



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, 13 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) a partir de las curvas I - V experimentales proporcionadas por los fabricantes. Primero se ajustarán los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das de forma analítica y numérica a unas curvas dadas. Finalmente, se digitalizarán las curvas de varios fabricantes de células solares para ajustar los mismos modelos posteriormente. Para cada caso se compararán los modelos de Karmalkar & Haneefa y Das con los resultados obtenidos con Pindado & Cubas.

Índice

| | |
|---|----|
| Índice de figuras | I |
| Índice de tablas | II |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Metodología | 2 |
| 3. Resultados | 3 |
| 3.1. Modelos ajustados numéricamente | 4 |
| 3.2. Modelos ajustados analíticamente | 10 |
| 3.3. Ajuste numérico las curvas de los fabricantes | 18 |
| 3.4. Ajuste analítico las curvas de los fabricantes | 19 |
| 3.5. Comparación de resultados | 20 |
| 4. Conclusiones | 21 |
| A. Matrices de Rotación | 22 |
| Referencias | 23 |

Índice de figuras

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Ajuste numérico del modelo de Karmalkar & Haneefa para los datos disponibles en <i>VI_curves.xlsx</i> | 5 |
| 1. | Ajuste numérico del modelo de Karmalkar & Haneefa para los datos disponibles en <i>VI_curves.xlsx</i> | 6 |
| 2. | Ajuste numérico del modelo de Das para los datos disponibles en <i>VI_curves.xlsx</i> . . . | 7 |
| 2. | Ajuste numérico del modelo de Das para los datos disponibles en <i>VI_curves.xlsx</i> . . . | 8 |
| 3. | Ajuste analítico del modelo de Karmalkar & Haneefa para los datos disponibles en <i>VI_curves.xlsx</i> | 12 |
| 4. | Ajuste analítico del modelo de Karmalkar & Haneefa para los datos disponibles en <i>VI_curves.xlsx</i> | 13 |
| 5. | Ajuste analítico del modelo de Das para los datos disponibles en <i>VI_curves.xlsx</i> | 15 |
| 6. | Ajuste analítico del modelo de Das para los datos disponibles en <i>VI_curves.xlsx</i> | 16 |

Índice de tablas

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Parámetros del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales. | 4 |
| 2. | Parámetros del modelo de Das ajustados para los datos experimentales. | 4 |
| 3. | Parámetros del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de forma analítica. | 11 |
| 4. | Parámetros del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de forma analítica. | 14 |

1. Introducción

Este trabajo se divide en dos partes en las que se propone lo siguiente:

1. Dadas las curvas $I-V$ (contenidas en el archivo *IV_curves.xlsx*):
 - Ajustar los modelos Karmalkar & Haneefa y Das de forma numérica.
 - Ajustar los modelos Karmalkar & Haneefa y Das de forma analítica con los puntos característicos de la curva $I-V$ por medio de la Función W de Lambert.
2. A partir de tres curvas $I-V$ de células o paneles solares proporcionados por fabricantes, se pide:
 - Ajustar los modelos Karmalkar & Haneefa y Das de forma numérica.
 - Ajustar los modelos Karmalkar & Haneefa y Das 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 compararán 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 utilizados se han obtenido de la documentación proporcionada por el profesor D. Santiago Pindado a través de la plataforma Moodle de la asignatura.

La primera parte del trabajo se ha basado en los datos contenidos en el archivo *VI_curves.xlsx*. Este archivo proporciona las curvas I - V , los valores de tensión para circuito abierto, V_{oc} , corriente para cortocircuito, I_{sc} , el punto de máxima potencia, $[V_{mp}, I_{mp}]$ y los valores de α y β para 8 tipos de tecnologías diferentes.

En primer lugar, para el ajuste numérico se ha utilizado la función *fitnlm* de MATLAB. Esta función realiza un ajuste paramétrico modelos no lineales. Esta función tiene como 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 unos valores de inicialización de estos parámetros. La función de error que minimiza *fitnlm* es el error cuadrático medio, que tiene la siguiente expresión:

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

Una vez que el error baja de un cierto umbral, se da por concluido el ajuste de los parámetros del modelo.

En el caso de la solución analítica se ha partido de los mismos datos (*VI_curves.xlsx*)

3. Resultados

A la hora de caracterizar el comportamiento de un panel solar de cara a su modelización matemática como parte de problemas más complejos en los que intervengan otros subsistemas reviste de especial utilidad el disponer de un modelo sencillo que además sea suficientemente fiel para así poder recurrir a 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 que proporciona el panel, V el voltaje y los parámetros a_i dependen de cada modelo.

