

Modelo físico y simulación computacional de un colector fotovoltaico-térmico pv/t con circulación de agua

Gonzalo José Durán¹, Miguel Angel Condori² (*)

RESUMEN:

En este trabajo se desarrolla un modelo teórico para analizar un colector fotovoltaico - térmico (FV/T). El modelo integra los aspectos térmicos y eléctricos, analizando la conversión fotoeléctrica de radiación solar y la cogeneración de calor a baja temperatura mediante la refrigeración con agua en la parte posterior del colector. Se realizó para un día tipo la simulación numérica bajo Simusol de un colector de 40 celdas y 80 Wp, planteando dos escenarios. En el primero se estudió el desempeño del módulo sin circulación de agua, y en el segundo, con circulación de flujo. En la simulación del colector con circulación de agua se encontró que la potencia eléctrica se incrementa en hasta un 15% respecto al caso de estudio sin refrigeración.

Palabras clave: Simulación, cogeneración, PVT, calentador solar de agua, panel fotovoltaico

ABSTRACT: *In this work a theoretical model is developed to analyze a photovoltaic - thermal collector (FV/T). The model integrates the thermal and electrical aspects, analyzing the photoelectric conversion of solar radiation and the cogeneration of heat at low temperature by cooling with water at the rear of the collector. The numerical Simusol simulation of a collector of 40 cells and 80 Wp was carried out for a day, proposing two scenarios. In the first, the performance of the module without water circulation was studied, and in the second, with flow circulation. In the simulation of the collector*

(*) Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO, UNSa. – CONICET) Universidad Nac. de Salta- Av. Bolivia 5150 – A4408FVY Salta, Argentina - FAX 54 387 4255489 – e-mail: gonzalo.jose.duran@gmail.com

¹ Investigador Asistente CONICET.

² Investigador Independiente CONICET – Director INENCO

with water circulation it was found that the electric power increases by up to 15% with respect to the case of study without refrigeration.

Keywords: *Simulation, cogeneration, PVT, solar water heater, photovoltaic panel*

INTRODUCCION:

La potencia entregada por los paneles fotovoltaicos depende de la radiación solar incidente, de la temperatura de la celda y de la resistencia de carga. En general, el fabricante provee datos de la tensión en circuito abierto V_{oc} , la corriente de corto circuito I_{sc} , los valores de tensión y corriente para máxima potencia V_{mp} e I_{mp} , y los coeficientes de variación con la temperatura de los valores anteriores, referidos a condiciones estándar de radiación (1000 W/m^2) y temperatura de celda ($25 \text{ }^\circ\text{C}$).

En un panel, una fracción de la radiación solar incidente es convertida en electricidad por efecto fotoeléctrico, y el resto de la energía es disipada como calor, contribuyendo al incremento en temperatura de la celda. Como consecuencia, la eficiencia eléctrica cae (Platz et. al., 1997; Kalogirou 2006; Chow, 2010), pues la eficiencia de las celdas depende de las condiciones ambientales, y la temperatura de

operación juega un papel fundamental.

Desde hace tiempo que se viene estudiando diseños teóricos y experimentales para el enfriamiento de los paneles FV. Una de las soluciones más eficientes se basa en combinar un panel FV estándar con un intercambiador de calor con circulación de líquidos en un sistema híbrido fotovoltaico – térmico (PV/T). Con ello, es posible producir en simultáneo agua caliente de baja temperatura y electricidad, con una mejor eficiencia de conversión eléctrica. Un trabajo de Zondag et. al. (2003) reporta que, comparando resultados de un módulo convencional con un panel PV/T sin cubierta, y con un panel PV/T con cubierta, se obtienen eficiencias anuales medias de 6.6 %, 7.2% y 7.7%.

