

## ESTUDIO SOBRE LA DISTRIBUCIÓN ÓPTIMA DE TERMOGENERADORES ACOPLADOS A PANELES FOTOVOLTAICOS

GONZÁLEZ CAMPO, Fernando<sup>(1)</sup>; GONZÁLEZ PEÑA, David<sup>(1)</sup>; DÍEZ MEDIAVILLA, Montserrat<sup>(1)</sup>

DIESTE VELASCO, María Isabel<sup>(1)</sup>; ALONSOTRISTÁN, Cristina<sup>(1)</sup>

fergonzalezcam@gmail.com

<sup>(1)</sup>Grupo de Investigación SWIFT (Solar and Wind Feasibility Technologies), Dpto.Ingeniería  
ElectromecánicaEscuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos

Avda. Cantabria s/n, Burgos, 09006, España.

### RESUMEN

En este trabajo se estudia el acoplamiento de células termogeneradoras (celdas Seebeck) a la parte posterior de paneles fotovoltaicos, aprovechando el calor residual para producir energía. Además este acoplamiento reduce la temperatura de trabajo del panel fotovoltaico, mejorando tanto su rendimiento eléctrico como su vida útil a largo plazo.

Se ha realizado un modelo teórico en Matlab y Simulink, que integra el modelo térmico del panel y el termogenerador con el modelo eléctrico de 5 parámetros propio de una celda fotovoltaica. Se verificará la validez de este modelo con los datos de producción y condiciones de operación dados por el fabricante, así como con posteriores medidas experimentales.

Además, el modelo implementado permite considerar de forma individual cada una de las 60 células fotovoltaicas en serie que componen el panel ensayado, proporcionando la posibilidad de colocar posteriormente a cada una de las células el número de termogeneradores deseado en el estudio.

De esta forma, el sistema modelado permite simular diferentes posiciones de los termogeneradores en la parte posterior del panel, permitiendo así hallar la distribución de termogeneradores que proporciona el resultado óptimo energéticamente y más económico.

**Palabras clave:** Termogeneradores, Temperatura, Célula fotovoltaica.

## 1. Introducción

El interés por las energías renovables se ha visto incrementado en los últimos años por motivos económicos y ecológicos. Entre las energías renovables, la solar fotovoltaica es una de las más implantadas. Para hacer de esta energía una solución real y económicamente viable, uno de los mayores retos consiste en mejorar su bajo rendimiento energético, el cual además disminuye a medida que aumenta la temperatura de trabajo del panel fotovoltaico [1].

Algunas líneas de investigación en este ámbito estudian la hibridación de los paneles solares fotovoltaicos y térmicos [2]. En este trabajo se estudia en cambio el comportamiento del panel fotovoltaico cuando se le acoplan en su parte posterior células termogeneradoras (celdas Seebeck, en adelante TEG). De esta forma, los TEG no solo van a permitir aprovechar el calor residual para producir energía eléctrica. Además, este acoplamiento reduce la temperatura de trabajo del panel fotovoltaico, mejorando tanto su rendimiento eléctrico como su vida útil a largo plazo.

También es posible utilizar los termogeneradores funcionando como celdas Peltier, consumiendo energía para refrigerar en mayor medida el panel fotovoltaico [3]. Sin embargo, en este estudio se ha contemplado exclusivamente la opción anterior.

En este trabajo se ha realizado un modelo teórico que integra el comportamiento térmico y eléctrico del panel fotovoltaico. El modelo desarrollado permite variar a voluntad el número de TEG acoplados al panel, lo cual será útil para el estudio de los diferentes casos posibles y su optimización.

Además, a diferencia de otros modelos teóricos encontrados en la bibliografía [4], el sistema desarrollado puede considerar de forma individual cada una de las 60 células fotovoltaicas en serie que componen nuestro panel (ver Figura 2), proporcionando la posibilidad de colocar tras cada una de las células un TEG, como se muestra en nuestro estudio, y determinando la temperatura de cada una de ellas de forma individualmente.

