



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

MODELOS EXPLÍCITOS

TRABAJO 2

GENERACIÓN Y GESTIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA

Autores: David Estébanez Mérida
Andrés Pedraza Rodríguez
María Elena Piqueras Carreño
Daniel del Río Velilla
Ana Isabel Soria Carro

Profesor: Santiago Pindado Carrión

MADRID, 23 DE MARZO, 2021

Resumen

El objetivo del presente trabajo es caracterizar una serie de paneles solares mediante modelos explícitos (*id est* funciones que no están basadas en la física de las células fotovoltaicas sino en la forma de las curvas de comportamiento) a partir de los datos y curvas *I-V* experimentales proporcionadas por los fabricantes. Primero se ajustarán los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas de forma analítica y numérica a una serie de puntos experimentales dados. Después, se digitalizarán las curvas de varios fabricantes de células solares para ajustar los modelos anteriores. Para cada caso se compararán los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das con los resultados obtenidos con el modelo Pindado & Cubas.

Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	IV
1. Introducción	1
2. Metodología	2
3. Resultados	3
3.1. Modelos ajustados numéricamente	4
3.2. Modelos ajustados analíticamente	12
3.3. Comparación de resultados	22
4. Conclusiones	24
A. Aproximación analítica de la función W de Lambert	28
Referencias	29

Índice de figuras

1. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico RTC France (izq). Diferencia entre los valores de intensidad corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	6
2. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico TNJ Spectrolab (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	7
3. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico ZTJ Emcore (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	7
4. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	8
5. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Photowatt PWP 201 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	8
6. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Kyocera KC200GT-2 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	9
7. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Selex Galileo SPVS X5 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	9
8. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	10

9. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico CESI CTJ30 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	10
10. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico ATJ Emcore (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	11
11. Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	11
12. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico RTC France (izq). Diferencia entre los valores de intensidad corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	15
13. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico TNJ Spectrolab (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	16
14. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico ZTJ Emcore (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	16
15. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	17
16. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Photowatt PWP 201 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	17

17. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Kyocera KC200GT-2 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	18
18. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Selex Galileo SPVS X5 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	18
19. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	19
20. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico CESI CTJ30 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	19
21. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico ATJ Emcore (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	20
22. Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der)	20

Índice de tablas

1.	Parámetros m y γ del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de manera numérica.	5
2.	Parámetros k y h del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de manera numérica.	5
3.	Parámetro η del modelo de Pindado & Cubas ajustado para los datos experimentales de manera numérica.	6
4.	Parámetros del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de forma analítica.	13
5.	Parámetros del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de forma analítica.	14
6.	Parámetros del modelo de Pindado & Cubas ajustados para los datos experimentales de forma analítica, donde η_1 corresponde al valor de la ecuación (13) y η_2 al de la ecuación (14).	15
7.	Valores RMSE normalizados con I_{sc} de los ajustes numéricos realizados en función del dispositivo fotovoltaico analizado.	22
8.	Valores RMSE normalizados con I_{sc} de los ajustes analíticos realizados en función del dispositivo fotovoltaico analizado.	22
9.	Parámetros m y γ del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de manera numérica.	24
10.	Parámetros k y h del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de manera numérica.	24
11.	Parámetro η del modelo de Pindado & Cubas ajustado para los datos experimentales de manera numérica.	25
12.	Parámetros del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de forma analítica.	25
13.	Parámetros del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de forma analítica.	26
14.	Parámetros del modelo de Pindado & Cubas ajustados para los datos experimentales de forma analítica, donde η_1 corresponde al valor de la ecuación (13) y η_2 al de la ecuación (14).	26
15.	Valores RMSE normalizados con I_{sc} de los ajustes numéricos realizados en función del dispositivo fotovoltaico analizado.	27

16. Valores RMSE normalizados con I_{sc} de los ajustes analíticos realizados en función del dispositivo fotovoltaico analizado.	27
--	----

1. Introducción

fotovoltaicas proveniente

En el desarrollo del análisis de una misión los paneles solares juegan un papel clave dado que son los encargados de transformar la energía **proveniente** del Sol en energía eléctrica. Esta energía se distribuye al resto de subsistemas y la restante se almacena en la batería, que la liberará de forma paulatina en los periodos orbitales en los cuales sea necesario. Es por ello que determinar el comportamiento de las células **fotovoltaicas** para distintos puntos de funcionamiento es de suma importancia. Sin embargo, son muchos los factores que determinan su comportamiento y es por ello que se han desarrollado modelos explícitos los cuales permiten conocer de manera rápida y precisa la intensidad correspondiente a cada voltaje de funcionamiento. Esto permite a su vez iterar con el resto de subsistemas y determinar las características de la misión.

En este trabajo se propone lo siguiente:

en la misma línea

- Dadas las curvas $I-V$ (contenidas en el archivo *IV_curves.xlsx*) y a partir de tres curvas **$I-V$** de células o paneles solares proporcionados por fabricantes, ajustar los modelos Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas de forma numérica y de forma analítica con los puntos característicos de la curva $I-V$ por medio de la Función W de Lambert.
- Una vez se hayan ajustado las curvas, se extraerá el error medio cuadrático total (RMSE) y se compararán los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das con el modelo de Pindado & Cubas.

2. Metodología

Este trabajo se ha desarrollado empleando fundamentalmente la herramienta de software MATLAB. Con ella se han realizado los cálculos y las representaciones gráficas pertinentes.

Los modelos matemáticos utilizados (Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas) se han obtenido de la documentación proporcionada por el profesor D. Santiago Pindado a través de la plataforma Moodle de la asignatura.

Del archivo *IV_curves.xlsx* se han utilizado los los valores de tensión para circuito abierto, V_{oc} , corriente para cortocircuito, I_{sc} , el punto de máxima potencia, $[V_{mp}, I_{mp}]$, los valores de α y β y los valores experimentales para 8 tipos de dispositivos fotovoltaicos diferentes. Además, se han seleccionado dos *datasheet* de diferentes fabricantes de células fotovoltaicas, CESI CTJ30 [1], ATJ Emcore [2]. En dichos archivos, el propio fabricante facilitaba los puntos característicos, no obstante, los valores experimentales debían ser digitalizados a partir de la curva *I-V* proporcionada. Para dicha digitalización se ha utilizado la función *digitize2* de MATLAB que permite exportar los puntos en un archivo *.dat*. Finalmente, la última célula estudiada, la 4S1P del archivo *curvas_DHV.xlsx*, proporcionaba los valores experimentales y se tuvieron que calcular los puntos característicos. El procedimiento seguido fue utilizar la función *fit* para los puntos cercanos a la región que se pretendía ajustar y evaluar el mejor ajuste a partir del coeficiente de determinación, R^2 , para diferentes grados de polinomio.

En primer lugar, para el ajuste numérico se ha utilizado la función *fitnlm* de MATLAB. Esta función realiza un ajuste paramétrico de modelos no lineales y tiene los siguientes argumentos de entrada: la tensión y corriente adimensionalizadas con los valores de V_{oc} e I_{sc} , la expresión matemática del modelo a ajustar con los parámetros definidos y, por último, unos valores de inicialización de estos parámetros. La función de error que minimiza *fitnlm* es el error cuadrático medio, que tiene la siguiente expresión:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2. \quad (1)$$

Una vez que el error baja de un cierto umbral o llega a un máximo de iteraciones, se da por concluido el ajuste de los parámetros.

En el caso de la solución analítica se ha partido de los mismos datos (*IV_curves.xlsx*) y se resolverán los distintos modelos siguiendo los pasos marcados en Pindado et al. (2021) [3].

3. Resultados

A la hora de caracterizar el comportamiento de un panel solar como parte de problemas más complejos en los que intervengan otros subsistemas, reviste de especial utilidad el disponer de un modelo matemático sencillo que sea suficientemente fiel a su comportamiento real. De este modo se podrá recurrir al modelo para analizar los distintos puntos de funcionamiento en los que trabajará el panel a lo largo de la misión.