En este trabajo se analiza un modelo teórico de colector PV/T, basado en la resolución simultánea de un circuito térmico y un circuito de cinco parámetros característicos que representa la conversión fotoeléctrica. Se aplica el modelo a un colector de dimensiones y materiales similares al estudiado en Spertino et. al. 2016, resolviendo la simulación numérica en base horaria mediante Simusol, y se discuten los resultados obtenidos al estudiar el panel FV sin circulación de agua, con circulación de agua, y en el caso de operación al caudal óptimo de agua que maximice la eficiencia de conversión eléctrica.

Modelo Eléctrico:

El modelo eléctrico utilizado se basa en el estudio del conjunto de celdas mediante el empleo de cinco parámetros característicos: La corriente foto generada I_L , la corriente de saturación inversa I_0 , una resistencia en serie R_s , una resistencia de derivación o shunt R_{sh} , y un parámetro a , que representa el factor de idealidad modificado del diodo, que depende de la temperatura de la celda. La figura representa un esquema del circuito equivalente de una celda fotovoltaica en base al modelo de los cinco parámetros.

La principal ventaja de este modelo, es que permite estimar el comportamiento del panel a partir de los datos que brinda el fabricante en la hoja de especificaciones. Utiliza la radiación solar absorbida y la temperatura de celda combinadas en ecuaciones semi empíricas para predecir la curva I-V de la celda (y la potencia). Fue validado rigurosamente contra datos experimentales encontrando coincidencias muy buenas (De Soto et al, 2006).

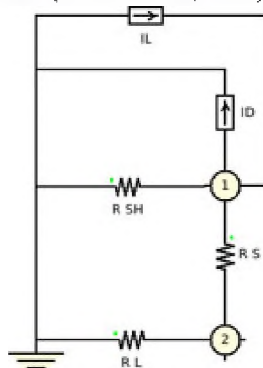


Figura 1: Circuito equivalente del modelo de los cinco parámetros para un panel fotovoltaico

Puesto que se necesita conocer cinco parámetros, se tiene que utilizar cinco condiciones distintas. Usualmente se encuentran en base a los tres puntos de la curva I-V del panel provistos por el fabricante (los que representan las condiciones de circuito abierto, corto circuito y máxima potencia), la condición de que la derivada de la potencia respecto al voltaje es cero en el punto de máxima potencia, y el coeficiente de variación del voltaje de circuito abierto con la temperatura (μ_{Voc}) en condiciones de corto circuito, circuito abierto y máxima potencia.

Las siguientes son las ecuaciones que representan con buena aproximación este comportamiento, halladas por Townsend y presentadas en Duffie y Beckman, 2013.

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{ref}} \quad (1) \quad I_D = I_0 \left[e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right] \quad (2)$$

$$R_s = \frac{a \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_L}\right) - V_{mp} + V_{OC}}{I_{mp}} \quad (3) \quad I_0 = \frac{qT}{qT_{ref}} \left[I_{Lref} + u_{isc}(T_c - T_{ref}) \right]$$

$$(4) \frac{I_0}{I_{0ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left[\frac{qV_{OC}}{a_{ref}} \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_c} \right) \right]} \quad (5) \quad \mu_{Voc} = \frac{dV_{OC}}{dT} \approx \frac{V_{OC}(T_2) - V_{OC}(T_1)}{T_2 - T_1}$$

$$(6) a_{cel} T_{PC} T_{TPU1} T_{ARC} (1 - \eta_{elec}) G = \frac{kTPU1}{esp_2} (T_{cel} - T_{TPU1}) + \frac{kTPU3}{esp_2} (T_{cel} - T_{TPU2})$$

$$(7) \quad \eta_{el} = \frac{P_{maxSC}}{G_{SC} A_{ef}} \left(1 - \gamma_{mp}(T_{cel} - T_{SC}) \right) \quad (8)$$

donde:

- I_D = corriente de diodo o corriente de oscuridad (A), I_L = corriente foto generada (A)
- I_0 = corriente inversa de saturación del diodo (A), R_s = resistencia serie (ohm)
- a = parámetro de ajuste de la curva (V), I_{sc} = corriente de cortocircuito (A)
- V_{oc} = tensión de circuito abierto (V), V_{mp} = tensión del punto de max pot(V)
- I_{mp} = corriente de máxima potencia (A), μ_{isc} = coef de temp de I de corto (A/K)
- μ_{voc} = coef de temp de V de circuito ab (V/K), γ_{mp} = coef de temp de Pmp(W/K)

