

Simulación eléctrica y térmica de paneles PV/T

Bayod Rújula, A.A.¹; Diaz de Garaio, S.¹; del Amo, A.²

¹ Centro Politécnico Superior/CIRCE,
Universidad de Zaragoza,

C/ María de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain

Tfno.: +34976761920; +34976762237

e-mail: aabavod@unizar.es, sgaraio@unizar.es

² ADES Pol. Malpica-Alfinden.

C/ La Sabina 13-15. 50171

La Puebla de Alfinden, Zaragoza, Spain

Tfno.: +34639338274, e-mail: alejodelamo@gmail.com

Palabras clave

Panel PV/T, panel híbrido, cogeneración solar, rendimiento de panel solar, instalación solar.

1. Introducción

Mediante este estudio se pretende conocer el funcionamiento del panel híbrido PV/T y las variables que afectan a su funcionamiento mediante diferentes simulaciones. De esta forma, a partir de los casos considerados a lo largo del artículo, se obtendrán conclusiones que optimicen el rendimiento eléctrico de estos paneles y muestren sus aplicaciones más interesantes en las diferentes instalaciones planteadas.

También se comparará su funcionamiento con un panel fotovoltaico convencional observando sus rendimientos a lo largo del año, así como sus temperaturas, y demás parámetros que influyen en su comportamiento.

Los mercados energéticos mundiales, están tratando de reducir las emisiones de efecto invernadero. Para ello, es necesario el uso combinado de las energías renovables y sus desarrollos. Dentro de la variedad disponible está la energía solar, en la cual encontramos 2 tipologías, la fotovoltaica y la térmica. A pesar de los numerosos esfuerzos por el desarrollo de estas tecnologías, a día de hoy todavía no existen soluciones de alta eficiencia que hagan rentable por sí misma a esta tecnología.

El mercado español tiene 2 legislaciones que potencian el uso de ambas en aplicaciones tan diferentes. El RD 1578/2008 de retribución de la actividad de producción de energía eléctrica mediante tecnología solar fotovoltaica, que ha fomentado hasta el momento la producción de grandes huertos solares, aunque la situación actual está marcando un cambio hacia aplicaciones sobre tejado, superficies muy poco

utilizadas en la actualidad. El segundo real decreto (RD 314/2006), el Código Técnico de la Edificación (CTE), que regula la eficiencia energética en la edificación y obliga a instalar colectores térmicos en los edificios, y en según qué aplicaciones, también fotovoltaica. Hasta la actualidad, ningún país ha tenido ambas legislaciones simultáneamente, por lo que nunca se ha dado la circunstancia de potencia estas dos tecnologías sobre tejado.

2. Panel PV/T

El panel híbrido PV/T combina la tecnología solar térmica y fotovoltaica en el mismo captador. De toda la irradiación incidente sobre el área de captación, aproximadamente, hasta el 15% es aprovechable con tecnología fotovoltaica, parte se pierde por reflexión (entorno al 5%) y el resto es disipado en forma de calor. Este tipo de panel produce electricidad y calor a partir del mismo módulo con diferentes capas. Existen diferentes tipologías para la obtención de ambos recursos.

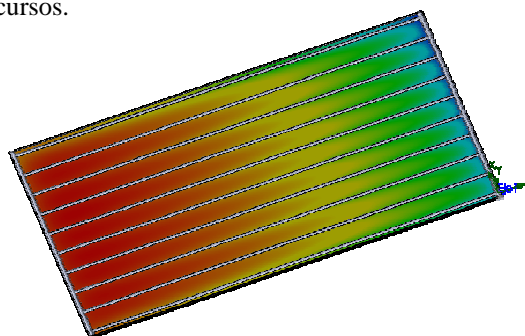


Fig.1: distribución de temperaturas en el panel PV/T

En nuestro caso, a un panel fotovoltaico convencional, se le adosa un recuperador de calor (figura 1) en su parte posterior y seguidamente se aísla térmicamente para tener una mayor recuperación de calor. De esta forma, tanto el calor que disipa por su cara posterior y lo que deja de disipar en su cara posterior por estar a una temperatura inferior, es aprovechado por el fluido

que se hace circular por el recuperador de calor. Así, el calor es recuperado por conducción, a diferencia de otras tipologías que utilizan el efecto invernadero y/o radiación directa para esta captación.