Los modelos explícitos, aunque no están basados en las propiedades físicas del panel solar ni de las células fotovoltaicas que lo conforman, son de gran interés ya que se trata de funciones explícitas (de ahí su nombre) de la forma:

$$I = f(V; a_1, a_2, \dots, a_N), \quad (2)$$

donde I es la intensidad de corriente que proporciona el panel, V el voltaje y los parámetros a_i dependen de cada modelo. Algunos de estos parámetros vienen dados por el fabricante, como es el caso de los puntos característicos V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} y I_{mp} , pero hay ocasiones en las que no ocurre esto como es el caso ya comentado de la tecnología proporcionada por DHV, donde los valores experimentales sí vienen dados. Tal y como se ha mencionado en la Sección 2, ha sido necesario realizar un ajuste para obtener los puntos característicos de la siguiente manera:

- Para la obtención del punto de cortocircuito, $(0, I_{sc})$: evaluando los cinco primeros puntos experimentales, el mejor ajuste obtenido ha sido un polinomio de grado 1, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,8026$.
- Para la obtención del punto de circuito abierto, $(V_{oc}, 0)$: evaluando los cinco últimos puntos experimentales, el mejor ajuste obtenido ha sido un polinomio de grado 2, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9888$.
- Para la obtención del punto de máxima potencia (V_{mp}, I_{mp}) : partiendo del gráfico experimental $P-V$, se observó que el máximo de potencia estaba situado entre 8 V y 10,5 V. Por ello, se realizó un ajuste *fit* de grado cuatro con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9837$ para dicho rango de voltaje y se obtuvo el voltaje para el cual la potencia era máxima, V_{mp} . Con este punto, entrando en los valores experimentales, se interpola para obtener el valor I_{mp} correspondiente.

Los modelos que se tratarán en ulteriores secciones son:

Karmalkar & Haneefa:

$$\frac{I}{I_{sc}} = 1 - (1 - \gamma) \left(\frac{V}{V_{oc}} \right) - \gamma \left(\frac{V}{V_{oc}} \right)^m, \quad (3)$$

donde γ y m son parámetros.

Das:

$$\frac{I}{I_{sc}} = \frac{1 - \left(\frac{V}{V_{oc}} \right)^k}{1 + h \left(\frac{V}{V_{oc}} \right)}, \quad (4)$$

donde h y k son parámetros.

Pindado & Cubas:

$$I = \begin{cases} I_{sc} \left[1 - \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \left(\frac{V}{V_{mp}} \right)^{\frac{I_{mp}}{I_{sc}-I_{mp}}} \right] & ; V \leq V_{mp} \\ I_{mp} \frac{V_{mp}}{V} \left[1 - \left(\frac{V-V_{mp}}{V_{oc}-V_{mp}} \right)^\eta \right] & ; V \geq V_{mp} \end{cases}, \quad (5)$$

donde η es un parámetro.

En las siguientes secciones, en concreto en la Sección 3.1 y la Sección 3.2, se van a estudiar conjuntamente los 8 dispositivos fotovoltaicos proporcionados y los 3 dispositivos obtenidos a partir de la información de diferentes fabricantes. Para estas 11 tecnologías, se van a utilizar los tres modelos de ajuste mencionados previamente, tanto para el método numérico como analítico, para finalmente realizar una comparación de ambas metodologías a través del error RMSE normalizado ([ver](#) Sección 3.3). véase la

3.1. Modelos ajustados numéricamente

A la vista de una sucesión de puntos experimentales es bastante sencillo, con las herramientas de software y programas disponibles hoy día, ajustar de forma numérica los parámetros de los modelos de forma que la curva resultante se ajuste a los datos. Existen infinidad de maneras de realizar este ajuste pero en el presente trabajo se ha optado por el uso de la función *fitnlm* de MATLAB. Así, una vez importados los datos, simplemente se hacen pasar por la función y se obtienen los coeficientes correspondientes del modelo. La representación gráfica de los valores experimentales junto con los ajustes de los tres modelos utilizados pueden observarse de la Figura 1 a la Figura 11.

Karmalkar & Haneefa

Los parámetros del ajuste obtenidos para el modelo de Karmalkar & Haneefa, tanto para las curvas proporcionadas como para las células de fabricantes seleccionados, se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros m y γ del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de manera numérica.

Dispositivo fotovoltaico	m	γ
RTC France	9,53	0,999
TNJ	26,23	0,991
ZTJ	24,95	0,993
3G30C	32,03	1,022
PWP201	7,28	0,999
KC200GT2	11,87	0,987
SPVSX5	35,31	0,967
PSC	10,27	0,522
CTJ30	27,44	0,995
ATJ	23,27	0,928
DHV 4S1P	21,78	1,029

Das

Los parámetros del ajuste obtenidos para el modelo de Das, tanto para las curvas proporcionadas como para las células de fabricantes seleccionados, se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros k y h del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de manera numérica.

Dispositivo fotovoltaico	k	h
RTC France	9,53	0,0014
TNJ	26,24	0,0092
ZTJ	24,95	0,0074
3G30C	32,00	-0,0212
PWP201	7,28	0,0008
KC200GT2	11,89	0,0130
SPVSX5	35,32	0,0342
PSC	8,31	0,6040
CTJ30	27,44	0,0053
ATJ	23,33	0,0773
DHV 4S1P	21,74	-0,0281

Pindado & Cubas

El parámetro de ajuste obtenido para el modelo de Pindado & Cubas, tanto para las curvas proporcionadas como para las células de fabricantes seleccionados, se recoge en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetro η del modelo de Pindado & Cubas ajustado para los datos experimentales de manera numérica.

Dispositivo fotovoltaico	η
RTC France	2,53
TNJ	3,26
ZTJ	2,98
3G30C	3,83
PWP201	2,48
KC200GT2	2,86
SPVSX5	3,88
PSC	3,30
CTJ30	3,38
ATJ	2,40
DHV 4S1P	2,01

Por lo que decís más adelante, ¿se solapan con el rojo?

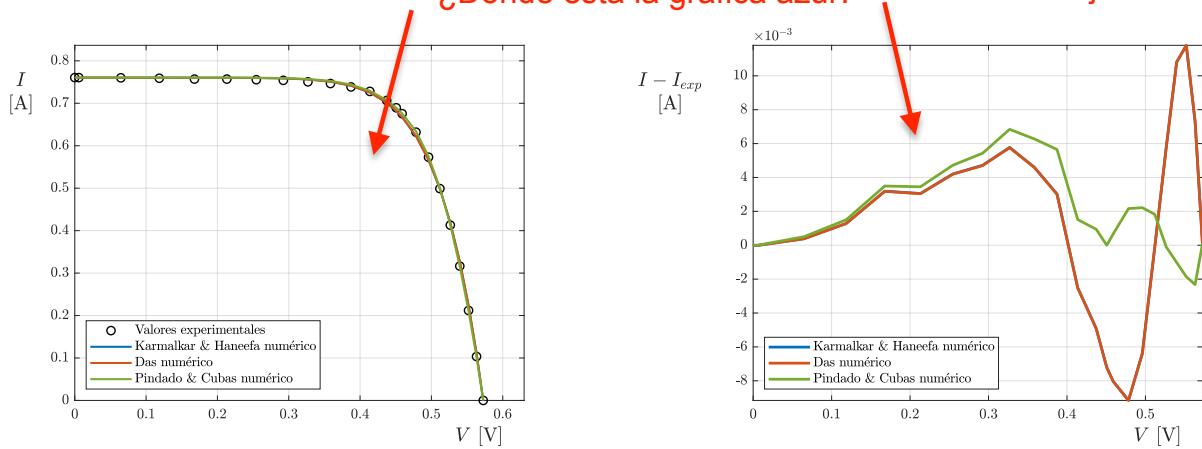


Figura 1: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico RTC France (izq). Diferencia entre los valores de intensidad corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

ídem

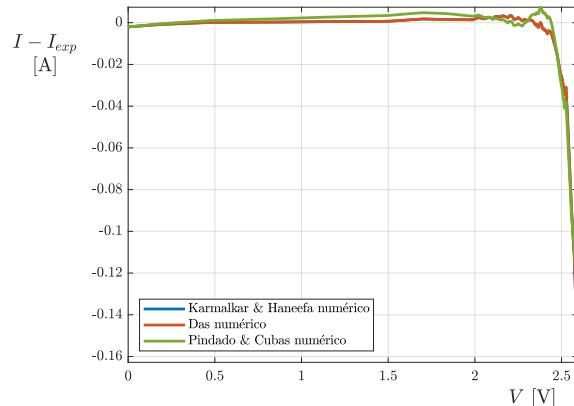
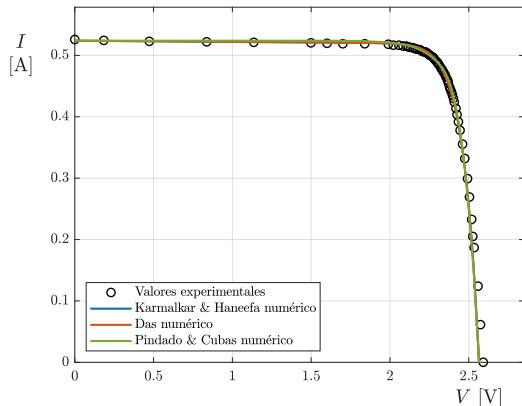


Figura 2: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico TNJ Spectrolab (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