ε = energía de banda prohibida (eV),	T_c = temperatura de la celda (K)
T_1, T_2 = temperaturas cercanas a T_c (K).	G = irradiancia (W/m^2)
N_s = número de celdas en serie,	Subíndice <i>ref</i> = de referencia
η_{el} = eficiencia de conversión eléctrica	Subíndice <i>SC</i> = de referencia

Modelo Térmico:

El modelo térmico se basa en calcular, mediante los balances de calor correspondientes, las temperaturas de las interfaces entre las distintas capas del colector. Se analiza el modelo térmico para dos casos: módulo FV sin circulación de agua, y FV con circulación de agua.

La figura 2 es un esquema de sección transversal del módulo FV, donde se muestran los flujos de calor de los que intervienen en los balances (azul). En rojo, los nodos de temperaturas de cada interfaz, y en negro, los nombres y coeficientes representativos en cada sección.

Panel FV sin circulación de agua: Para el análisis se realizarán las siguientes hipótesis:

- 1.- Flujo de calor a través del módulo PV estacionario.
- 2.- Se considerará unidimensional al flujo de calor, ya que cualquier gradiente significativo de temperatura existirá predominantemente en la dirección normal a las celdas FV.
- 3.- Las conductividades térmicas de las capas del módulo se consideraran constantes.
- 4.- Se supondrán despreciables las resistencias de contacto en las interfaces.
- 5.- En la celda FV, el espesor de la celda es despreciable, y de temperatura uniforme.
- 6.- Se considerarán despreciables las **absortancias** solares de la capa de poliuretano termoplástico (TPU) α_{TPU} y de las superficies de policarbonato α_{PC} .

Balance de calor en cubierta:

Interviene la pérdida de calor al ambiente por convección por viento, la pérdida de calor por radiación a cielo abierto, y la conducción en el policarbonato de la cubierta.

$$q_{cond,TPU2} = q_{glob,alv} = \frac{k_{TPU}}{esp_2} (T_{cel} - T_{TPU2}) = U_{alv} (T_{pot} - T_{TPU2}) \quad (9)$$

k_{PC} representa el coeficiente conductivo del policarbonato. La convección por viento se ha calculado por **Watmuff** et. al 1977, donde v es la velocidad del viento:

$$h_{viento} = 2.8 + 3v \quad (10)$$

La temperatura de cielo se ha estimado mediante **Notton et al., 2005:**

$$T_{cie} = 0.0552 T_{zmb}^{1.5} \quad (11)$$

Balance de calor en la interfaz policarbonato – TPU1:

En la interfaz cubierta-TPU, el flujo de calor es netamente conductivo:

$$q_{cond,cub} = q_{cond,TPU} = \frac{k_{PC}}{esp_1} (T_{TPU1} - T_{cub}) = \frac{k_{PC}}{esp_1} (T_{cel} - T_{TPU}) \quad (12)$$

Balance de calor en la celda:

En la celda, el recubrimiento anti **reflectivo** permite considerar a la celda como una superficie opaca, de tal manera que $\alpha_{cel}=1$. La radiación absorbida en la celda está determinada por la porción de la radiación incidente sobre la cubierta, quitando las pérdidas ópticas.

$$\alpha_{cel} \tau_{PC} \tau_{TPU1} \tau_{ARC} (1 - \eta_{elec}) G = \frac{k_{TPU1}}{esp_2} (T_{cel} - T_{TPU1}) + \frac{k_{TPU2}}{esp_2} (T_{cel} - T_{TPU2}) \quad (13)$$

donde η_{elec} es la eficiencia de conversión eléctrica, τ_{PC} , τ_{TPU1} , τ_{ARC} son las **transmitancias** de la cubierta de policarbonato, placa de TPU, y del tratamiento **antireflectivo**. α_{cel} es la **absortancia** de la celda, y k_{TPU} representa la conductividad de la placa de TPU.