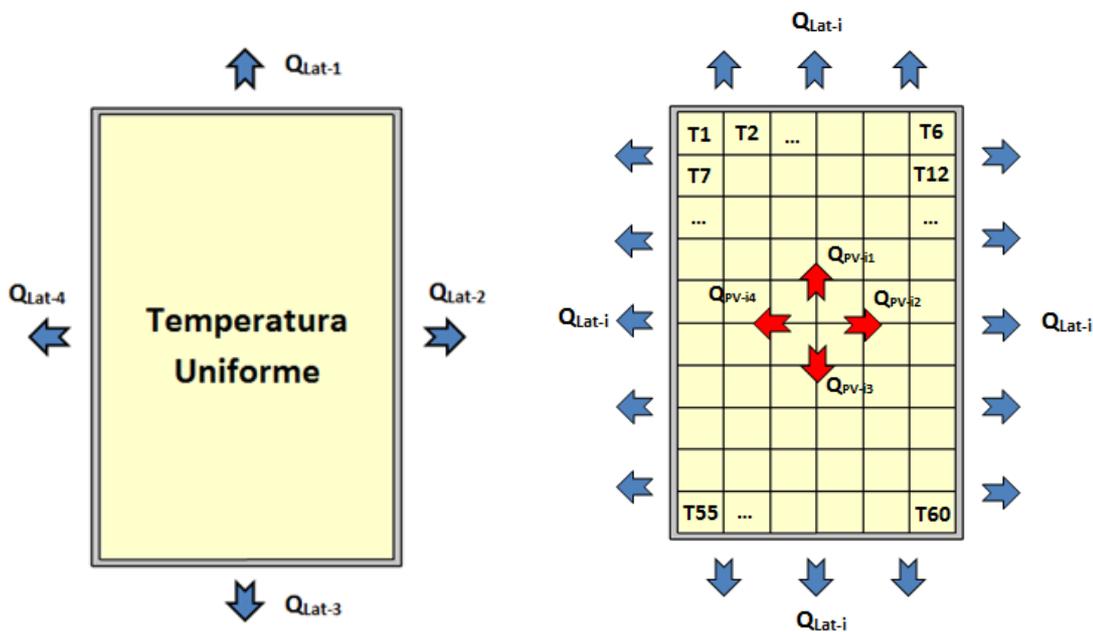


Figura 3. Modelo Discreto. Temperatura independiente en cada célula del panel.

El modelo permite gracias a esto encontrar la distribución espacial y el número adecuado de TEG que proporcionan la solución óptima y económicamente más rentable, siendo éste uno de los principales objetivos del presente trabajo.

En resumen, los objetivos principales del trabajo son:

- Hallar la distribución de TEG más adecuada en la parte posterior del panel.
- Comprobar el descenso de la temperatura del panel fotovoltaico.
- Obtener el incremento de producción fotovoltaica del panel debido a este descenso de temperatura.

## 2. Balance energético en el panel fotovoltaico

Las ecuaciones que componen el modelo térmico del panel fotovoltaico constituyen una de las partes centrales de este trabajo y han sido implementadas con la herramienta Simulink [5]. Estas ecuaciones permitirán calcular la temperatura de la célula fotovoltaica en función de la irradiancia, la temperatura ambiente y el número de TEG acoplados.

En la Figura 3 se representan las interacciones energéticas presentes en un panel fotovoltaico con termogeneradores acoplados en la parte posterior:

