

As



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID

---

# EFECTO DE LA TEMPERATURA Y LA IRRADIANCIA

## TRABAJO 4

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

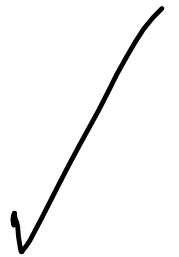
MADRID, 11 DE ABRIL, 2021

- Muy buen trabajo



## **Resumen**

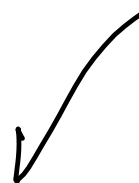
El objetivo del presente trabajo es determinar las condiciones de funcionamiento de un panel solar en función de la temperatura y la irradiancia. Estas dos últimas variables están determinadas a su vez por leyes horarias. Además, se estudiará el comportamiento del panel para distintas cargas resistivas que representan el conjunto de baterías y equipos conectados al panel.





## Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	III
1. Introducción	1
2. Metodología	1
3. Resultados	3
3.1. Análisis de datos experimentales . . . . .	3
3.2. Modelización del panel . . . . .	7
3.2.1. Influencia de la irradiancia y temperatura . . . . .	8
3.2.2. Modelos de panel utilizados . . . . .	10
3.2.3. Funcionamiento del panel con varias resistencias conectadas . . . . .	12
4. Conclusiones	15
Referencias	18



## Índice de figuras

1.	Modelo explícito de Karmalkar & Haneefa ajustado analíticamente a partir de los datos experimentales (izda.) y diferencia entre los valores de intensidad corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (dcha.). . . . .	5
2.	Modelo explícito de Karmalkar & Haneefa ajustado analíticamente a partir de los tres puntos característicos proporcionados por el fabricante (izda.) y diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (dcha.). . . . .	5
3.	Modelo de circuito equivalente 1D2R ajustado analíticamente a partir de los datos experimentales (izda.) y diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (dcha.). . . . .	6
4.	Modelo de circuito equivalente 1D2R ajustado analíticamente a partir de los tres puntos característicos proporcionados por el fabricante (izda.) y diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (dcha.). . .	6
5.	Representación geométrica del giro del panel a lo largo del tiempo para 3 instantes diferentes. $\hat{z}$ es el vector unitario del sistema de referencia fijo. $\hat{r}_{sol}$ es el vector unitario que apunta hacia el Sol y respecto del cual se mide el giro del panel a lo largo del tiempo, $\theta$ . Por otro lado, $G_{ref}$ , es la irradiancia solar de referencia y $\theta_p$ es el ángulo formado entre la la dirección del Sol, $\hat{r}_{sol}$ y la normal unitaria al panel, $\hat{n}_{panel}$ . . . . .	7
6.	Representación de las ecuaciones (7), (8) y (9) en función del ángulo girado por el panel solar. . . . .	9
7.	Evolución de la temperatura del panel durante una vuelta completa. . . . .	10
8.	Curvas de comportamiento del panel para diferentes condiciones ambientales. A la izquierda curvas de comportamiento para tres distintas irradiancias: en línea continua la correspondiente a $G_{ref}(AM0)$ , en línea discontinua la mitad de $G_{ref}$ y en línea de puntos un 10 % de $G_{ref}$ . A la derecha curvas de comportamiento para tres distintas temperaturas: en línea continua $T_{max} = 80$ °C, en línea discontinua $T_{ref} = 20$ °C y en línea de puntos $T_{min} = -20$ °C. . . . .	12
9.	Intersección entre la curva $I - V$ proporcionada por los modelos de la sección 3.2.2 para distintas condiciones de funcionamiento y la curva proporcionada por la ley de Ohm para diferentes valores de resistencia. . . . .	13

10.	Variación de la intensidad de corriente utilizando el modelo de Karmalkar & Haneefa para las distintas resistencias durante un giro completo del panel teniendo en cuenta el efecto de la variación temperatura multiplicando los coeficientes recogidos en la Tabla 1 por un factor de 10 (izda.) y por un factor de 1 (dcha.). . . . .	13
11.	Variación de la intensidad de corriente utilizando el modelo de 1D2R para las distintas resistencias durante un giro completo del panel teniendo en cuenta el efecto de la variación temperatura multiplicando los coeficientes recogidos en la Tabla 1 por un factor de 10 (izda.) y por un factor de 1 (dcha.). . . . .	14
12.	Variación de la intensidad de corriente utilizando los modelos de Karmalkar & Haneefa y 1D2R para una carga de $37,5 \Omega$ durante un giro completo del panel teniendo en cuenta el efecto de la variación temperatura y multiplicando los coeficientes recogidos en la Tabla 1 por un factor de 10 (izda.) y por un factor de 1 (dcha.). . . . .	14
13.	Modelo explícito analítico de Karmalkar & Haneefa (izda.) y modelo de circuito equivalente 1D2R analítico (dcha.) calculado a partir de los datos experimentales y a partir de los tres puntos característicos proporcionados por el fabricante. . . . .	15
14.	Evolución de la potencia a lo largo de un giro completo para las distintas resistencias estudiadas. Estimación según el modelo de Karmalkar & Haneefa (dcha.) y según el modelo 1D2R (izda.). . . . .	17

## Índice de tablas

1.	Gradientes de temperatura de la célula solar AzurSpace 3G28C [1]. Las siglas BOL (Begining of Life) hacen referencia a los valores al inicio de la vida útil. . . . .	3
2.	Puntos característicos de la célula solar AzurSpace 3G28C proporcionados por el fabricante y puntos característicos escalados [1]. El valor BOL (Begining of Life) hace referencia a los valores al inicio de la vida útil. . . . .	4
3.	Número de células en paralelo y en serie y parámetro de idealidad del diodo. . . . .	4
4.	Puntos característicos extraídos de los datos experimentales y puntos característicos escalados de la célula solar AzurSpace 3G28C [1] a temperatura $T_{ref} = 293,15$ K. El valor BOL (Begining of Life) hace referencia a los valores al inicio de la vida útil. . . .	5
5.	Puntos característicos extraídos de los datos experimentales y puntos característicos escalados de la célula solar AzurSpace 3G28C [1] a temperatura $T_{ref} = 293,15$ K. El valor BOL (Begining of Life) hace referencia a los valores al inicio de la vida útil. . . .	15
6.	Número de células en paralelo y en serie y parámetro de idealidad del diodo. . . . .	16
7.	Potencia media generada para una vuelta completa. . . . .	17



## 1. Introducción

A la hora de estudiar el desarrollo de una misión es necesario determinar la potencia disponible de la misma ya que es un factor limitante a la hora de diseñar las operaciones llevadas a cabo en órbita. Sin embargo, en el transcurso de la órbita, las condiciones ambientales a las que se ve sometido el panel solar fluctúan enormemente ya que las temperaturas en el espacio son extremas y la irradiancia sobre el panel es muy dependiente de la naturaleza de la órbita.

