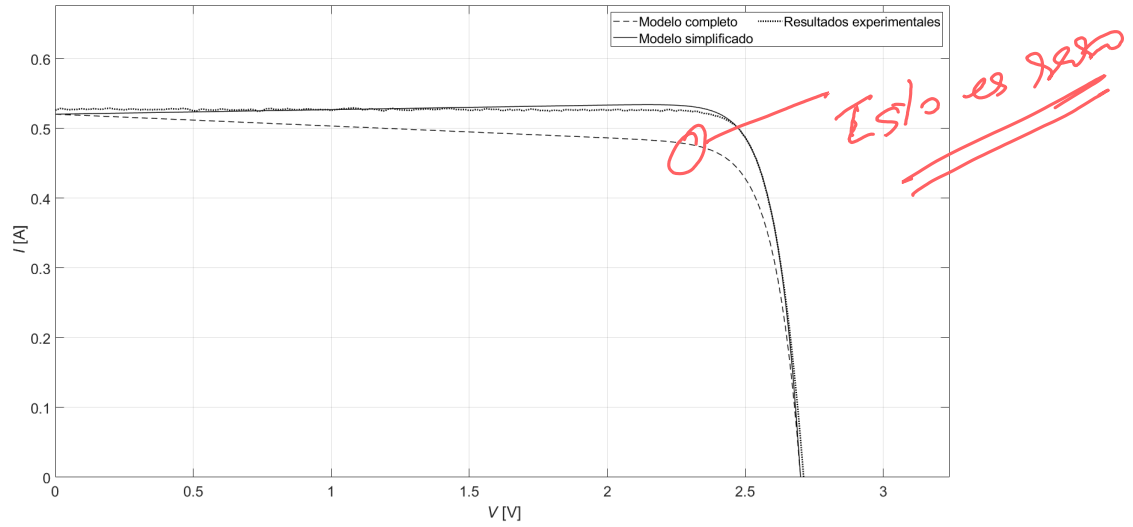


Figura 10: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa explicada en 2.3.2.

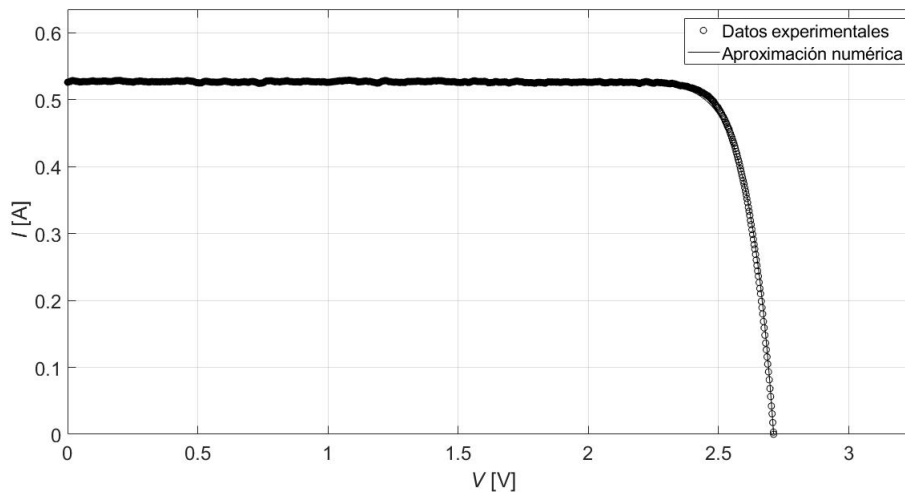


Figura 11: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de Azur Space 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para el dispositivo fotovoltaico **Plastic Solar Cell**. Este caso es de especial interés dada la tecnología que usa, y la inusual forma de su curva I - V , que ha dificultado su ajuste en todos los modelos y ha dado lugar a grandes diferencias en la calidad del ajuste para los diferentes modelos y métodos. El ajuste en el caso del método analítico no es bueno (Figura 12), en el caso del método numérico (Figura 13), a pesar de contar con un número de puntos limitado, la curva si es capaz de ajustarse a los datos experimentales, por lo que para casos similares se aconseja el uso del método numérico para la obtención de los coeficientes del modelo de Karmalkar & Hannefa.

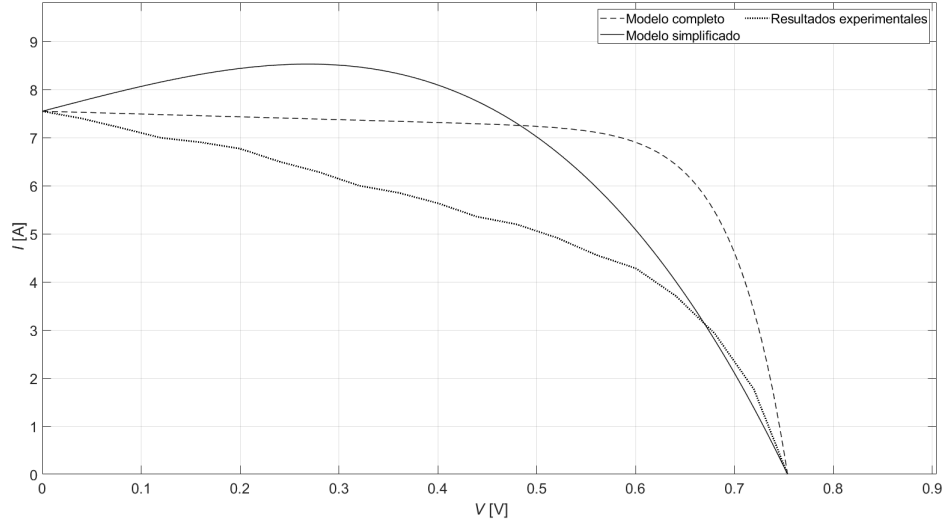


Figura 12: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa explicada en 2.3.2.

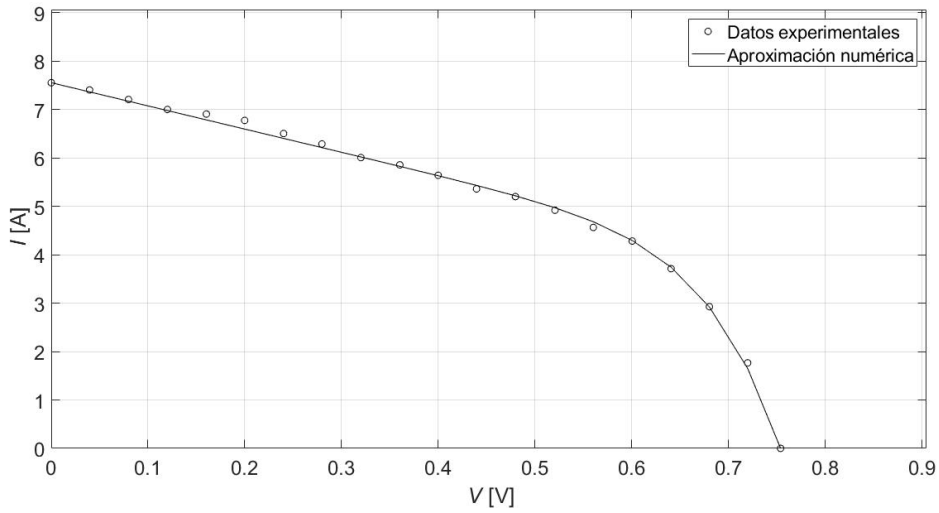


Figura 13: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

En el caso del dispositivo fotovoltaico **DHV 4SIP** de nuevo se aprecia una diferencia entre el ajuste a través del método analítico y numérico. En el primer caso (Figura 14), se aprecia como el ajuste con el modelo simplificado resulta en una pendiente positiva en el punto de cortocircuito, en cambio, el modelo completo si presenta una pendiente similar a la que se obtiene de los resultados experimentales, pero no es capaz de ajustar bien la zona de potencia máxima de la curva, lo que resultaría en unos datos con un mayor error. En el caso del ajuste numérico (Figura 15), la curva se aproxima a los datos experimentales, aunque de nuevo no es capaz de ajustar la zona de potencia máxima de forma precisa. Es de esperar que con un mayor número de punto experimentales disponibles el ajuste numérico presente un error menor.

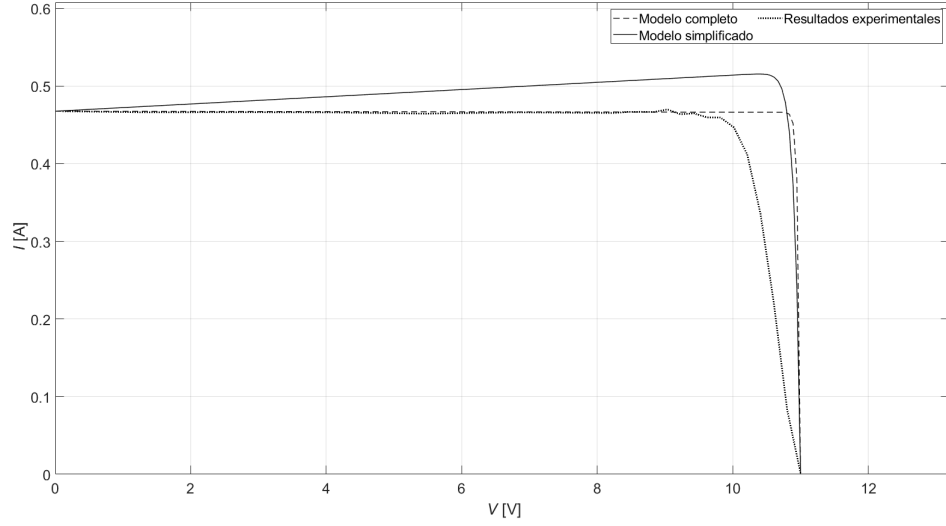


Figura 14: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa explicada en 2.3.2.

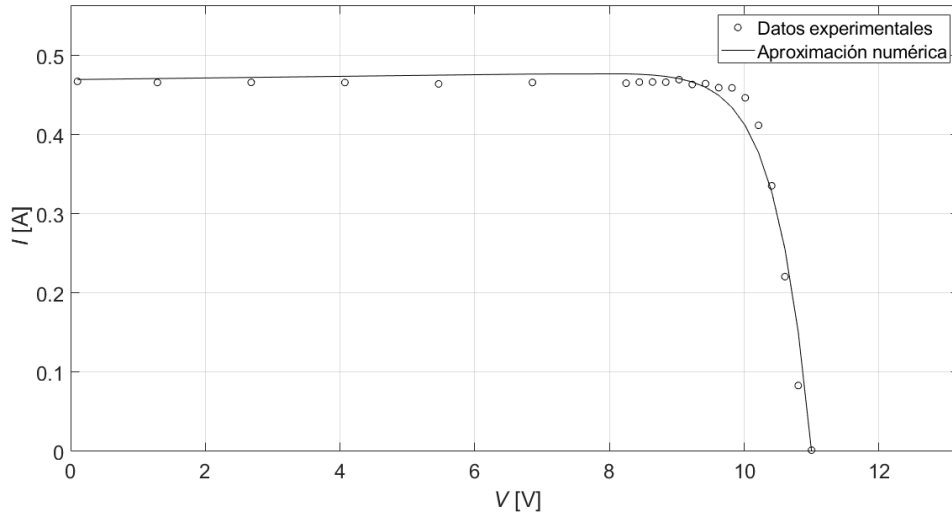


Figura 15: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

Finalmente, para el dispositivo fotovoltaico **Mitsubishi MLU255HC** la tendencia observada es la misma que para los casos anteriores. En el ajuste analítico (Figura 16), el modelo simplificado de nuevo presenta una pendiente positiva en el primer tramo, mientras que el modelo completo lo aproxima mejor pero no es capaz de ajustar con precisión la zona de potencia máxima. En el ajuste numérico (Figura 17), dada la gran cantidad de puntos disponibles, el modelo se ajusta con una gran precisión a los resultados experimentales.

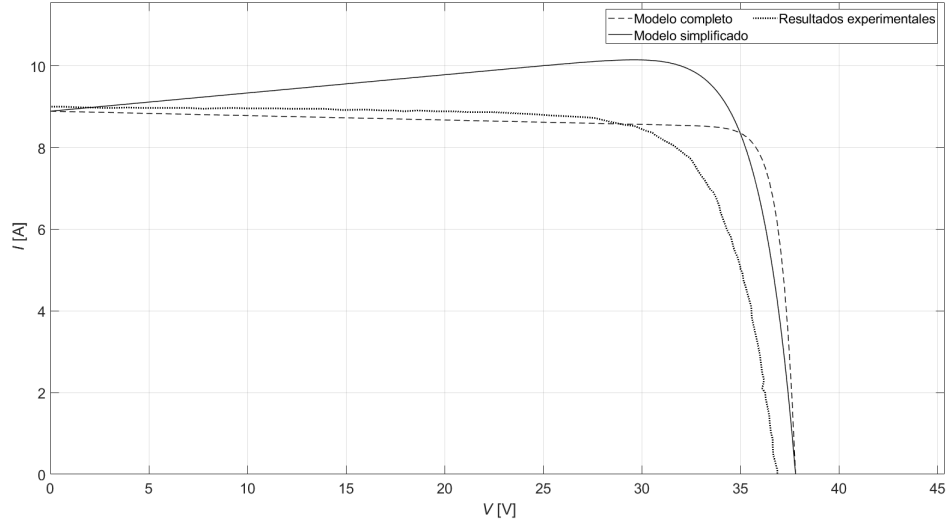


Figura 16: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa explicada en 2.3.2.

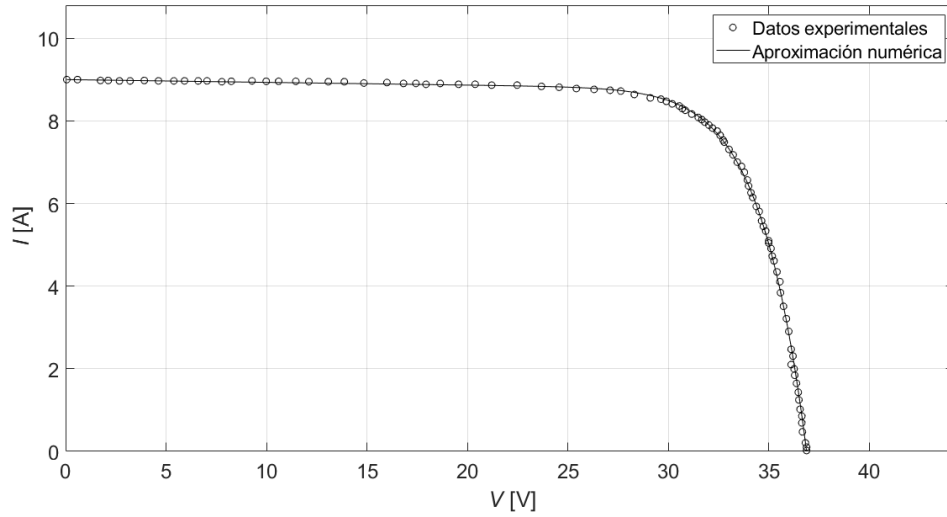


Figura 17: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

3.3. Modelo de Pindado & Cubas

Se comienza, al igual que en los dos apartados anteriores, con el ajuste del panel **3G30C**, tanto analítico, presentado en la Figura 18, como numérico, presentado en la Figura 19. Se aprecia un ajuste fino tanto en la aproximación analítica como por el método RMSE.