ídem

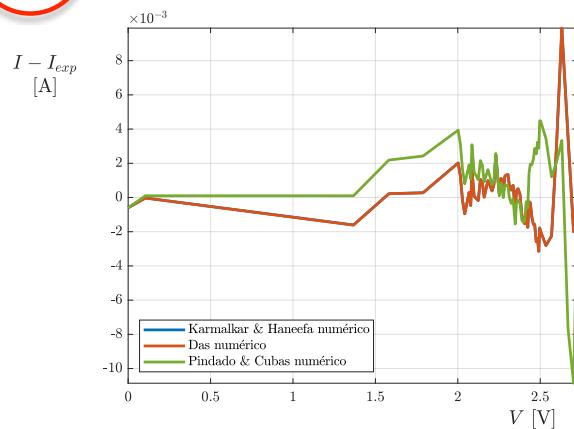
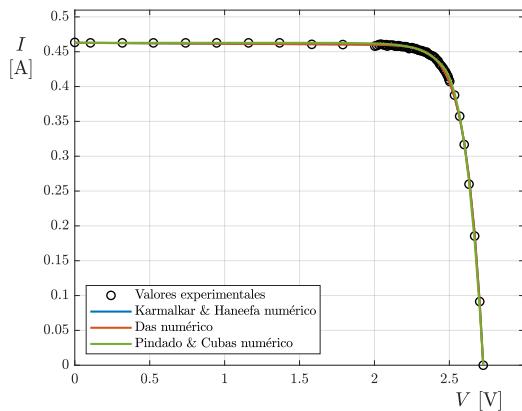


Figura 3: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico ZTJ Emcore (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

Ídem

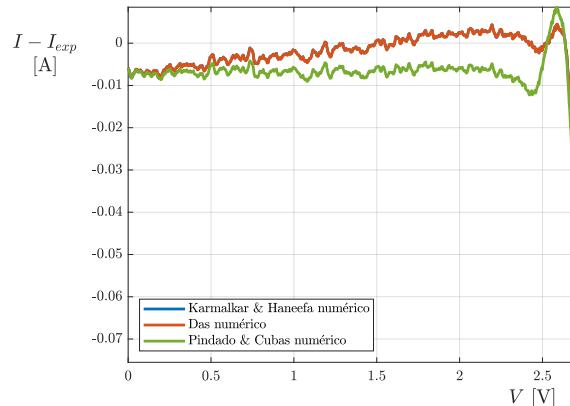
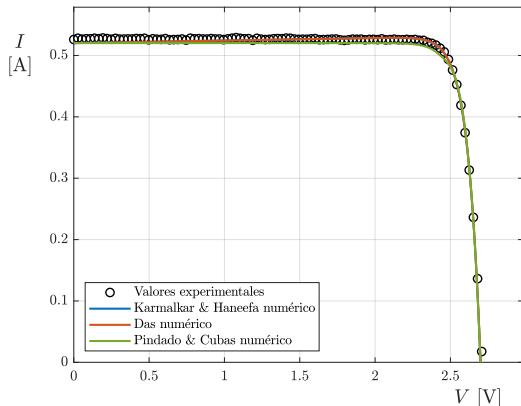


Figura 4: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

Ídem

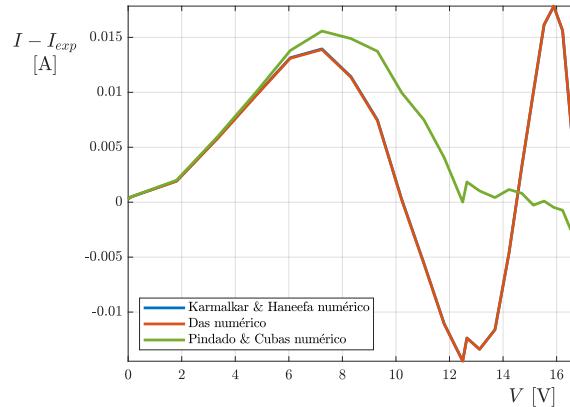
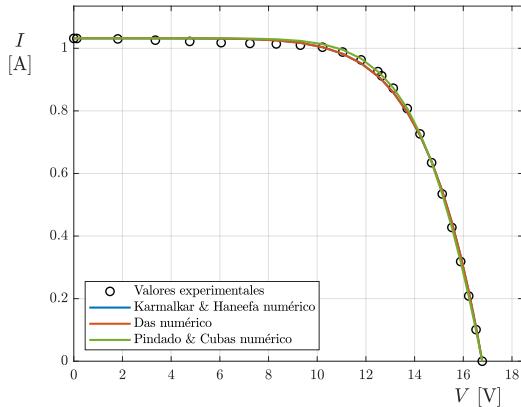


Figura 5: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Photowatt PWP 201 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

ídem

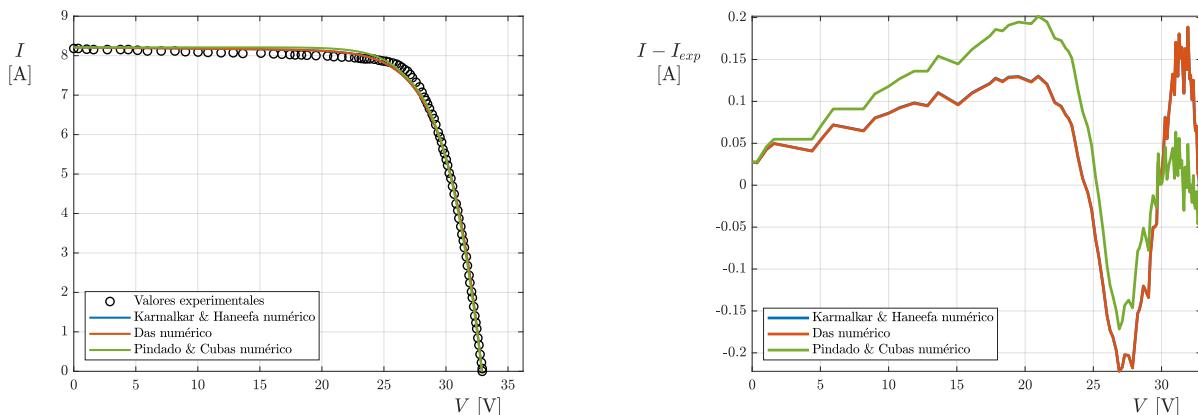


Figura 6: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Kyocera KC200GT-2 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

ídem

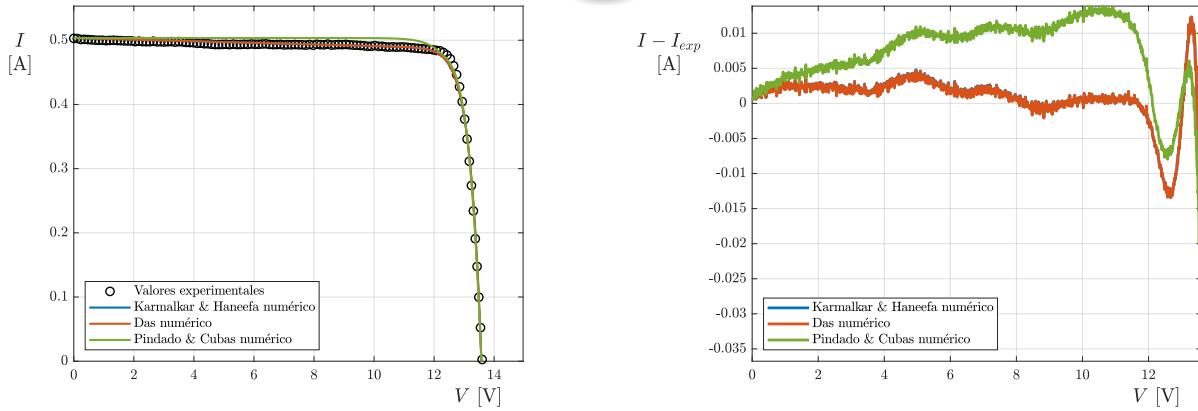


Figura 7: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Selex Galileo SPVS X5 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