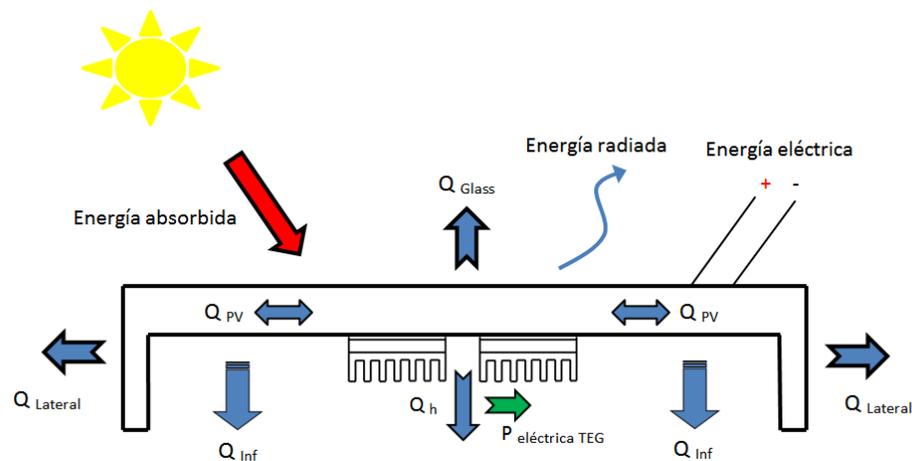


Figura 4. Esquema explicativo del Balance Energético del panel

En el trabajo de Najafi et al. [6] se presenta el balance energético del modelo térmico unidimensional, y sobre la ecuación fundamental se ha añadido en la ecuación (1) el último término ( $Q_{Transversal}$ ), que expresa el calor intercambiado transversalmente, necesario para nuestro estudio de optimización.

$$E_{absorbida} = Q_{glass} + E_{radiada} + Q_{inf} + Q_h + E_{eléctrica} + Q_{Transversal} \quad (1)$$

Donde el término de la energía absorbida por el panel se calcula como:

$$E_{absorbida} = \tau_G [\alpha_c \beta_C G + \alpha_T (1 - \beta_C) G] A_{PV} \quad (2)$$

En estas expresiones  $G$  es la irradiancia en  $W/m^2$ ,  $A_{PV}$  es el área del panel en  $m^2$ . El resto de parámetros son adimensionales:  $\tau_G$  es la transmisibilidad del cristal,  $\alpha_c$  y  $\alpha_T$  son los valores de absorción de la parte del panel cubierta por células fotovoltaicas y la parte que no está cubierta (espacios entre células), lo que se indica mediante el factor de empaquetamiento  $\beta_C$ .

La energía que se transmite a través del cristal se rige mediante la siguiente expresión:

$$Q_{glass} = U_t (T_{cell} - T_{amb}) A_{PV} \quad (3)$$

Donde  $T_{cell}$  es la temperatura de las células fotovoltaicas del panel expresada en Kelvin y  $U_t$  es el coeficiente global de transmisión del calor hacia al ambiente a través del cristal en  $W/m^2K$ . La energía radiada por el panel puede despreciarse.

La energía que se emite hacia el exterior a través de los TEG y de la parte posterior del panel no cubierta por TEG (ver Figura 3), será igual a la energía en conducción a través de las diferentes capas del panel.

$$Q_{inf} + Q_h = U_T(T_{cell} - T_{bs})A_{PV} \quad (4)$$

Donde  $U_T$  es el coeficiente de conducción del calor a través de las capas del panel [7], expresado en  $W/m^2K$ . La energía eléctrica puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$E_{eléctrica} = \tau_G \beta_C \eta_{PV} G A_{PV} \quad (5)$$

Donde  $\eta_{PV}$  es el rendimiento del panel fotovoltaico, que dependerá fundamentalmente de la temperatura de trabajo de las células.

En condiciones estacionarias, con una irradiancia constante, la disminución de la temperatura de la célula fotovoltaica (por ejemplo mediante termogeneradores u otros sistemas de refrigeración), provocará el aumento del rendimiento y la producción eléctrica.

A priori, puede tomarse un rendimiento del 14% (dado por el fabricante) para calcular la energía eléctrica producida mediante (5) comprobando de esta manera si los resultados del modelo térmico son coherentes. Posteriormente, la energía eléctrica producida se calculará utilizando el modelo eléctrico de 5 parámetros implementado (ver Apartado 4), sustituyendo el término expresado en (5), integrándose así la unión entre el modelo térmico y el eléctrico.

Por otro lado, tal como se puede ver en la Figura 4, el calor transversal será diferente en función de la posición de cada célula fotovoltaica.

