

EVALUACION DE DISTINTOS METODOS PARA ESTIMAR LA TEMPERATURA DE OPERACION DE MODULOS FOTOVOLTAICOS Y ESTIMACION DE LAS PERDIDAS DE ENERGIA POR EFECTO DE LA TEMPERATURA

Mario Battioni, Gustavo Risso, Miriam Cutrera, Javier Schmidt
IFIS Litoral – CONICET-UNL. Güemes 3450, 3000 Santa Fe
gusrisso@fiq.unl.edu.ar

Recibido 05/08/16, aceptado 03/10/16

RESUMEN: Debido a la incidencia de la temperatura de un panel fotovoltaico en su rendimiento energético, se compararon distintos modelos matemáticos que predicen en forma aceptable la temperatura final de un panel en función de las variables climáticas. Para ello se utilizaron los datos experimentales de una instalación fotovoltaica ubicada en la ciudad de Rosario, aplicando cinco modelos conocidos y evaluando cuál es el que mejor ajusta los valores reales medidos. Una vez elegido el modelo más adecuado, se hizo el cálculo de temperatura de operación de un panel en distintos puntos de la Provincia de Santa Fe para los cuales se cuenta con datos provenientes de la Red Solarimétrica. Se calcularon las energías teóricas generadas para condiciones estándar de temperatura, y las pérdidas de energía por efecto de la temperatura real de operación de los paneles.

Palabras clave: temperatura de panel, instalación fotovoltaica, potencia entregada, radiación solar.

INTRODUCCIÓN

Para obtener un buen rendimiento energético de una instalación fotovoltaica es necesario dimensionarla correctamente. Al momento de realizar los cálculos de la potencia real que entregará un grupo de paneles de una tecnología determinada, se deben analizar cuáles son las variables que influirán beneficiosamente o irán en detrimento del resultado esperado. El factor más importante en cuanto a la potencia entregada por el panel es la radiación solar en el plano, pero existe además otra variable que influye en la potencia generada, en este caso en forma negativa: la temperatura.

La potencia que entrega un módulo fotovoltaico se ve afectada significativamente por la temperatura., en celdas de silicio cristalino cae aproximadamente 0,4-0,5 %/°C; el voltaje de circuito abierto disminuye en el orden de 2,3 mV/°C, mientras que la corriente de cortocircuito aumenta solo ligeramente en valores que oscilan entre 0,05 y 0,07 %/°C (Goetzberger, 2005).

La eficiencia de una celda solar se mide generalmente bajo condiciones estándar (STC): temperatura de celda de 25 °C y radiación de 1000 W/m² con espectro AM1.5g, siendo estas condiciones muy difíciles de encontrar en instalaciones al aire libre. Se puede suponer que la temperatura de la celda fotovoltaica es la misma que la temperatura del módulo (Mattei *et al.*, 2006), la cual es muy variable en condiciones de intemperie. Como consecuencia de esto, observamos que existe un impacto importante en la eficiencia de la celda solar y por tanto en la producción de energía.

En un día de verano, libre de nubosidad y con poco viento, en el norte de la provincia de Santa Fe la temperatura de la celda puede llegar fácilmente a 60 °C. Como consecuencia de ello se producirá una disminución en el rendimiento, que según la tecnología con la que haya sido fabricado el panel puede estar en el orden del 10%.

El aumento de la temperatura está relacionado con factores ambientales tales como la temperatura ambiente y del suelo, la radiación solar y el viento. Además influyen los factores estructurales del panel como la geometría, tamaño, espesores, tipo de materiales encapsulantes, capas ópticas

antirreflectantes, etc. Por último, aunque en menor escala, podemos citar que la variación de la temperatura también está relacionada con el Efecto Joule a través de la generación eléctrica del panel. De los factores antes citados, los que tienen mayor preponderancia en el aumento de la temperatura son la radiación y la temperatura ambiente. En cuanto a la disminución de la temperatura del panel, la velocidad del viento es un elemento determinante (Romero, 1995).