En este trabajo se distinguen dos partes en las que se propone lo siguiente:

- A partir de los datos experimentales de las células solares, caracterizar el comportamiento de los paneles mediante los modelos analíticos de Karmalkar & Haneefa y de circuito equivalente de un diodo y dos resistencias (1D2R).
- Determinar la evolución de la intensidad de corriente que entrega el panel respecto del tiempo para distintos valores de carga resistiva y para ambos modelos.

## 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 métodos para el ajuste de ambos modelos se han obtenido de la documentación proporcionada por el profesor D. Santiago Pindado a través de la plataforma Moodle de la asignatura.

Se dispone de datos experimentales que contienen los valores de intensidad de corriente y voltaje por lo que, para realizar el ajuste, se han de obtener los valores de tensión para circuito abierto,  $V_{oc}$ , intensidad de corriente para cortocircuito,  $I_{sc}$  y el punto de máxima potencia,  $[V_{mp}, I_{mp}]$ .

En primer lugar, se han tratado de ajustar ambos modelos de forma analítica y para ello se han seguido los procedimientos recogidos en siguiendo los pasos marcados por Pindado *et al.* en [2] y [3] para el modelo Karmalkar & Haneefa y 1D2R respectivamente.

Para estudiar el efecto de los parámetros ambientales primero se han incluido las leyes horarias y las funciones necesarias. Luego se ha obtenido el valor del voltaje haciendo coincidir la intensidad de corriente proporcionada por el panel con la intensidad de corriente correspondiente a la resistencia sometida al voltaje seleccionado. A la hora de determinar la intensidad de corriente que suministra el panel se recurren a los modelos anteriormente mencionados donde se ha de tener en cuenta el efecto de la temperatura y la irradiancia quedando así reflejado su efecto sobre el sistema. Además, se ensayarán distintos valores de resistencia para simular la variación de la carga conectada al panel puesto que los equipos y baterías no siempre demandan la misma potencia a lo largo de la misión.

Para enfocar el desarrollo se ha adoptado una estructura de programación orientada a objetos con el fin de, en futuros trabajos, construir el problema de gestión de potencia total a partir de los elementos particulares. En este caso se han definido las clases de panel solar (que determina el comportamiento), condiciones ambientales (que determina la temperatura y la irradiancia) y el propio satélite (que tiene una resistencia asociada).

### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis de datos experimentales

Para caracterizar el comportamiento del panel solar a partir de datos experimentales primero se ha de comprobar que son acordes con la información suministrada por el fabricante. Así se puede determinar también el número de celdas en serie y en paralelo de las que se dispone si no se conocen estos datos a priori. Los puntos característicos más comúnmente empleados son el voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$ , la intensidad de corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  y el voltaje e intensidad de corriente en el punto de máxima potencia  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$ .

Los puntos característicos suministrados por el fabricante se representan en la Tabla 2, los cuales han sido extraídos del *datasheet* correspondiente a la célula AzurSpace 3G28C [1]. Además, estos puntos han sido escalados mediante las expresiones (1) a (4) y con los valores de la Tabla 1 que contiene los coeficientes necesarios para determinar los puntos según la temperatura. Esto ha sido necesario ya que los datos experimentales se han medido a  $T_{ref} = 293,15$  K y los puntos característicos que proporciona el *datasheet* a  $T_0 = 301,15$  K.

$$V_{oc} = V_{oc0} + \alpha_{V_{oc}} (T - T_0), \quad (1)$$

$$I_{sc} = I_{sc0} + \alpha_{I_{sc}} (T - T_0), \quad (2)$$

$$V_{mp} = V_{mp0} + \alpha_{V_{mp}} (T - T_0), \quad (3)$$

$$I_{mp} = I_{mp0} + \alpha_{I_{mp}} (T - T_0). \quad (4)$$

Tabla 1: Gradientes de temperatura de la célula solar AzurSpace 3G28C [1]. Las siglas BOL (Beginning of Life) hacen referencia a los valores al inicio de la vida útil.

Gradientes de temperatura	BOL	Unidades
$\alpha_{V_{oc}} = \Delta V_{oc} / \Delta T$	-6,00	mV/°C
$\alpha_{I_{sc}} = \Delta I_{sc} / \Delta T$	0,32	mA/°C
$\alpha_{V_{mp}} = \Delta V_{mp} / \Delta T$	-6,10	mV/°C
$\alpha_{I_{mp}} = \Delta I_{mp} / \Delta T$	0,28	mA/°C



Tabla 2: Puntos característicos de la célula solar AzurSpace 3G28C proporcionados por el fabricante y puntos característicos escalados [1]. El valor BOL (Beginning of Life) hace referencia a los valores al inicio de la vida útil.

Puntos característicos célula a $T_0 = 301,15$ K			Puntos característicos célula escalados a $T_{ref} = 293,15$ K		
Parámetro	Valor BOL	Unidades	Parámetro	Valor	Unidades
$V_{oc0}$	2,667	V	$V_{oc}$	2,715	V
$I_{sc0}$	0,506	A	$I_{sc}$	0,503	A
$V_{mp0}$	2,371	V	$V_{mp}$	2,420	V
$I_{mp0}$	0,487	A	$I_{mp}$	0,485	A

Los puntos característicos obtenidos a partir de los datos experimentales se muestran en la Tabla 4 y el ajuste de ambos modelos se plasma en las Figuras 1 a 4, donde se recoge el ajuste a partir de los datos experimentales y el ajuste a partir de los tres puntos característicos suministrados por el fabricante. Los valores que aparecen en estos ajustes y también contenidos en la Tabla 4, han sido escalados según el número de células en paralelo y en serie de las que se disponen. Estos dos últimos valores se han estimado a partir de los voltajes e intensidades de corriente características según las expresiones (5) y (6) y se recogen en la Tabla 3. Además, se ha determinado en función del error cometido (pues es necesario para el ajuste del modelo 1D2R y para determinar el voltaje según la irradiancia) el parámetro de idealidad de diodo  $a = 1,54$ .

$$\text{Número de células en serie} \equiv \frac{V_{oc}}{V_{oc\text{escalado}}} = 7,0148 \simeq 7. \quad (5)$$

$$\text{Número de células en paralelo} \equiv \frac{I_{sc}}{I_{sc\text{escalado}}} = 0,9968 \simeq 1. \quad (6)$$

Tabla 3: Número de células en paralelo y en serie y parámetro de idealidad del diodo.

Parámetro	Valor
Número de células en paralelo	1
Número de células en serie	7
$a$	1,54

Tabla 4: Puntos característicos extraídos de los datos experimentales y puntos característicos escalados de la célula solar AzurSpace 3G28C [1] a temperatura  $T_{ref} = 293,15$  K. El valor BOL (Beginning of Life) hace referencia a los valores al inicio de la vida útil.