Esta superposición constructiva, permite reducir entorno al 38% (estudio para un unifamiliar en el sur de Francia, [3]) el área requerida, lo cual favorece su implantación debido a la escasez de superficie útil sobre el tejado de los inmuebles.

Como se explicará a lo largo de artículo, y a priori evidente, una recuperación de calor a baja temperatura mejora el rendimiento de ambas fuentes renovables. En especial, el uso de calor a baja temperatura es óptimo para la calefacción por suelo radiante, instalación más apropiada en viviendas bioclimáticas.

El panel fotovoltaico utilizado dispone (según ficha técnica) de una potencia pico de 240 Wp, con una superficie de 1650 x 992 mm., un rendimiento de célula de 16.9%, eficiencia de panel 14.7%, un coeficiente de temperatura Pm de -0.45%/°C, coeficiente de temperatura Isc de 0.05 %/°C, y coeficiente de temperatura Voc de -0.35 %/°C. Las gráficas que representan el comportamiento del panel tanto fotovoltaico como térmico, se muestran a continuación.



Fig 2: curva I-V para diferentes irradiaciones

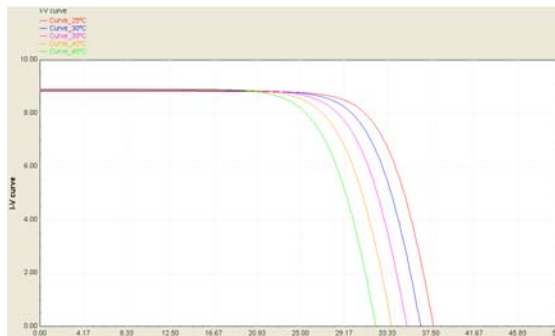


Fig 3: curva I-V para diferentes temperaturas de panel

El comportamiento térmico sigue la curva de rendimiento que se muestra en la figura 3.

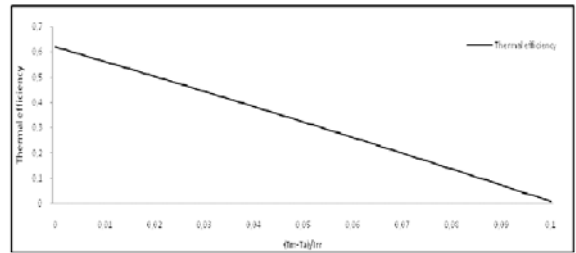


Fig. 4: curva de rendimiento térmico del panel PV/T

Del comportamiento térmico se puede ver que al disminuir la temperatura media del fluido, aumentar la temperatura ambiente o aumentar la irradiación el panel tiene mejores valores de rendimiento, lo cual serán parámetros importantes para el estudio del comportamiento global del panel.

3. Instalaciones

3.1 Panel aislado

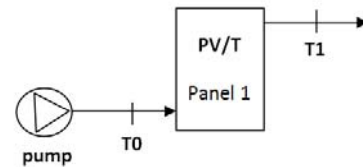


Fig. 5: Esquema hidráulico de un panel

Al hacer circular diferentes caudales a través del circuito hidráulico del panel, se obtienen diferentes temperaturas de funcionamiento. En la siguiente figura se representan cada una de esas temperaturas características del panel frente a un panel fotovoltaico con las mismas características que el híbrido considerado. Para unas condiciones de 1000 W/m² y 25°C, se ha variado el caudal entre 0 y 100 l/h, siendo la temperatura de entrada del fluido de 10°C.