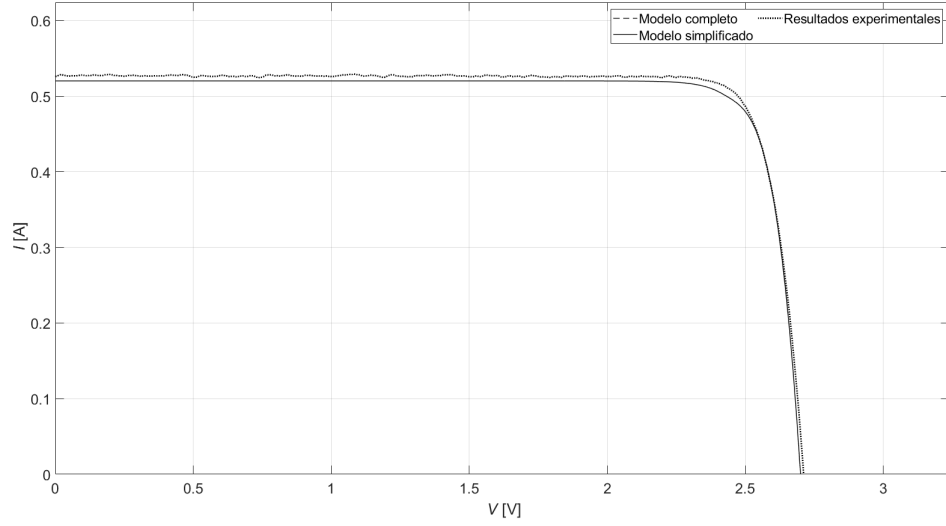


Figura 18: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3 para las dos aproximaciones del parámetro η .

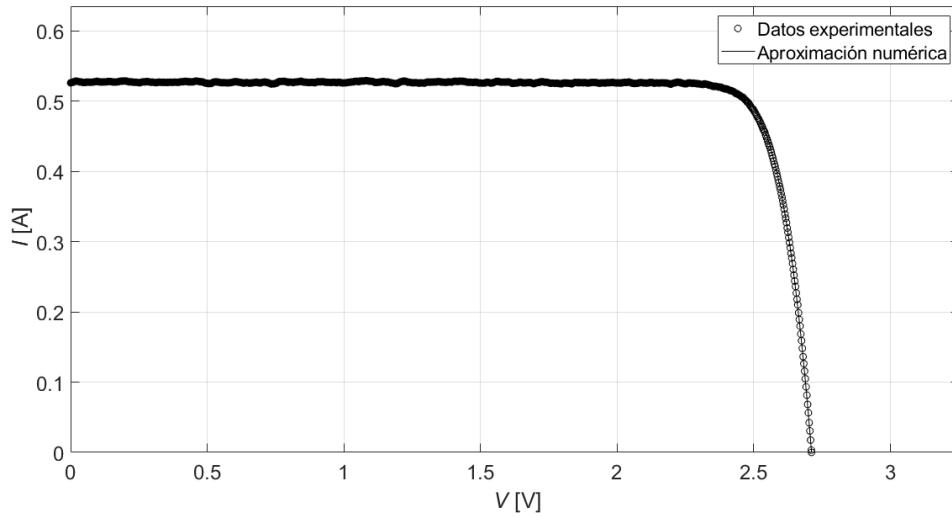


Figura 19: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.4.

Para el caso del ajuste analítico del panel **PSC**, dado por la Figura 20, el modelo simplificado que utiliza el parámetro η con una peor aproximación no ajusta satisfactoriamente la curva, al contrario que en el caso del modelo completo. El ajuste numérico, planteado en la Figura 21 sigue dando buenos resultados.

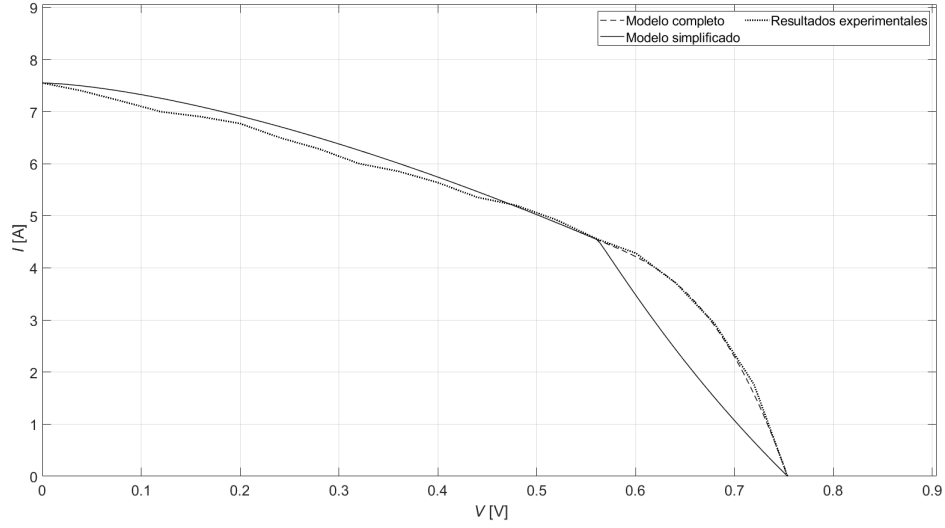


Figura 20: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3 para las dos aproximaciones del parámetro η .

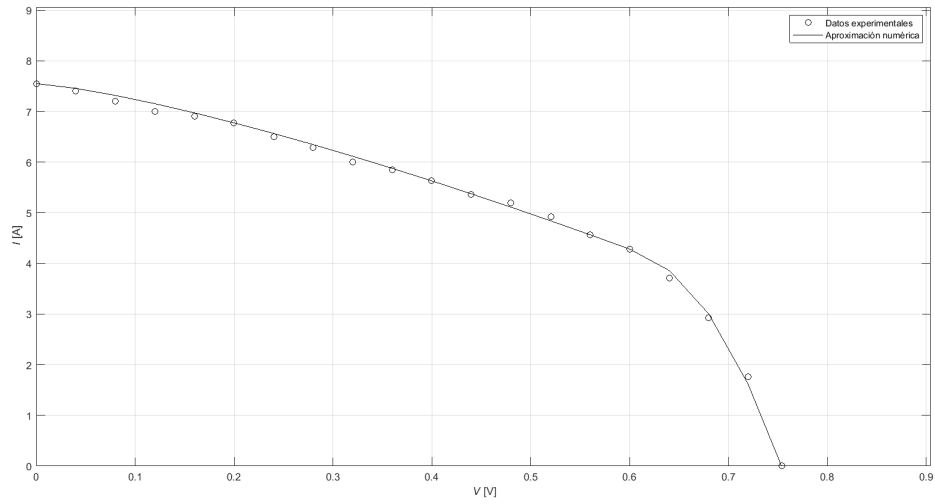


Figura 21: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.4.

Para el caso del dispositivo **4S1P**, se sigue la misma tendencia, tanto para la aproximación analítica, dada por la Figura 22, como utilizando RMSE, en la Figura 23.

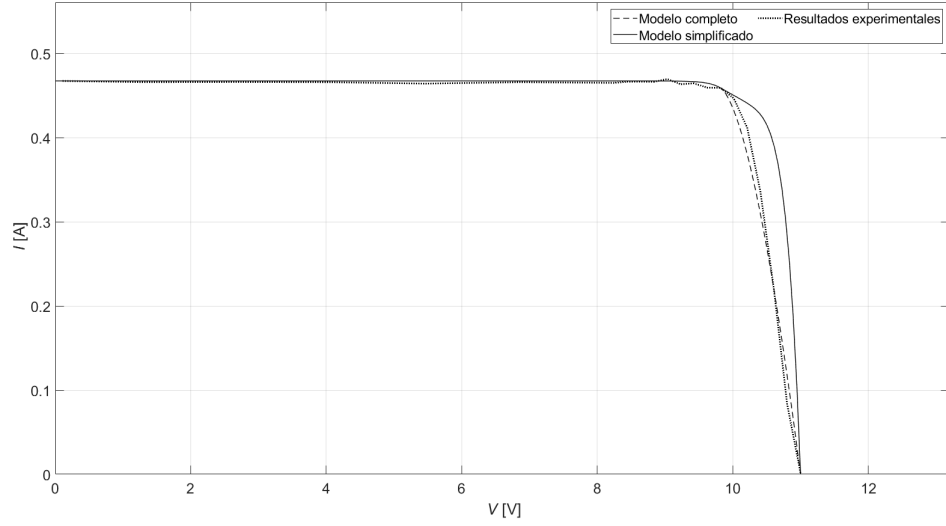


Figura 22: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV-4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3 para las dos aproximaciones del parámetro η .

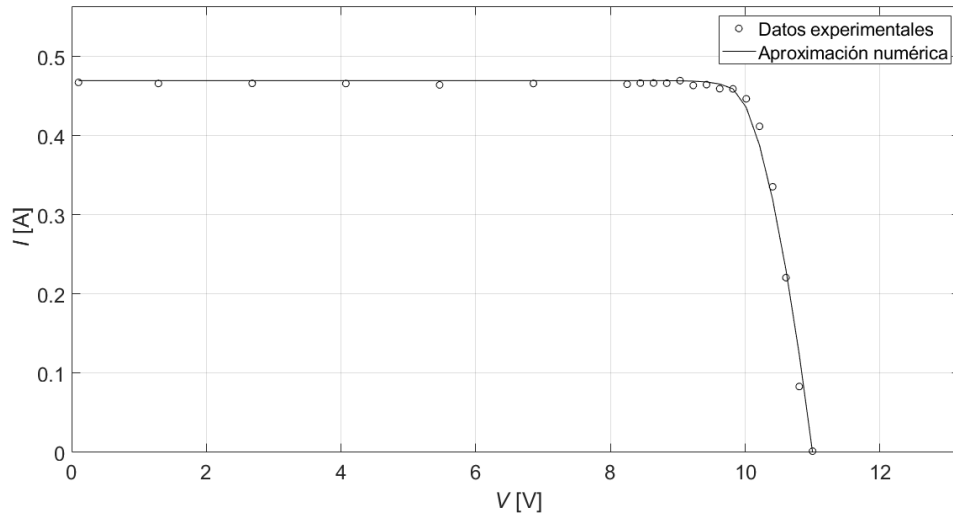


Figura 23: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV-4S1P empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.4.

Por último, en el ajuste del panel **MLU** de Mitsubishi, no queda claro qué modelo analítico genera una mejor aproximación, como puede verse en la Figura 24. El ajuste numérico sigue dando buenas aproximación, según la Figura 25.

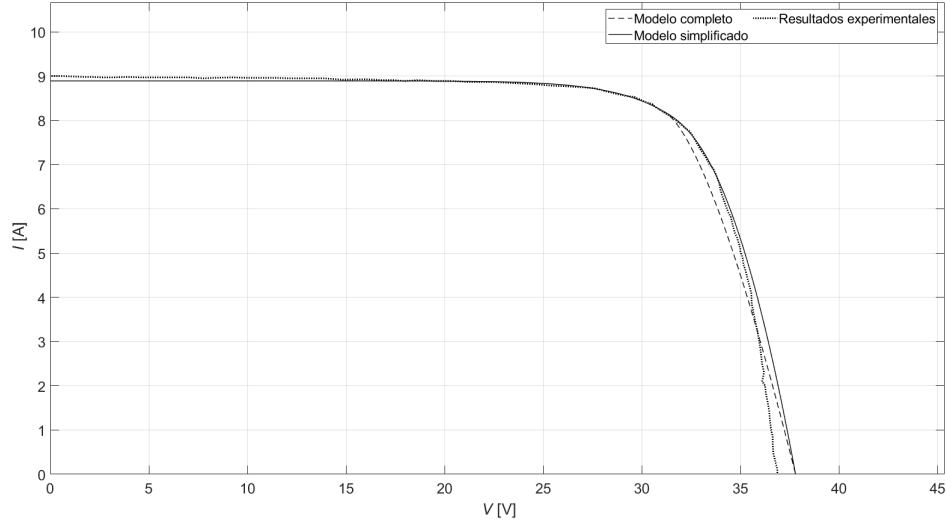


Figura 24: Curva característica de corriente frente a potencial ajustada analíticamente para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi-MLU empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3 para las dos aproximaciones del parámetro η .

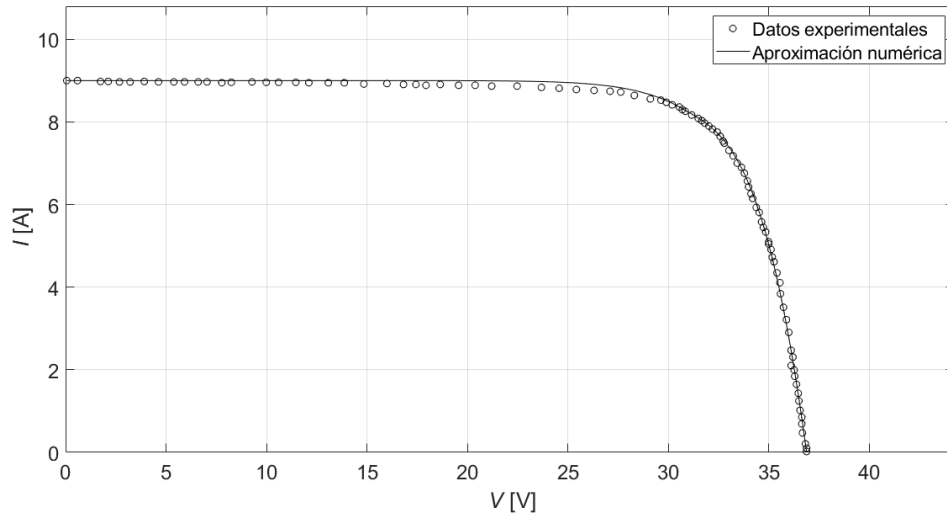


Figura 25: Curva característica de corriente frente a potencial ajustada numéricamente para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi-MLU empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.4.

En definitiva, queda patente, por un lado, la buena aproximación que genera el ajuste numérico por RMSE, a costa de esfuerzo computacional, y, además, la clara ventaja que significa utilizar un único parámetro a la hora de definir un modelo, sobretodo si arroja tan buenas aproximaciones.