Puntos característicos del panel obtenidos de los datos experimentales			Puntos característicos del panel obtenidos escalando datos del fabricante		
Parámetro	Valor	Unidades	Parámetro	Valor BOL	Unidades
$V_{oc}$	19,045	V	$V_{oc}$	19,005	V
$I_{sc}$	0,502	A	$I_{sc}$	0,503	A
$V_{mp}$	17,354	V	$V_{mp}$	16,939	V
$I_{mp}$	0,479	A	$I_{mp}$	0,485	A

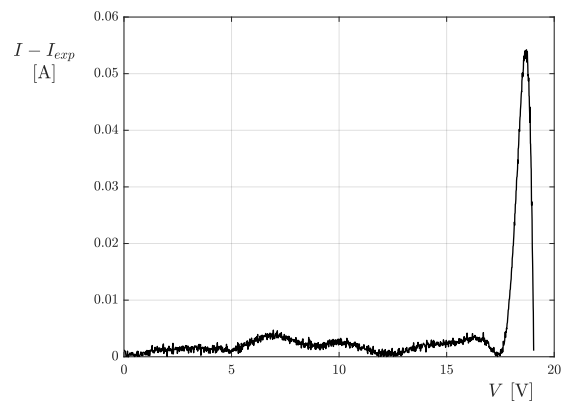
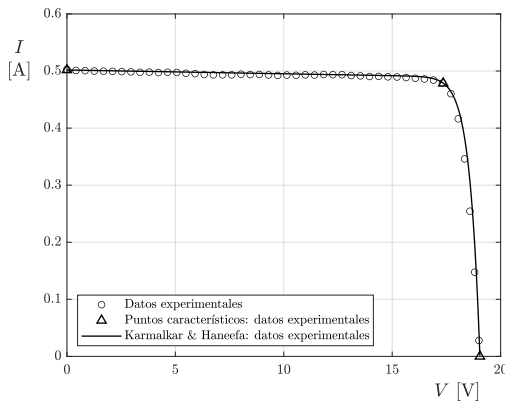


Figura 1: Modelo explícito de Karmalkar & Haneefa ajustado analíticamente a partir de los datos experimentales (izda.) y diferencia entre los valores de intensidad corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (dcha.).

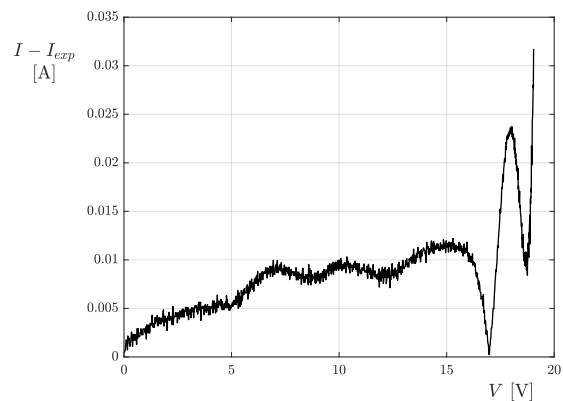
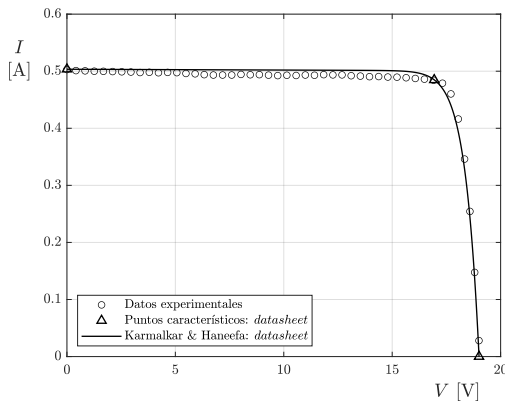


Figura 2: Modelo explícito de Karmalkar & Haneefa ajustado analíticamente a partir de los tres puntos característicos proporcionados por el fabricante (izda.) y diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (dcha.).

Como se puede observar, el modelo de Karmalkar & Haneefa proporciona un mejor ajuste utilizando los puntos característicos extraídos de los datos experimentales para los valores de corriente previos a la zona de máxima potencia, en cambio después de esta zona el modelo proporciona un mejor ajuste con los puntos característicos del datasheet.

*de la hoja de características (\*)*

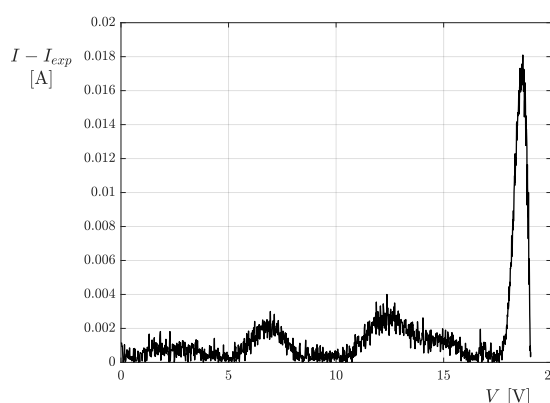
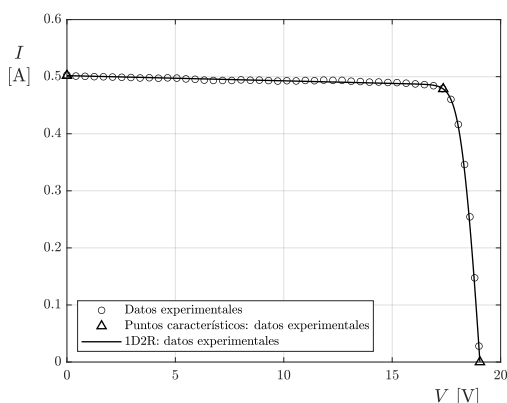


Figura 3: Modelo de circuito equivalente 1D2R ajustado analíticamente a partir de los datos experimentales (izda.) y diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (dcha.).

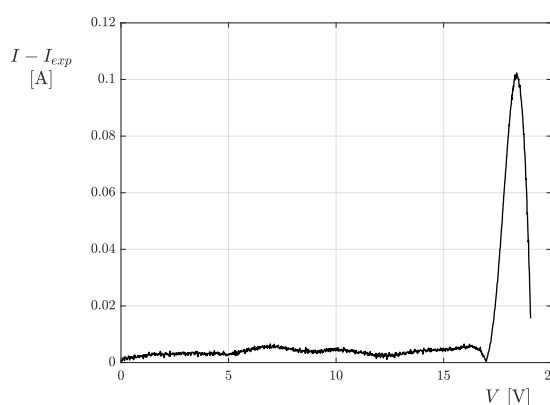
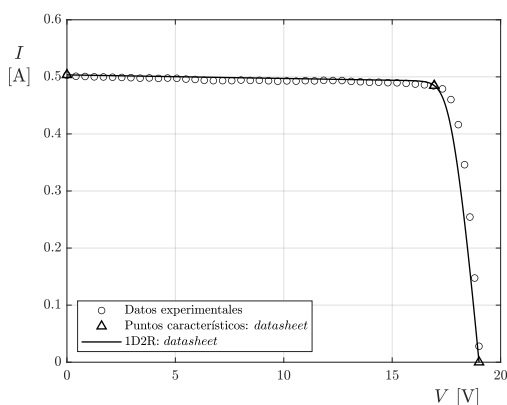


Figura 4: Modelo de circuito equivalente 1D2R ajustado analíticamente a partir de los tres puntos característicos proporcionados por el fabricante (izda.) y diferencia entre los valores de intensidad de corriente ajustados y la intensidad de corriente experimental (dcha.).