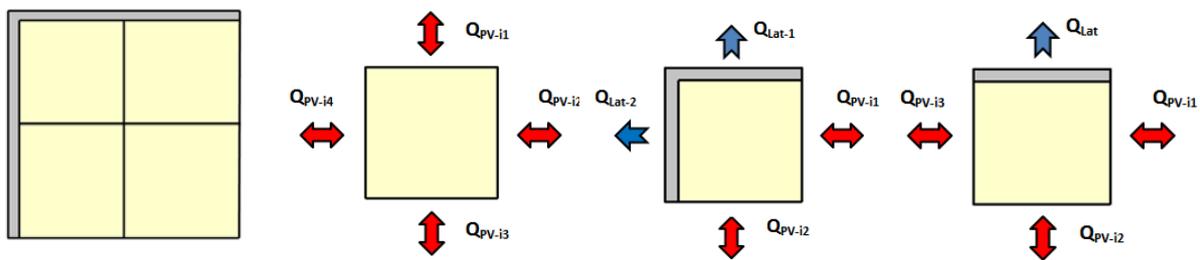


Figura 5. Intercambios de calor en función de la posición de las células fotovoltaicas

Las células de las esquinas y los bordes del panel intercambian considerables cantidades de calor con el ambiente a través del marco lateral de aluminio, mientras que las células fotovoltaicas interiores solo realizan intercambios de calor de menor valor con las células contiguas. Por este motivo, las células del interior se encontrarán a una temperatura ligeramente superior a la de los bordes y esquinas.

$$Q_{Transversal} = Q_{PV} + Q_{Lat} \quad (6)$$

El coeficiente de transmisión transversal del calor entre células fotovoltaicas se ha estimado a partir de medidas experimentales.

### 3. Modelo del Termogenerador

Para unir los TEG a la parte posterior del panel se ha utilizado una pasta de alta conductividad térmica. A la hora de realizar el modelo teórico se ha estimado que la temperatura en la parte posterior del panel ( $T_{bs}$ ) será similar a la temperatura de la cara caliente del TEG ( $T_h$ ). Así pues, podemos simplificar y considerar que  $T_{bs} = T_h$ . Un esquema explicativo del montaje del TEG se muestra en la Figura 5.

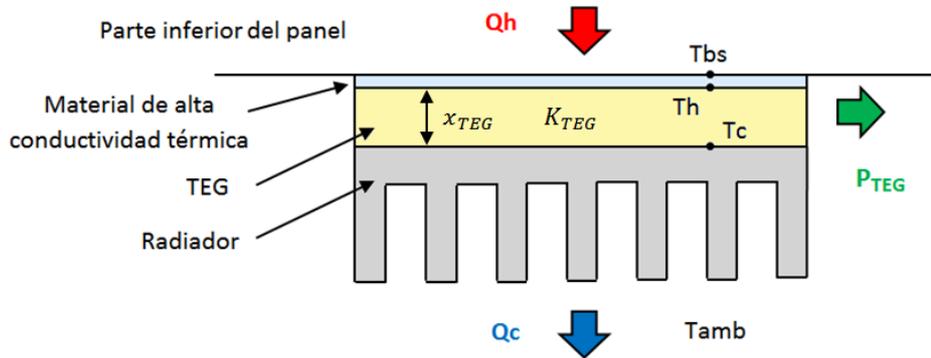


Figura 6. Esquema explicativo del termogenerador

La ecuación (7), describe el funcionamiento básico del TEG:

$$Q_h = Q_c + P_{TEG} \quad (7)$$

$Q_h$  es la potencia térmica recibida desde la célula fotovoltaica,  $Q_c$  es la potencia térmica transmitida al exterior y  $P_{TEG}$  la potencia eléctrica generada por coeficiente Seebeck. Este último término depende de la diferencia de temperatura entre ambas caras del TEG ( $T_h$  y  $T_c$ ) y del coeficiente Seebeck ( $S_m$ ), especificado por el fabricante (V/K) (ecuación 8). Para incrementar la evacuación de calor del panel y aumentar la diferencia de temperatura entre las caras del TEG, se ha acoplado a este un radiador de aluminio a medida, tal y como queda reflejado en la Figura 5.

$$P_{TEG} = S_m(T_h - T_c)I_{TEG} - I_{TEG}^2 R_m \quad (8)$$

Para la máxima transferencia de potencia, el valor de la resistencia interna  $R_m$  del TEG deberá ser igual al valor de la carga  $R_{ext}$ , como se muestra en el circuito equivalente de la Figura 6. El valor de resistencia interna viene dado por el fabricante, pero también se caracterizó en este estudio mediante ensayos experimentales.