3.4. Resumen de resultados

Se presentan en este apartado los resultados obtenidos para los 11 dispositivos fotovoltaicos seleccionados. En la Tabla 2 se recogen los parámetros calculados para cada modelo y dispositivo fotovoltaico. Cada caso se resuelve tanto de forma analítica como numérica, dando lugar a una selección de parámetros y un error diferentes. Para ilustrar el error cometido se calcula en cada caso el error medio cuadrático (RMSE), que permitirá comparar el

error cometido por los diferentes modelos y métodos para cada dispositivo fotovoltaico. Esta medida del error, sin embargo, no está adimensionalizada, y por tanto no supone una buena métrica para realizar comparaciones entre los casos de distintos dispositivos fotovoltaicos. Para solventar este inconveniente se recurre a adimensionalizar el valor de RMSE tal y como se indica en [5]. Esta forma adimensional de RMSE viene dada por la expresión:

$$\xi = \frac{\text{RMSE}}{I_{sc}} = \frac{1}{I_{sc}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{\text{modelo},i} - I_{\text{exp},i})^2}, \quad (12)$$

donde I_{exp} son los valores de corriente obtenidos experimentalmente, I_{modelo} son los valores de corriente obtenidos empleando los modelos explícitos estudiados y I_{sc} es el valor de la corriente de cortocircuito de cada uno de los dispositivos estudiados. Este parámetro ξ permite realizar comparaciones entre los distintos dispositivos fotovoltaicos.

Tabla 2: Resultados obtenidos del ajuste a diferentes modelizaciones de la curva intensidad-voltaje de datos experimentales, para 11 casos de diferentes dispositivos fotovoltaicos.

Modelo	Método de ajuste		RTC	TNJ	ZTJ	3G30C	PWP	KC200	SPV	PSC	SIP	CTJ30	MLU
Das	Numérico	k	9,532	21,974	24,979	29,107	7,277	11,672	32,517	8,314	20,769	20,223	16,233
		h	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$5,21 \cdot 10^{-3}$	$9,13 \cdot 10^{-3}$	$5,01 \cdot 10^{-3}$	$7,42 \cdot 10^{-5}$	$5,14 \cdot 10^{-3}$	$3,04 \cdot 10^{-2}$	$6,04 \cdot 10^{-1}$	$-2,38 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$2,77 \cdot 10^{-2}$
		RMSE	$6,00 \cdot 10^{-3}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-1}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-1}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$7,60 \cdot 10^{-2}$
		ξ	$7,68 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$4,73 \cdot 10^{-3}$	$5,36 \cdot 10^{-3}$	$9,89 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$4,69 \cdot 10^{-2}$	$2,88 \cdot 10^{-2}$	$8,46 \cdot 10^{-3}$
	Analítico	k	10,037	27,605	27,257	30,446	6,937	11,081	29,826	9,335	30,119	27,469	14,296
		h	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$2,26 \cdot 10^{-2}$	$2,01 \cdot 10^{-2}$	$-1,70 \cdot 10^{-3}$	$-3,90 \cdot 10^{-2}$	$-1,43 \cdot 10^{-2}$	$5,62 \cdot 10^{-3}$	$7,47 \cdot 10^{-1}$	$-1,72 \cdot 10^{-2}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$
		RMSE	$9,00 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$	$8,00 \cdot 10^{-3}$	$2,42 \cdot 10^{-1}$	$3,60 \cdot 10^{-2}$	$3,10 \cdot 10^{-2}$	$2,22 \cdot 10^{-1}$
		ξ	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$3,81 \cdot 10^{-2}$	$9,47 \cdot 10^{-3}$	$8,93 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$3,20 \cdot 10^{-2}$	$7,68 \cdot 10^{-2}$	$6,38 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$
	Numérico	γ	0,999	0,995	0,991	0,995	1	0,995	0,97	0,522	1,024	0,984	0,973
		m	9,529	21,969	24,971	29,101	7,276	11,665	32,496	10,267	20,804	20,202	16,213
		RMSE	$6,00 \cdot 10^{-3}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-1}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$7,20 \cdot 10^{-2}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$7,60 \cdot 10^{-2}$
		ξ	$7,87 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$4,35 \cdot 10^{-3}$	$5,56 \cdot 10^{-3}$	$9,66 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$9,79 \cdot 10^{-3}$	$9,54 \cdot 10^{-3}$	$4,67 \cdot 10^{-2}$	$2,90 \cdot 10^{-2}$	$8,44 \cdot 10^{-3}$
Karmalkar y Hannefa	Analítico	γ	0,833	0,903	0,903	0,912	0,86	0,845	0,91	0,942	0,997	0,976	0,954
		m	8,533	26,643	26,265	29,255	4,804	9,53	28,708	13,958	343,991	122,959	51,784
		RMSE	$7,20 \cdot 10^{-2}$	$2,40 \cdot 10^{-2}$	$2,80 \cdot 10^{-2}$	$2,40 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$9,06 \cdot 10^{-1}$	$2,10 \cdot 10^{-2}$	1,63	$1,05 \cdot 10^{-1}$	$1,19 \cdot 10^{-1}$	1,70
		ξ	$9,45 \cdot 10^{-2}$	$4,54 \cdot 10^{-2}$	$6,09 \cdot 10^{-2}$	$4,45 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-1}$	$1,11 \cdot 10^{-1}$	$4,11 \cdot 10^{-2}$	$2,16 \cdot 10^{-1}$	$2,23 \cdot 10^{-1}$	$2,46 \cdot 10^{-1}$	$1,89 \cdot 10^{-1}$
	Numérico	η	2,528	2,76	3,093	3,049	2,483	2,375	2,626	2,419	1,922	2,271	3,315
		RMSE	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$7,00 \cdot 10^{-3}$	$8,80 \cdot 10^{-2}$	$8,00 \cdot 10^{-3}$	$8,00 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$8,80 \cdot 10^{-2}$
		ξ	$4,20 \cdot 10^{-3}$	$7,91 \cdot 10^{-3}$	$6,22 \cdot 10^{-3}$	$5,36 \cdot 10^{-3}$	$7,00 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$	$2,59 \cdot 10^{-2}$	$9,90 \cdot 10^{-3}$
		η	2,529	3,120	2,844	3,632	2,483	2,803	3,786	3,027	1,800	3,308	1,744
	Analítico	RMSE	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$9,10 \cdot 10^{-3}$	$4,30 \cdot 10^{-3}$	$6,50 \cdot 10^{-3}$	$6,80 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-1}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$	$8,74 \cdot 10^{-1}$
		ξ	$4,10 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$9,20 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$	$2,57 \cdot 10^{-2}$	$3,22 \cdot 10^{-2}$	$1,51 \cdot 10^{-2}$	$2,65 \cdot 10^{-2}$	$5,60 \cdot 10^{-2}$	$9,71 \cdot 10^{-2}$
Pindado y Cubas	Numérico	η	2,528	2,76	3,093	3,049	2,483	2,375	2,626	2,419	1,922	2,271	3,315
		RMSE	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$7,00 \cdot 10^{-3}$	$8,80 \cdot 10^{-2}$	$8,00 \cdot 10^{-3}$	$8,00 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$8,80 \cdot 10^{-2}$
		ξ	$4,20 \cdot 10^{-3}$	$7,91 \cdot 10^{-3}$	$6,22 \cdot 10^{-3}$	$5,36 \cdot 10^{-3}$	$7,00 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$	$2,59 \cdot 10^{-2}$	$9,90 \cdot 10^{-3}$
	Analítico	η	2,529	3,120	2,844	3,632	2,483	2,803	3,786	3,027	1,800	3,308	1,744

La evolución del error adimensionalizado con el valor del potencial eléctrico, se presenta en las Figuras 26, 27, 28 y 29 para los dispositivos fotovoltaicos Azur Space 3G30C, Plastic Solar Cell, DHV-4S1P y Mitsubishi MLU255HC respectivamente, para el caso del cálculo de coeficientes con el método analítico.

La Tablas tan grandes suele ser bueno ponerlas en página apaisada.

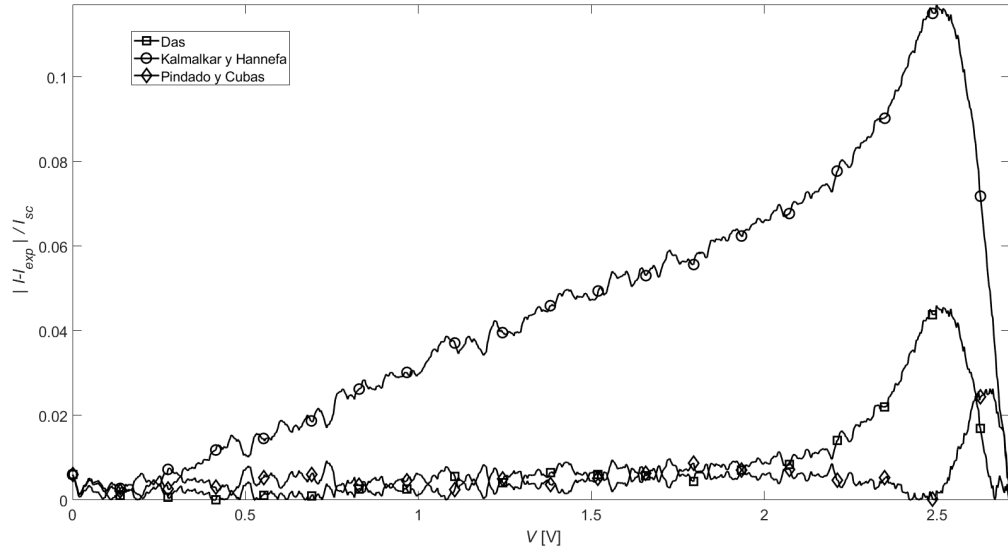


Figura 26: Error adimensionalizado frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C empleando la resolución analítica para todos los métodos explícitos estudiados.

De este modo se aprecia a simple vista como en el caso del Azur Space 3G30C, el modelo de Karmalkar & Hannefa no es capaz de ajustar la curva a medida que aumenta el potencial, siendo el error más pronunciado en el punto de potencia máxima. Esta tendencia es similar con el modelo de Das y de Pindado y Cubas, aunque estos son capaces de ajustar la curva con un error bajo durante un tramo significativamente mayor del potencial.

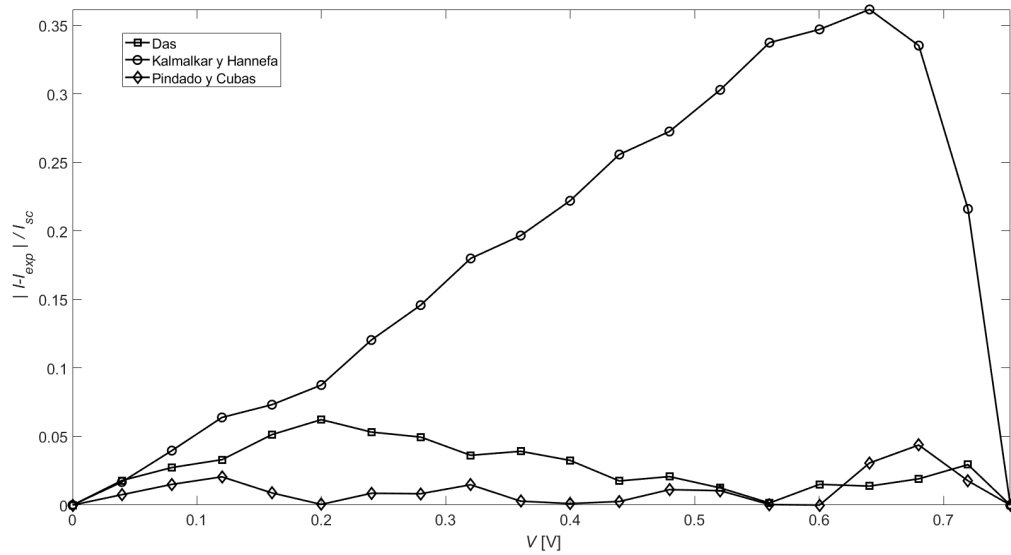


Figura 27: Error adimensionalizado frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell empleando la resolución analítica para todos los métodos explícitos estudiados.

En el caso del dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell, el modelo de Karmalkar & Hannefa es de nuevo el que presenta un mayor error, siendo los modelos Das y de Pindado y Cubas muy similares en su comportamiento.

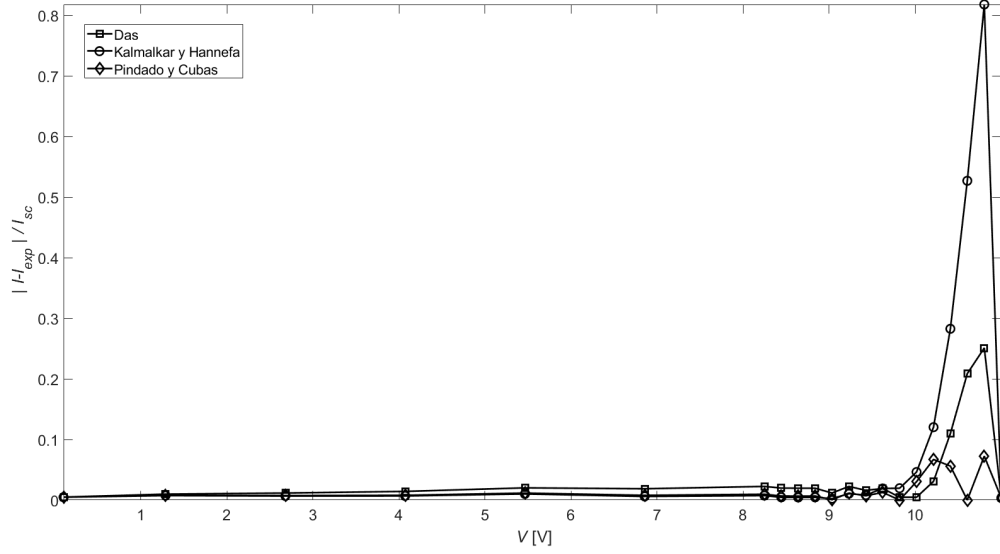


Figura 28: Error adimensionalizado frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV-4S1P empleando la resolución analítica para todos los métodos explícitos estudiados.

Para el dispositivo fotovoltaico DHV-4S1P, en cambio, los tres modelos parecen presentar un error bajo a lo largo del potencial, incluso a través del punto de máxima potencia, disparándose el error para el último tramo de la curva $I-V$.

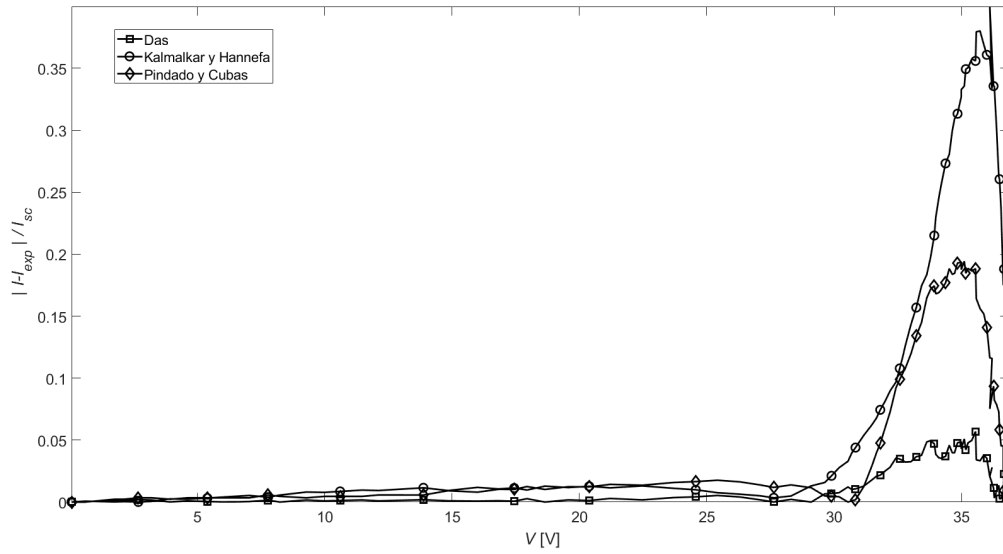


Figura 29: Error adimensionalizado frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi MLU255HC empleando la resolución analítica para todos los métodos explícitos estudiados.