Como se puede observar, el modelo 1D2R proporciona un mejor ajuste utilizando los puntos característicos extraídos de los datos experimentales. En las siguientes secciones se emplearán estos puntos para determinar el comportamiento del panel.

*(\*) Puedeis encontrarlos con algun generador del uso del castellano.*

### 3.2. Modelización del panel

En este trabajo se ha considerado que el panel estudiado rota sobre sí mismo con una velocidad angular de  $\omega = 0,052$  rad/s. Centrando el intervalo de estudio en un ángulo,  $\theta = \omega t$ , comprendido entre 0 y  $2\pi$  radianes. Por otro lado, el ángulo  $\theta_p$ , es el ángulo medido respecto a la dirección de la radiación incidente con la normal del panel,  $\hat{n}_{panel}$ , tal y como se representa en la Figura 5, obteniendo de esta manera su comportamiento durante un giro completo.

En primer lugar, se modelizará la influencia de la irradiancia y la temperatura para posteriormente introducir dicho efecto en el panel empleando los modelos de Karmalkar & Haneefa y 1D2R. Finalmente, se obtendrá la variación con el tiempo de la corriente que suministra el panel, el cual se supondrá conectado a una resistencia que simula el comportamiento de los diferentes elementos unidos al mismo.

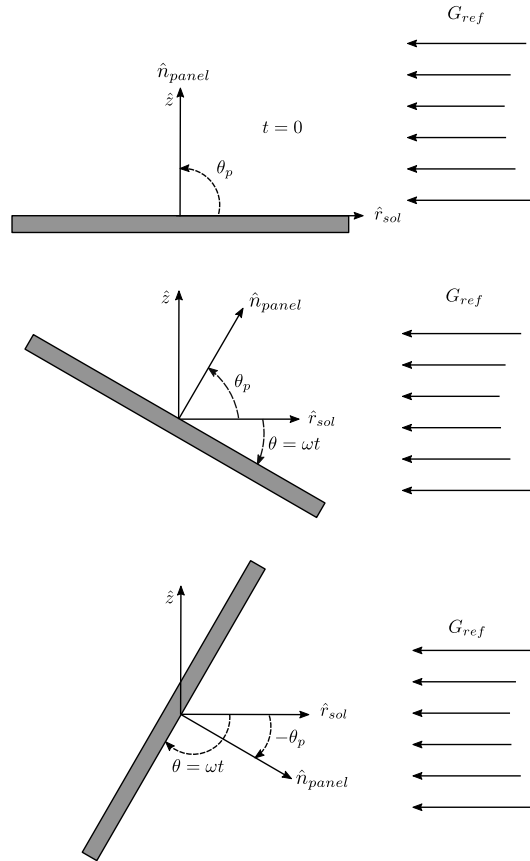


Figura 5: Representación geométrica del giro del panel a lo largo del tiempo para 3 instantes diferentes.  $\hat{z}$  es el vector unitario del sistema de referencia fijo.  $\hat{r}_{sol}$  es el vector unitario que apunta hacia el Sol y respecto del cual se mide el giro del panel a lo largo del tiempo,  $\theta$ . Por otro lado,  $G_{ref}$ , es la irradiancia solar de referencia y  $\theta_p$  es el ángulo formado entre la la dirección del Sol,  $\hat{r}_{sol}$  y la normal unitaria al panel,  $\hat{n}_{panel}$ .

### 3.2.1. Influencia de la irradiancia y temperatura

A continuación, se van a desarrollar las modelizaciones de la irradiancia y temperatura y su integración con los modelos de Karmalkar & Haneefa y 1D2R. Cabe mencionar que se ha tomado como referencia para  $G_{ref} = 1367 \text{ W/m}^2$  el valor especificado en el *datasheet* [1].

#### Irradiancia:

Para modelar la irradiancia se ha utilizado el ángulo formado por la dirección de la radiación incidente respecto a la normal del panel,  $\theta_p$ , mediante la siguiente expresión en función del ángulo girado por el panel,  $\theta$ ,

$$\theta_p = \arcsin \left( \left| \sin \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right| \right), \quad (7)$$

además, el panel estudiado no genera potencia cuando este ángulo supera los  $75^\circ$ .

Para conseguir este efecto se ha utilizado el coseno de Kelly,  $\cos K(\alpha)$ , que reescala los valores del coseno para que estén comprendidos entre  $0^\circ$  y  $75^\circ$  de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \cos K(\alpha) = \cos\left(\frac{90}{75}\alpha\right) & \text{para } \alpha \in [0, 75^\circ] \\ \cos K(\alpha) = 0 & \text{para } \alpha \in (75^\circ, 90^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

También es necesario tener en cuenta que el panel solo recibe radiación en  $\theta \in [0, \pi]$  estando el resto del del intervalo en sombra y, por lo tanto, el valor de irradiancia será nulo. Finalmente, la irradiancia adimensionalizada con el valor de referencia,  $G_{ref}$ , queda definida como la siguiente función a trozos:

$$\begin{cases} \frac{G}{G_{ref}}(\theta) = \cos K(\theta_p(\theta)) & \text{para } \theta \in [0, \pi] \\ \frac{G}{G_{ref}}(\theta) = 0 & \text{para } \theta \in (\pi, 2\pi) \end{cases} \quad (9)$$

Se han representado los valores adimensionales de las anteriores funciones para una vuelta completa del panel en la Figura 6.



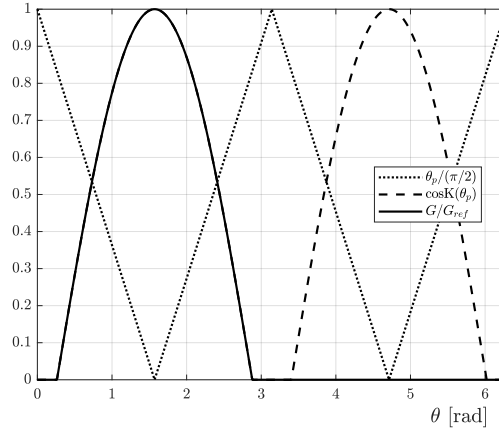


Figura 6: Representación de las ecuaciones (7), (8) y (9) en función del ángulo girado por el panel solar.