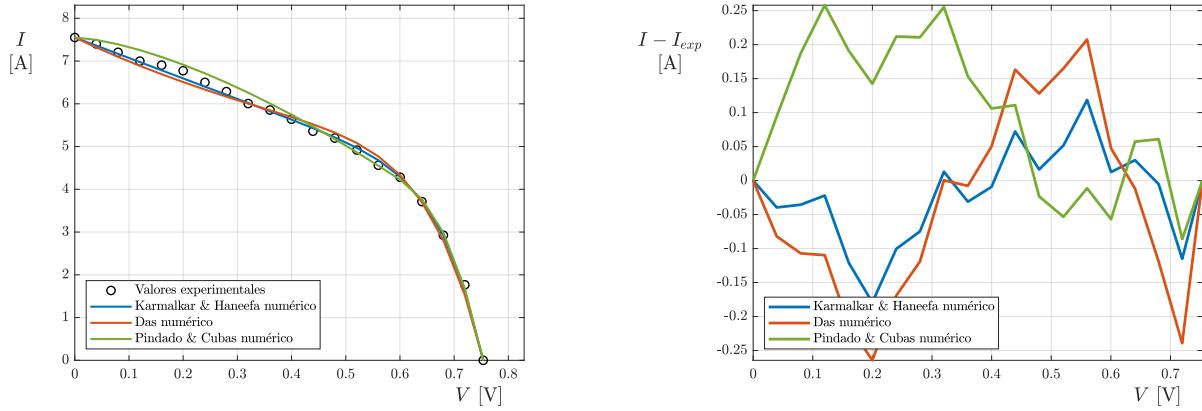


Figura 8: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

Idem

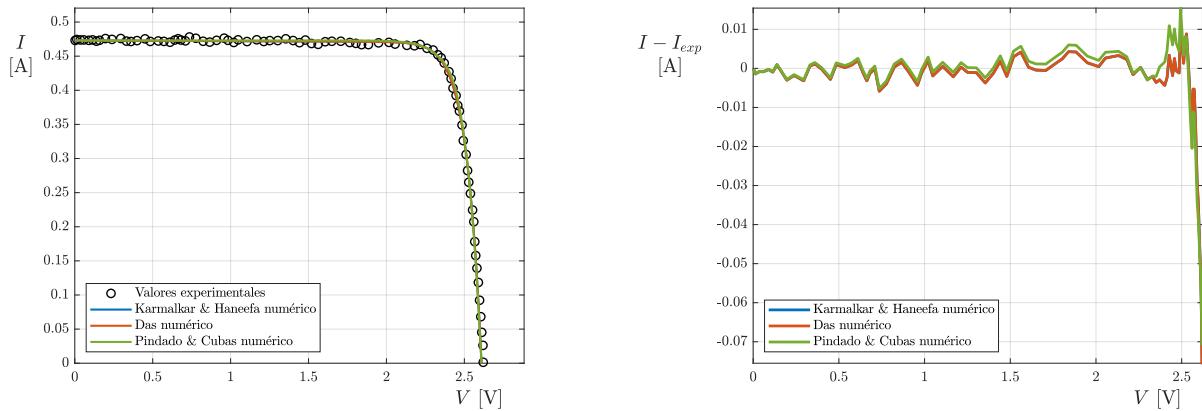


Figura 9: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico CESI CTJ30 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

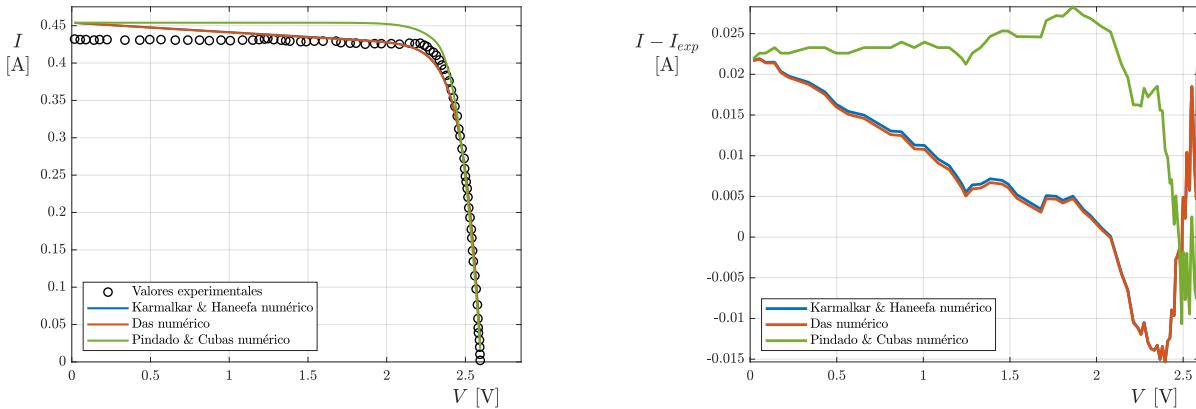


Figura 10: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico ATJ Emcore (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

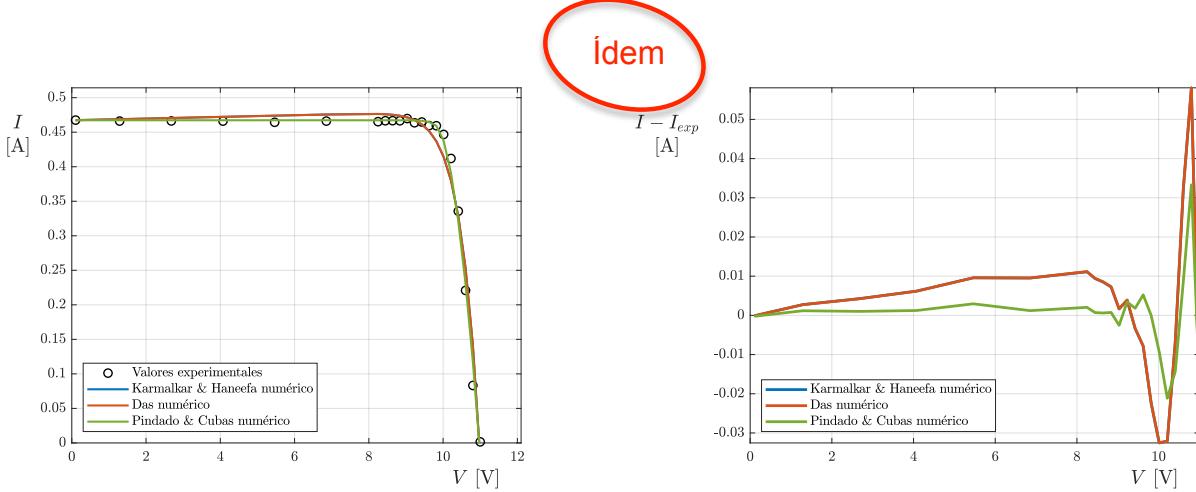


Figura 11: Ajuste numérico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

De los ajustes realizados se puede observar que los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das vuelcan resultados prácticamente idénticos. De hecho, la diferencia entre ambos modelos no puede apreciarse en casi ninguna de las gráficas mostradas, únicamente se puede distinguir la curva verde correspondiente al modelo de Das, mientras que la curva del modelo Karmalkar & Haneefa queda por debajo de esta última al haber sido trazada con anterioridad. Por este motivo, y siguiendo el análisis realizado en Pindado et al. (2018) [4], se ha incluido una segunda gráfica para cada célula solar con el objetivo de indicar las diferencias de intensidad de corriente entre los modelos (I) y los datos experimentales (I_{exp}). OK

Estas gráficas confirman finalmente que los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das dan resultados muy parecidos. El parecido es tan evidente que tampoco pueden diferenciarse las líneas correspondientes a ambos modelos. Las únicas células solares cuyos ajustes con dichos modelos no arrojan resultados prácticamente idénticos son las células Plastic Solar Cell (Figura 8) y ATJ Emcore (Figura 10).

3.2. Modelos ajustados analíticamente

Aunque el ajuste numérico plantea una solución sencilla bajo ciertas condiciones puede no converger a una solución admisible y por tanto se ha de tener especial cuidado a la hora de comprobar su bondad sobre todo en los puntos más relevantes de la curva. Es por ello que, dado que se dispone de los puntos de funcionamiento en circuito abierto, cortocircuito y máxima potencia, se puede ajustar el modelo de forma analítica de manera que coincida en estos tres puntos asumiéndose así que el resto del comportamiento del panel es el del modelo explícito. Además este ajuste tiene la ventaja de ser más rápido y más liviano computacionalmente.

Karmalkar & Haneefa

En primer lugar se estudia el modelo de Karmalkar & Haneefa, los cuales proponen la ecuación explícita (3) para obtener la intensidad de corriente, I , en función del voltaje, V . Esta ecuación incluye los parámetros γ y m para ajustar el modelo y el método empleado para obtenerlos es el siguiente:

$$K = \frac{1 - \beta - \alpha}{2\beta - 1}, \quad (6)$$

$$a = - \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{1/K} \frac{1}{K} \ln(\alpha), \quad (7)$$

$$m = \frac{W(a)^-}{\ln(\alpha)} + \frac{1}{K} + 1, \quad \text{y} \ln \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{2\beta - 1}{(m - 1)\alpha^m}, \quad (9)$$

donde $\alpha = V_{mp}/V_{oc}$ es la relación entre el voltaje a máxima potencia y el voltaje de circuito abierto, $\beta = I_{mp}/I_{sc}$ es la relación entre la intensidad de máxima potencia y la intensidad de cortocircuito y $W(z)^-$ es la rama negativa de la Función W de Lambert, obtenida analíticamente en el Anexo A.

Los resultados obtenidos para el modelo de Karmalkar & Haneefa se plasman de la Figura 12 a la Figura 22 y los parámetros del ajuste se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de forma analítica.