Balance de calor en la interfaz TPU2 – policarbonato alveolar:

$$q_{cond,TPU2} = q_{glob,air} = \frac{k_{TPU}}{esp_2} (T_{cel} - T_{TPU2}) = U_{air} (T_{pol} - T_{TPU2}) \quad (14)$$

En el ducto de policarbonato alveolar no está circulando agua, solo se tiene aire. La resistencia térmica en el ducto es convectiva y siguiendo a Spertino et al (2016), se puede calcular como un coeficiente global, de valor aproximado $U_{air}=6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

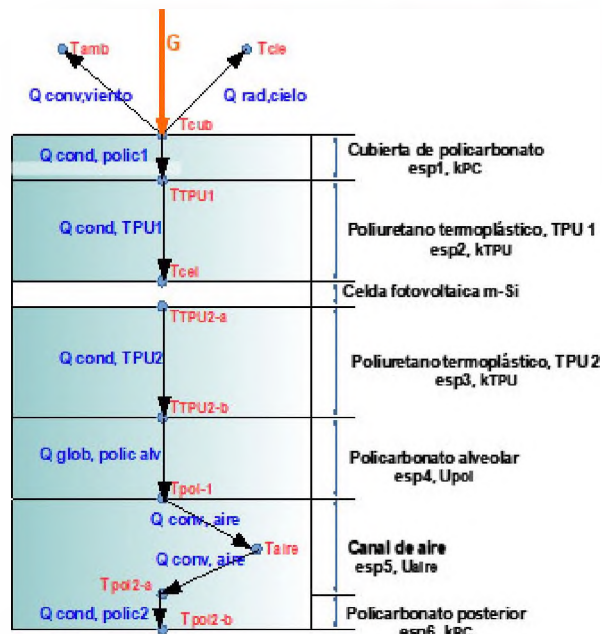


Figura 2: Sección transversal del módulo FV sin circulación de agua.

Balance de calor entre la cara inferior del policarbonato alveolar y el ducto de aire:

El balance de calor entre la capa de policarbonato alveolar y el ducto de aire inferior es:

$$q_{glob,air} = q_{glob,aire} = U_{air} (T_{pol} - T_{TPU2}) = U_{air} (T_{cubinf} - T_{air}) \quad (16)$$

Luego, en la interfaz policarbonato alveolar – cámara de aire, puede utilizarse la misma expresión que en el balance anterior donde toma un valor equiparable $U_{air}=12 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Balance de calor en la interfaz entre el aire del ducto y la cara interna de la cubierta posterior:

$$q_{glob,air} = q_{cond,pol2} = U_{air} (T_{air} - T_{pol2-a}) = \frac{k_{PC}}{esp_6} (T_{pol2-a} - T_{pol2-b}) \quad (17)$$

Panel FV con circulación de agua

Se va a suponer que el incremento de temperatura de agua se produce en la dirección del flujo (a lo largo del panel), por intercambio de calor con las secciones superiores del colector. Las hipótesis a considerar son similares a las tomadas para el módulo sin refrigerar.

Se van a despreciar los efectos de conducción en las laminas de policarbonato y la sección de TPU2, y entre las laminas de policarbonato y la cara adyacente al ducto de aire.

Balance de calor en el agua:

h_{agua} representa el coeficiente convectivo que se calcula en base al número de Nusselt, Nu , el cual se consideró fijo para un flujo laminar.

$$q_{conv,agua1} = q_{conv,agua2} = h_{agua}(T_{TPU2} - T_{agua}) = h_{agua}(T_{agua} - T_{pol1}) \quad (18)$$

Incropera 2006, indica que en estas condiciones Nu toma el valor 3,608 para recintos cuadrados. Como Reynolds se calcula en base al diámetro hidráulico de los alveolos, se tiene que h_{agua} toma valores entre 240 y 260 W/mK , para temperaturas de flujo entre 20 y 70 °C.