Los modelos que se tratarán en ulteriores secciones son:

$$Karmalkar \& Haneefa : \frac{I}{I_{sc}} = 1 - (1 - \gamma) \frac{V}{V_{oc}} - \gamma \frac{V^m}{V_{oc}^m} \text{ donde } \gamma \text{ y } m \text{ son parámetros,} \quad (3)$$

$$Das : \frac{I}{I_{sc}} = \frac{1 - \left(\frac{V}{V_{oc}}\right)^k}{1 + h \left(\frac{V}{V_{oc}}\right)} \text{ donde } h \text{ y } k \text{ son parámetros,} \quad (4)$$

$$Pindado \& Cubas : I = \begin{cases} I_{sc} \left(1 - \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) \left(\frac{V}{V_{mp}}\right)\right) & \text{si } V < V_{mp}, \\ I_{mp} \frac{V_{mp}}{V} \left(1 - \left(\frac{V - V_{mp}}{V_{oc} - V_{mp}}\right)^\phi\right) & \text{si } V > V_{mp}, \end{cases} \quad \text{donde } \phi \text{ es un parámetro.} \quad (5)$$

donde I es la intensidad de suministra el panel, V es la diferencia de potencial a la salida del panel, I_{sc} es la corriente de cortocircuito, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto, I_{mp} es la intensidad correspondiente al punto de máxima potencia y V_{mp} es el voltaje correspondiente al punto de máxima potencia.

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.

Karmalkar & Haneefa

Los resultados obtenidos para el modelo de Karmalkar & Haneefa se plasman en la Figura 1 y los parámetros del ajuste se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales.

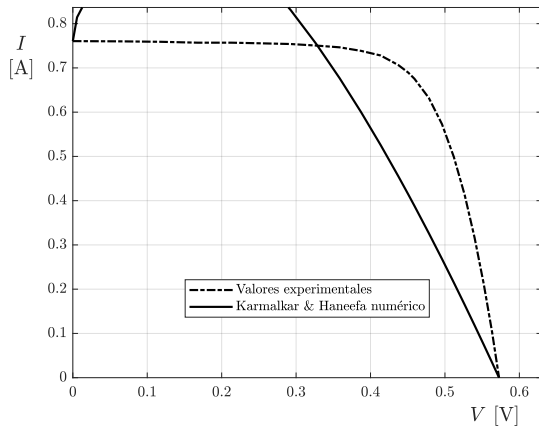
| Modelo | m | γ | Error (RMSE) |
|------------|------|----------|--------------|
| RTC France | 1 | 41200 | 0.275 |
| TNJ | 26.2 | 0.991 | 0.0572 |
| ZTJ | 24.9 | 0.993 | 0.00401 |
| 3G30C | 1 | 56900 | 0.358 |
| PWP201 | 7.28 | 0.999 | 0.0104 |
| KC200GT2 | 1 | 52700 | 0.315 |
| SPVSX5 | 35.3 | 0.967 | 0.00938 |
| PSC | 10.3 | 0.522 | 0.01 |

Das

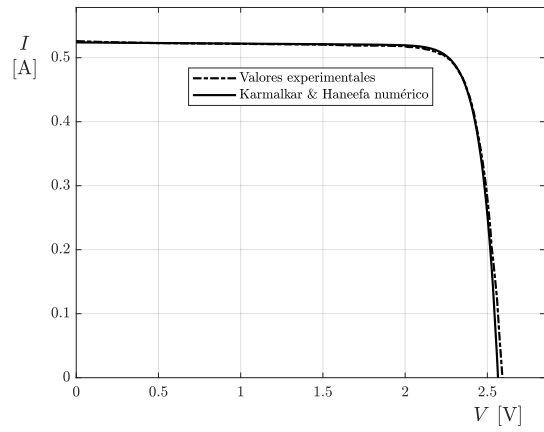
Los resultados obtenidos para el modelo de Das se plasman en la Figura 2 y los parámetros del ajuste se recogen en las tablas 2.

Tabla 2: Parámetros del modelo de Das ajustados para los datos experimentales.

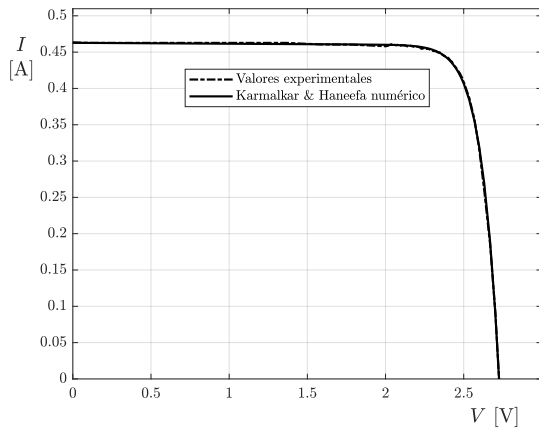
| Modelo | k | h | Error (RMSE) |
|------------|------|----------|--------------|
| RTC France | 9.53 | 0.00141 | 0.0078 |
| TNJ | 26.2 | 0.00921 | 0.0572 |
| ZTJ | 25 | 0.0074 | 0.00401 |
| 3G30C | 32 | -0.0212 | 0.0137 |
| PWP201 | 7.28 | 0.000783 | 0.0104 |
| KC200GT2 | 11.9 | 0.013 | 0.0142 |
| SPVSX5 | 35.3 | 0.0342 | 0.00933 |
| PSC | 8.31 | 0.604 | 0.0192 |