Para el presente trabajo, se utilizan cinco modelos de cálculo de temperatura de celda, en los cuales están presentes variables como velocidad de viento, radiación, temperatura ambiente y características constructivas. Aplicando estos modelos a los datos obtenidos de una instalación fotovoltaica ubicada en la ciudad de Rosario (provincia de Santa Fe), en la cual se mide la temperatura real del panel y las variables atmosféricas, se encuentra el modelo que mejor describe las medidas experimentales de temperatura del panel. Definido el modelo, se realizan cálculos de las potenciales temperaturas que adquiriría un panel ubicado en distintas localidades de la provincia de Santa Fe. Este cálculo es posible dado que se cuenta con mediciones de radiación solar y de las variables atmosféricas en las cinco estaciones que forman la Red Solarimétrica de la Provincia de Santa Fe: Tostado, Reconquista, Elisa, Cañada Rosquín y Firmat. Finalmente, se compara la energía mensual que podría generar un panel típico de silicio policristalino ubicado en los cinco sitios mencionados, teniendo en cuenta los datos de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento.

METODOLOGÍA

Medidas e instrumentos.

Las medidas experimentales que son base para la predicción de la temperatura del panel, se hacen sobre un panel de silicio policristalino Modelo AS-6P18 de la Empresa Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., ubicado en la ciudad de Rosario, provincia de Santa Fe. El panel forma parte de una instalación de 15 kW_p conectada a la red, en condiciones de operación normal. Las mediciones se realizan las 24 hs, cada hora, con el siguiente equipamiento marca SMA Solar Technology AG:

- Velocidad del viento: Anemómetro Windsensor-IES101010 | 98-0025310 | Versión 1.0
- Radiación Solar: SUNNY SENSORBOX
- Temperatura: TempsensorAmb-IES110610 | 98-0042310 | Versión 1.0

En la Figura 1 se muestran las ubicaciones de las estaciones que conforman la Red Solarimétrica de la Provincia de Santa Fe.

Los instrumentos usados en las mediciones en las cinco estaciones son:

- Velocidad del viento: Anemómetro TECMES, Modelos TS231/2.
- Radiación Solar en el plano horizontal: Piranómetro Kipp & Zonen Modelo CMP6.
- Temperatura ambiente medida en el lugar: Sensor TECMES TS251-T

Las medidas se registran las 24 hs. cada 3 minutos.



Figura 1: Ubicación de las estaciones de la Red Solarimétrica de Santa Fe

Modelos teóricos.

En este estudio comparamos la temperatura real medida para un panel fotovoltaico con las predicciones de cinco modelos propuestos en la literatura. Nos focalizamos en el efecto refrigerante del viento sobre la temperatura de la celda de un panel fotovoltaico, aplicando los modelos propuestos por Skoplaki *et al.* (2008), Koehl *et al.* (2011), Mattei *et al.* (2006), Kurtz *et al.* (2009), como así también el método Standard (Markvart, 2000), que en este caso no contempla la velocidad del viento.

Aproximación Standard.

Este método, también denominado de la temperatura de operación nominal de la celda (T_{NOCT}), calcula la temperatura de la celda (T_C) con la siguiente fórmula:

$$T_C = T_a + \frac{I}{I_{NOCT}} * (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}), \quad (1)$$

donde T_a es la temperatura ambiente e I es la radiación incidente en el plano del panel. T_{NOCT} se mide con una radiación incidente I_{NOCT} de 800 W/m^2 , una temperatura ambiente $T_{a,NOCT}$ de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y una velocidad del viento de 1 m/s . La T_{NOCT} es un dato provisto por el fabricante del panel fotovoltaico, que depende de la tecnología con la que ha sido construido pero que generalmente ronda los $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Modelo de Skoplaki.

Skoplaki *et al.* sugieren un modelo en el que se contempla, además de la temperatura ambiente y la radiación en el plano, la velocidad del viento y propiedades específicas de la celda tales como eficiencia (η), coeficiente de temperatura de máxima potencia (β), transmitancia de la cobertura superficial (τ), y el coeficiente de absorción de la celda (α).

$$T_C = T_a + \frac{I}{I_{NOCT}} * (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) * \frac{h_{w,NOCT}}{h_w(v)} * \left[1 - \frac{\eta_{STC}}{\tau * \alpha} (1 - \beta_{STC} T_{STC}) \right] \quad (2)$$

η_{STC} y β_{STC} son la eficiencia y el coeficiente de temperatura de máxima potencia en condiciones estándar: radiación de 1000 W/m^2 , temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, espectro AM1.5g. Los valores de η_{STC} y β_{STC} dependen de la tecnología del panel fotovoltaico y se encuentran tabulados (Skoplaki *et al.*, 2008). Para el producto $\tau * \alpha$, se toma el valor 0.9 normalmente estimado, h_w es un coeficiente de convección relacionado por una función lineal con la velocidad del viento. En nuestro caso usamos:

$$h_w = 5.7 + 2.8 * v_w, \quad (3)$$

donde v_w es la velocidad local del viento cerca del módulo. $h_{w,NOCT}$ resulta de reemplazar en la fórmula anterior $v_w = 1 \text{ m/s}$.