## Temperatura

La temperatura del panel varía entre  $T_{\max} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $T_{\min} = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , estando su máximo retrasado 15 segundos respecto al ángulo de máxima irradiancia. Por lo tanto, la temperatura se va a dividir en dos fases:

1. Fase de calentamiento comenzando en  $\theta = 0 \text{ rad}$ , donde  $T(0) = T_{\min} = 253 \text{ K}$  y terminando en  $\theta = \pi/2 + 15\omega$ , siendo  $T(\pi/2 + 15\omega) = T_{\max} = 353 \text{ K}$ .
2. Fase de enfriamiento comenzando en  $\theta = \pi/2 + 15\omega$ , siendo  $T(\pi/2 + 15\omega) = T_{\max} \text{ K}$  y terminando en  $\theta = 2\pi \text{ rad}$ , donde  $T(2\pi) = T_{\min} \text{ K}$ .

Para modelar la temperatura del panel se ha elegido una ley exponencial, ecuación (10), en función del ángulo girado por el panel y de dos constantes fijadas por las condiciones de contorno.

$$T(\theta) = C_1 \exp(C_2\theta) . \quad (10)$$

Aplicando en (10) las condiciones de contorno mencionadas anteriormente para cada fase se da la siguiente expresión para la ley de temperaturas en función del ángulo girado por el panel.

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{\pi}{2} + 15\omega \\ \theta_2 = 2\pi \\ T(\theta) = T_{\min} \exp\left(\ln\left(\frac{T_{\max}}{T_{\min}}\right) \frac{\theta}{\theta_1}\right) & \text{para } \theta \in [0, \theta_1] \\ T(\theta) = T_{\max} \exp\left(\ln\left(\frac{T_{\min}}{T_{\max}}\right) \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1}\right) & \text{para } \theta \in (\theta_1, 2\pi) \end{cases} . \quad (11)$$

En la Figura 7 se representa cómo varía la temperatura durante un giro completo.

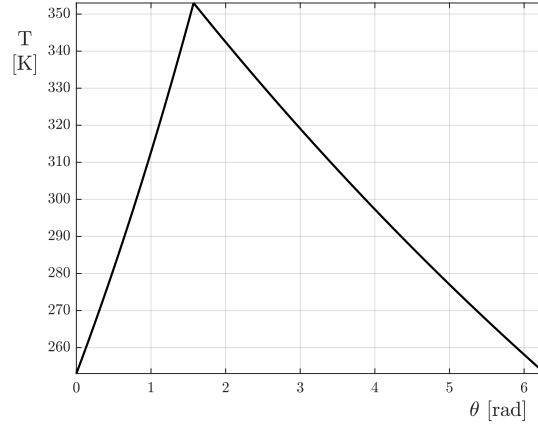


Figura 7: Evolución de la temperatura del panel durante una vuelta completa.

### 3.2.2. Modelos de panel utilizados

La simulación se realizará empleando los dos modelos analizados en la sección 3.1 donde la intensidad de corriente tiene las siguientes expresiones:

#### Karmalkar & Haneefa

$$\frac{I}{I_{sc}} = 1 - (1 - \gamma) \left( \frac{V}{V_{oc}} \right) - \gamma \left( \frac{V}{V_{oc}} \right)^m, \quad (12)$$

donde  $\gamma$  y  $m$  son parámetros y  $V$  e  $I$  son el voltaje y la intensidad de corriente a las que está sometida la carga. Una explicación más concisa sobre este modelo se encuentra recogida en los trabajos anteriores (véase [4]).

#### 1D2R

$$I = I_{pv} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{anV_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (13)$$

donde  $I_{pv}$  es la intensidad de corriente que proporciona el generador de corriente,  $I_0$  es la intensidad de corriente que circula por el diodo,  $V$  e  $I$  hacen referencia al voltaje y la intensidad de corriente a las que está sometida la carga,  $a$  es la variable que modela la idealidad del diodo (típicamente entre 1 y 2),  $n$  es el número de células en serie y  $V_T = k_B T / q_e$  es el voltaje térmico (donde  $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23}$  J/K

es la constante de Boltzman,  $T$  es la temperatura y  $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C es la carga del electrón). El número de células  $n$  se agrupará con el voltaje térmico en los siguientes desarrollos. Una explicación más concisa sobre este modelo se encuentra recogida en trabajos anteriores (véase [5]).

La influencia de la irradiancia y temperatura en el comportamiento del panel se ve representada por un desplazamiento de los puntos característicos del panel [6] que siguen las siguientes expresiones matemáticas,

$$I_{sc}(\theta) = \frac{G(\theta)}{G_{ref}} (I_{sc,ref} + \alpha_{I_{sc}}(T(\theta) - T_{ref})) , \quad (14)$$

$$I_{mp}(\theta) = \frac{G(\theta)}{G_{ref}} (I_{mp,ref} + \alpha_{I_{mp}}(T(\theta) - T_{ref})) , \quad (15)$$

$$V_{mp}(\theta) = V_{mp,ref} + \alpha_{V_{mp}}(T(\theta) - T_{ref}) + aV_T \ln \left( \frac{G(\theta)}{G_{ref}} \right) , \quad (16)$$

$$V_{oc}(\theta) = V_{oc,ref} + \alpha_{V_{oc}}(T(\theta) - T_{ref}) + aV_T \ln \left( \frac{G(\theta)}{G_{ref}} \right) . \quad (17)$$

En estas expresiones se puede observar cómo los puntos característicos dependen de las condiciones de irradiancia y temperatura a las que se encuentra el panel. Esto quiere decir que los puntos característicos dependen del ángulo girado y que, por lo tanto, para cada ángulo el panel tendrá una curva de comportamiento diferente.

En la Figura 8 se ha representado cómo varía la curva de funcionamiento del panel para tres temperaturas con irradiancia máxima y tres irradiancias diferentes para la temperatura de referencia.