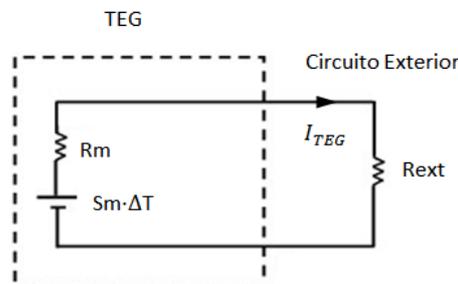


Figura 7. Termogenerador: Circuito eléctrico equivalente

#### 4. Modelo eléctrico de 5 parámetros para el panel fotovoltaico

Para realizar el modelo eléctrico del panel fotovoltaico se ha utilizado el modelo de 5 parámetros [8] representado esquemáticamente en la Figura 7, ya que proporciona un buen equilibrio entre complejidad y precisión. El comportamiento matemático de este modelo se encuentra definido por la ecuación (9).

$$I = I_{PV} - I_D - I_p = I_{PV} - I_o \left( e^{\frac{V+IR_s}{N_s a V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (9)$$

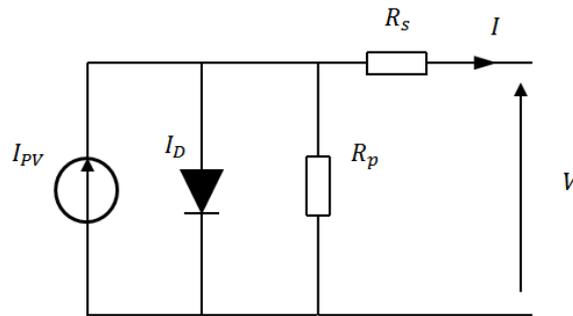


Figura 8. Célula fotovoltaica. Modelo Eléctrico de 5 parámetros

Donde  $I_{PV}$  es la intensidad del generador fotovoltaico,  $I_D$  es la intensidad que circula por el diodo,  $a$  es el factor de idealidad del diodo y  $R_s$  y  $R_p$  son las resistencias en serie y paralelo que contabilizan pérdidas de energía en los contactos, por corrientes de fugas, etc.

Gracias a la ecuación (9) y los parámetros dados por el fabricante (Tensión de circuito abierto, Corriente de cortocircuito, tensión y corriente de máxima potencia) para condiciones estándar STC ( $1000\text{W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) podemos hallar los parámetros del modelo y obtener las curvas I-V y P-V del panel [9] y de cada célula fotovoltaica. Para ello ha sido necesario emplear el método iterativo de Newton-Raphson [10], que se ha implementado en la herramienta Matlab [5].

El fabricante también proporciona los parámetros  $K_V$  y  $K_I$  que definen la variación de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito del panel en función de la temperatura. De esta forma, mediante las ecuaciones (10) y (11) puede ajustarse el modelo a diferentes valores de temperatura e irradiancia:

$$I_{PV} = I_{PV,n} (1 + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad K_I = 0,05\%/^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$V_{ac} = V_{ac,n} (1 + K_V \Delta T) \quad K_V = -0,37\%/^\circ\text{C} \quad (11)$$

Como se deduce de las expresiones anteriores (9), (10) y (11), la temperatura de trabajo de las células fotovoltaicas influye en su producción eléctrica. Asimismo, la producción eléctrica también influye recíprocamente en la temperatura de trabajo del panel (ecuación 1). Para solucionar este problema se ha empleado un proceso iterativo, representado en el esquema de la Figura 8, mediante el cual los valores de temperatura y producción eléctrica de las células fotovoltaicas convergen tras 3-4 iteraciones. Como consecuencia de esto, las células de las esquinas (más frías) producirán mayor energía eléctrica que las células del interior (más calientes).