En el caso del Mitsubishi MLU255HC el error aumenta considerablemente en el punto de máxima potencia, ajustándose bien los tres modelos al resto de los tramos de la curva $I-V$.

Cabe recalcar que, para la mayor parte de los casos, el modelo de Pindado y Cubas presenta el menor error adimensionalizado de entre todos los modelos estudiados.

4. Conclusiones

Para ilustrar la eficacia de los modelos explícitos considerados en el estudio, se recoge en la Tabla 2 una recopilación de todos los resultados obtenidos.

En cuanto a los resultados obtenidos con los diferentes modelos, se observan varios patrones. Por un lado, mediante resolución analítica, el modelo de Das y el de Pindado & Cubas logran errores del mismo orden, mientras que el de Karmalkar & Hannefa da lugar a errores mucho mayores en algunos de los casos. Sin embargo, cuando la resolución es numérica, los errores cometidos difieren en menor medida; además, se aprecian diferentes tipos de resultados, siendo en este caso el modelo de Pindado & Cubas el que logra el menor error en más casos, y siendo los modelos de Das y Karmalkar & Hannefa muy similares en la mayoría de casos, obteniendo el de Karmalkar & Hannefa mejor resultado para alguno de los casos.

A continuación, se comentan las diferencias entre la aproximación analítica y la aproximación numérica. Si bien es cierto que en el caso del ajuste numérico los errores obtenidos son menores en todos los casos, el tiempo de computación necesario es mayor, y su precisión depende en gran medida del número de puntos experimentales disponibles. Por lo tanto, se observa que el método analítico presenta una aproximación suficientemente precisa en la mayoría de casos, siendo el modelo de Pindado y Cubas el que mejor ajusta las curvas a los datos experimentales. Por último, respecto a la validez de los resultados, estos pueden compararse con los obtenidos por [5], siendo los valores de los parámetros calculados para los modelos explícitos estudiados muy similares a los obtenidos en este trabajo.

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, E. Roibás-Millán, F. Bugallo-Siegel, F. Sorribes-Palmer, Assessment of explicit models for different photovoltaic technologies, *Energies* (2018) 11.
- [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-Estallrich, 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>

A. Anexo I: Curvas I-V de distintos paneles y con distintos ajustes

A.1. Modelo de Das

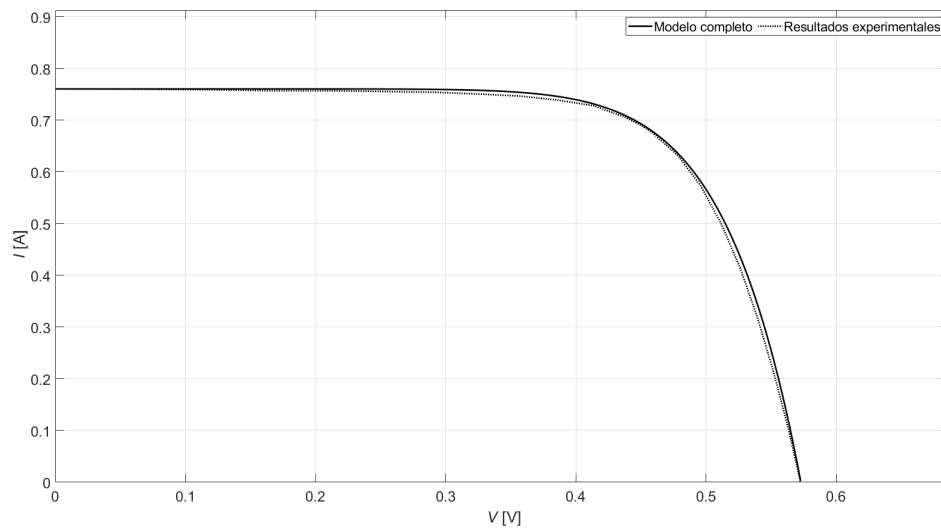


Figura 30: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

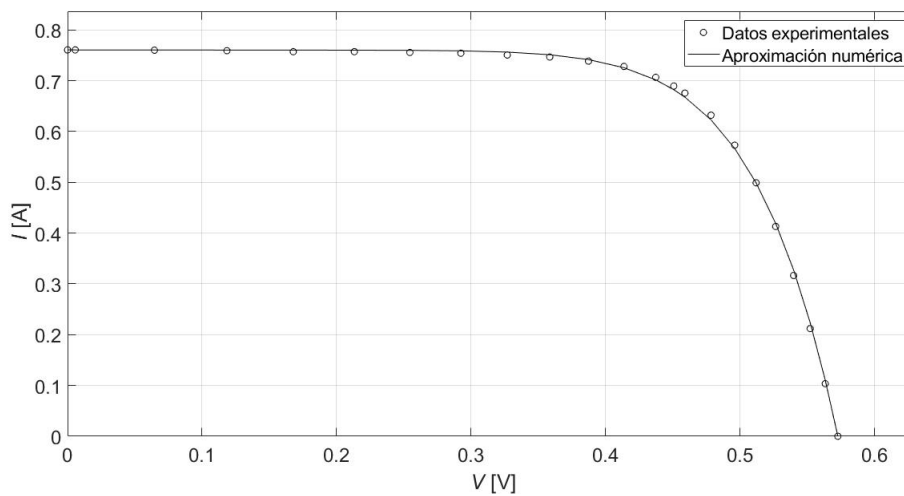


Figura 31: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución numérica del modelo de Das explicada en 2.4.