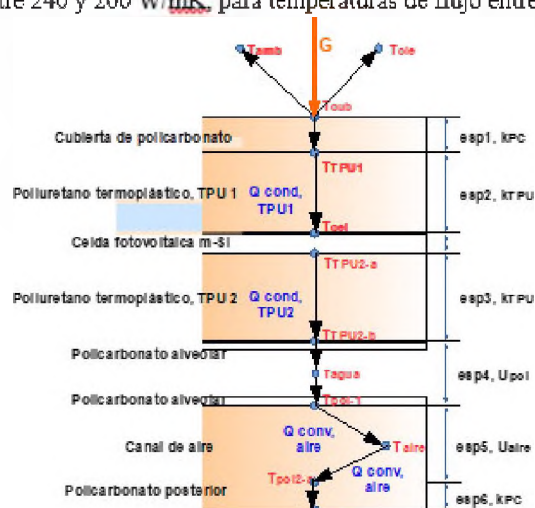


Figura 2: Esquema de secciones para el colector con circulación de agua en su parte posterior.

SIMULACIÓN DEL COLECTOR PV/T BAJO SIMUSOL

Usualmente los fabricantes de paneles no proveen información sobre las propiedades físicas de las capas que componen sus módulos FV, ya que se trata muchas veces de datos confidenciales. Debido a ello, se decidió seguir a Spertino, et. al., 2016, en donde se describen las propiedades térmicas de las diversas capas de un módulo comercial, de marca no detallada para preservar la confidencialidad de la información descrita. Se decidió simular un módulo FV de 40 celdas de silicio mono cristalino, 80 W_{pp} de potencia, y de 1,47 m x 0,6 m. Se supuso inclinación de 30° sobre la horizontal, y como localidad, Salta, Argentina.

Se realizó la simulación suponiendo un tiempo de 12 horas, suponiendo condiciones climáticas de un día claro de invierno en la localidad de Salta, Argentina (Lat: 24°47'18"S, Long: 65°24'38"O, 1180 $m.s.n.m$). La temperatura ambiente se varió entre una mínima de 17 °C y máxima de 23 °C, con pico a hs 13:00. Los valores de radiación directa, difusa de cielo y difusa de suelo se generaron mediante el software GEOSOL, para el día 21 de junio, en Salta, con 30° de pendiente y albedo de 0,3, mediante el método de estimación de día claro de Liu – Jordan. En base a ello, la radiación global sobre plano de colector presenta un pico de 950 W/m^2 , a horas 12:00. Por último, se consideró un valor de velocidad de viento promedio de 2 m/s.

Propiedad	Valor		
Cond de la cubierta de policarbonato (PC), k_{PC}	0,2 W/mK	Espesor de la placa trasera de PC, esp6	4 x 10 ⁻³ m
Conductividad de placa de TPU k_{TPU}	0,2 W/mK	Resistencia de shunt, $R_{sh}(\Omega)$	200
Espesor de la cubierta frontal de PC, esp1	0,375x10 ⁻³ m	Resistencia de cortocircuito, $R_{sc}(\Omega)$	7,64 x 10 ⁻³
Espesor de la placa frontal de TPU1 ,esp2	10 ⁻³ m	Factor de idealidad del diodo, $m(V)$	1,249
Espesor de la placa posterior de TPU2 ,esp3	1,5 x 10 ⁻³ m	Corriente foto generada a condiciones <i>estandard</i>	4,73
Esp de la placa de policarbonato alveolar, esp4	0,6 x 10 ⁻³ m	Corriente de diodo a condiciones <i>estandard</i> $I_{ph,SC}(A)$	9,2 x 10 ⁻⁸

Altura del ducto de agua	8,8 x 10 ⁻³ m	Coefficiente de variación de I_{sc} , α_p (A / °C)	0,038
Altura del canal de aire, esp ⁵	10-2 m	Corriente máxima, a condiciones estandard I_{mp} (A)	4,48
Pot máxima, a condiciones estandard P_{mp} (W)	87,61	Tensión máxima, a condiciones estandard V_{mp} (V)	19,57

Tabla 1: Parámetros físicos y eléctricos del colector analizado.