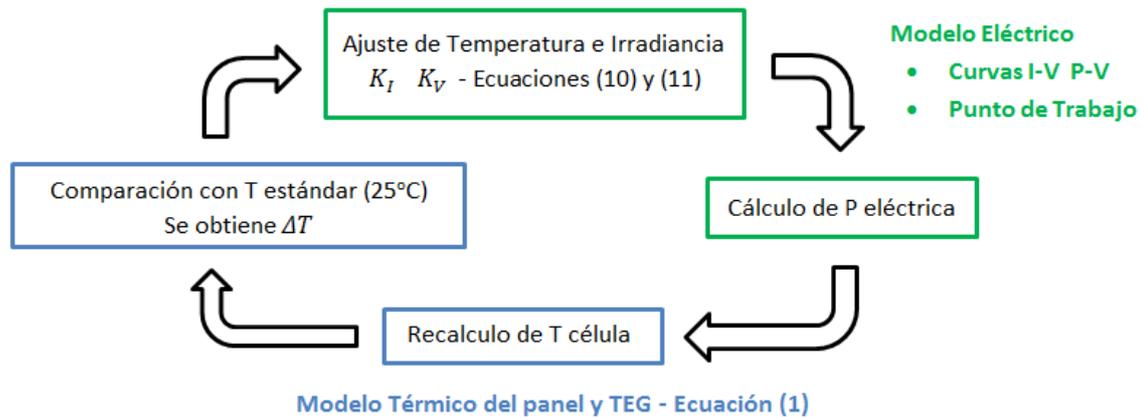


Figura 9. Proceso iterativo para calcular la temperatura y producción eléctrica de las células fotovoltaicas.

## 5. Resultados

El modelo termoeléctrico del panel se validó primeramente con los datos proporcionados por el fabricante para las condiciones STC. Los resultados se muestran en la Tabla 1. Como puede comprobarse, los resultados de la simulación están dentro de los márgenes de error indicados por el fabricante.

Tabla 1. Potencia y Rendimiento eléctrico en condiciones STC. Comparación.

Condiciones estándar: $G=1000W/m^2$ $T=25^{\circ}C$	
Rendimiento Fabricante	14%
Rendimiento Modelo Térmico-Eléctrico	13,77%
Potencia Fabricante (W)	$230 \pm 2\%$
Potencia Modelo Térmico-Eléctrico (W)	226,30

Posteriormente se probaron cuatro diferentes distribuciones de los TEG en la parte posterior del panel:

- Caso I: 32 TEG centrados en el panel acoplados de 4 en 4.
- Caso II: 32 TEG repartidos en la zona central acoplados en grupos de 4.
- Caso III: 32 TEG en grupos de 4 colocados en la zona lateral central.
- Caso IV, 32 TEG uniformemente repartidos en el centro del panel individualmente.

Para que sean equivalentes, todas las distribuciones tienen el mismo número de termogeneradores (32 TEG tamaño, 40x40 mm), como se puede ver en la Figura 9.

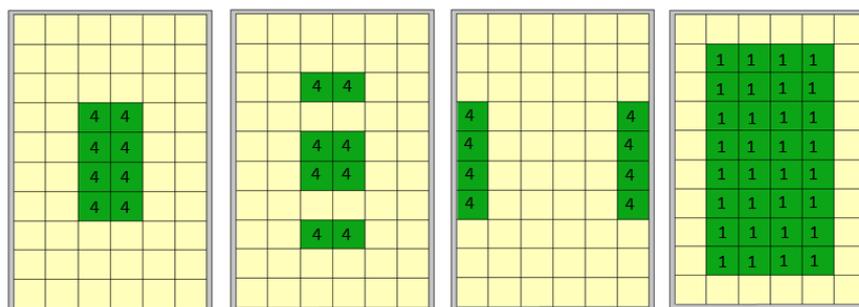


Figura 10. Distribuciones de estudio: Central, Repartida, Exterior y Uniforme. Todas ellas constan del mismo número de TEG (32).

Los resultados de estas distribuciones se encuentran disponibles en la Tabla 2, junto con los resultados que proporciona el panel cuando no existe ningún termogenerador acoplado. En la tabla se muestra la potencia proporcionada por el panel fotovoltaico, la suma de la potencia fotovoltaica y la proporcionada por los TEG, la potencia térmica extraída del panel por los TEG, la temperatura media de las células fotovoltaicas y la desviación típica de la temperatura de las 60 células respecto a la media.