Modelo de Koehl.

Koehl *et al.* usan un modelo empírico más simple, donde para estimar la temperatura de celda T_C utilizan los valores de la radiación I en el plano, la temperatura ambiente T_a y la velocidad del viento cercana a la superficie del panel, v_w .

$$T_C = T_a + \frac{I}{U_0 + U_1 * v_w} \quad (4)$$

Los coeficientes de transferencia U_0 y U_1 utilizados en la aplicación del método fueron extraídos de la publicación Koehl *et al.* (2011) y estos son valores específicos en función de la tecnología del panel.

Modelo de Mattei.

Mattei *et al.* proponen la siguiente expresión para el cálculo de la temperatura de celda:

$$T_C = \frac{U_{PV}(v) * T_a + I * [\tau * \alpha - \eta_{STC} (1 - \beta_{STC} T_{STC})]}{U_{PV}(v) + \beta_{STC} * \eta_{STC} * I} \quad (5)$$

Los parámetros η_{STC} y β_{STC} son los mismos del modelo de Skoplaki, y el valor de $\alpha * \tau = 0.81$. $U_{PV}(v)$ es un coeficiente de intercambio de calor y Mattei *et al.* lo consideran:

$$U_{PV}(v_w) = 26.6 + 2.3 v_w \quad (6)$$

Modelo de Kurtz.

Con este método podemos calcular la temperatura de la celda mediante la ecuación:

$$T_C = T_a + I * e^{-3.473 - 0.0594 * v_w} \quad (7)$$

Hay que destacar que en este método no se contempla la tecnología del panel.

Evaluación de los Modelos.

Los coeficientes de eficiencia η_{STC} y β_{STC} fueron obtenidos de la ficha técnica de los paneles instalados en la Estación en estudio. Se calculó la temperatura del panel con los cinco modelos propuestos para cada uno de los datos originales, y se comparó el resultado con la temperatura real del panel medida con una termocupla adherida a la parte posterior del mismo. Se usaron las mediciones diarias tomadas cada hora (promedio horario) para los meses de agosto de 2015 a mayo de 2016, lo que representa un total de 7300 datos aproximadamente.

A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se detallan las medidas registradas en la planta fotovoltaica de la ciudad de Rosario para el día 26 de Enero de 2016. Los datos medidos son: temperatura ambiente, temperatura del panel, velocidad del viento a la altura del panel y radiación en el plano del panel.

Hora	T_a (°C)	T_C (°C)	v_w (m/s)	I (W/m ²)
01:00	25,34	23,77	0,4	0
02:00	25,29	23,37	0,63	0
03:00	25,15	23,5	0,47	0
04:00	25,38	23,75	0,37	0
05:00	24,02	22,12	0,28	0
06:00	22,93	20,67	0,19	0
07:00	22,87	21,31	0,51	4,64
08:00	25,48	24,85	0,09	92,73
09:00	29,85	34,53	0,04	342,27
10:00	30,01	41,47	0,18	630,09
11:00	29,95	45,25	0,56	873
12:00	30,71	49,32	0,73	1089,18
13:00	32,79	51,82	0,55	1024,09
14:00	33,19	53,02	0,72	1189,09
15:00	33,38	50,78	0,91	1057,18
16:00	33,91	50,94	0,6	945,82
17:00	32,52	44,94	0,78	633,64
18:00	30,5	37,13	0,95	310,18
19:00	28,43	27,77	1,01	57,18
20:00	27,71	26,22	0,78	37,18
21:00	26,52	24,11	0,56	3,36
22:00	25,58	23,13	0,91	0
23:00	24,81	22,52	1,44	0
00:00	24,36	21,88	1,26	0

Tabla 1: Medidas experimentales 26/01/2016

En la Figura 2 se compara el valor real con los resultados de los cinco modelos presentados previamente, incluyéndose también la temperatura ambiente como referencia. En la Tabla 2 se presenta la temperatura medida experimentalmente y el resultado predicho por los distintos modelos. La calidad de la aproximación la dan el coeficiente de correlación lineal R^2 y el error cuadrático medio (RMSE).