Simulación de colector sin refrigeración:

Se realizó una **primer simulación** del colector, sin circulación de agua, como referencia.

Simulación del colector con circulación de agua:

Se **discretizó** el volumen del colector para hallar los **gradientes térmicos** en sus distintas superficies. La **discretización** se realizó tomando cinco volúmenes de control, cada uno de dimensiones 0,6 m de ancho, 0,284 m de largo, y alto equivalente a la suma de los espesores y alturas de canales. Se supuso conectado al colector a un tanque de agua de 20 litros, convenientemente aislado.

Los ensayos se centraron en hallar el caudal óptimo que maximice la potencia eléctrica entregada por el colector. Una vez hallado el caudal, se realizó una segunda corrida a caudal constante, con objeto de conocer los gradientes de temperatura en las superficies del colector.

RESULTADOS:

Simulación sin flujo de agua:

En funcionamiento sin refrigeración, la máxima potencia entregada por el panel es de 74 W, al mediodía solar. En ese mismo instante, el voltaje y la corriente entregados son 19,28 V y 3,86 A. Se puede observar, comparando con la tabla de propiedades del panel, que estos valores son menores que los de condición de máxima potencia. En el mismo instante la temperatura de celda es máxima, con un salto de 30°C respecto a la temperatura ambiente.

No.	variable	val inicial	val final	val mínimo	val máximo
0	TIME Tiempo	0.00000E+00	4.32000E+04	0.0000E+00	4.3200E+04
1	VIN2 V2	1.62347E-03	-1.18179E-01	-1.1818E-01	1.9283E+01
2	PISAL PIsal	3.24694E-04	-2.36357E-02	-2.3636E-02	3.8567E+00
3	VINCEL Temp cel	1.12021E+01	1.32829E+01	1.1202E+01	5.6494E+01
4	ECIE Temp cie	4.93724E+00	4.92030E+00	4.9203E+00	7.3181E+00
5	EAMB Temp amb	2.00000E+01	1.99542E+01	1.9954E+01	2.6000E+01
6	PPOT Ppot	5.27132E-07	2.79324E-03	5.2713E-07	7.4369E+01

51 puntos de la solución calculados; STOP TIME EXCEEDED (NORMAL STOP)

Tabla 2: Resumen de resultados de simulación sin refrigeración.

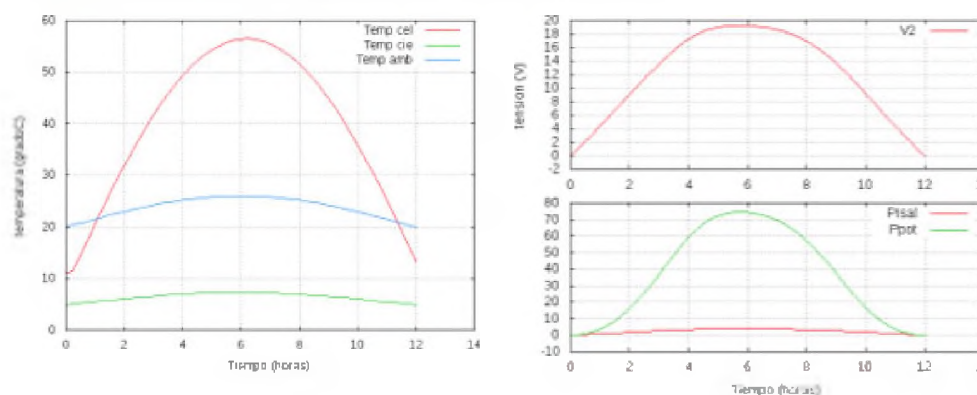


Figura 3: Temperaturas de celda, ambiente y cielo. Voltaje de salida y potencia entregada por el panel. Simulación sin flujo de agua.