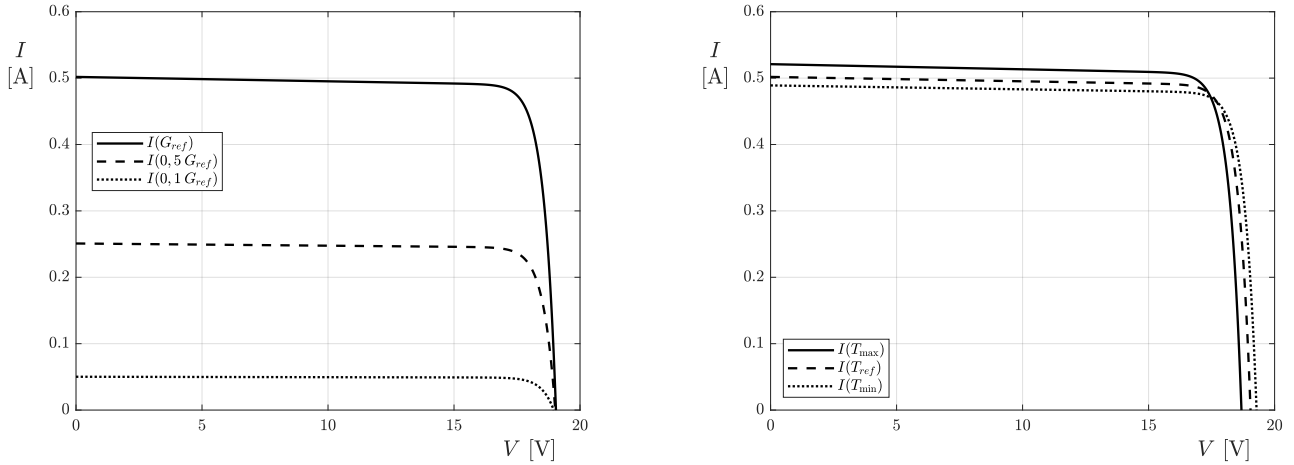


Figura 8: Curvas de comportamiento del panel para diferentes condiciones ambientales. A la izquierda curvas de comportamiento para tres distintas irradiancias: en línea continua la correspondiente a  $G_{ref}$  (AM0), en línea discontinua la mitad de  $G_{ref}$  y en línea de puntos un 10 % de  $G_{ref}$ . A la derecha curvas de comportamiento para tres distintas temperaturas: en línea continua  $T_{max} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en línea discontinua  $T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y en línea de puntos  $T_{min} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.3. Funcionamiento del panel con varias resistencias conectadas

En esta sección se calcula la variación con el tiempo de la intensidad de corriente que suministra el panel cuando se encuentra conectado a una resistencia de tres posibles valores  $35\text{ }\Omega$ ,  $37,5\text{ }\Omega$  y  $42\text{ }\Omega$ .

El punto de funcionamiento del panel para diferentes condiciones de temperatura e irradiancia, se determina como la intersección entre la curva  $I - V$  proporcionada por los modelos de la sección 3.2.2 y la curva proporcionada por la ley de Ohm, ecuación (18), tal y como se observa en la Figura 9.

$$V = IR, \quad (18)$$

donde  $R$  es la resistencia conectada al panel.

En la Figura 9 se ve representado gráficamente como el punto de funcionamiento del panel, siendo este la intersección de las curvas obtenidas con la ecuación (18) con la curva del panel, va a ir variando en función de la irradiancia y la temperatura, además de que son distintos para cada una de las resistencias.

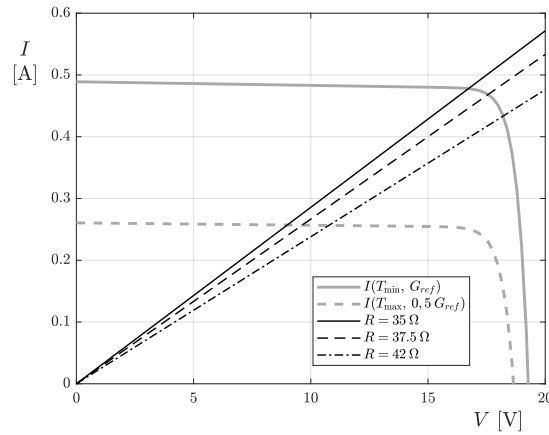


Figura 9: Intersección entre la curva  $I - V$  proporcionada por los modelos de la sección 3.2.2 para distintas condiciones de funcionamiento y la curva proporcionada por la ley de Ohm para diferentes valores de resistencia.

Finalmente, en las Figuras 10 y 11 se observa la evolución de la intensidad de corriente en un periodo para los tres posibles valores de la resistencia, utilizando el modelo de Karmalkar & Haneefa y 1D2R respectivamente.

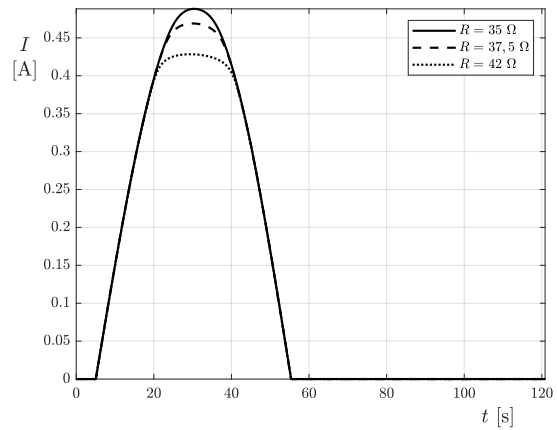
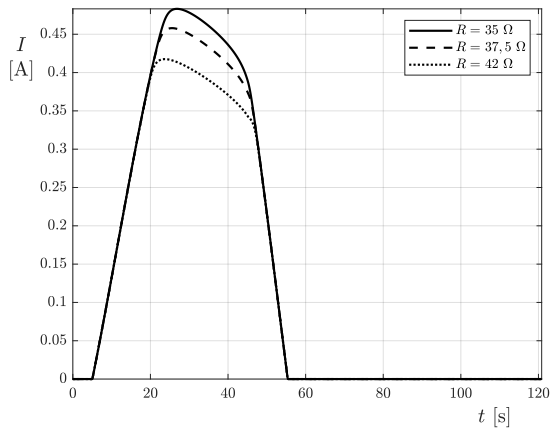


Figura 10: Variación de la intensidad de corriente utilizando el modelo de Karmalkar & Haneefa para las distintas resistencias durante un giro completo del panel teniendo en cuenta el efecto de la variación temperatura multiplicando los coeficientes recogidos en la Tabla 1 por un factor de 10 (izda.) y por un factor de 1 (dcha.).



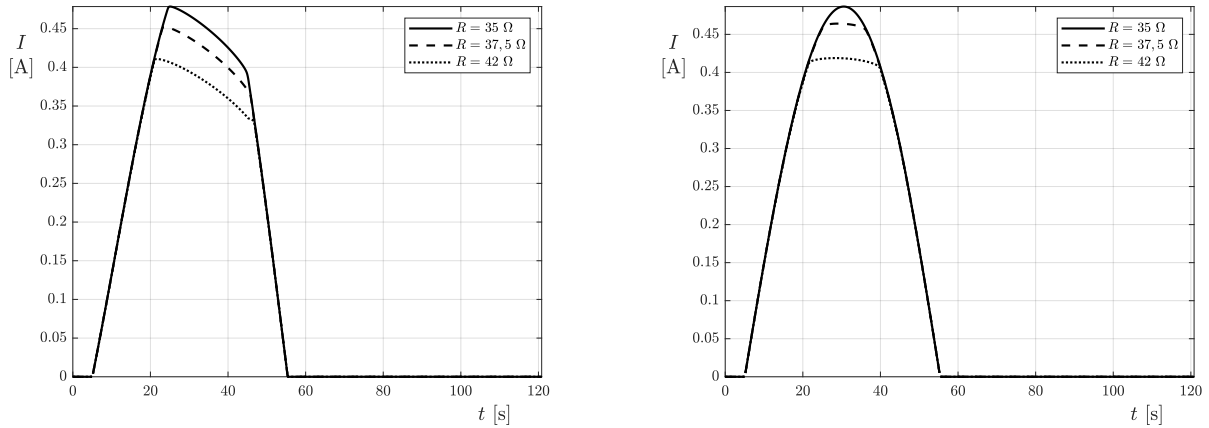


Figura 11: Variación de la intensidad de corriente utilizando el modelo de 1D2R para las distintas resistencias durante un giro completo del panel teniendo en cuenta el efecto de la variación temperatura multiplicando los coeficientes recogidos en la Tabla 1 por un factor de 10 (izda.) y por un factor de 1 (dcha.).