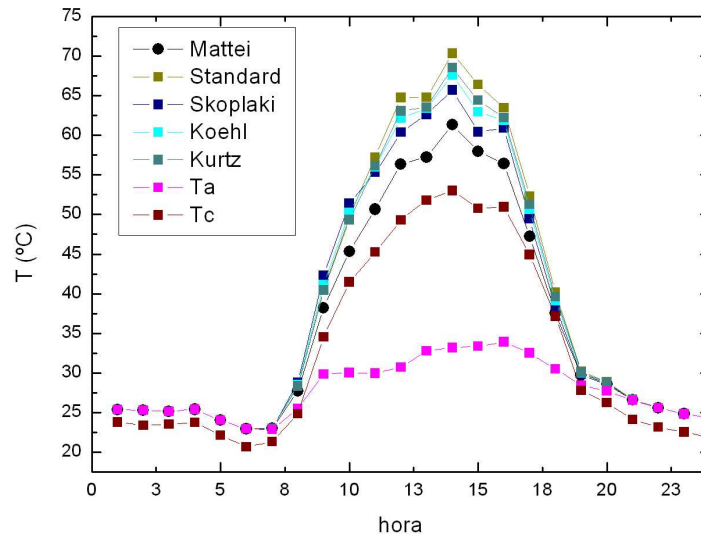


Figura 2: Comparación de los cinco modelos con T_a y T_c .

Hora	T_c	Mattei	Standard	Skoplaki	Koehl	Kurtz
01:00	23,77	25,34	25,34	25,34	25,34	25,34
02:00	23,37	25,29	25,29	25,29	25,29	25,29
03:00	23,5	25,15	25,15	25,15	25,15	25,15
04:00	23,75	25,38	25,38	25,38	25,38	25,38
05:00	22,12	24,02	24,02	24,02	24,02	24,02
06:00	20,67	22,93	22,93	22,93	22,93	22,93
07:00	21,31	22,97	23,01	23,00	23,00	23,00
08:00	24,85	27,71	28,37	28,76	28,51	28,34
09:00	34,53	38,21	40,54	42,27	41,15	40,44
10:00	41,47	45,34	49,70	51,44	50,23	49,34
11:00	45,25	50,65	57,23	55,29	55,98	56,14
12:00	49,32	56,34	64,74	60,39	62,18	63,06
13:00	51,82	57,27	64,79	62,64	63,38	63,53
14:00	53,02	61,34	70,34	65,71	67,61	68,53
15:00	50,78	57,94	66,41	60,42	62,96	64,45
16:00	50,94	56,40	63,46	60,95	61,90	62,22
17:00	44,94	47,22	52,32	49,48	50,66	51,28
18:00	37,13	37,52	40,19	38,33	39,11	39,59
19:00	27,77	29,70	30,21	29,84	30,00	30,10
20:00	26,22	28,55	28,87	28,70	28,77	28,81
21:00	24,11	26,59	26,62	26,61	26,62	26,62
22:00	23,13	25,58	25,58	25,58	25,58	25,58
23:00	22,52	24,81	24,81	24,81	24,81	24,81
24:00	21,88	24,36	24,36	24,36	24,36	24,36
	R^2	0,993	0,990	0,988	0,991	0,991
	RMSE	14,868	62,154	39,560	46,888	50,613

Tabla 2: Temperatura del panel medida y calculada. R^2 y RMSE.

En la Figura 3 se presenta el factor R^2 calculado para los distintos modelos a lo largo de Agosto 2015 a Mayo 2016