Tabla 2. Distribución de termogeneradores. Comparación de resultados.

Distribución de TEG	Potencia PV(W)	TEG + PV(W)	Qh(W)	T célula media(K)	T célula desv. (K)
1. Distribución Uniforme	226,91	228,06	25,82	328,60	0,91
2. Distribución Repartida	226,851	227,81	23,57	328,65	1,36
3. Distribución Central	226,848	227,79	23,43	328,65	1,41
4. Distribución Exterior	226,76	227,59	21,88	328,72	1,95
Sin TEG	226,22	226,22	0	329,18	1,36

Estos resultados se muestran gráficamente en la Figura 10. Los TEG disminuyen la temperatura de las células fotovoltaicas interiores, mejorando su producción eléctrica.

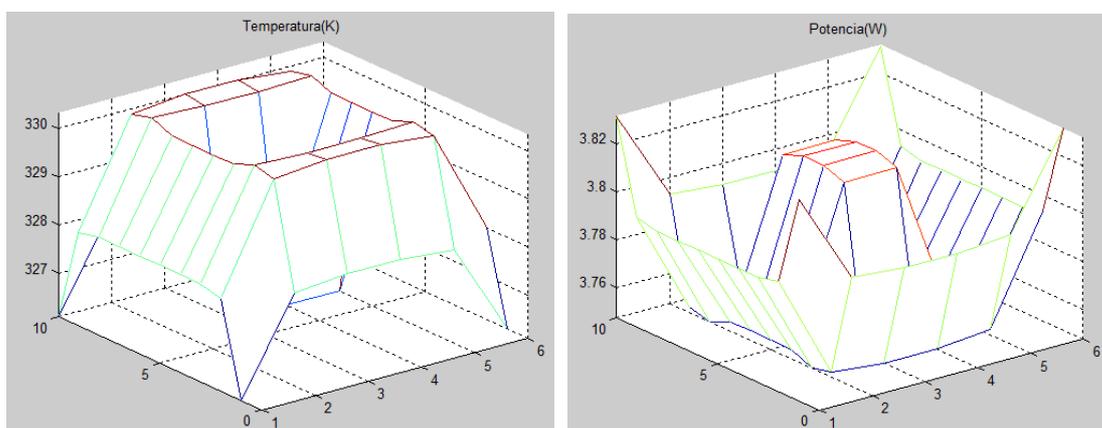


Figura 11. Temperatura (K) y potencia eléctrica (W) de cada una de las 60 células fotovoltaicas del panel

## 6. Conclusiones

La distribución más eficiente ha resultado ser aquella en la que los TEG se colocan en todas las células interiores (y no solo en las células centrales internas). Si bien para un número pequeño de TEG la diferencia de una distribución a otra no aporta grandes variaciones en valor absoluto (ver resultados en la Tabla 3), en forma porcentual si supone una diferencia de más del 30%, lo que sí resulta significativo.

Tabla 3. Resultados sin TEG acoplados frente a la Distribución Uniforme y Exterior

Distribución	Potencia total (W)	Diferencia (W)
Sin TEG	226,22	
Distribución Uniforme	228,06	1,84
Distribución Exterior	227,59	1,37

De todas formas, aunque la diferencia sea más o menos pequeña, siempre resulta más eficiente y necesario colocarlos en la distribución óptima. Además, una correcta distribución de los TEG evita que existan células fotovoltaicas mucho más calientes que otras, cuyo rápido envejecimiento podría afectar a la vida útil de todo el panel.

Como también puede verse en la anterior Tabla 2, los TEG deberán colocarse en aquella distribución que obtenga una menor desviación típica de la temperatura, ya que hay una clara tendencia a ser la distribución que mejor resultado obtiene.

Para conseguir esto, a la hora de cubrir la parte posterior del panel con un número elevado de TEG, conviene colocar los TEG en las células interiores hasta que estas células alcancen la temperatura de los bordes. A continuación, se colocan TEG en los bordes y en el interior hasta que las células alcancen la temperatura de las esquinas. A partir de este punto, los TEG deberían colocarse de forma equitativa por toda la parte posterior del panel, incluyendo las esquinas.