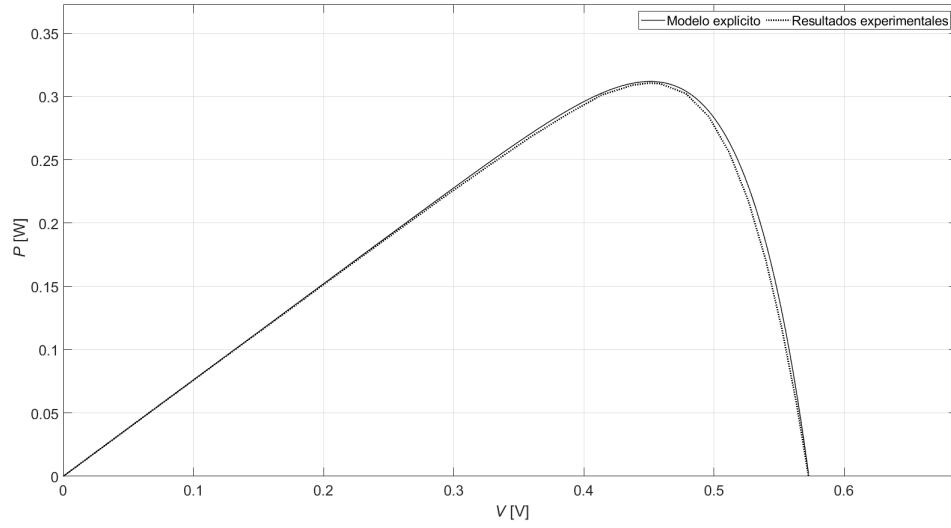


Figura 32: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

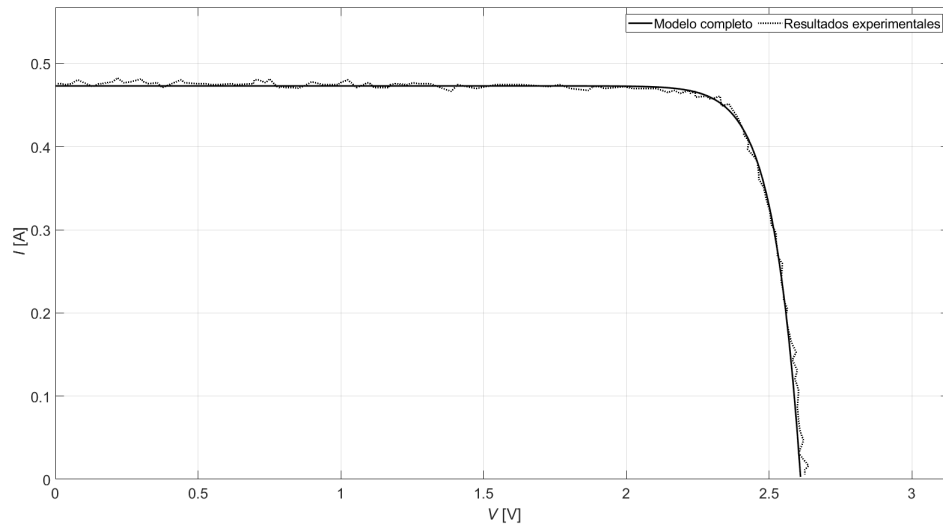


Figura 33: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

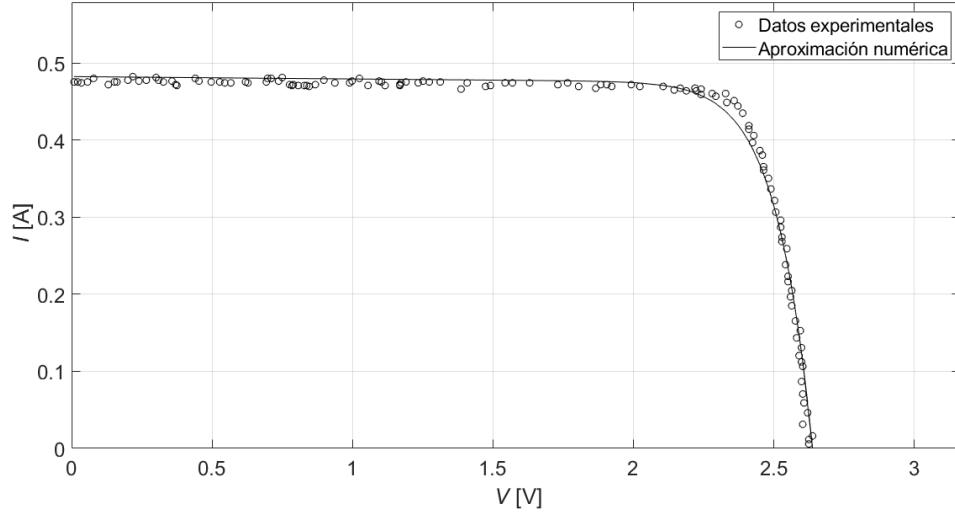


Figura 34: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

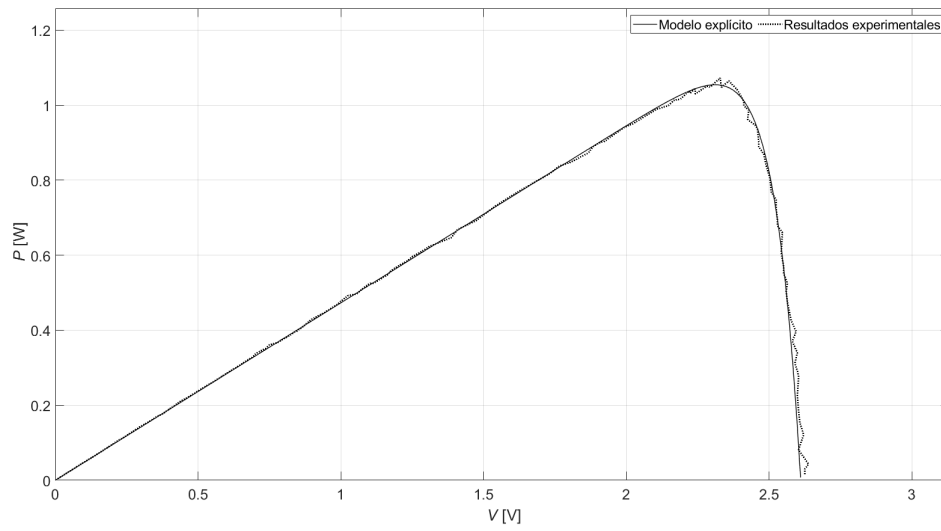


Figura 35: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

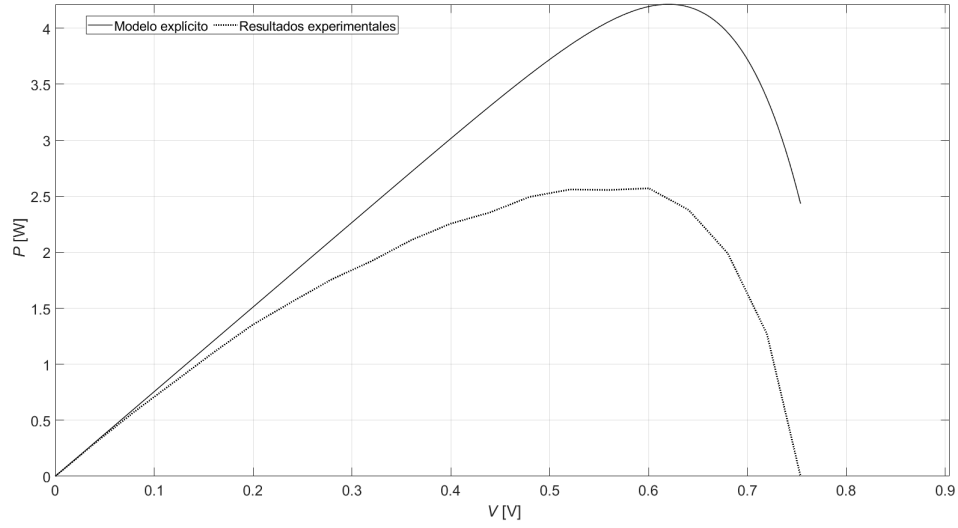


Figura 36: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

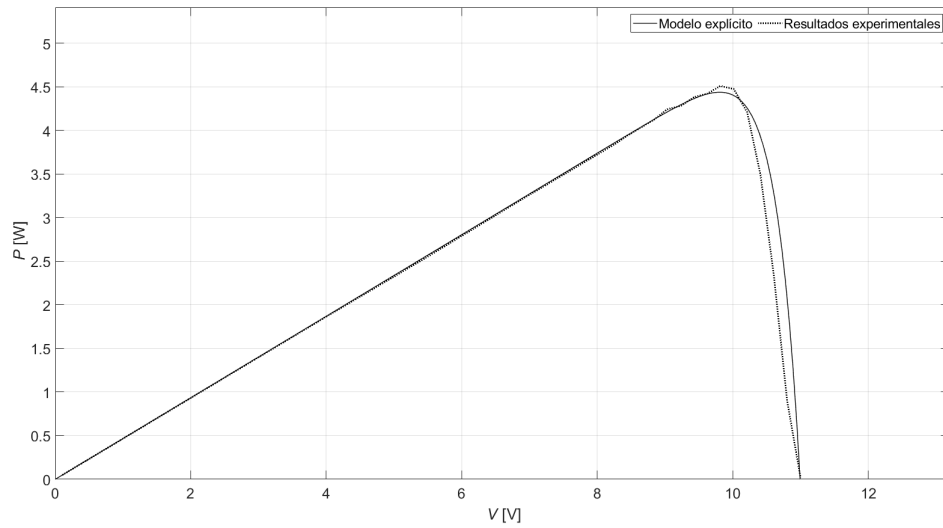


Figura 37: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

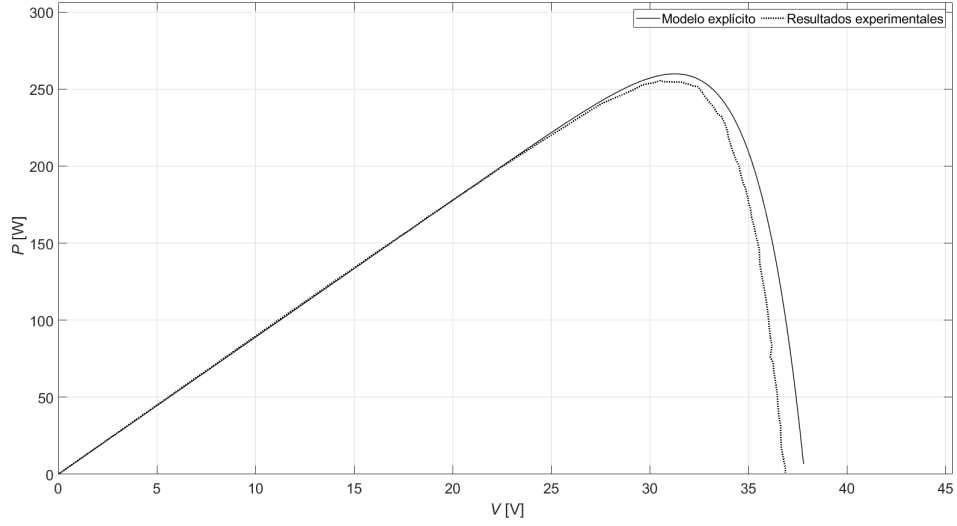


Figura 38: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico MLU empleando la resolución analítica del modelo de Das explicada en 2.3.1.

A.2. Modelo de Karmalkar & Hannefa

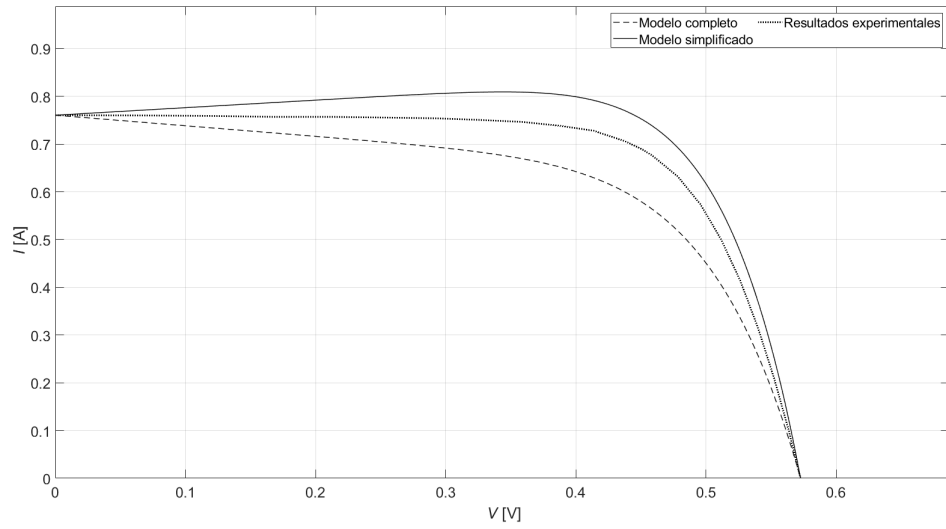


Figura 39: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

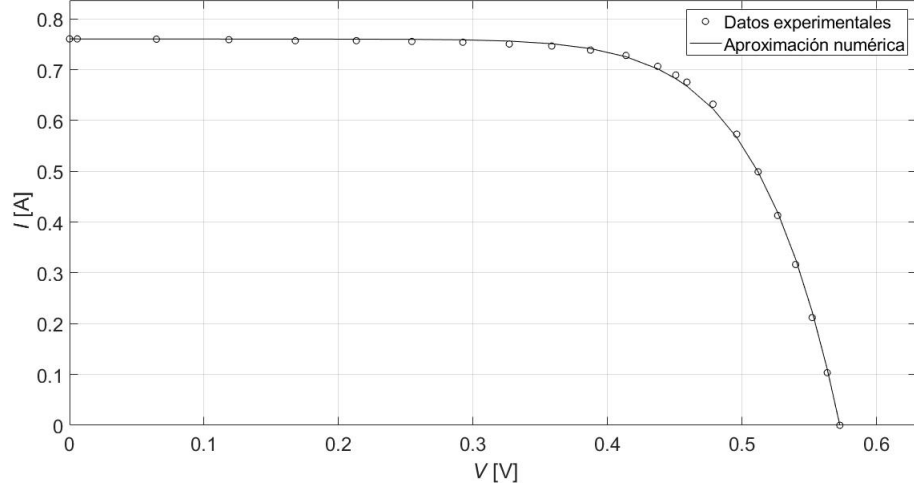


Figura 40: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

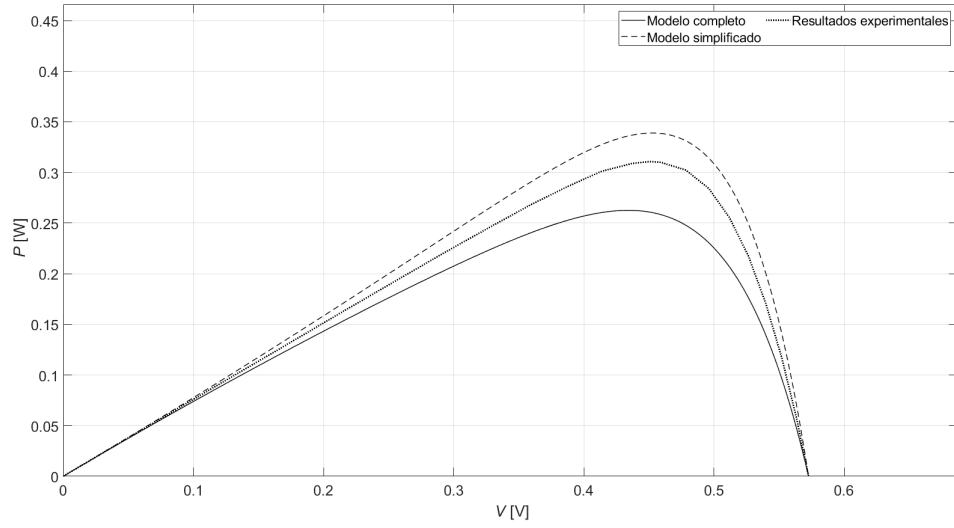


Figura 41: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de RTC France empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

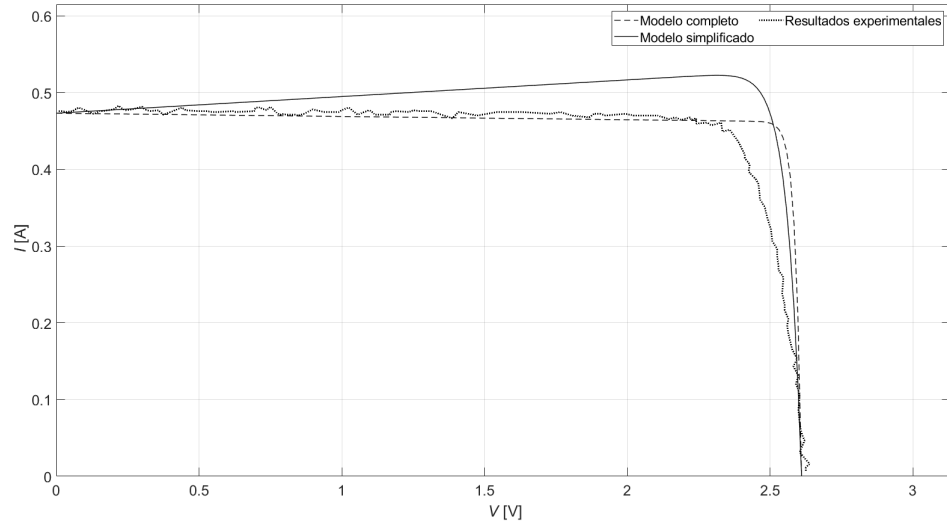


Figura 42: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CESA CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

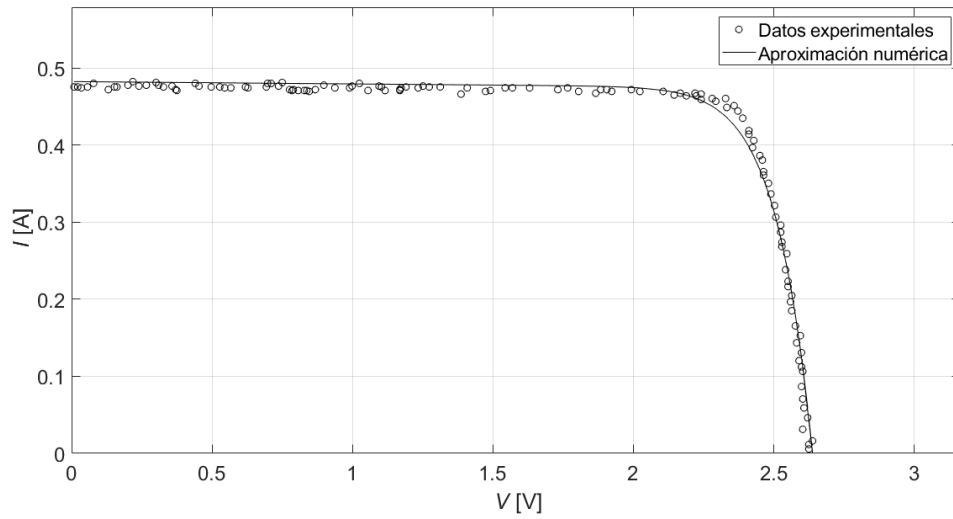


Figura 43: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CESA CTJ30 empleando la resolución numérica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

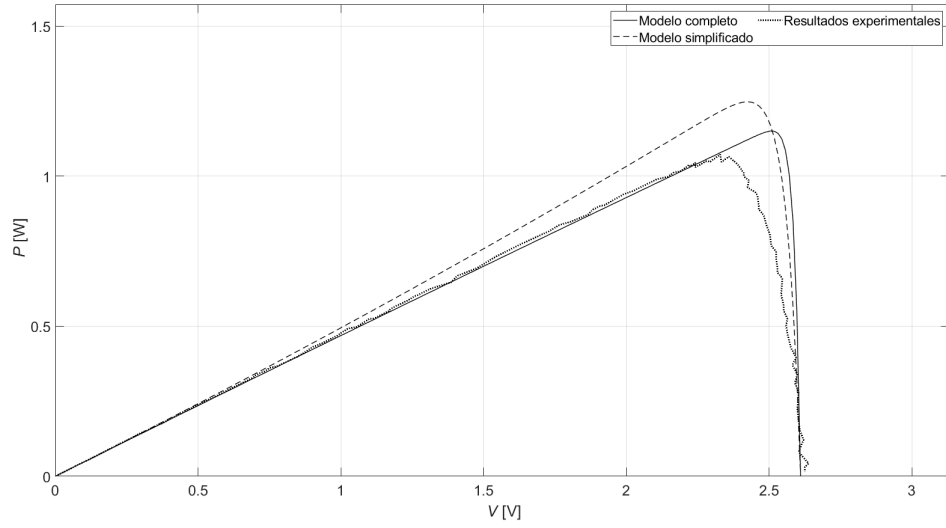


Figura 44: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico de CESA CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

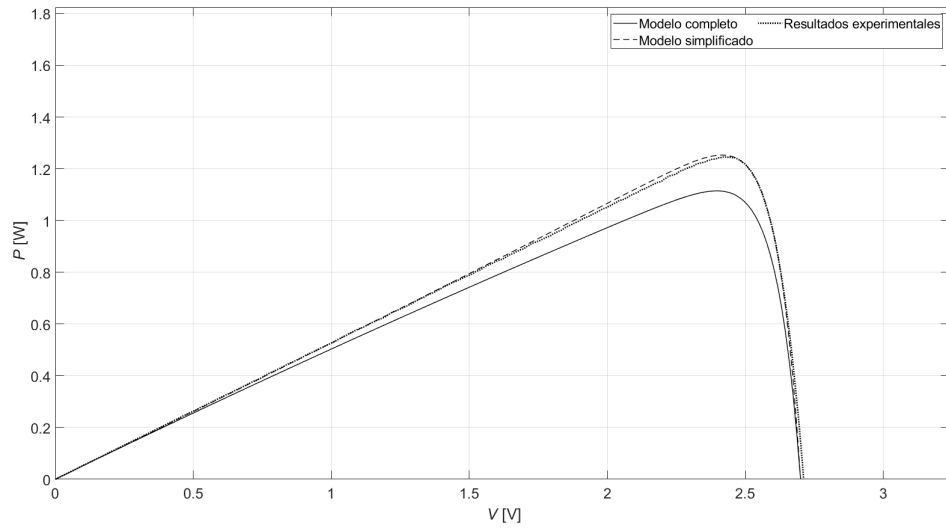


Figura 45: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

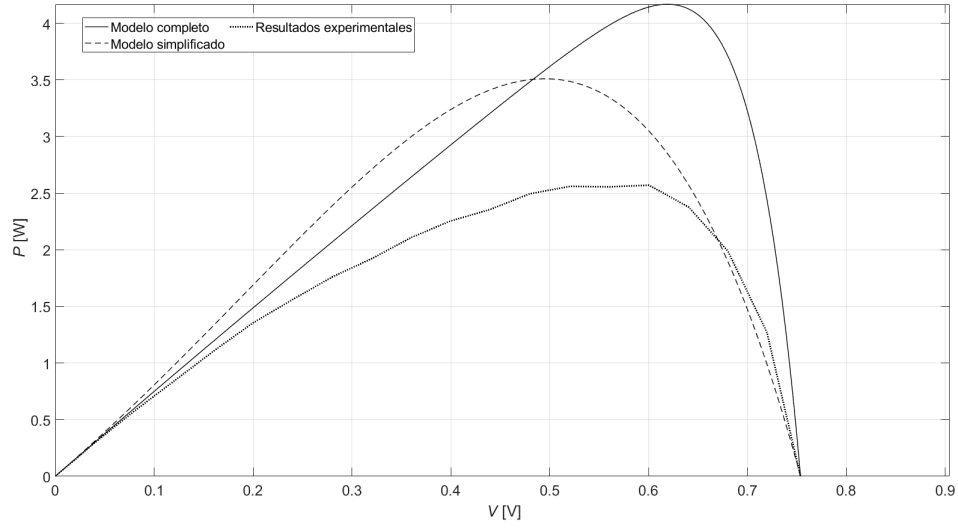


Figura 46: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa.