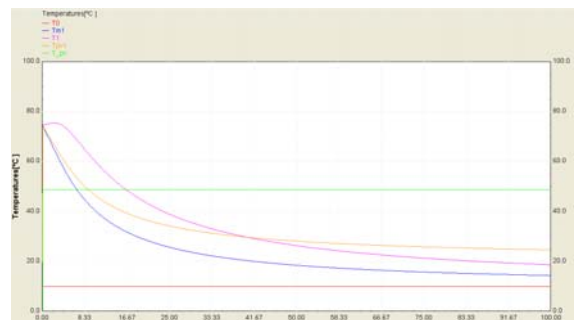


Fig. 5: Perfil de temperaturas (°C) vs. caudal circulante (l/h).

Si observamos la temperatura media del panel fotovoltaico (48.9 °C, para las condiciones citadas) frente a la de las células del panel híbrido se muestra que, si bombeamos un caudal entre 0 y 100 l/h, a partir de un caudal de 8 l/h, la temperatura media del panel PV/T (Tm1) es menor, por lo que el rendimiento será mayor y en consecuencia su producción eléctrica. Adicionalmente, el panel PV/T calienta un caudal de agua que para las condiciones de esos 8 l/h y las condiciones estándar, es de 63 °C. Esto significa que, una parte del panel está a una temperatura de al menos esos 63 °C, y por lo tanto su célula. Al estar todas las células conectadas en serie, será la más fría quien determine la intensidad que circule por las restantes, no ocurriendo lo mismo con la tensión. Esto se puede apreciar en la figura 3, donde se representa la curva I-V en función de la temperatura de panel fotovoltaico, al aumentar la temperatura, aumenta la intensidad, y disminuye la tensión. La potencia generada por el panel fotovoltaico es menor con el aumento de la temperatura debido a que la disminución de la tensión (-0.35 %/°C) es más considerable que el aumento de la intensidad (0.05 %/°C). Sin embargo, la tensión será consecuencia de la temperatura de cada célula individualmente. En el panel, las condiciones de funcionamiento de las células serán para la intensidad, tal y como funcione la más desfavorable y para la tensión, la temperatura media del panel. A partir de este razonamiento, se puede comparar en la figura 6 la producción eléctrica (y térmica) de cada panel y concluir que a partir de 10 l/h. panel, la producción eléctrica es mayor en el panel híbrido (W_pvt_electrical) que en el fotovoltaico (W_pv), por lo que la refrigeración es interesante en cuanto a términos de generación eléctrica. Caudal ligeramente superior a lo inicialmente previsible, 8 l/h.

En la siguiente gráfica se puede observar las producciones tanto eléctricas, térmicas como totales para el panel híbrido y la producción generada por el fotovoltaico. Para el instante de inflexión eléctrica (ambas producciones coinciden), la potencia eléctrica generada es de 148.0 W y la generación térmica es de 436.4 W. Si vemos sus rendimientos, el eléctrico es de 13.77% y el térmico del 33.1%. Es decir, mediante un solo panel fotovoltaico tenemos un rendimiento (para las condiciones estándar) de 13.77% frente al rendimiento total (eléctrico más fotovoltaico) del panel PV/T, del 46.87%.

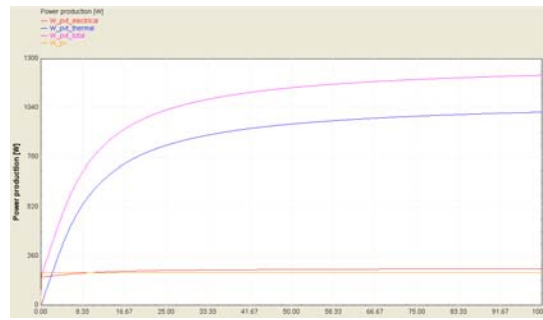


Fig. 6: Potencia (W/panel) vs. caudal (l/h)

A lo largo del año, el funcionamiento del panel variará. Para ello se pueden considerar para cada mes un día representativo en el cual la declinación en ese día, coincide con la media del mes. Para representar cuatro condiciones diferentes se han elegido en este artículo, un mes de cada estación del año y para cada uno, su día representativo. Los cuatro días son el 17/01, 15/04, 18/07 y 19/10. [8]