Simulación del colector PVT con agua. Caudal óptimo.:

A continuación se reseñarán los resultados obtenidos en las simulaciones con caudal de flujo forzado, con valores de 1 y 15 litros/hora. En esta corrida, se evalúan los resultados de temperatura de celda cubierta, flujo y agua de tanque, además de la corriente y voltaje de salida, y la potencia entregada por el colector, donde:

1. temp 5t3: nodo 5 (temp celda) del tercer volumen de control (volumen central)
2. temp 3t3: nodo 3 (temp de cubierta) del tercer volumen de control (central)
3. temp 9t3: nodo 9 (temp de flujo de agua) del tercer volumen de control (central)
4. temp tan: nodo de temperatura de agua en tanque de reserva de 20 litros.
5. temp 14t5: fondo del colector, del tercer volumen de control (extremo de salida)
6. V2: voltaje de salida, en voltios. Ppot: potencia de salida del panel, en vatios
7. Ppsal: Representa la corriente de salida del panel, en amperes.

Los resultados indican que el caudal para los mejores resultados eléctricos es 1 l/h. Aunque no se muestran en este trabajo, los resultados a caudales más pequeños no representan mejora sustancial. Por otro lado, el incremento en caudales lleva a una disminución máxima en la potencia entregada a mediodía solar de 92.9 W a 82.3 W, aprox 10 W.

```

RERUN 0/5 (CAUDAL = 1 LITRO/h)
No.  variable val inicial val final val minimo val maximo
0  TIME Tiempo 0.00000E+00 4.32027E+04 0.00000E+00 4.3203E+04
1  VJN5T3 temp 5t3 1.56543E+01 1.31363E+01 1.3136E+01 5.5892E+01
2  VJN3T3 temp 3t3 1.52026E+01 1.28941E+01 1.2894E+01 5.2071E+01
3  VC2T3 temp 9t3 1.70000E+01 1.39467E+01 1.3947E+01 5.4843E+01
4  VCTAN temp tan 1.70000E+01 2.95654E+01 1.7000E+01 3.3193E+01
5  VJN1 temp 14t5 1.95782E+01 1.90205E+01 1.9020E+01 3.0206E+01
6  VJN2 V2 1.72170E-03 -1.23569E-01 -1.2357E-01 2.1549E+01
7  PPOT Ppot 5.92851E-07 3.05388E-03 9.4171E-08 9.2873E+01
8  PPSAL Ppsal 3.44340E-04 -2.47139E-02 -2.4714E-02 4.3098E+00
13059 puntos de la solución calculados; STOP TIME EXCEEDED (NORMAL STOP)
    
```

Tabla 3: Resumen de resultados con caudal de agua de 1 litro.

```

RERUN 2/5 (CAUDAL = 15 LITROS/h)
No.  variable val inicial val final val minimo val maximo
0  TIME Tiempo 0.00000E+00 4.32001E+04 0.00000E+00 4.3200E+04
1  VJN5T3 temp 5t3 1.56543E+01 2.01605E+01 1.4874E+01 5.2471E+01
2  VJN3T3 temp 3t3 1.52026E+01 1.93124E+01 1.4492E+01 4.8977E+01
3  VC2T3 temp 9t3 1.70000E+01 2.27796E+01 1.5742E+01 5.0810E+01
4  VCTAN temp tan 1.70000E+01 2.64377E+01 1.6511E+01 4.9551E+01
5  VJN1 temp 14t5 1.95782E+01 2.00906E+01 1.9458E+01 2.9540E+01
6  VJN2 V2 1.72170E-03 -1.27862E-01 -1.2786E-01 2.1004E+01
7  PPOT Ppot 5.92851E-07 3.26976E-03 1.9747E-09 8.8233E+01
8  PPSAL Ppsal 3.44340E-04 -2.55725E-02 -2.5573E-02 4.2008E+00
182301 puntos de la solución calculados; STOP TIME EXCEEDED (NORMAL STOP)
    
```

Tabla 4: Resumen de resultados con flujo de agua de 15 litros.