Dispositivo fotovoltaico	m	γ
RTC France	10,00	0,996
TNJ	27,60	0,978
ZTJ	27,20	0,980
3G30C	30,40	100
PWP201	6,98	1,040
KC200GT2	11,10	1,010
SPVSX5	29,80	0,994
PSC	10,80	0,492
CTJ30	27,50	0,994
ATJ	27,40	0,981
DHV 4S1P	31,00	1,020

Das

A continuación se estudia el modelo de Das, el cual propone la ecuación explícita (4) que incluye los parámetros h y k . El método empleado para ajustar analíticamente este modelo es el siguiente:

$$a = \beta \ln(\alpha), \quad (10)$$

$$k = \frac{W(a)^-}{\ln(\alpha)}, \quad \text{\textcolor{red}{\ln}} \quad (11)$$

$$h = \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(\left(\frac{1}{\beta} \right) - \left(\frac{1}{k} \right) - 1 \right), \quad (12)$$

donde $\alpha = V_{mp}/V_{oc}$ es la relación entre el voltaje a máxima potencia y el voltaje de circuito abierto, $\beta = I_{mp}/I_{sc}$ es la relación entre la intensidad de máxima potencia y la intensidad de cortocircuito y $W(z)^-$ es la rama negativa de la Función W de Lambert.

Los resultados obtenidos para el modelo de Das se plasman de la Figura 12 a la 22 y los parámetros del ajuste se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de forma analítica.

Dispositivo fotovoltaico	<i>k</i>	<i>h</i>
RTC France	10,00	0,0045
TNJ	27,60	0,0226
ZTJ	27,30	0,0201
3G30C	30,40	-0,0017
PWP201	6,94	-0,0391
KC200GT2	11,10	-0,0143
SPVSX5	29,80	0,0056
PSC	9,34	0,7470
CTJ30	27,50	0,0062
ATJ	27,40	0,0191
DHV 4S1P	30,90	-0,0167

Pindado & Cubas

A continuación se estudia el modelo de Pindado & Cubas, los cuales proponen la función a trozos (5) donde solo se utiliza un único parámetro para ajustar la ecuación, η , y se obtiene de:

$$\eta_1 = \frac{1}{\beta} \left(\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{mp}} \right) \left(\frac{V_{oc} - V_{mp}}{V_{oc}} \right), \quad (13)$$

donde $\alpha = V_{mp}/V_{oc}$ es la relación entre el voltaje a máxima potencia y el voltaje de circuito abierto y $\beta = I_{mp}/I_{sc}$ es la relación entre la intensidad de máxima potencia y la intensidad de cortocircuito.

La precisión puede ser mejorada utilizando un punto intermedio (V^*, I^*) entre el punto de máxima potencia y el de circuito abierto. En este caso:

$$\eta_2 = \frac{\ln(V_{mp}I_{mp} - V^*I^*) - \ln(V_{mp}I_{mp})}{\ln(V^* - V_{mp}) - \ln(V_{oc} - V_{mp})}. \quad (14)$$

Los resultados obtenidos para el modelo de Pindado & Cubas se plasman de la Figura 12 a la 22 y los parámetros del ajuste se recogen en la Tabla 6, donde η_1 corresponde al valor de la ecuación (13) y η_2 al de la ecuación (14).

De la Figura 12 a la 22 se representa a la derecha el ajuste analítico de los tres modelos presentados y a la izquierda la diferencia entre los valores de intensidad de corriente de los modelos ajustados y los valores experimentales.

¿Pindado?

Tabla 6: Parámetros del modelo de Pindado & Cubas ajustados para los datos experimentales de forma analítica, donde η_1 corresponde al valor de la ecuación (13) y η_2 al de la ecuación (14).

Dispositivo fotovoltaico	η_1	η_2
RTC France	2,51	2,54
TNJ	2,28	4,94
ZTJ	2,37	2,91
3G30C	3,63	3,59
PWP201	2,76	2,49
KC200GT2	2,96	3,11
SPVSX5	3,04	3,78
PSC	1,06	3,03
CTJ30	2,98	2,88
ATJ	2,40	1,73
DHV 4S1P	6,27	2,21

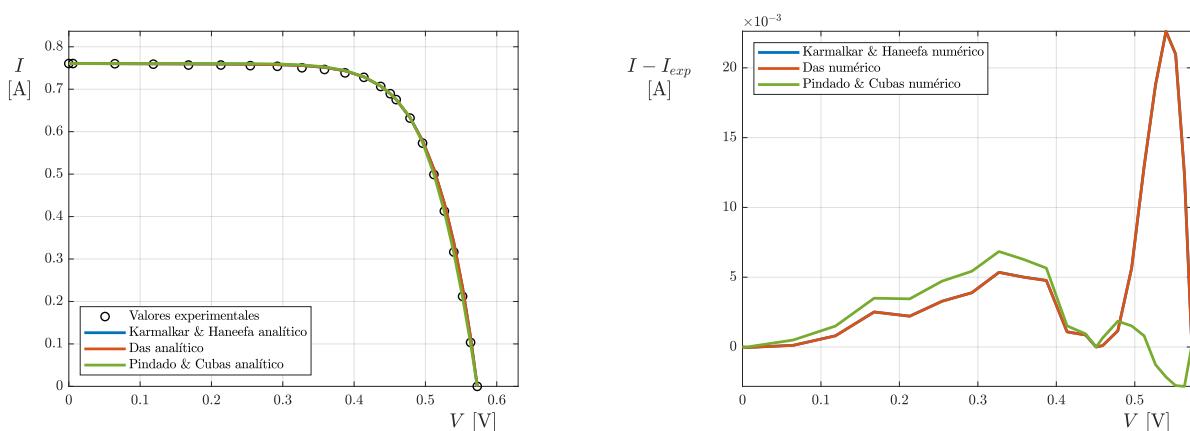


Figura 12: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico RTC France (izq). Diferencia entre los valores de intensidad corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

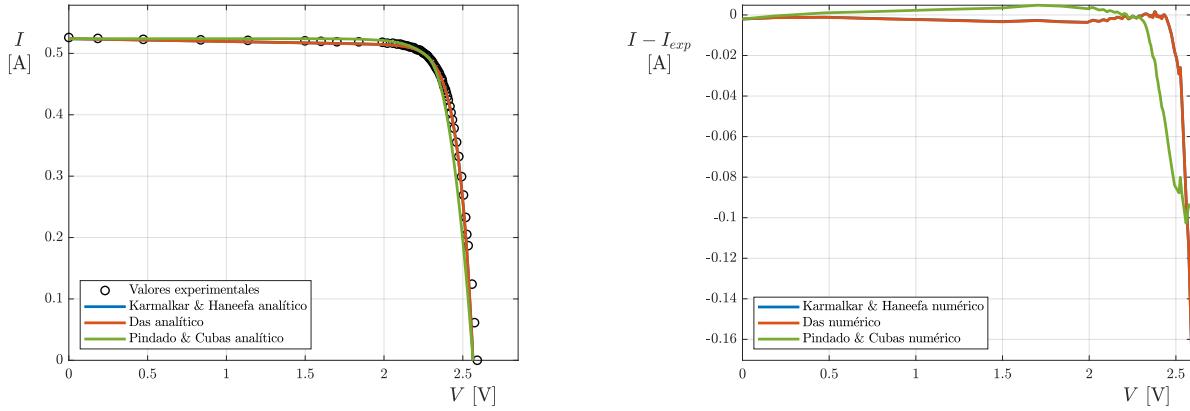


Figura 13: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico TNJ Spectrolab (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

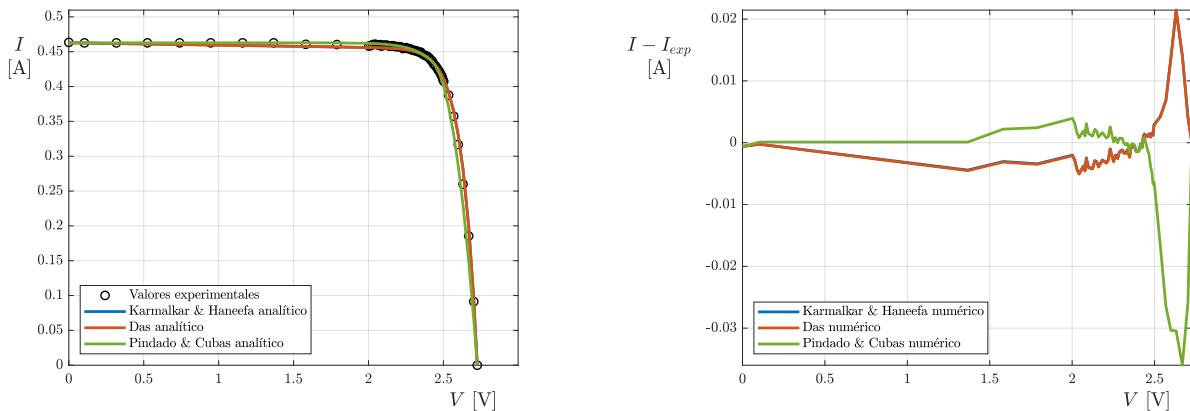


Figura 14: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico ZTJ Emcore (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