Si tomamos estos días, se puede ver que para invierno el caudal a partir la temperatura media del panel PV/T es inferior a la del fotovoltaico es de 4 l/h, para primavera es de 9 l/h, para verano de 8 l/h y para otoño de 8.30 l/h. En estos resultados se ven reflejados tres parámetros que determinan sustancialmente el resultado, la irradiación incidente, la temperatura del ambiente y la temperatura de la red. La primera de esta variables conlleva un mayor calentamiento de la parte fotovoltaica, por lo que con menos caudal se conseguirá refrigerar; al disminuir la segunda, se necesitará mayor caudal para tener una temperatura inferior ya que el panel fotovoltaico tendrá mayores pérdidas por convección y por lo tanto menor temperatura, y la tercera de ellas permite refrigerar más rápido el panel en meses de invierno.

La mejora de rendimiento en los meses de escasa irradiación no causa un importante incremento en la producción ya que la energía disponible es reducida, aunque si es notable en los meses de verano.

3.2 PV/T string

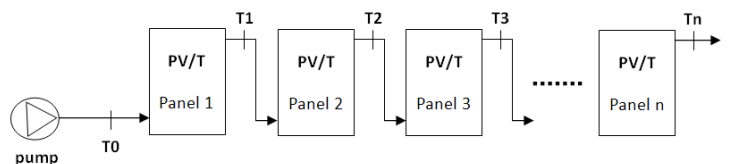


Fig. 7: Esquema hidráulico en serie PV/T

Como se ha visto anteriormente, la curva I-V varía con la temperatura de funcionamiento. A continuación se va a estudiar el funcionamiento de varios paneles en

serie con el objetivo de conocer cuál es su disposición óptima.

Thermal production (W)	panel number:			
	1	2	3	4
633,7				
735,2	530,1			
773,2	623,4	499,3		
793,3	675,8	573,4	485	

Thermal efficiency	panel number:			
	1	2	3	4
38,72%				
44,92%	32,39%			
47,24%	38,08%	30,51%		
48,46%	41,28%	35,03%	29,63%	

Fig. 8: Producción y eficiencia del esquema en serie.

Para este caso se han tomado entre 1 y 4 paneles en serie y se han observado tanto las producciones eléctrica y térmica, como sus respectivos rendimientos. Se ha considerado una serie hidráulica máxima de cuatro por que el CTE exige que la serie más larga tenga como máximo esta cantidad. Para el estudio, se ha marcado una temperatura de salida de 50°C de manera que el caudal se adapta a tal consigna. La figura 8 pretende mostrar el funcionamiento de cada panel para las diferentes condiciones de funcionamiento.

Si observamos la producción eléctrica, conforme avanzamos en la serie de paneles, se observa que el rendimiento eléctrico empeora (un 0.8% entre el panel 1 y 4), debido a que la temperatura media del panel es más elevada al ir calentándose el fluido a cada panel atravesado.

El conexionado eléctrico de la serie debería ser en paralelo y no en serie, ya que de ser así, disminuiría el rendimiento del conjunto causado por la intensidad limitante del panel más frío, y a su vez, la de la célula más desfavorable por su elevada temperatura. Es decir, cada panel debería estar conectado al inversor (multi-string) para que la instalación alcanzase su máxima generación.

En las siguientes tablas se refleja la producción eléctrica, térmica y sus respectivos rendimientos en cada uno de los paneles y para las diferentes longitudes de la serie.

De la misma forma que el rendimiento fotovoltaico mejora en los primeros paneles y empeora en los últimos de la serie, también lo hace el rendimiento térmico. En el conexionado térmico, lo que determinará el número de paneles en serie será el caudal que vaya a circular por ellos ya que de ello dependerá la pérdida de carga y a mayor numero en

serie, mayor pérdida de carga, ya que esta es menor conforme más paneles hay en paralelo.