En la Figura 12 se observa cómo, al modelizar el panel con Karmalkar & Haneefa, se estiman valores de intensidad de corriente superiores que al utilizar el modelo de 1D2R. En este caso se ha seleccionado el valor de resistencia de  $37,5 \Omega$ .

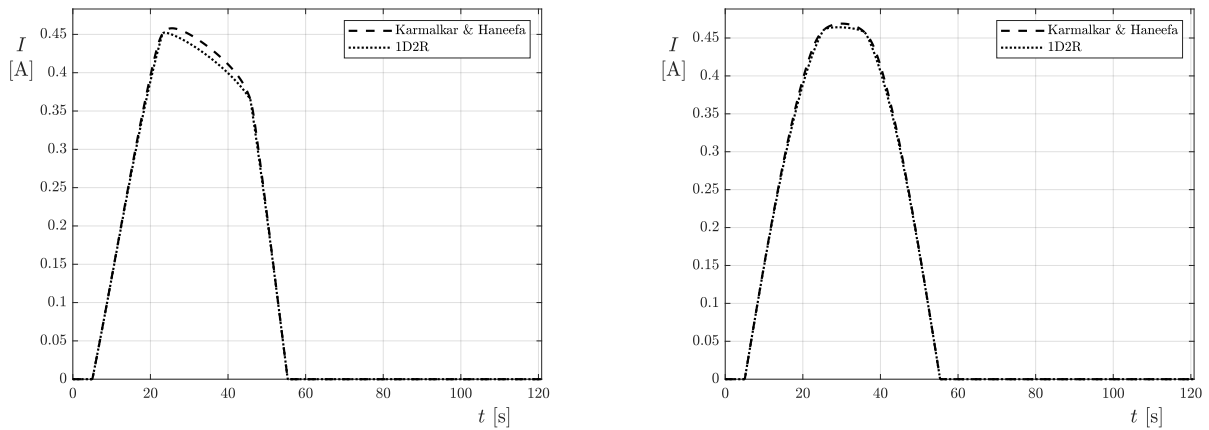


Figura 12: Variación de la intensidad de corriente utilizando los modelos de Karmalkar & Haneefa y 1D2R para una carga de  $37,5 \Omega$  durante un giro completo del panel teniendo en cuenta el efecto de la variación temperatura y multiplicando los coeficientes recogidos en la Tabla 1 por un factor de 10 (izda.) y por un factor de 1 (dcha.).

## 4. Conclusiones

Del trabajo realizado se extraen las siguientes conclusiones:

- El ajuste realizado a partir de datos experimentales y de datos suministrados por el fabricante es bastante similar aunque el ajuste según los datos experimentales se ajusta más en la zona previa al punto de máxima potencia mientras que el ajuste con los puntos característicos proporcionados por el fabricante se ajusta mejor en la zona posterior a dicho punto. La comparativa entre puntos característicos calculados a partir de los datos experimentales y los suministrados por el fabricante (escalados) es patente en la Tabla 5. En la Figura 13 se muestra gráficamente el ajuste del modelo de Karmalkar & Haneefa y el ajuste del modelo 1D2R.

Tabla 5: Puntos característicos extraídos de los datos experimentales y puntos característicos escalados de la célula solar AzurSpace 3G28C [1] a temperatura  $T_{ref} = 293,15$  K. El valor BOL (Beginning of Life) hace referencia a los valores al inicio de la vida útil.

Puntos característicos del panel obtenidos de los datos experimentales			Puntos característicos del panel obtenidos escalando datos del fabricante		
Parámetro	Valor	Unidades	Parámetro	Valor BOL	Unidades
$V_{oc}$	19,045	V	$V_{oc}$	19,005	V
$I_{sc}$	0,502	A	$I_{sc}$	0,503	A
$V_{mp}$	17,354	V	$V_{mp}$	16,939	V
$I_{mp}$	0,479	A	$I_{mp}$	0,485	A

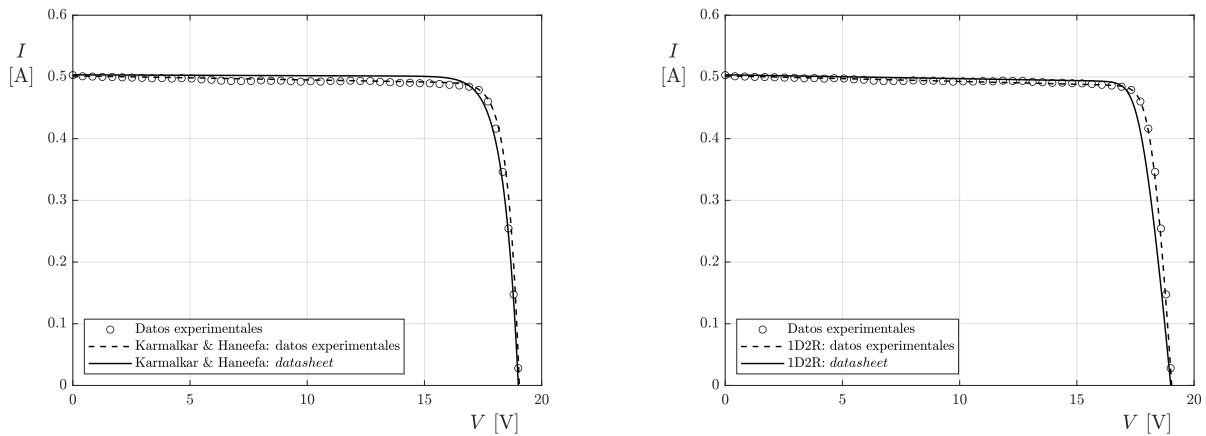


Figura 13: Modelo explícito analítico de Karmalkar & Haneefa (izda.) y modelo de circuito equivalente 1D2R analítico (dcha.) calculado a partir de los datos experimentales y a partir de los tres puntos característicos proporcionados por el fabricante.