Con este procedimiento, cuyos resultados pueden verse en la Figura 11, se consigue la distribución óptima cuando se acoplan al panel un número relativamente elevado de TEG.

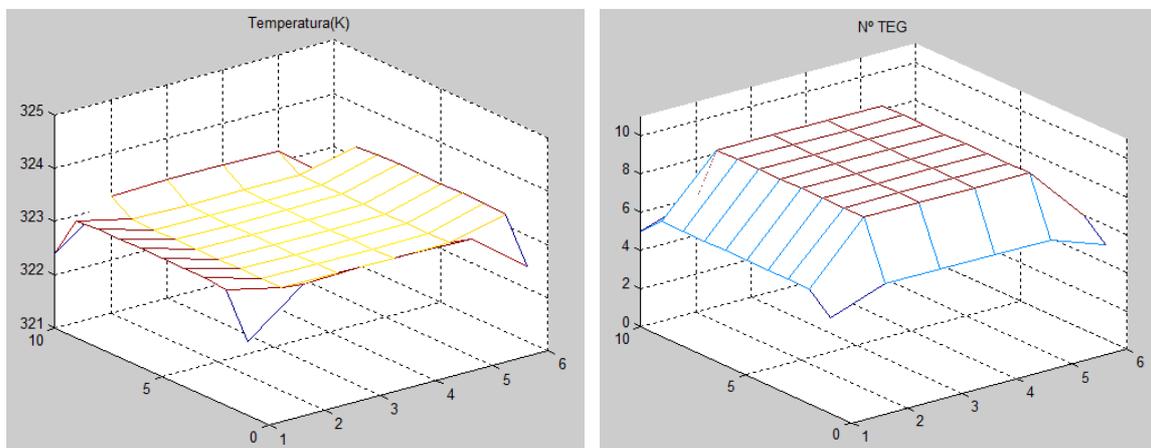


Figura 12. Perfil de temperaturas y distribución de TEG, repartidos de tal forma que la temperatura de todas las células fotovoltaicas sea aproximadamente la misma. Optimización.

## 7. Referencias

- [18] Anand S. Joshi, I.D., Bale V. Reddy, *Thermodynamic assessment of photovoltaic systems*. Solar Energy, 2009: p. 83(8): p. 1139-1149.
- [19] Niccolò Aste, C.d.P., Fabrizio Leonforte, *Architecture Water flat plate PV-thermal collectors: A review*. Built Environment and Construction Engineering A.B.C., Politecnico di Milano, Via Bonardi 3, 20133 Milano, Italy, 2014.
- [20] Najafi, H. and K.A. Woodbury, *Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells*. Solar Energy, 2013. **91**: p. 152-160.
- [21] Laura Aeleneia , R.P., HelderGonçalves, Andreas Athienitis, *Thermal performance of a hybrid BIPV-PCM: modeling, design and experimental investigation*. Energy Procedia, 2014.
- [22] <http://es.mathworks.com/>

- [23] Najafi, H. and K.A. Woodbury, *Modeling and analysis of a combined photovoltaic-thermoelectric power generation system*. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 2013. **135**(3).
- [24] TSAI, H.L., Complete PV model considering its thermal dynamics. Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A/Chung-kuo Kung Ch'engHsuchK'an, 2013. 36(8): p. 1073-1082
- [25] Huan-Liang Tsai, C.-S.T., and Yi-Jie Su, Member, IAENG, *Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK*.
- [26] Del Álamo Nuñez, M. , *Estudio y modelado del acoplamiento de termogeneradores a paneles fotovoltaicos*, Trabajo Fin de Grado, in *Departamento de Ingeniería electromecánica*, 2014, Universidad de Burgos.
- [27] P. Deufhard, *Newton Methods for Nonlinear Problems. Affine Invariance and Adaptive Algorithms*. Springer Series in Computational Mathematics, Vol. 35. Springer, Berlin, 2004. ISBN 3-540-21099-7