Electrical production (W)	panel number:			
	1	2	3	4
177				
181,5	172,5			
183,3	176,5	171,2		
184,2	178,9	174,4	170,6	

Electrical efficiency	panel number:			
	1	2	3	4
13,27%				
13,61%	12,93%			
13,74%	13,24%	12,83%		
13,81%	13,41%	13,07%	12,79%	

3.3 Malla PV/T

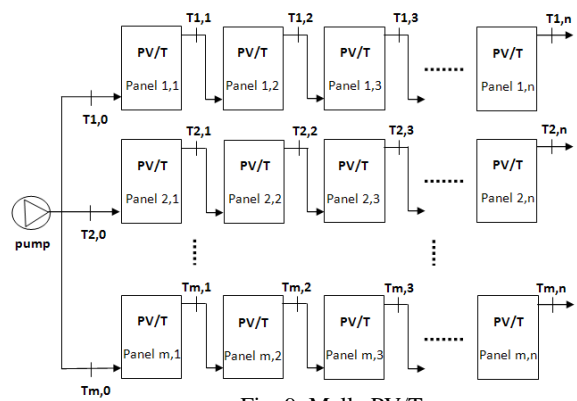


Fig. 9. Malla PV/T

Para la optimización de la instalación, debemos tener en cuenta los dos tipos de conexiones, la hidráulica y la eléctrica. A partir de una temperatura de consumo fijada, tomemos por ejemplo 50°C, el número de paneles a conectar hidráulicamente en serie vendrá determinado por la irradiación disponible. En ubicaciones con mucha irradiación, con un simple colector será suficiente y harán falta varios cuando este recurso no sea tan elevado.

A su vez esa temperatura dependerá del caudal que hagamos circular por su interior por lo que el número mínimo en serie lo determinará aquel número para el cual el caudal sea superior al mínimo comentado antes por serie que por lo tanto mejorará el rendimiento de la instalación. Según lo comentado anteriormente el caudal que mejorará en cualquier época de año será de al menos 10 l/h. Por lo tanto, si tenemos poca radiación, al poner 1 sólo panel en serie, no obtendremos la refrigeración deseada, por lo que se deberá dimensionar este número para que este caudal mínimo sea superior al que podríamos denominar “mínimo de refrigeración”.

caudal (l/h)	ELECTRICAL PRODUCTION				THERMAL PRODUCTION				
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	TOT
62,5	193,1	184,1	176,9	171,3	981,7	791,3	632,5	501,9	2907,4
62,5	193,1	184,1	176,9	171,3	981,7	791,3	632,5	501,9	2907,4
62,5	193,1	184,1	176,9	171,3	981,7	791,3	632,5	501,9	2907,4
62,5	193,1	184,1	176,9	171,3	981,7	791,3	632,5	501,9	2907,4
TOTAL	772,4	736,4	707,6	685,2					

Fig. 10: Producción de la malla

Por otra parte, el conexionado eléctrico se verá en su mejor distribución cuando se conecten en serie los paneles con temperaturas similares, de forma que no haya paneles limitantes por exceso de temperatura. Para ello se deberán conectar en serie los primeros paneles de cada serie, por otra parte, los segundos de cada serie y así sucesivamente, de forma que cada serie eléctrica, llegue a una entrada diferente del inversor multi-string que se requiere para que cada una de las serie llegue a su punto óptimo de operación. Es decir sobre, sobre la figura 9, el conexionado en serie térmico se realizará de izquierda a derecha y la serie eléctrica será de arriba abajo.

A modo de ejemplo se ha simulado una malla de 4 x 4, conectadas como se ha detallado anteriormente, para las condiciones antes establecidas, se han obtenido los resultados que se muestran en la figura 10.

La potencia total de esta instalación es de 2901.6 W eléctricos y 11629.6 W térmicos, que supone un rendimiento eléctrico de 11% y 44% térmico.