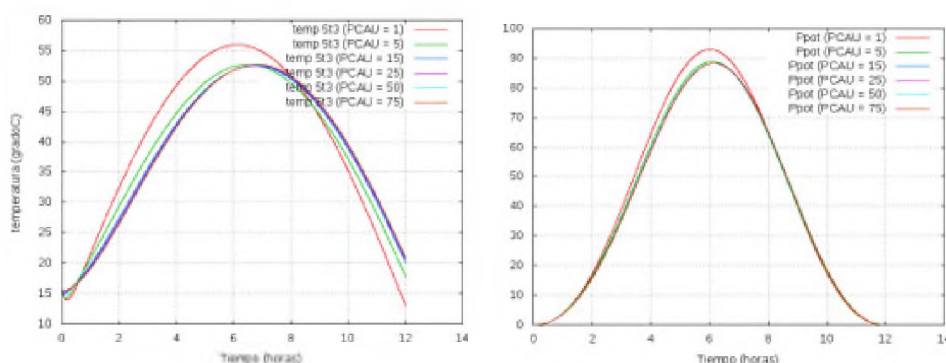


Figura 5: Temperatura de celda a distintos caudales. Figura 6: Potencia entregada a distintos caudales.

CONCLUSIONES:

Se ha estudiado un modelo termo eléctrico de colector FV/T basado en la resolución simultánea de un circuito de nodos de temperatura, y otro circuito que representa el comportamiento eléctrico. Se resuelve el modelo mediante una simulación numérica bajo Simusol, considerando un día de sol de invierno en la ciudad de Salta, Argentina. Se plantean dos escenarios: el primero simulando el colector en modo FV, sin la circulación de agua. En esa simulación se halla que la máxima potencia entregada por el panel es de 74 W, al mediodía solar. En ese mismo instante, el voltaje y la corriente entregados son 19,28 V y 3,86 A. Comparando con la tabla de propiedades del panel, estos valores son menores que los de máxima potencia. En el mismo instante la temperatura de celda es máxima, con un salto de 30°C respecto a la temperatura ambiente. Como siguiente paso, se evalúa el colector en funcionamiento como colector FV/T, con el objeto de hallar el caudal de agua que maximice la conversion eléctrica. Para ello se corren simulaciones parametrizadas por el caudal de agua circulante, con valores de 1,5,15,25,50 y 75 l/h. Los resultados simulados indican que el caudal para el cual se obtienen los mejores resultados eléctricos es 1 l/h, valor para el cual se pasa de una potencia máxima de 74.4 W a 92.9 W, lo que representa un incremento de hasta 25% en potencia máxima. A mismos valores, la temperatura de celda disminuye de 56.5 °C a 55.9 °C, con lo cual se puede considerar que no se registra un incremento sustancial de temperatura a pesar del incremento en potencia entregada. Para finalizar, se describe el comportamiento del colector al caudal mas favorable, 1 l/h, observando que los gradientes de temperatura en el panel son pequeños fuera de la zona del panel en contacto con la entrada de agua fría. Se prevéen realizar ensayos prácticos en un prototipo experimental, con el objetivo de validar el modelo descrito.

REFERENCIAS

- Chow, T.T., 2010. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Appl. Energy* 87, 365–379.
- Spertino et. al. Thermal–electrical model for energy estimation of a water cooled photovoltaic module. *Solar Energy* 133 (2016) 119–140.
- Platz et. al. 1997. Hybrid collectors using thin-film technology. *Proceeding of the Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE, Anaheim, California* pp. 1293–1296.
- Kalogirou, S.A., Tripanagnostopoulos, Y., 2006. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Convers. Manag.* 47, 3368–3382.
- De Soto W., Klein S. And Beckman W. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy* 80, pp. 78–88.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3a edición. pp. 768-780. Wiley Interscience. New York.