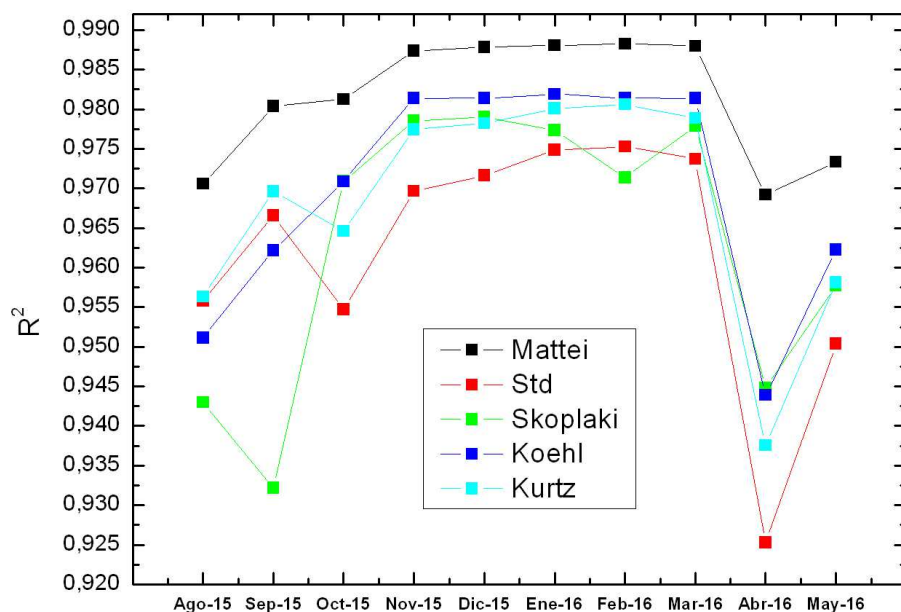


Figura 3: Valor mensual de R^2 para los cinco modelos.

A partir de los valores del factor R^2 de la Figura 3, y del Error Cuadrático Medio de la Tabla 2, vemos que el mejor ajuste se obtiene con el modelo de Mattei *et al.* Esto también se aprecia en el ejemplo de la Figura 2.

Una vez establecido que el modelo de Mattei es el que más se acerca a los datos medidos para el caso de la instalación en Rosario, se calculó la potencial temperatura que adquirirían esos mismos paneles ubicados en las cinco localidades de la provincia de Santa Fe que conforman la Red Solarimétrica. Debido a que en las Estaciones de la Red Solarimétrica la radiación solar se mide en el plano horizontal, y a fin de aplicar el modelo teórico que utiliza la radiación en el plano del panel, la radiación medida en el plano horizontal se corrigió mediante las tablas de CLEANERGYSOLAR del Factor de corrección K para superficies inclinadas (www.cleanergysolar.com).

Aplicación del Modelo.

Utilizando el Modelo de Mattei *et al.* se calculó la temperatura de panel para cada momento del día en cada una de las cinco localidades en estudio, para los meses de Enero de 2015 a Junio de 2016. Se supone para este caso, que el panel es el mismo que se usa en la instalación de Rosario, de tecnología policristalina, cuya Potencia Nominal es de $145 W_p$ y el coeficiente de variación de potencia con la temperatura es de $-0.43 \%/^{\circ}C$.

Dado que la época del año de mayor interés es de Noviembre a Marzo por la alta temperatura ambiente en ese período, se enfocó el análisis en estos meses. Teniendo en cuenta el efecto de la radiación medida y de la temperatura de panel calculada con el modelo de Mattei (a partir de la temperatura ambiente y la velocidad del viento medidas), se calculó el rendimiento que tendría un panel como el antes mencionado en cada una de las localidades.

En la Figura 4 se muestra el cálculo de la potencia instantánea entregada por un panel de $145 W_p$ a lo largo de un día despejado de Diciembre de 2015 para la localidad de Elisa. El cálculo se realiza para el panel a una temperatura de $25^{\circ}C$ y a la temperatura que alcanzaría en condiciones reales de operación. Realizando este mismo cálculo para cada día de Noviembre de 2015 a Marzo de 2016, y para cada una de las cinco localidades, se procesaron aproximadamente 14000 datos debido a la frecuencia de medición.