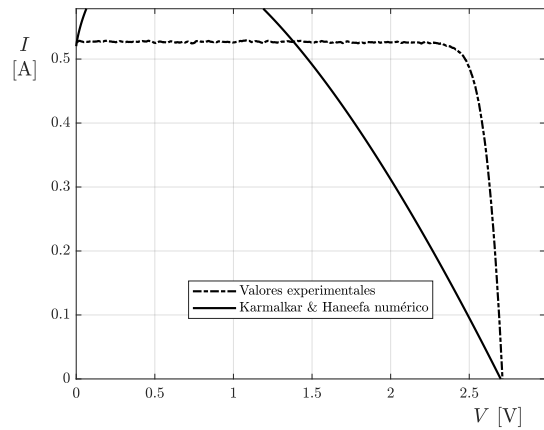
(a) RTC France.



(b) TNJ.

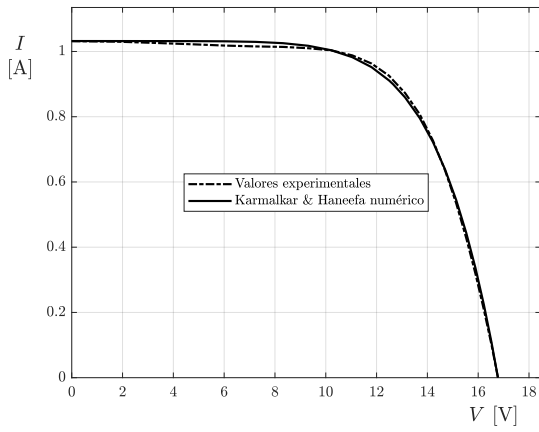


(c) ZTJ.

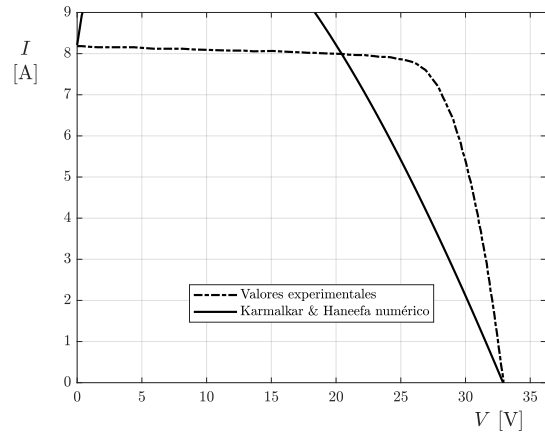


(d) 3G30C.

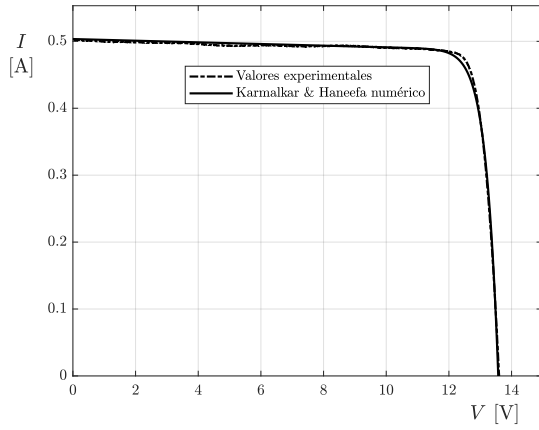
Figura 1: Ajuste numérico del modelo de Karmalkar & Haneefa para los datos disponibles en *VI_curves.xlsx*



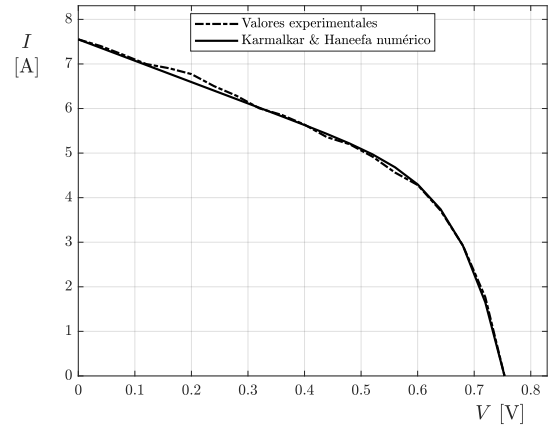
(e) PWP201.



(f) KC200GT2.