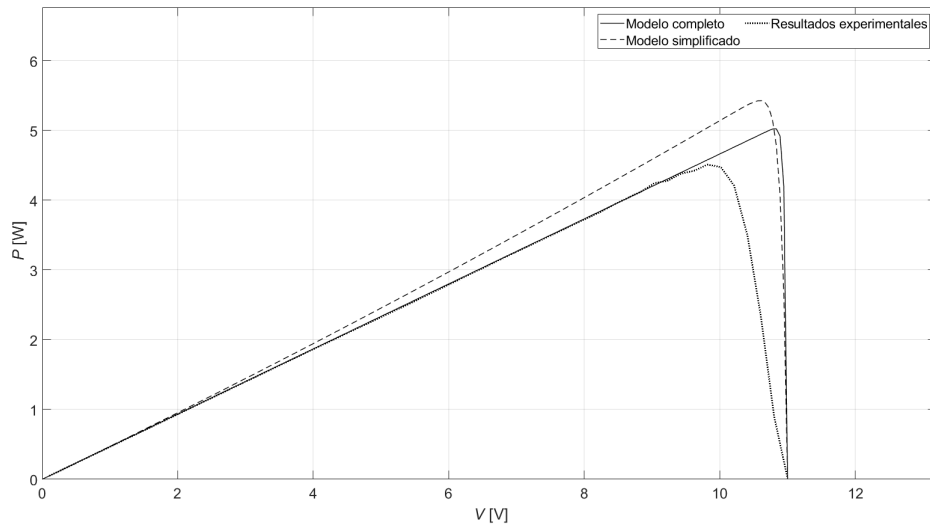


Figura 47: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa..

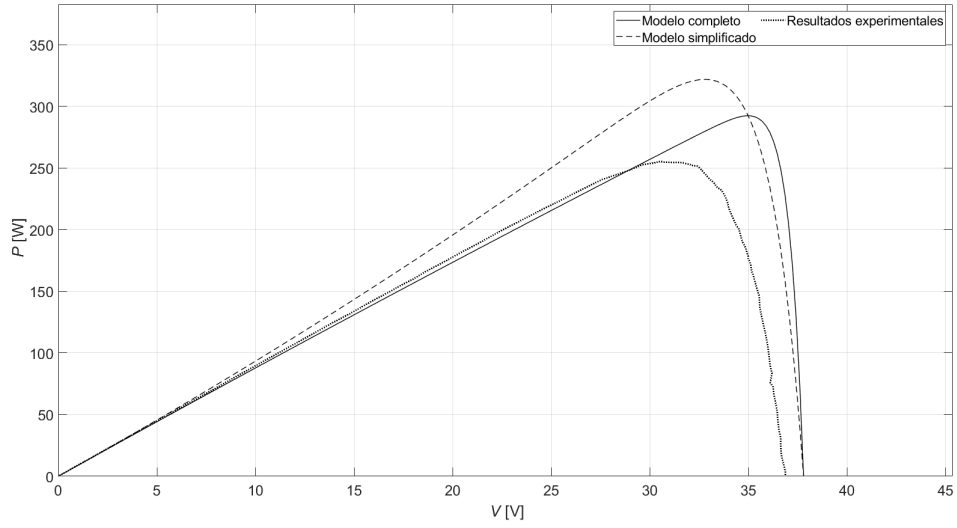


Figura 48: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico MLU empleando la resolución analítica del modelo de Karmalkar & Hannefa..

A.3. Modelo de Pindado Cubas

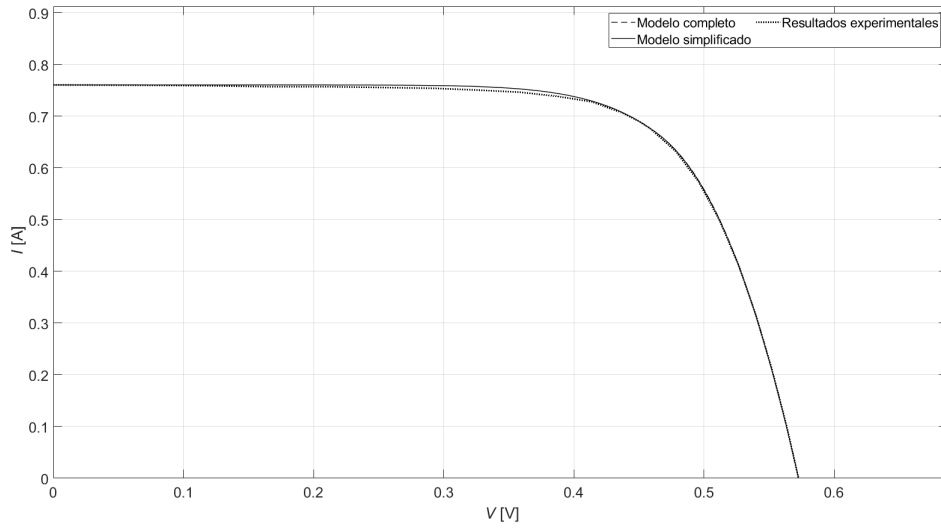


Figura 49: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

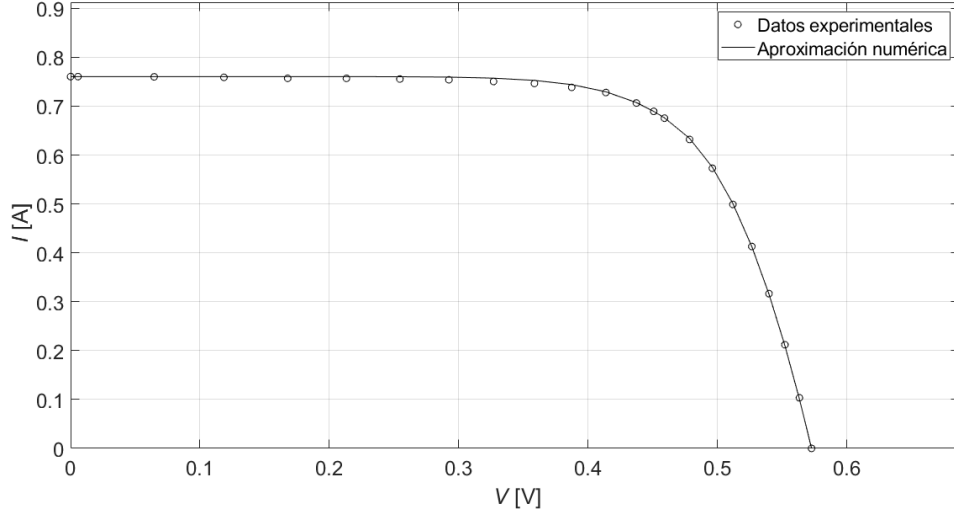


Figura 50: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

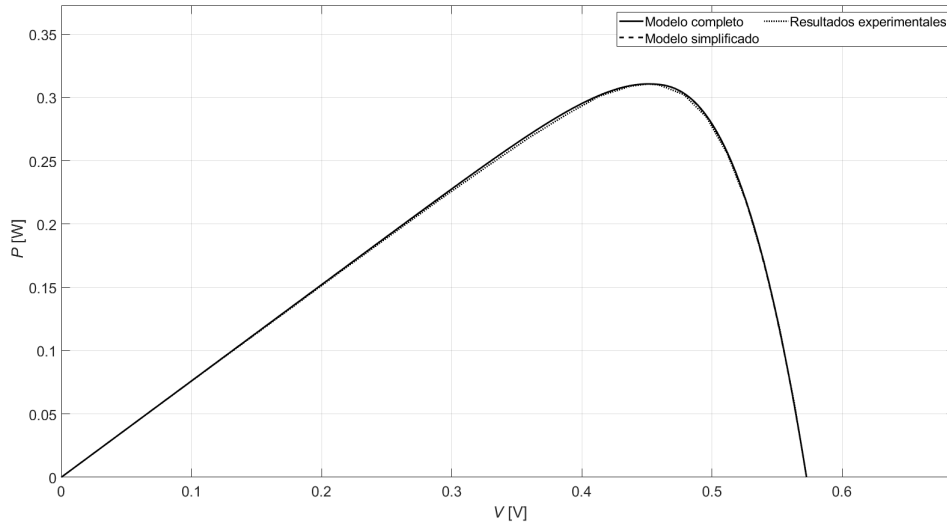


Figura 51: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

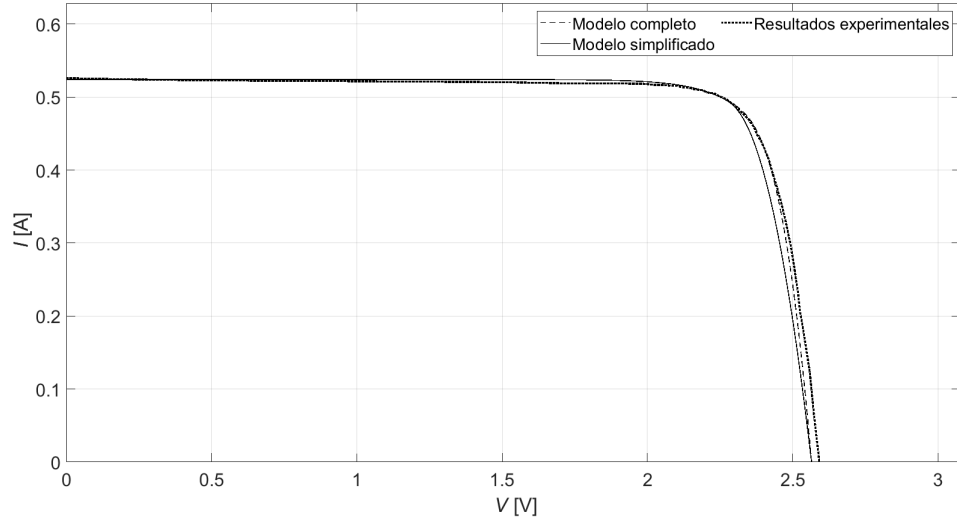


Figura 52: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

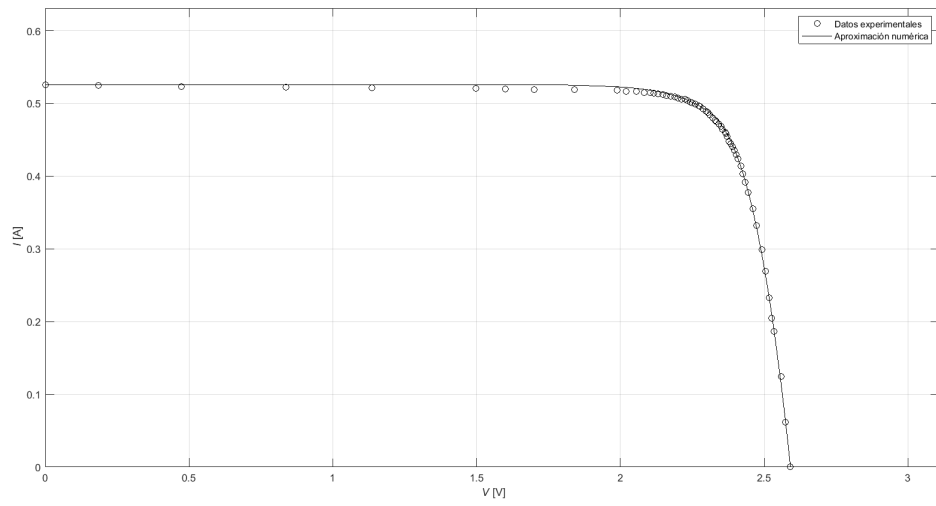


Figura 53: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

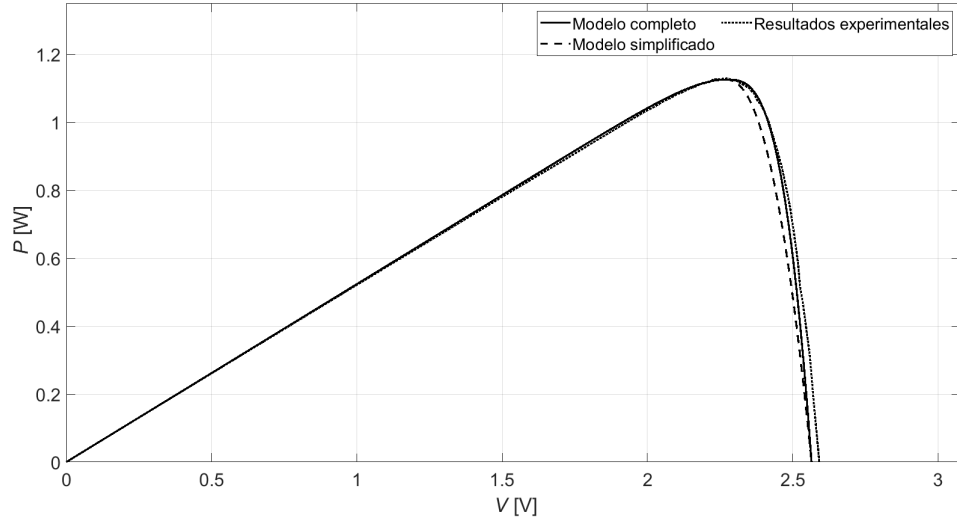


Figura 54: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico TNJ empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