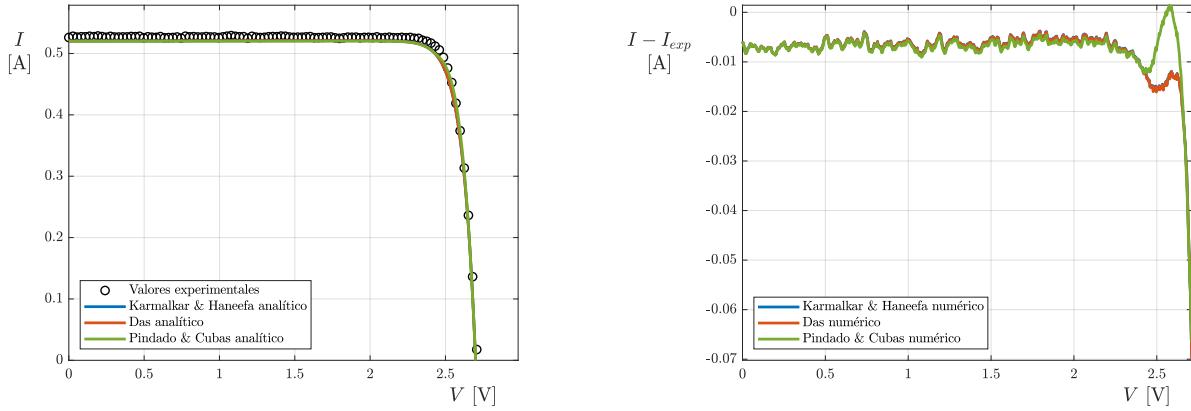


Figura 15: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Azur Space 3G30C (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

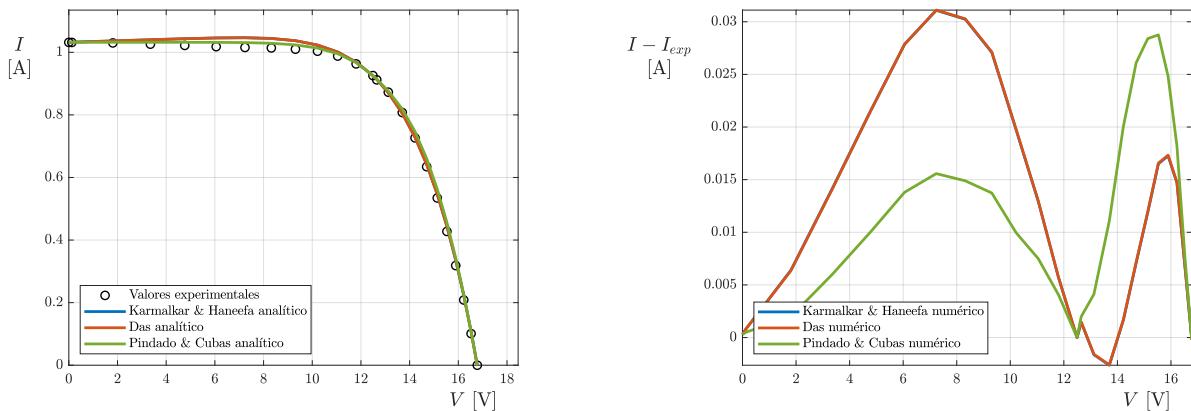


Figura 16: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Photowatt PWP 201 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

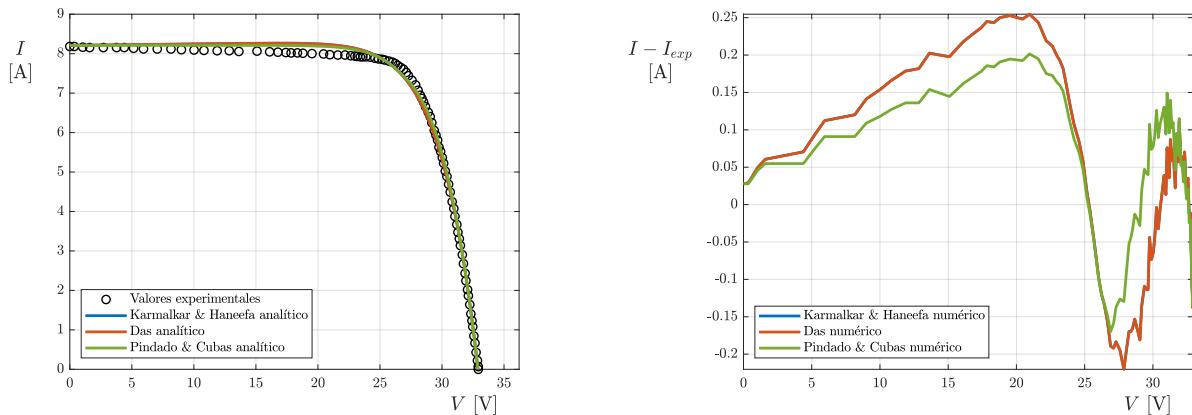


Figura 17: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Kyocera KC200GT-2 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

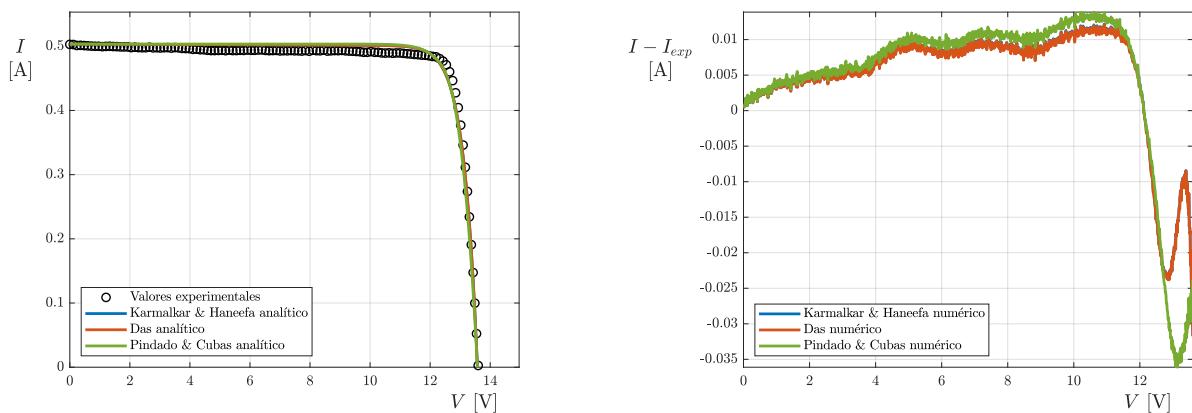


Figura 18: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Selex Galileo SPVS X5 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

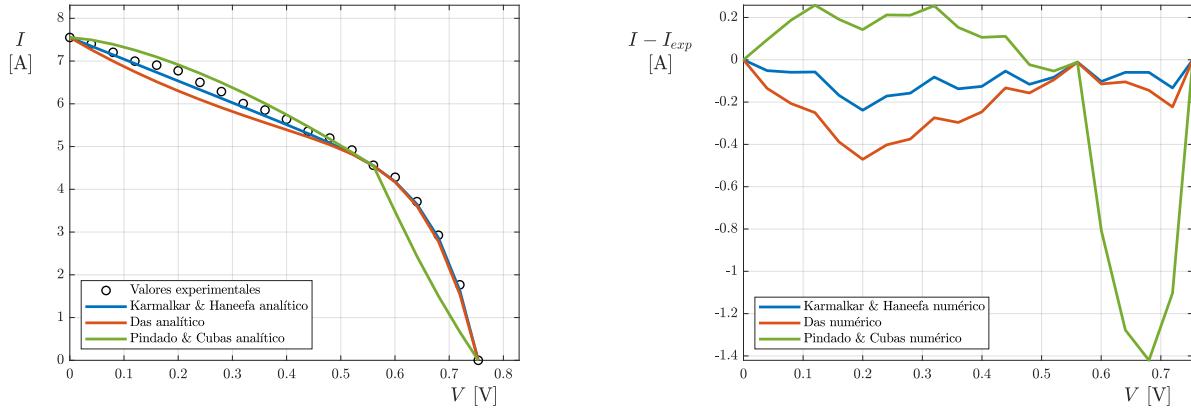


Figura 19: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico Plastic Solar Cell (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