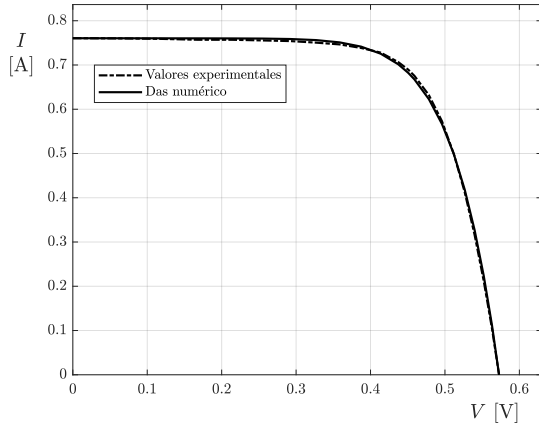


(g) SPVSX5.

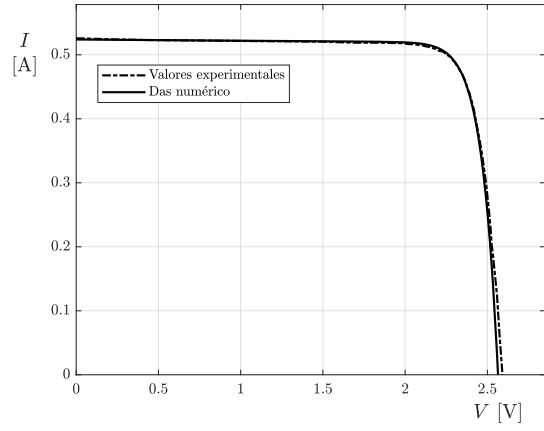


(h) PSC.

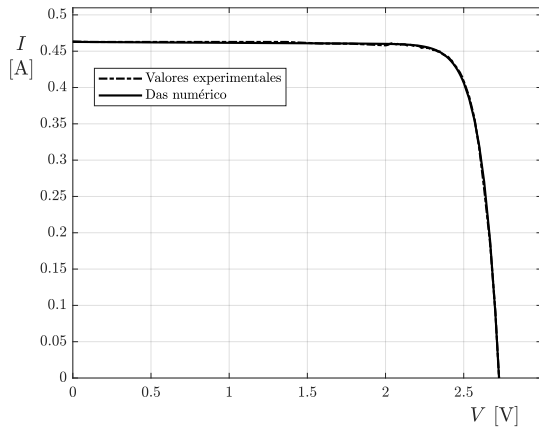
Figura 1: Ajuste numérico del modelo de Karmalkar & Haneefa para los datos disponibles en *VI_curves.xlsx*



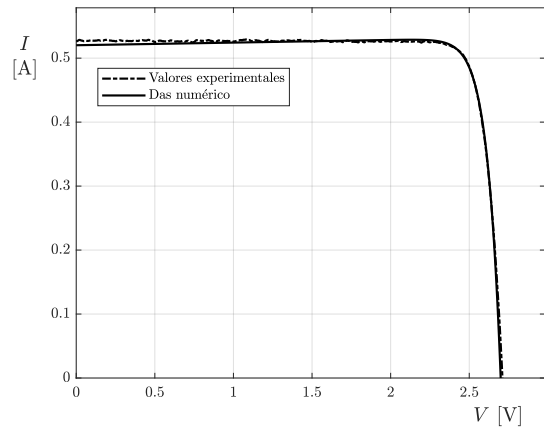
(a) RTC France.



(b) TNJ.

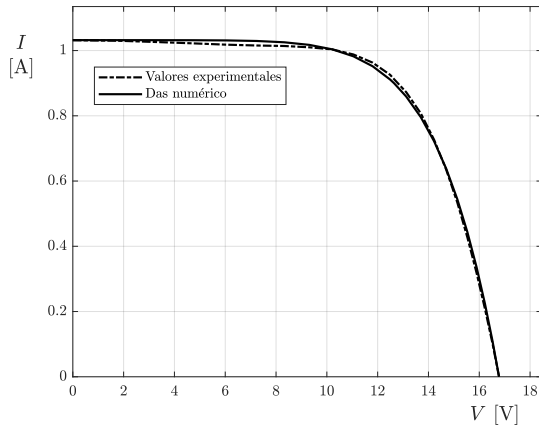


(c) ZTJ.

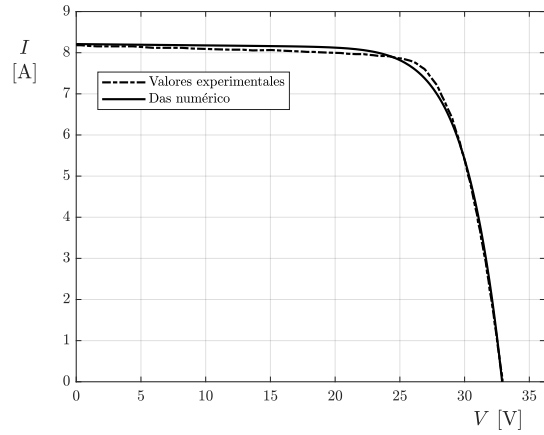


(d) 3G30C.