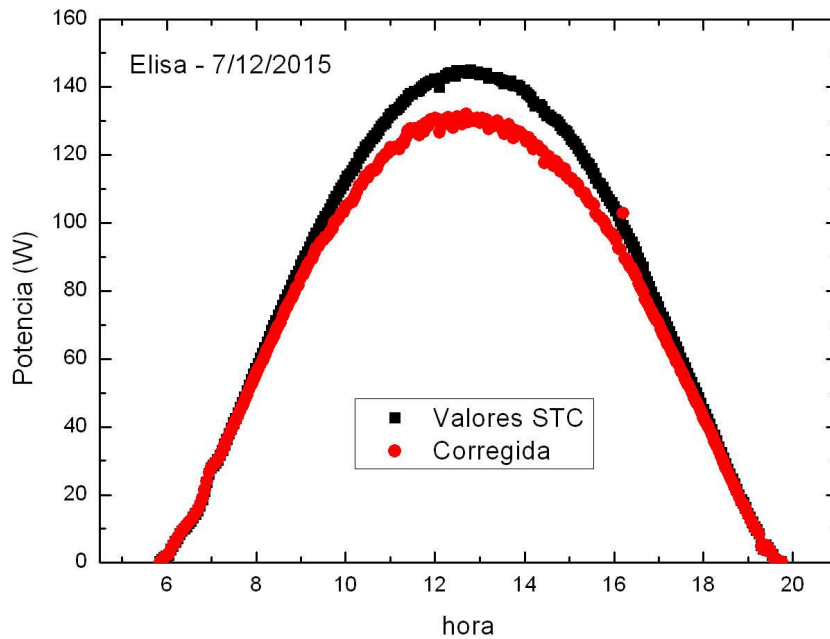


Figura 4: Comparación de la potencia instantánea entregada por un panel ubicado en la localidad de Elisa para un día despejado de Diciembre de 2015

Las figuras 5 a 9 muestran la energía total generada mensualmente por un panel de silicio policristalino de 145 W_p ubicado en cada una de las cinco localidades, tanto si estuviese a la temperatura estándar como a la temperatura real de operación.

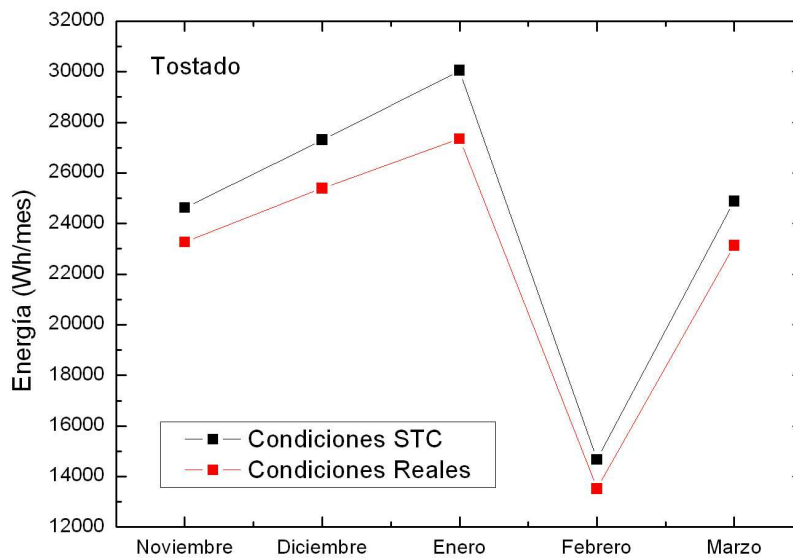


Figura 5: Energía mensual generada por un panel de 145 W_p ubicado en Tostado

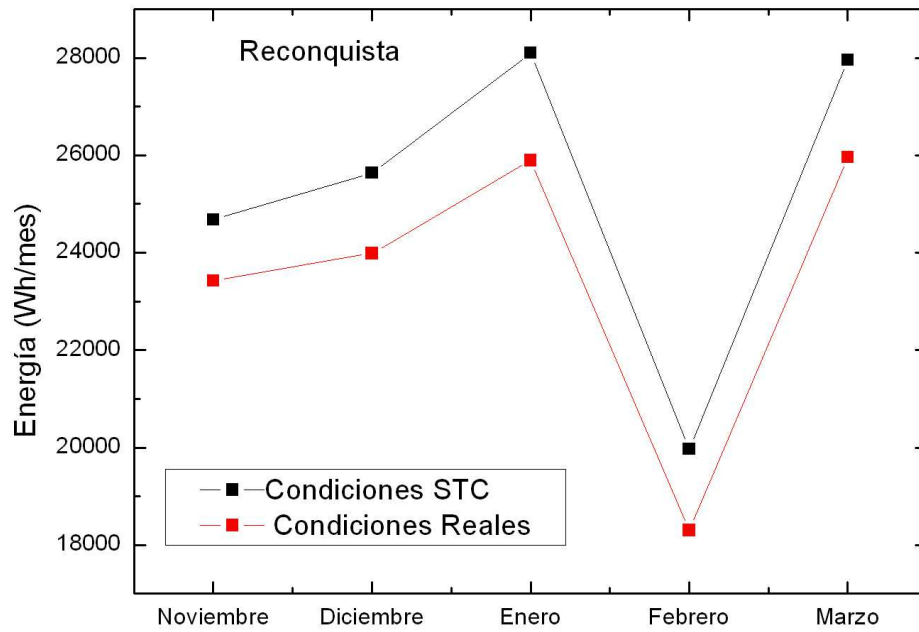


Figura 6: Energía mensual generada por un panel de $145 W_p$ ubicado en Reconquista