- De los valores de voltaje e intensidad de corriente procedentes de los datos experimentales se puede deducir el número de células en serie y en paralelo pues el voltaje total es la suma de la de las células en serie y la intensidad de corriente total es la suma de la intensidad de cada línea en paralelo. Además, se determina el parámetro de idealidad del modelo del error cometido en el ajuste para el modelo 1D2R. Esta serie de valores se recogen en la Tabla 6.

Tabla 6: Número de células en paralelo y en serie y parámetro de idealidad del diodo.

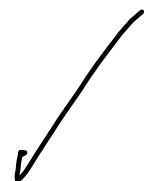
Parámetro	Valor
Número de células en paralelo	1
Número de células en serie	7
$a$	1,54

- Una vez obtenidas las curvas de intensidad de corriente en el periodo correspondiente a un giro (Figuras 11 y 12) se puede observar que la corriente tiene una gran dependencia de los coeficientes de la Tabla 1, haciendo que cuando aumentan la curva deje de tener un comportamiento tan simétrico. Además, el panel responde de forma más suave a los cambios ambientales cuando es modelado con Karmalkar & Haneefa comparado con el modelo 1D2R.
- Una vez determinadas las leyes de irradiancia y temperatura se puede determinar la intensidad de corriente a la que trabaja el panel a lo largo de un giro completo. En las Figuras 11 y 10 se muestra la intensidad de corriente respecto del tiempo para las tres cargas ( $R = 35 \Omega$ ,  $R = 37,2 \Omega$  y  $R = 42 \Omega$ ) para el ajuste con el modelo de Karmalkar & Haneefa y para el ajuste con el modelo 1D2R respectivamente. Además, en la Figura 12 se representa conjuntamente el ajuste por ambos modelos para el caso de resistencia intermedia  $R = 37,2 \Omega$ .

En la Figura 9 es importante destacar que para resistencias bajas, el punto de funcionamiento se encuentra cercano al punto de máxima potencia, pero dentro de la zona lineal. Sin embargo, para el valor medio de resistencia estudiada ya se pasa a trabajar muy cerca del punto de potencia máxima y con la resistencia más alta pasa a funcionar en la zona de la curva  $I - V$  en la que las variaciones de temperatura pueden hacer que la potencia generada caiga bruscamente.

También merece la pena destacar que el panel no va a generar prácticamente potencia si está conectado a una resistencia de valor superior a  $42 \Omega$ .

- No ha de olvidarse que a la hora de estudiar el funcionamiento de un panel solar lo más relevante es la potencia que éste entrega  $P = I^2 R$ . En la Figura 14 se representa la evolución de esta variable a lo largo del tiempo para las distintas resistencias estudiadas. La estimación se ha realizado con el modelo de Karmalkar & Haneefa a la derecha y con el modelo 1D2R a la izquierda.





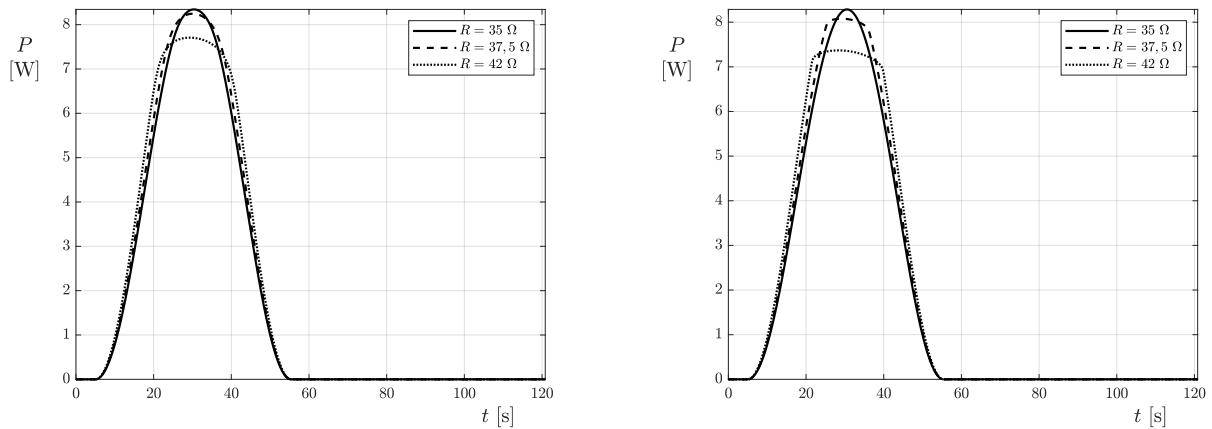


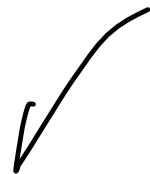
Figura 14: Evolución de la potencia a lo largo de un giro completo para las distintas resistencias estudiadas. Estimación según el modelo de Karmalkar & Haneefa (dcha.) y según el modelo 1D2R (izda.).

Para poder tener una referencia más clara, se presenta la potencia media generada por cada modelo de panel y cada resistencia en la Tabla 7.

Tabla 7: Potencia media generada para una vuelta completa.

Modelo	$R$ [ $\Omega$ ]	Potencia media [W]
K&H	35	1,748
K&H	37,5	1,819
K&H	42	1,833
1D2R	35	1,794
1D2R	37,5	1,860
1D2R	42	1,892

En posteriores trabajos habrá de incluirse también las actuaciones de la batería y del resto de componentes eléctricos y electrónicos que en este caso se ha representado como una resistencia fija. Además, las variaciones ambientales a las que se ve sometido el panel habrán de determinarse a partir de las actuaciones orbitales del satélite en conjunto.



## Referencias

- [1] AzurSpace, 28 % Triple Junction GaAs Solar Cell.
- [2] S. Pindado, E. Roibás-Millán, J. Cubas, J. M. Álvarez, D. Alfonso-Corcuera, J. L. Cubero-Estalrrich, A. González-Estrada, M. Sanabria-Pinzón, R. Jado-Puente, Simplified Lambert W-function math equations when applied to photovoltaic systems modeling, IEEE Transactions on Industry Applications 9994 (c).
- [3] S. Pindado, J. Cubas, F. Sorribes-Palmer, On the analytical approach to present engineering problems: Photovoltaic systems behavior, wind speed sensors performance, and high-speed train pressure wave effects in tunnels (2015). doi:10.1155/2015/897357.
- [4] D. del Río, D. Estébanez, A. Pedraza, M. E. Piqueras, A. I. Soria, Modelos explícitos. Generación y gestión de potencia eléctrica.
- [5] D. del Río, D. Estébanez, A. Pedraza, M. E. Piqueras, A. I. Soria, Modelos implícitos. Generación y gestión de potencia eléctrica.
- [6] J. Cubas, Modelos analíticos Paneles solares.