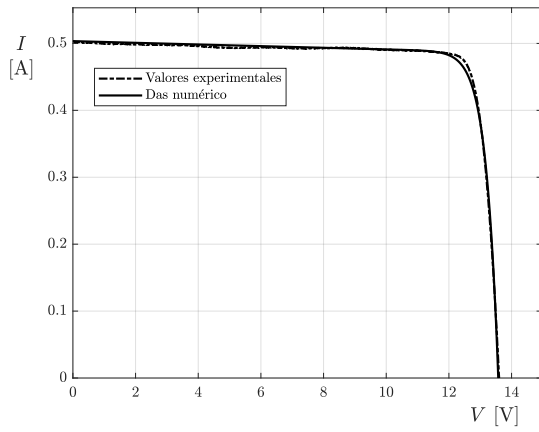
Figura 2: Ajuste numérico del modelo de Das para los datos disponibles en *VI_curves.xlsx*



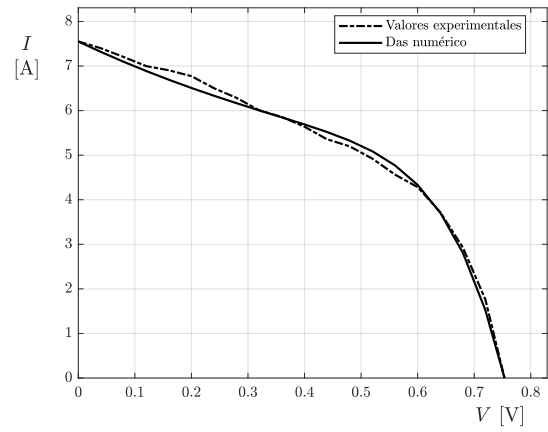
(e) PWP201.



(f) KC200GT2.



(g) SPVSX5.



(h) PSC.

Figura 2: Ajuste numérico del modelo de Das para los datos disponibles en *VI_curves.xlsx*

De los ajustes realizados se puede observar ...

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:

$$Karmalkar \& Haneefa : \frac{I}{I_{sc}} = 1 - (1 - \gamma) \frac{V}{V_{oc}} - \gamma \frac{V}{V_{oc}}^m \text{ donde } \gamma \text{ y } m \text{ son parámetros ,} \quad (6)$$

y el método empleado para ajustar este modelo es el siguiente:

$$K = \frac{1 - \beta - \alpha}{2\beta - 1}, \quad (7)$$

$$a = - \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{1/K} \frac{1}{K} \ln(\alpha), \quad (8)$$

$$m = \Re \left(\frac{W(a)^-}{\ln(\alpha)} + \frac{1}{K} + 1 \right), \quad (9)$$

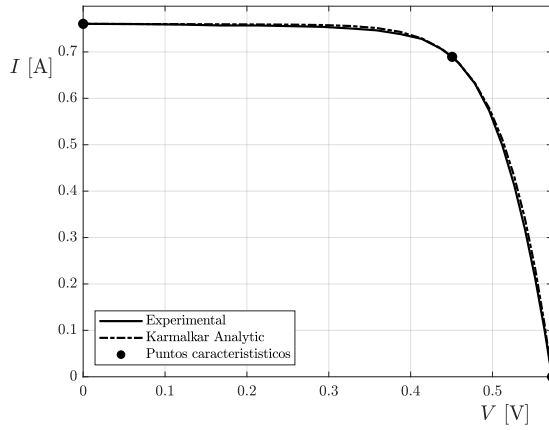
$$\gamma = \frac{2\beta - 1}{(m - 1)\alpha^m}, \quad (10)$$

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, $W(z)^-$ es la rama negativa de la Función W de Lambert y m y γ son los parámetros que finalmente ajustan el modelo.

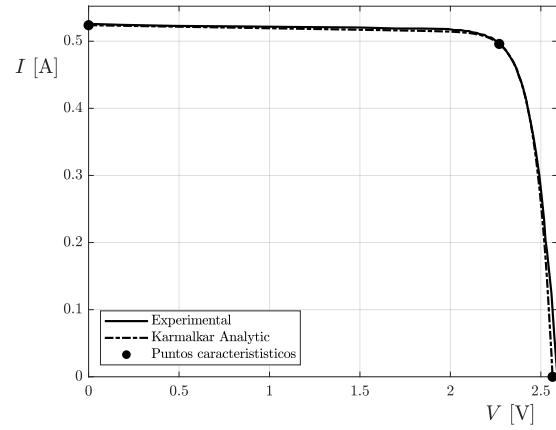
Los resultados obtenidos para el modelo de Karmalkar & Haneefa se plasman en la Figura 3 y 4 y los parámetros del ajuste se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros del modelo de Karmalkar & Haneefa ajustados para los datos experimentales de forma analítica.