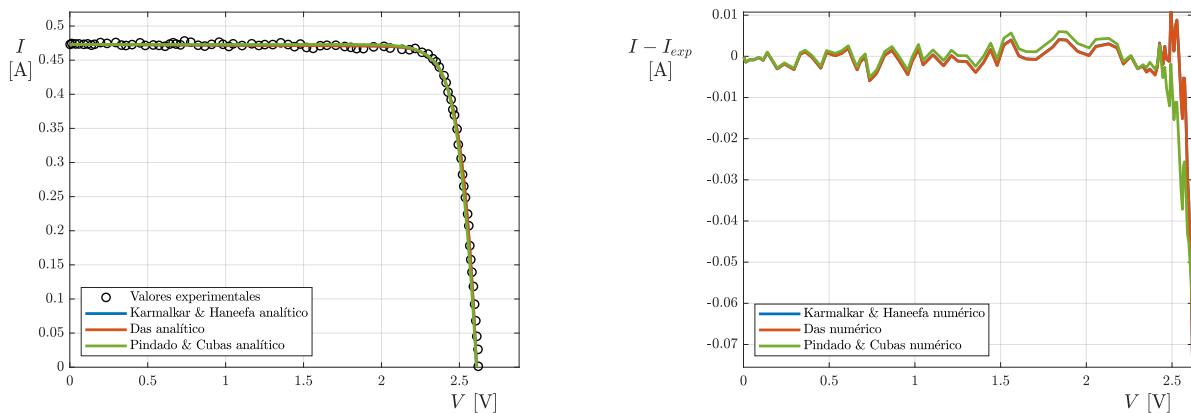


Figura 20: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico CESI CTJ30 (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

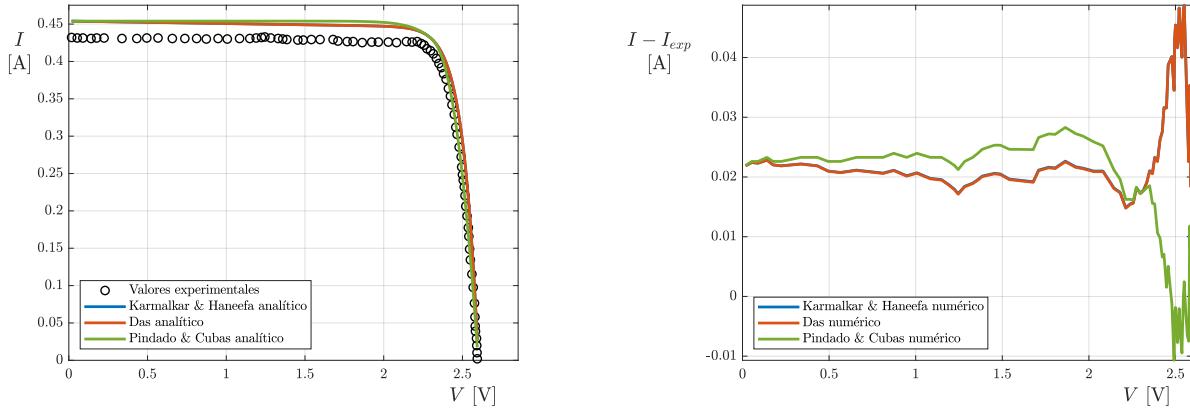


Figura 21: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico ATJ Emcore (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

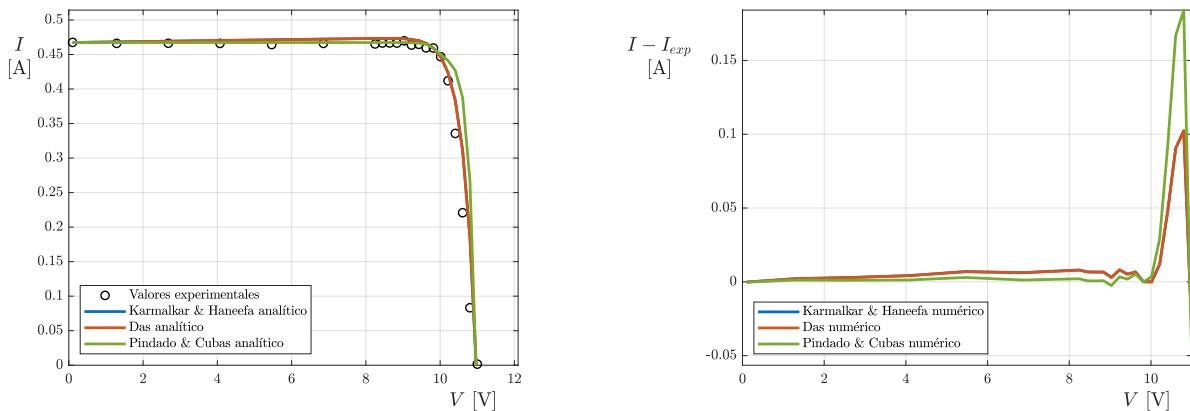


Figura 22: Ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas para los datos experimentales del dispositivo fotovoltaico DHV 4S1P (izq). Diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (der).

De los ajustes realizados se puede observar que, tal y como sucede al realizar el ajuste numérico, los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das proporcionan resultados muy similares y los valores de Karmalkar & Haneefa no son apreciables en los gráficos dado que queda por debajo de los valores de Das, excepto para el dispositivo fotovoltaico de Plastic Solar Cell (Figura 19).

3.3. Comparación de resultados

Los valores RMSE normalizados, ξ , se obtienen a partir de la ecuación (15) y se representan en la Tabla 7 para el caso del ajuste numérico y en la Tabla 8 para el analítico, donde K & H son las siglas del modelo Karmalkar & Haneefa, P & C, las del modelo Pindado & Cubas utilizando el parámetro η_1 y P & C* utilizando el parámetro η_2 .

$$\xi = \frac{1}{I_{sc}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_{calc,j} - I_j)^2}. \quad (15)$$

Tabla 7: Valores RMSE normalizados con I_{sc} de los ajustes numéricos realizados en función del dispositivo fotovoltaico analizado.

Dispositivo fotovoltaico	K & H [%]	Das [%]	P & C [%]
RTC France	1,03	1,03	0,21
TNJ	10,91	10,91	7,25
ZTJ	0,87	0,87	0,87
3G30C	2,64	2,64	3,83
PWP201	1,01	1,01	0,11
KC200GT2	0,17	0,17	0,90
SPVSX5	1,86	1,85	1,76
PSC	0,13	0,25	0,88
CTJ30	6,56	6,56	5,65
ATJ	5,93	5,87	2,16
DHV 4S1P	9,58	9,58	4,15

Tabla 8: Valores RMSE normalizados con I_{sc} de los ajustes analíticos realizados en función del dispositivo fotovoltaico analizado.

Dispositivo fotovoltaico	K & H [%]	Das [%]	P & C [%]	P & C * [%]
RTC France	1,16	1,15	0,41	0,40
TNJ	5,67	5,67	7,39	7,67
ZTJ	0,96	0,97	1,89	0,55
3G30C	1,89	1,90	1,81	1,83
PWP201	1,49	1,50	1,40	0,68
KC200GT2	1,70	1,69	1,36	1,75
SPVSX5	1,96	1,95	2,67	1,81
PSC	1,47	3,20	7,19	1,90
CTJ30	3,07	3,07	3,43	3,36
ATJ	6,05	6,04	4,08	6,29
DHV 4S1P	7,03	7,02	12,72	2,57

Observando los valores RMSE normalizados de los tres modelos para el ajuste numérico (Tabla 7), se puede ver que, efectivamente, el ajuste es prácticamente el mismo para los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das. La célula Selex Galileo SPVS X5 parece ajustarse mejor con el modelo de Das al igual que ocurre con la célula ATJ Emcore pero, en cambio, la célula Plastic Solar Cell (PSC) ofrece mejores resultados utilizando el modelo de Karmalkar & Haneefa. La célula con mayor error RMSE es la TNJ Spectrolab mientras que la célula con menor error es la Plastic Solar Cell (PSC). En cuanto al modelo de Pindado & Cubas, parece tener errores muy pequeños en las células RTC France y en la Photowatt PWP 201 aunque, al igual que los otros modelos, realiza un mal ajuste en la TNJ Spectrolab.

Con respecto al ajuste analítico (Tabla 8) la similitud entre los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das sigue siendo lo más destacable. En este caso, utilizar el modelo Pindado & Cubas para la célula 4S1P de DHV ofrece malos resultados mientras que es mucho mejor que el numérico para la célula CTJ30 de CESI, aunque ambos pueden mejorarse introduciendo el parámetro η_2 .

Teniendo en cuenta lo recientemente comentado, se puede afirmar que:

- Los modelos explícitos propuestos por Karmalkar & Haneefa y Das son los que proporcionan, en líneas generales, el mejor ajuste a las curvas $I - V$ de los dispositivos fotovoltaicos estudiados.
- El modelo explícito propuesto por Pindado & Cubas proporciona un error superior en la mayoría de dispositivos excepto en los que utilizan la antigua tecnología fotovoltaica de silicio.
- Utilizar el parámetro η_2 en el modelo de Pindado & Cubas mejora significativamente el error en la mayoría de casos.
- En general, utilizar un ajuste numérico proporciona mejores resultados que realizar un ajuste analítico.