3.4 Instalación en unifamiliar

Para completar este estudio sobre el comportamiento energético de los paneles PV/T, se considera interesante integrarlo en una instalación. Se elige una vivienda unifamiliar con 6 personas (equivalente a 4 dormitorios según la HE-4 del CTE), cuya demanda de calor será la necesaria en el agua caliente sanitaria.

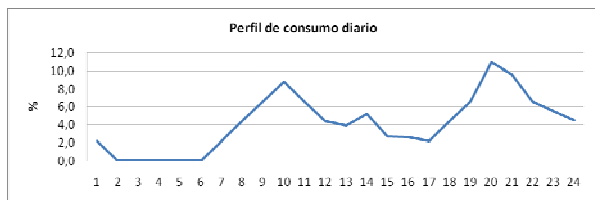


Fig. 11: perfil de consumo diario (%), f-chart

El CTE exige una contribución solar mínima para esta demanda, que en el caso de Zaragoza y para un consumo inferior a 5000 l/día, es del 60%. Para un unifamiliar se estima un consumo de agua caliente sanitaria de 30 l/día persona, lo que supone un consumo total diario de 180 l/día. Con un perfil de temperaturas a lo largo del día como muestra la figura:

La simulación se hace hora a hora mediante el software TRNSYS. El circuito completo se refleja en el siguiente esquema de simulación del programa (figura 12). Se compone de una instalación hidráulica y eléctrica para la simulación del PV/T, y de la misma superficie de captación fotovoltaica.

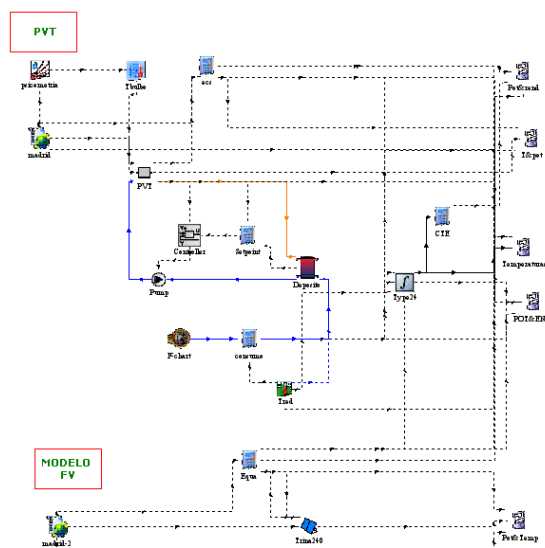


Fig. 12: Esquema de la instalación de la vivienda

Para cumplir el porcentaje solar que exige el CTE, es necesario instalar, para el caso considerado, 2 captadores híbridos, semejante en número a lo necesario si tuviésemos paneles térmicos. Si fuesen necesarios más captadores, por ejemplo 4, de las disposiciones consideradas en la simulación se obtienen mejores resultados para una conexión térmica de dos en paralelo y dos en serie y eléctricamente también 2 en serie y dos en paralelo, aunque como ya se ha comentado durante la matriz, el conexionado en serie eléctrico coincide con el paralelo térmico. Se requieren 2 en serie para conseguir aportaciones a temperatura en invierno.

A partir de un depósito de 1000 litros, una inclinación de paneles de 30°, ubicado en la ciudad española de Zaragoza, con una regulación PID que permite aprovechar al máximo el calor existente en los paneles, se obtiene que se cubre aproximadamente el 61% de la demanda de agua caliente sanitaria.

La producción eléctrica anual en la instalación es similar a la de una producción fotovoltaica, la producida por el PV/T es de 336 kWh/año panel (lo que supone 1402 horas pico equivalentes) y la de un