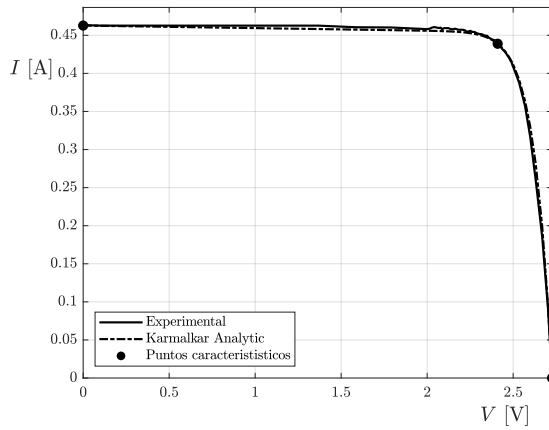
| Modelo | m | γ |
|------------|------|----------|
| RTC France | 10 | 0.996 |
| TNJ | 27.6 | 0.978 |
| ZTJ | 27.2 | 0.98 |
| 3G30C | 30.4 | 1 |
| PWP201 | 6.98 | 1.04 |
| KC200GT2 | 11.1 | 1.01 |
| SPVSX5 | 29.8 | 0.994 |
| PSC | 10.8 | 0.492 |



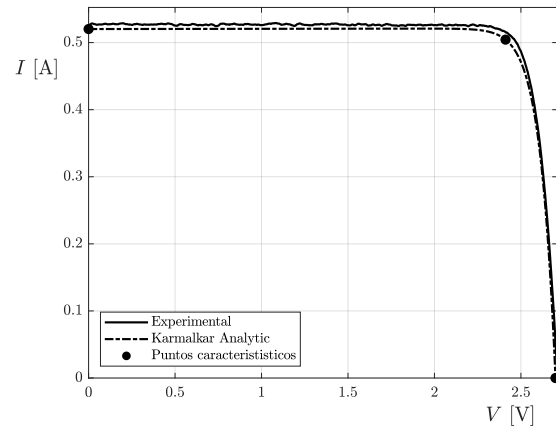
(a) RTC France.



(b) TNJ.

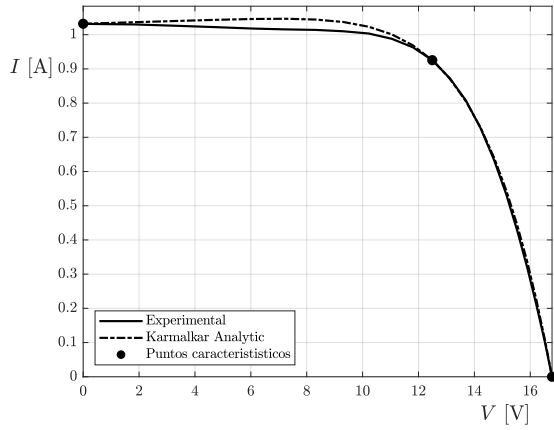


(c) ZTJ.

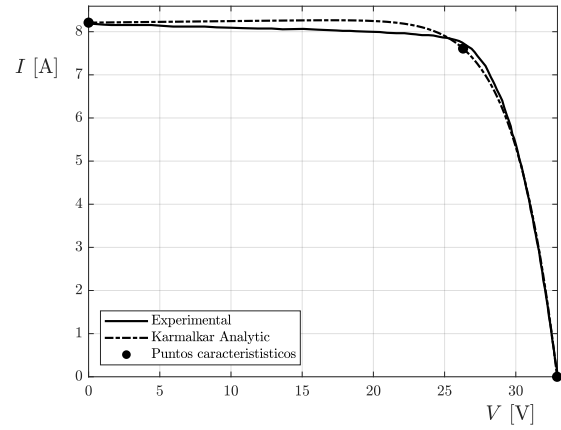


(d) 3G30C.

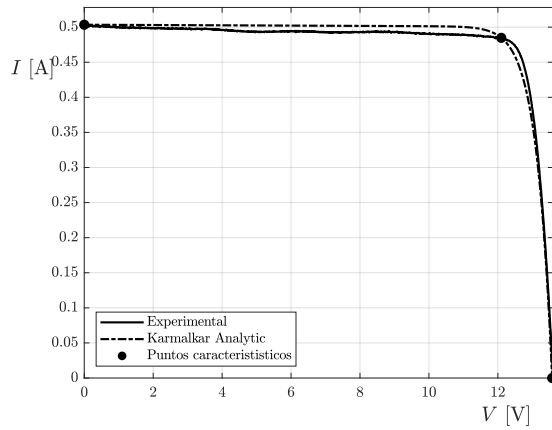
Figura 3: Ajuste analítico del modelo de Karmalkar & Haneefa para los datos disponibles en *VI_curves.xlsx*



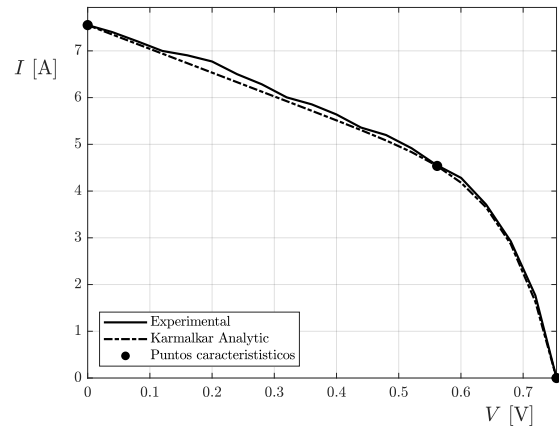
(a) PWP201.