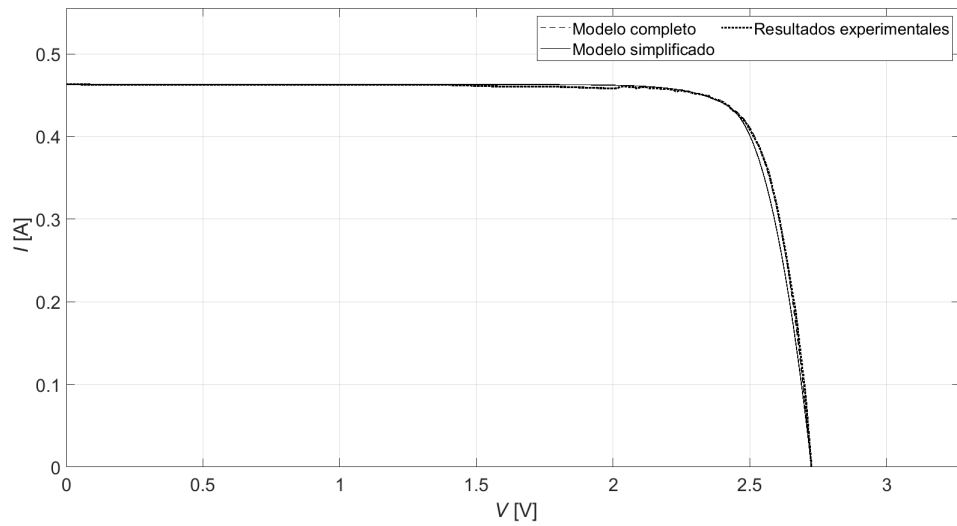


Figura 55: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

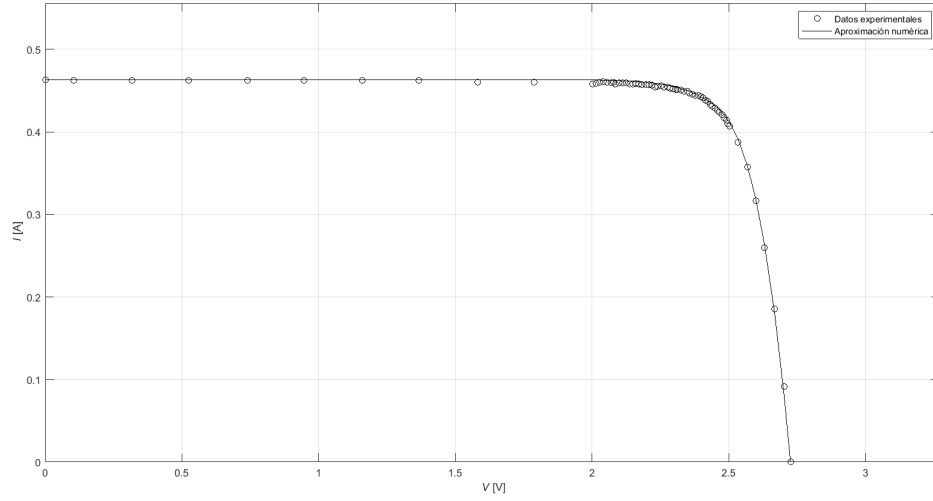


Figura 56: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

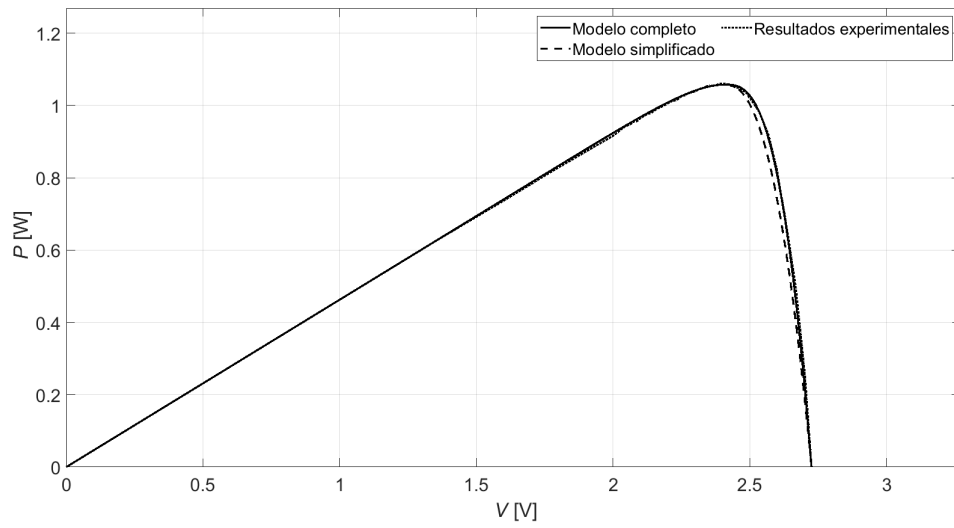


Figura 57: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico ZTJ empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

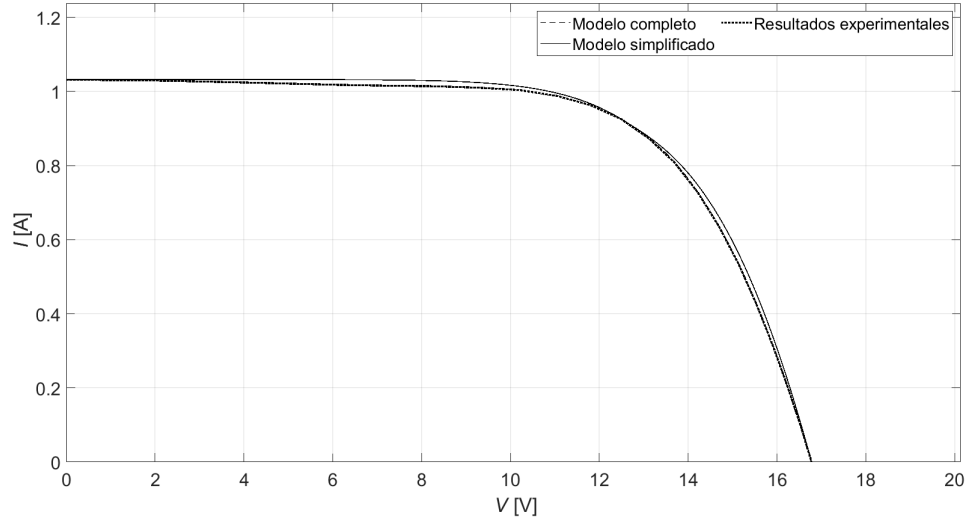


Figura 58: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

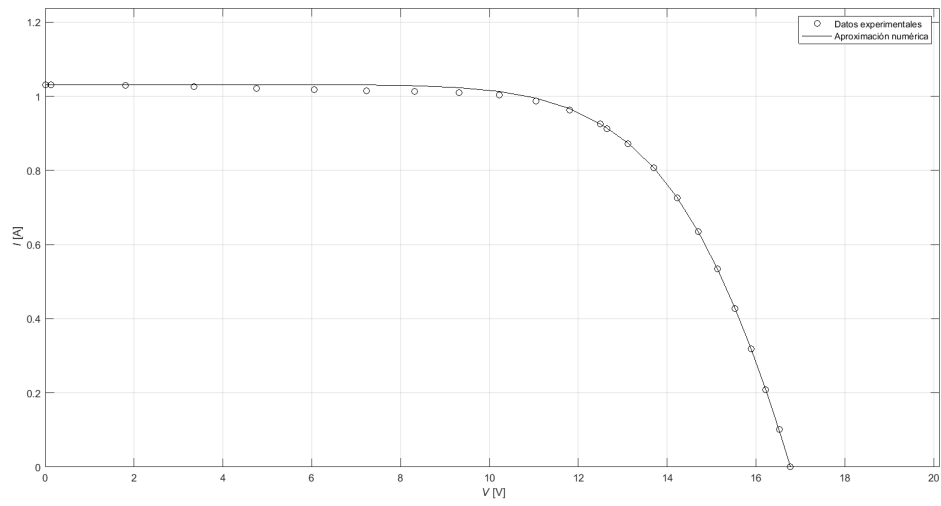


Figura 59: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

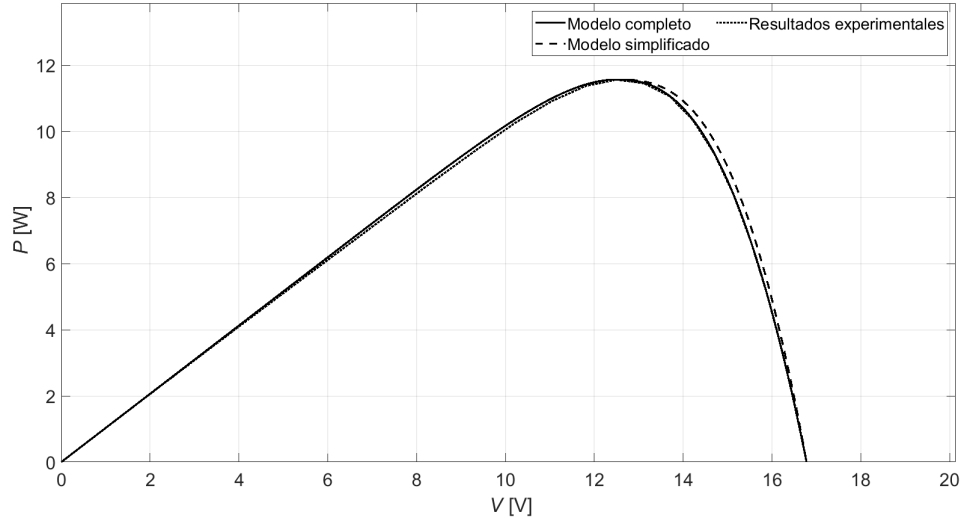


Figura 60: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PWP empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

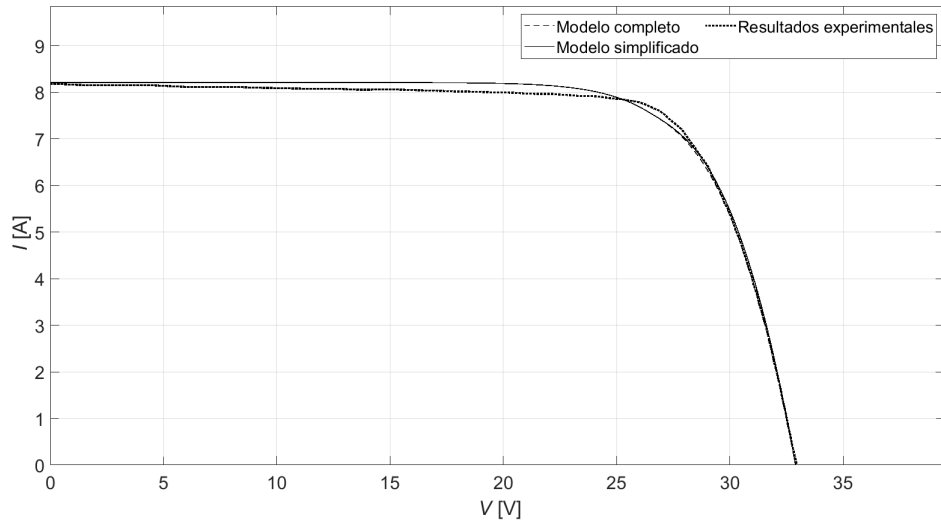


Figura 61: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

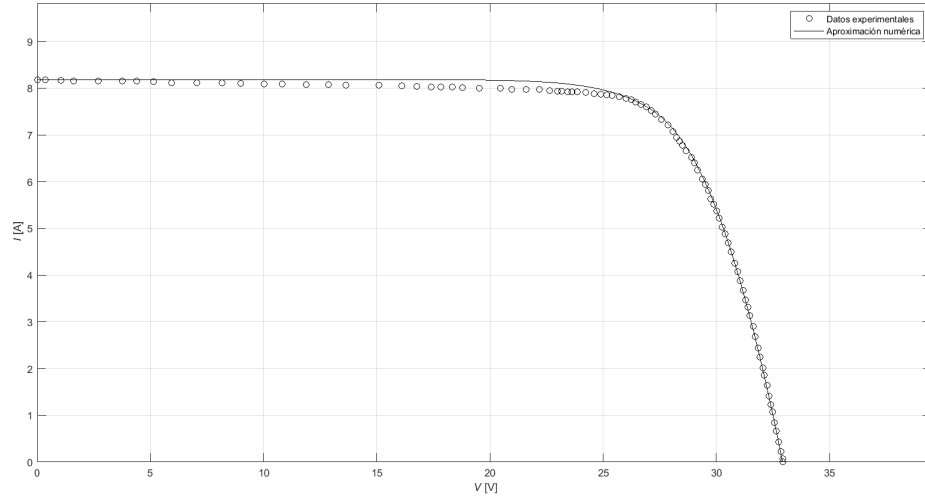


Figura 62: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico RTC empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

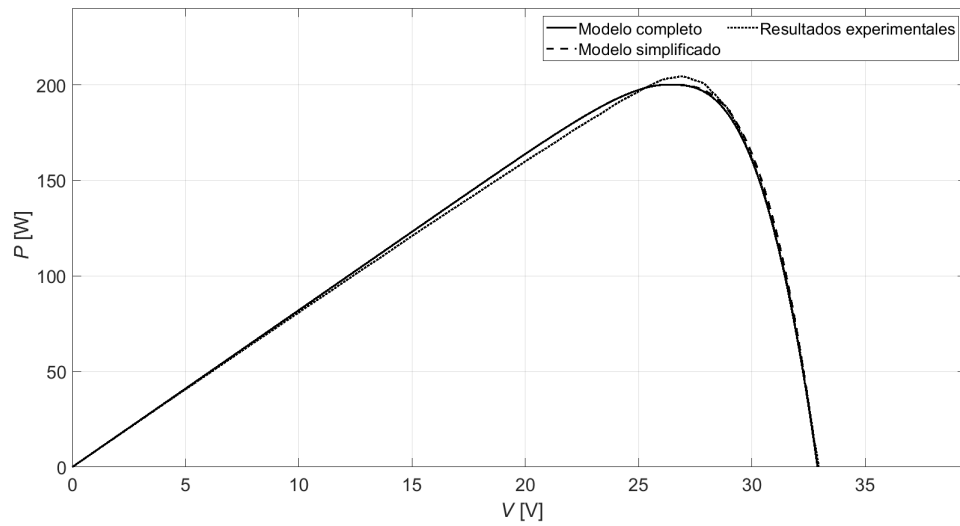


Figura 63: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico KC2 empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