panel fotovoltaico de 296 kWh/año panel (1233 horas), supone que para el ejemplo de Zaragoza, existe un 13% más de producción. Si esto se simula para latitudes más al norte, por ejemplo Stuttgart (Alemania) la producción de ambos paneles es muy similar, 231 kWh/año panel, lo cual significa que la refrigeración del panel no es tan interesante. Si se observa el rendimiento en las diferentes estaciones, se observa que en invierno, el panel fotovoltaico se comporta con mejor rendimiento (debido a que cuesta más refrigerar el panel ya que la temperatura ambiente lo mantiene refrigerado). Sin embargo, en verano, el panel fotovoltaico se encuentra a mayor temperatura que el PV/T ya que se refrigera por el fluido. El hecho de que sea mejor rendimiento eléctrico del panel híbrido en verano conlleva esa mayor producción ya que es en estos meses cuando la producción es mayor. Si se hace el balance energético correspondiente, obviamente favorece al PV/T, ya que si se incluye la producción térmica 1515 kWh/año panel, se obtienen 1851 kWh/año panel. Hay que tener en cuenta que el interés de trabajar a baja temperatura en la parte fotovoltaica conlleva que la parte térmica trabaje a buen rendimiento causado por la reducción de pérdidas con el exterior.

Si comparamos el comportamiento térmico del panel con el de un captador térmico convencional, los rendimientos térmicos obtenidos son muy similares, sin embargo, se requeriría una instalación más grande para poder obtener diferencias más significativas en su funcionamiento.

Los caudales obtenidos durante la simulación se controlan mediante una bomba de caudal variable, tomando un máximo de 50 l/h, lo que obtiene temperaturas máximas de 56°C para el dimensionamiento realizado. La temperatura máxima registrada a lo largo del año en el panel fotovoltaico es de 53°C.

4. Conclusiones

Hay un valor de caudal que circula por el interior del recuperador a partir del cual el rendimiento del panel mejora respecto al módulo de referencia. Ese valor, cambia en función de la estación del aire y es muy sensible a variables como la irradiación, temperatura ambiente y temperatura del fluido interior.

Al colocar varios paneles en serie (térmica y eléctricamente) el rendimiento de la instalación se ve reducido. Esto se debe a que la intensidad que

circulará por los paneles se verá limitada por el panel más caliente. Sin embargo la tensión funcionará a la temperatura media del panel, por lo que se concluye que la conexión óptima sería que cada panel tuviese una conexión a un inversor multi-string de forma que se adapte a las condiciones de funcionamiento de cada panel. Esto se ve más justificado en el caso de instalaciones con varias ramas en paralelo, de forma que se conecten eléctricamente en serie los paneles que trabajen a temperaturas similares para que no exista un panel limitante. Esto se puede realizar conectando en serie todos los primeros paneles de cada rama, todos los segundos, etc. y cada serie eléctrica conectadas al inversor de forma separada.

Al estudiar este panel en una casa unifamiliar, vemos que el rendimiento eléctrico anual del PV/T mejora respecto a un módulo normal un 13 % en Zaragoza, y esta mejora decrece con la latitud, siendo similar para ciudades como Stuttgart. Al añadirle el rendimiento térmico al balance energético, el aprovechamiento de la superficie es bastante mayor.

5. Referencias

- [1] Duffie, J.A., Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, third ed. Wiley Interscience, New York, 1991.
- [2] Tiwari, A., Sodha, M.S. Performance Evaluation of Solar PV/T system: An experimental validation, 2005.
- [3] Fraisse, G., Ménézo, C., Johannes K. Energy Performance of Water Hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor Type, 2007.
- [4] Joshi, A.S., Tiwari, A., Tiwari, G.N., Dincer, I., Reddy, B.V. Performance Evaluation of a Hybrid Photovoltaic Thermal (PV/T), 2008.
- [5] Riveros, F., Radiación solar sobre Superficies Arbitrarias, ADES solar conference, 2008.
- [6] Huang, B.J., Lin, T.H., Hung, W.C., Sun, F.S., Performance Evaluation of Solar Photovoltaic/Thermal Systems, 2000.
- [7] Fernandez, J.M., Compendio de Energía Solar, 2008.
- [8] Kalogirou, S.A., Use of Trnsys for modelling and simulation of a hybrid pv-thermal solar system for Cyprus, 2000.
- [9] Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- [10] Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, de retribución de la actividad de producción de energía eléctrica mediante tecnología solar fotovoltaica.