(b) KC200GT2.



(c) SPVSX5.



(d) PSC.

Figura 4: Ajuste analítico del modelo de Karmalkar & Haneefa para los datos disponibles en *VI_curves.xlsx*

Das

A continuación se estudia el modelo de Das:

$$Das : \frac{I}{I_{sc}} = \frac{1 - \left(\frac{V}{V_{oc}}\right)^k}{1 + h \left(\frac{V}{V_{oc}}\right)} \text{ donde } h \text{ y } k \text{ son parámetros ,} \quad (11)$$

y el método empleado para ajustar este modelo es el siguiente:

$$a = \beta \ln(\alpha), \quad (12)$$

$$k = \frac{W(a)^-}{\ln(\alpha)}, \quad (13)$$

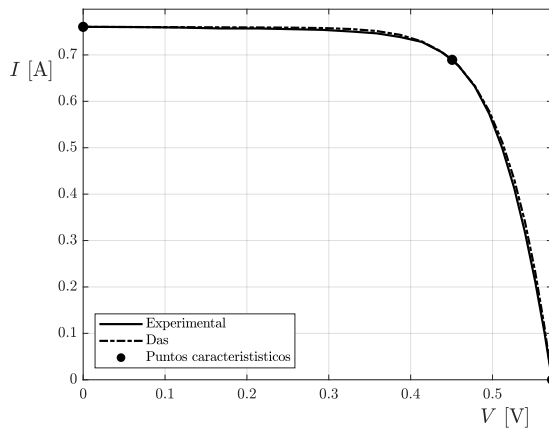
$$h = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \left(\left(\frac{1}{\beta}\right) - \left(\frac{1}{k}\right) - 1 \right), \quad (14)$$

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, $W(z)^-$ es la rama negativa de la Función W de Lambert y k y h son los parámetros que finalmente ajustan el modelo.

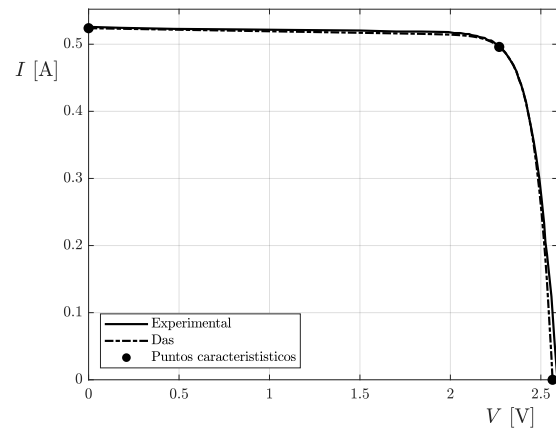
Los resultados obtenidos para el modelo de Das se plasman en la Figura 5 y 6 y los parámetros del ajuste se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros del modelo de Das ajustados para los datos experimentales de forma analítica.

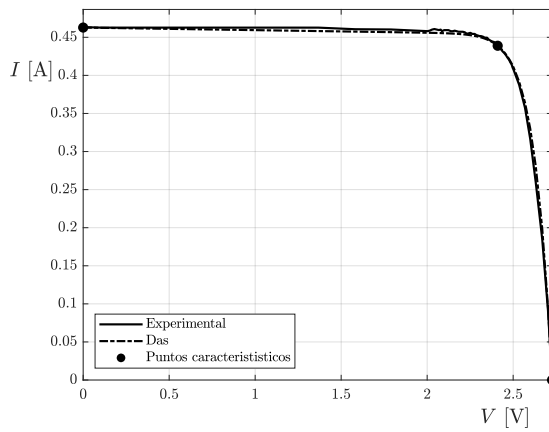
| Modelo | k | h |
|------------|------|---------|
| RTC France | 10 | 0.00445 |
| TNJ | 27.6 | 0.0226 |
| ZTJ | 27.3 | 0.0201 |
| 3G30C | 30.4 | -0.0017 |
| PWP201 | 6.94 | -0.039 |
| KC200GT2 | 11.1 | -0.0143 |
| SPVSX5 | 29.8 | 0.00562 |
| PSC | 9.33 | 0.747 |



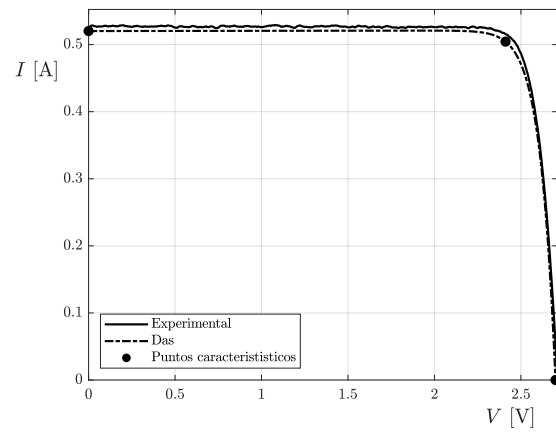
(a) RTC France.