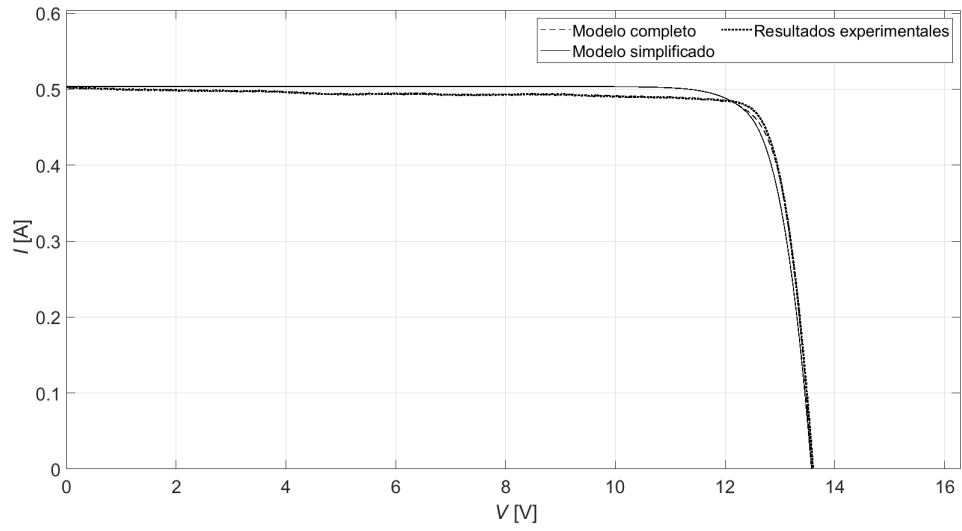


Figura 64: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

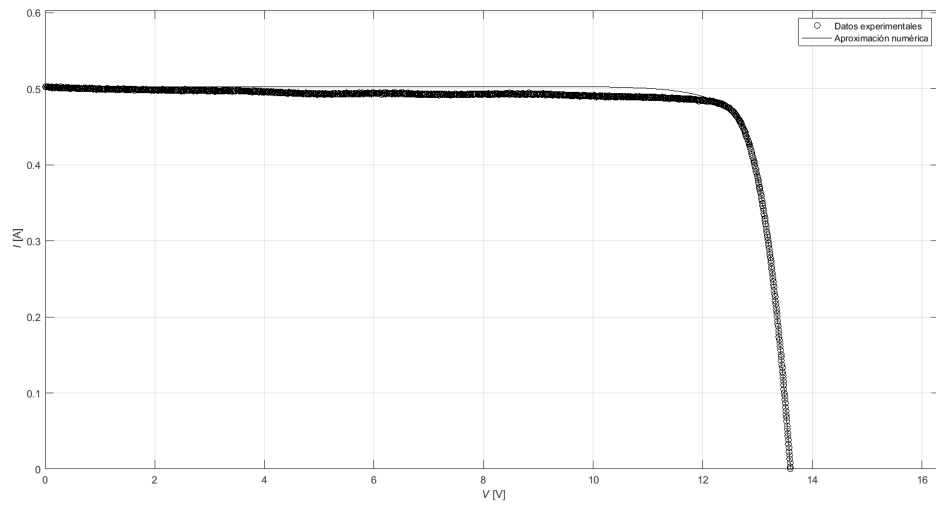


Figura 65: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

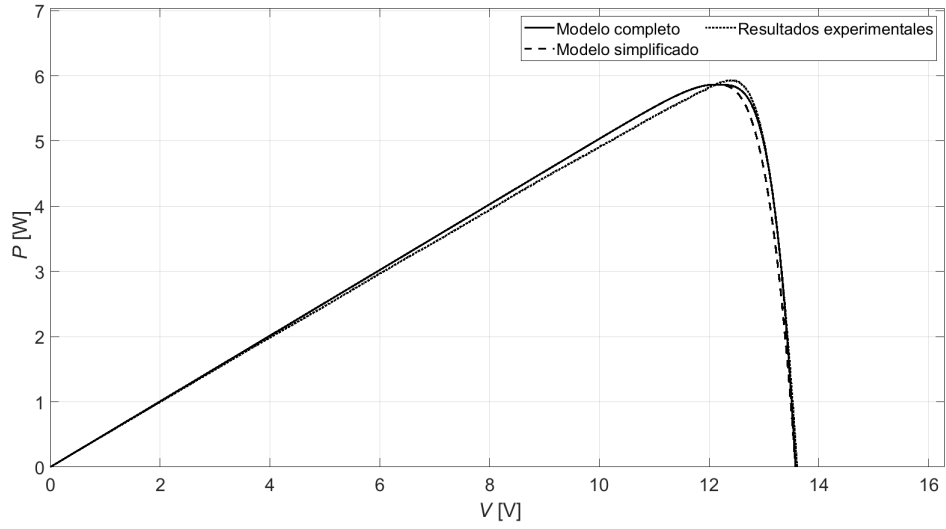


Figura 66: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico SPV empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

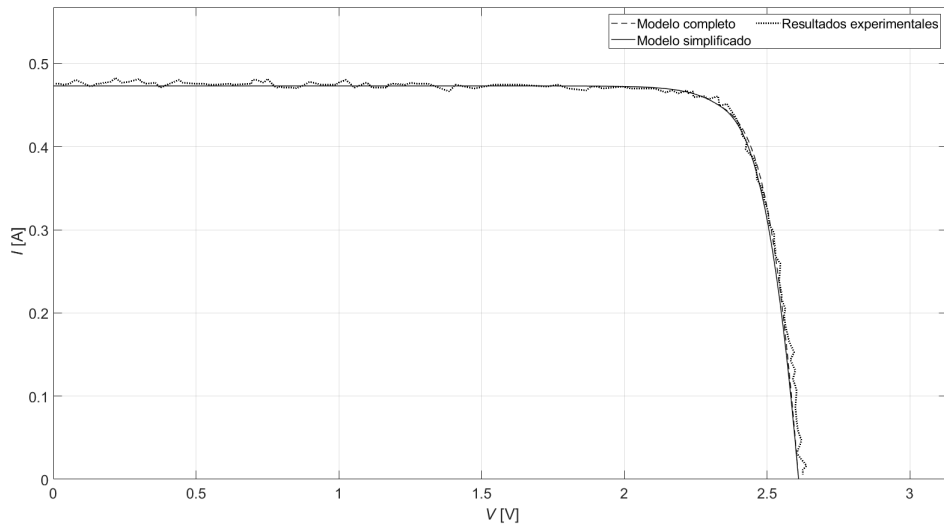


Figura 67: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

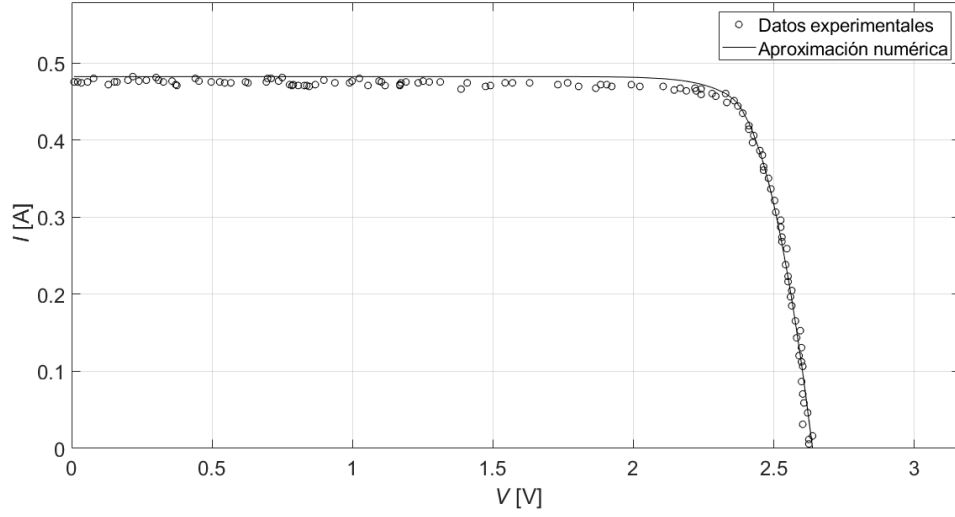


Figura 68: Curva característica de corriente frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución numérica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

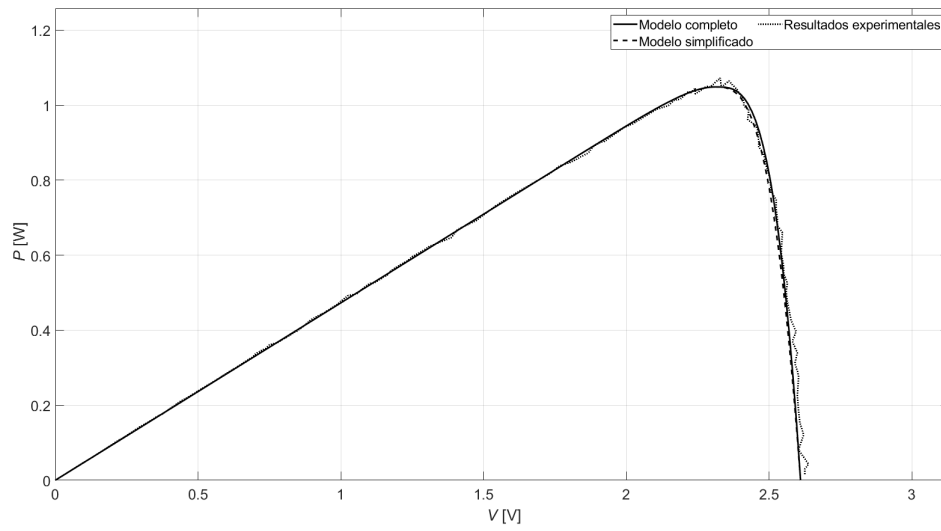


Figura 69: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico CTJ30 empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

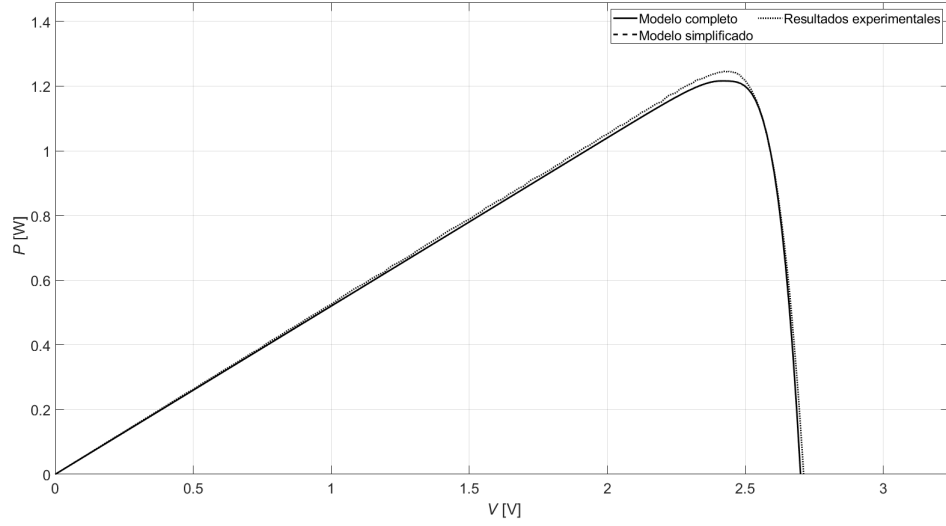


Figura 70: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico 3G30C empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

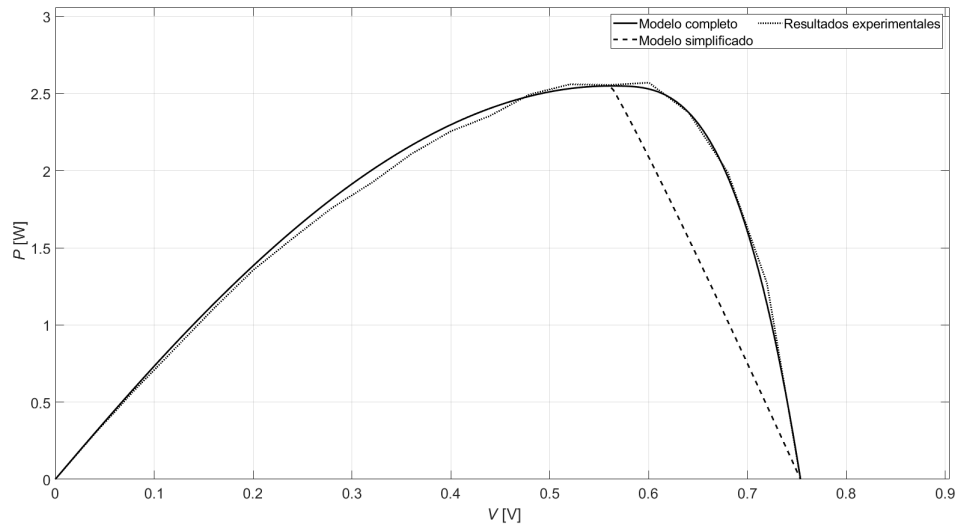


Figura 71: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico PSC empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

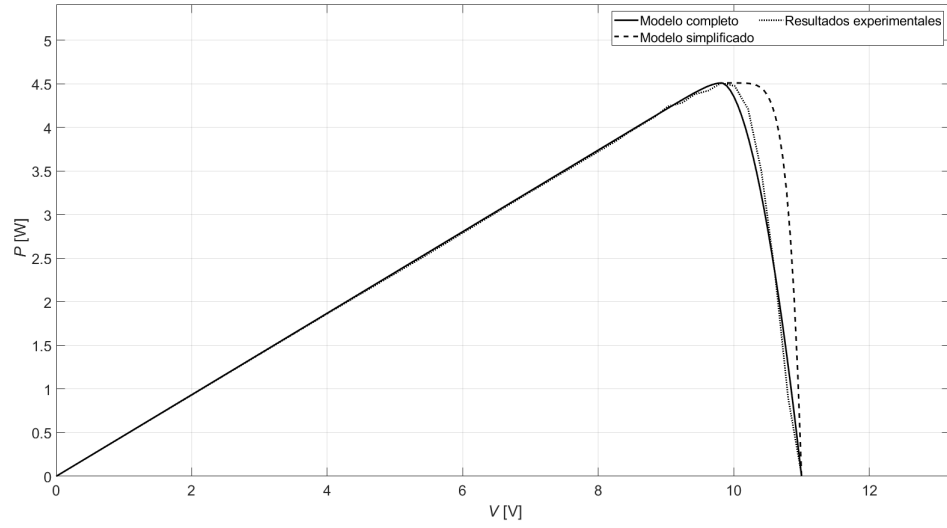


Figura 72: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico DHV-4S1P empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.

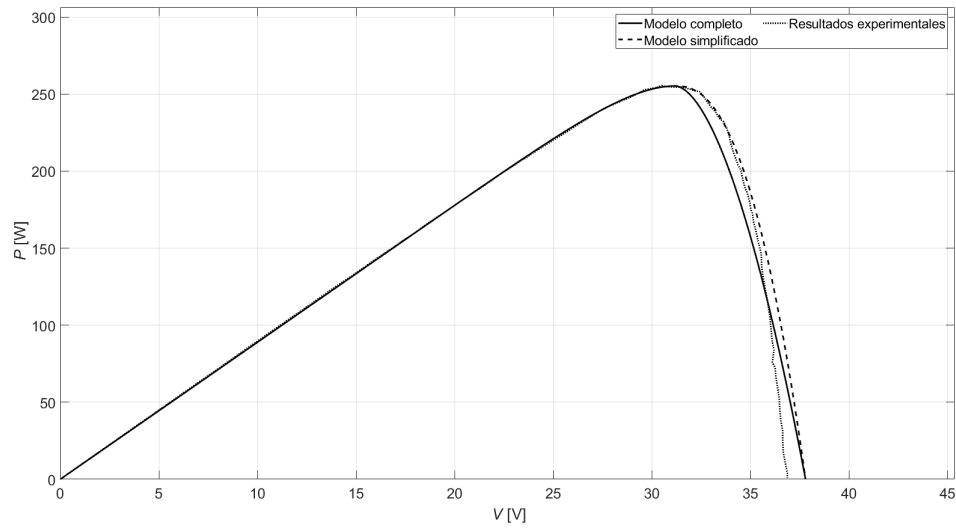


Figura 73: Curva característica de potencia frente a potencial para el dispositivo fotovoltaico Mitsubishi-MLU empleando la resolución analítica del modelo de Pindado y Cubas explicada en 2.3.3.