4. Conclusiones

Del trabajo realizado se extraen las siguientes conclusiones:

fotovoltaicas

- Para los modelos de placas fotovoltaicas estudiadas, los valores del ajuste numérico del los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas son los que se muestran en la Tabla 9, 10 y 11 respectivamente:

Tabla 9: Parámetros m y γ del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de manera numérica.

Dispositivo fotovoltaico	m	γ
RTC France	9,53	0,999
TNJ	26,23	0,991
ZTJ	24,95	0,993
3G30C	32,03	1,022
PWP201	7,28	0,999
KC200GT2	11,87	0,987
SPVSX5	35,31	0,967
PSC	10,27	0,522
CTJ30	27,44	0,995
ATJ	23,27	0,928
DHV 4S1P	21,78	1,029

Tabla 10: Parámetros k y h del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de manera numérica.

Dispositivo fotovoltaico	k	h
RTC France	9,53	0,0014
TNJ	26,24	0,0092
ZTJ	24,95	0,0074
3G30C	32,00	-0,0212
PWP201	7,28	0,0008
KC200GT2	11,89	0,0130
SPVSX5	35,32	0,0342
PSC	8,31	0,6040
CTJ30	27,44	0,0053
ATJ	23,33	0,0773
DHV 4S1P	21,74	-0,0281

Tabla 11: Parámetro η del modelo de Pindado & Cubas ajustado para los datos experimentales de manera numérica.

Dispositivo fotovoltaico	η
RTC France	2,53
TNJ	3,26
ZTJ	2,98
3G30C	3,83
PWP201	2,48
KC200GT2	2,86
SPVSX5	3,88
PSC	3,30
CTJ30	3,38
ATJ	2,40
DHV 4S1P	2,01

fotovoltaicas

- Para los modelos de placas fotovoltaicas estudiadas, los valores del ajuste analítico de los modelos de Karmalkar & Haneefa, Das y Pindado & Cubas son los que se muestran en la Tabla 12, 13 y 14 respectivamente:

Tabla 12: Parámetros del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de forma analítica.

Dispositivo fotovoltaico	m	γ
RTC France	10,00	0,996
TNJ	27,60	0,978
ZTJ	27,20	0,980
3G30C	30,40	100
PWP201	6,98	1,040
KC200GT2	11,10	1,010
SPVSX5	29,80	0,994
PSC	10,80	0,492
CTJ30	27,50	0,994
ATJ	27,40	0,981
DHV 4S1P	31,00	1,020

Tabla 13: Parámetros del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de forma analítica.

Dispositivo fotovoltaico	k	h
RTC France	10,00	0,0045
TNJ	27,60	0,0226
ZTJ	27,30	0,0201
3G30C	30,40	-0,0017
PWP201	6,94	-0,0391
KC200GT2	11,10	-0,0143
SPVSX5	29,80	0,0056
PSC	9,34	0,7470
CTJ30	27,50	0,0062
ATJ	27,40	0,0191
DHV 4S1P	30,90	-0,0167

¿Pindado?

Tabla 14: Parámetros del modelo de Pindado & Cubas ajustados para los datos experimentales de forma analítica, donde η_1 corresponde al valor de la ecuación (13) y η_2 al de la ecuación (14).

Dispositivo fotovoltaico	η_1	η_2
RTC France	2,51	2,54
TNJ	2,28	4,94
ZTJ	2,37	2,91
3G30C	3,63	3,59
PWP201	2,76	2,49
KC200GT2	2,96	3,11
SPVSX5	3,04	3,78
PSC	1,06	3,03
CTJ30	2,98	2,88
ATJ	2,40	1,73
DHV 4S1P	6,27	2,21

- De la comparativa entre modelos a partir del error cuadrático medio total (RMSE), el cual se muestra en la Tabla 15 para ajuste numérico y en la Tabla 16 para ajuste analítico, se puede concluir que los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das proporcionan un mejor ajuste para la mayoría de tecnologías a excepción de las basadas en silicio (las cuales son de uso frecuente en la Tierra) y también se puede concluir que los ajustes numéricos proporcionan por lo general una mejor aproximación que los ajustes analíticos.

Tabla 15: Valores RMSE normalizados con I_{sc} de los ajustes numéricos realizados en función del dispositivo fotovoltaico analizado.

Dispositivo fotovoltaico	K & H [%]	Das [%]	P & C [%]
RTC France	1,03	1,03	0,21
TNJ	10,91	10,91	7,25
ZTJ	0,87	0,87	0,87
3G30C	2,64	2,64	3,83
PWP201	1,01	1,01	0,11
KC200GT2	0,17	0,17	0,90
SPVSX5	1,86	1,85	1,76
PSC	0,13	0,25	0,88
CTJ30	6,56	6,56	5,65
ATJ	5,93	5,87	2,16
DHV 4S1P	9,58	9,58	4,15

Tabla 16: Valores RMSE normalizados con I_{sc} de los ajustes analíticos realizados en función del dispositivo fotovoltaico analizado.

Dispositivo fotovoltaico	K & H [%]	Das [%]	P & C [%]	P & C * [%]
RTC France	1,16	1,15	0,41	0,40
TNJ	5,67	5,67	7,39	7,67
ZTJ	0,96	0,97	1,89	0,55
3G30C	1,89	1,90	1,81	1,83
PWP201	1,49	1,50	1,40	0,68
KC200GT2	1,70	1,69	1,36	1,75
SPVSX5	1,96	1,95	2,67	1,81
PSC	1,47	3,20	7,19	1,90
CTJ30	3,07	3,07	3,43	3,36
ATJ	6,05	6,04	4,08	6,29
DHV 4S1P	7,03	7,02	12,72	2,57

A. Aproximación analítica de la función W de Lambert

\$W\$

La función **W** de Lambert define soluciones de la ecuación $W \exp W = x$. Para valores reales de x la función presenta dos ramas: la rama principal, W_0 , y la negativa, W_{-1} . La rama principal a su vez queda dividida en $-1 \leq W_0^- \leq 0$ y $0 \leq W_0^+$, como se muestra en la Figura X. **???**

Barry et Al. [5] propone una aproximación analítica muy precisa de la función, con errores inferiores al 0,02 %, la cual es presentada a continuación.

que se presenta

Para la rama principal W_0^- :

$$W_0^-(x) = -1 + \frac{\sqrt{\varphi}}{1 + \left((N_1\sqrt{\varphi})/N_2 + \sqrt{\varphi} \right)}, \quad (16)$$

donde:

$$\text{alinear en los " = " } \varphi = 2(1 + ex), \quad (17)$$

$$N_1 = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) (N_2 + \sqrt{2}), \quad (18)$$

$$N_2 = 3\sqrt{2} + 6 - \frac{(2237 + 1457\sqrt{2})e - 4108\sqrt{2} - 5764}{(215 + 199\sqrt{2})e - 430\sqrt{2} - 796} \varphi. \quad (19)$$

Para la rama principal W_0^+ :

$$W_0^+(x) = 1,4586887 \ln \left(\frac{1,2x}{\ln(2,4x/\ln(1+2,4x))} \right) - 0,4586887 \ln \left(\frac{2x}{\ln(1+2x)} \right). \quad (20)$$

Para la rama negativa W_{-1} :

$$W_{-1}(x) = -1 - \sigma - 5,95061 \left(1 - \frac{1}{1 + f(\sigma)} \right), \quad (21)$$

donde,

$$f(\sigma) = \frac{0,23766\sqrt{\sigma}}{1 - 0,0042\sigma \exp(-0,0201\sqrt{\sigma})}, \quad (22)$$

$$\sigma = -1 - \ln(-x). \quad (23)$$

Referencias

- [1] T. C.-v. Characteristic, E. Q. Efficiency, Thin Triple-Junction Solar Cell for Space Applications.
- [2] C. Aiaa-s, A.-s. Standards, 29.5 % Minimum Average Efficiency.
- [3] S. Pindado, E. Roibas-Millan, J. Cubas, J. M. Alvarez, D. Alfonso-Corcuera, J. L. Cubero-Estalrrich, 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 9994 (c). doi:10.1109/TIA.2021.3052858. **Este DOI da error**
¿Acentos?
- [4] S. Pindado, J. Cubas, E. Roibás-Millán, F. Bugallo-Siegel, F. Sorribes-Palmer, Assessment of explicit models for different photovoltaic technologies, Energies 11 (6). doi:10.3390/en11061353.
- [5] 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, Mathematics and Computers in Simulation 53 (1-2) (2000) 95–103. doi:10.1016/s0378-4754(00)00172-5.