(b) TNJ.

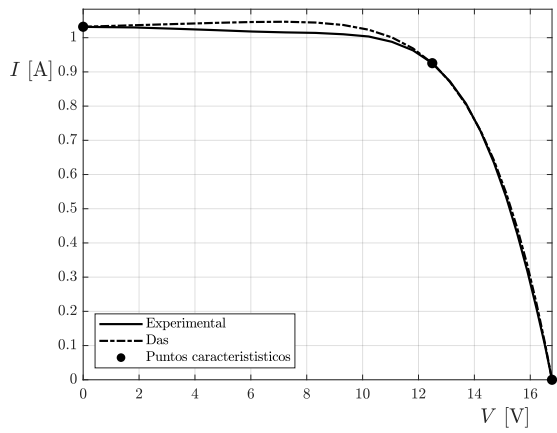


(c) ZTJ.

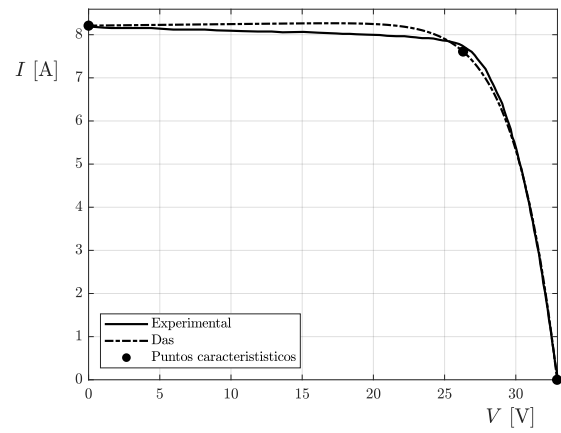


(d) 3G30C.

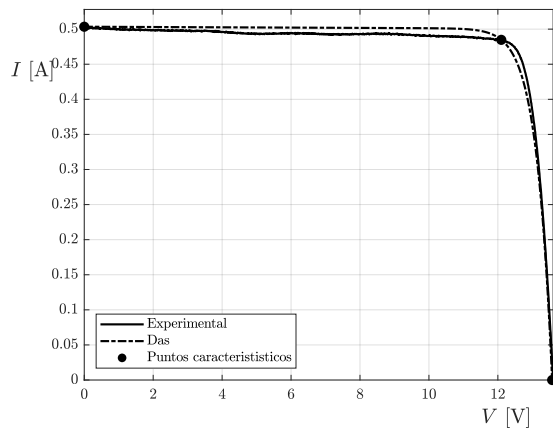
Figura 5: Ajuste analítico del modelo de Das para los datos disponibles en *VI_curves.xlsx*



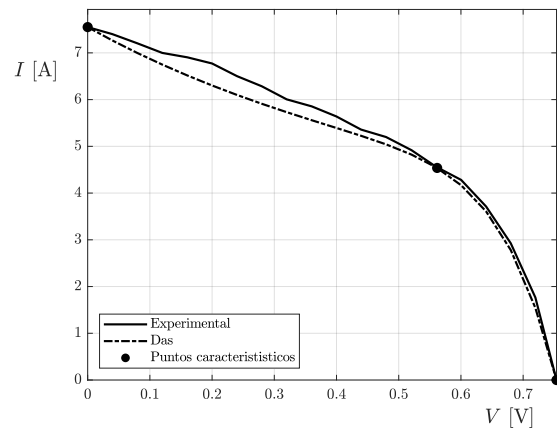
(a) PWP201.



(b) KC200GT2.



(c) SPVSX5.



(d) PSC.

Figura 6: Ajuste anlítico del modelo de Das para los datos disponibles en *VI_curves.xlsx*

De los ajustes realizados se puede observar ...

Y comparándolos con los ajustes numéricos se puede ver ...

Un apunte para que quede por escrito: - Tanto para las células RTC France, 3G30C y KC200GT2 del excel, el modelo de Karmalkar no converge. He probado a cambiar el número de iteraciones del bucle, rollo desde 2 hasta 8 pasos y nada. Imagino que justo para ese modelos pues no convergerán. de todas formas Don Ángel Luis dijo que entre 3 y 5 iteraciones estaba bien.

3.3. Ajuste numérico las curvas de los fabricantes

Karmalkar & Haneefa

Das

3.4. Ajuste analítico las curvas de los fabricantes

Karmalkar & Haneefa

Das

3.5. Comparación de resultados

Ajustes numéricos

Ajustes analíticos

4. Conclusiones

A. Matrices de Rotación

Referencias