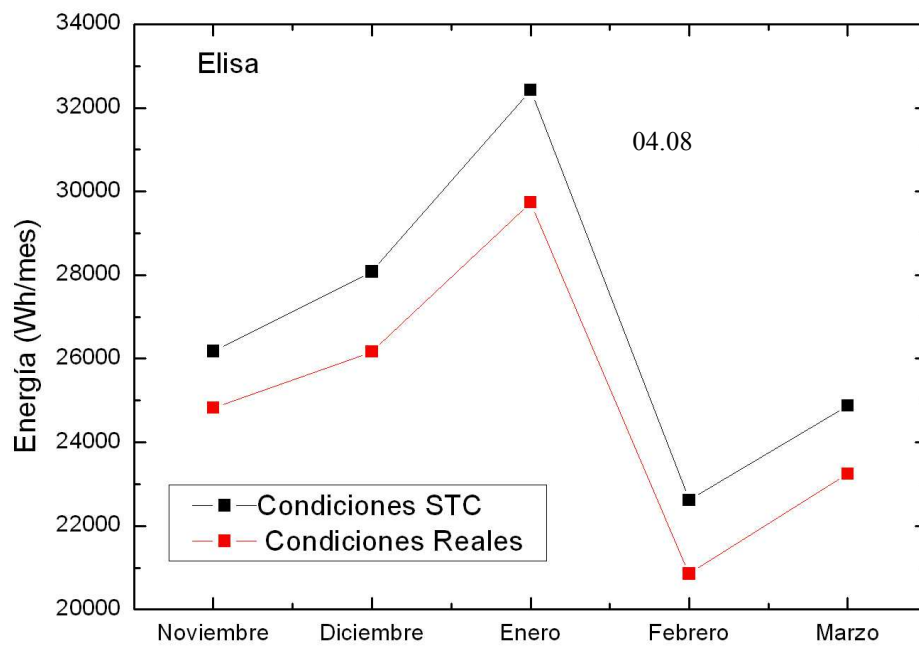


Figura 7: Energía mensual generada por un panel de $145 W_p$ ubicado en Elisa

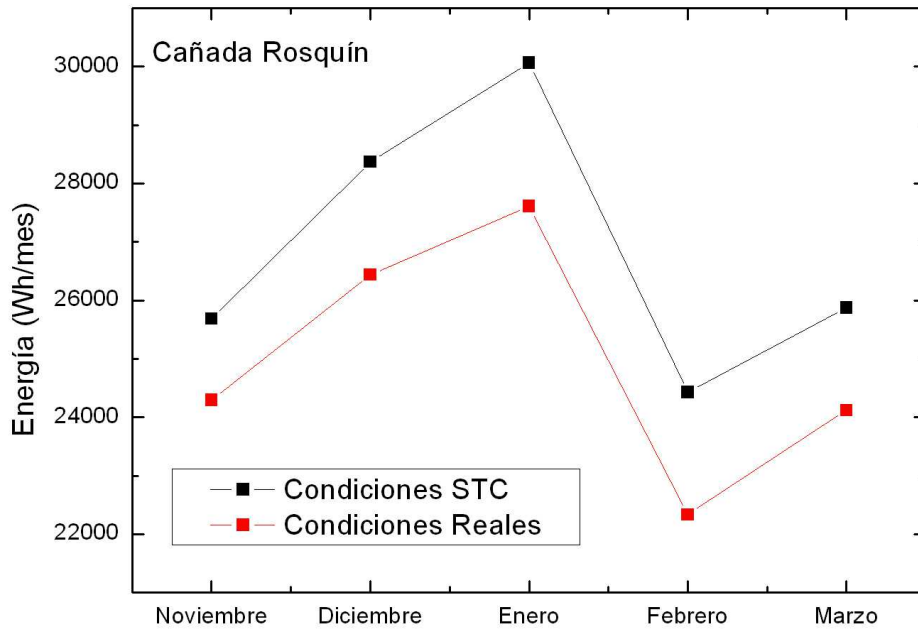


Figura 8: Energía mensual generada por un panel de 145 W_p ubicado en Cañada Rosquín

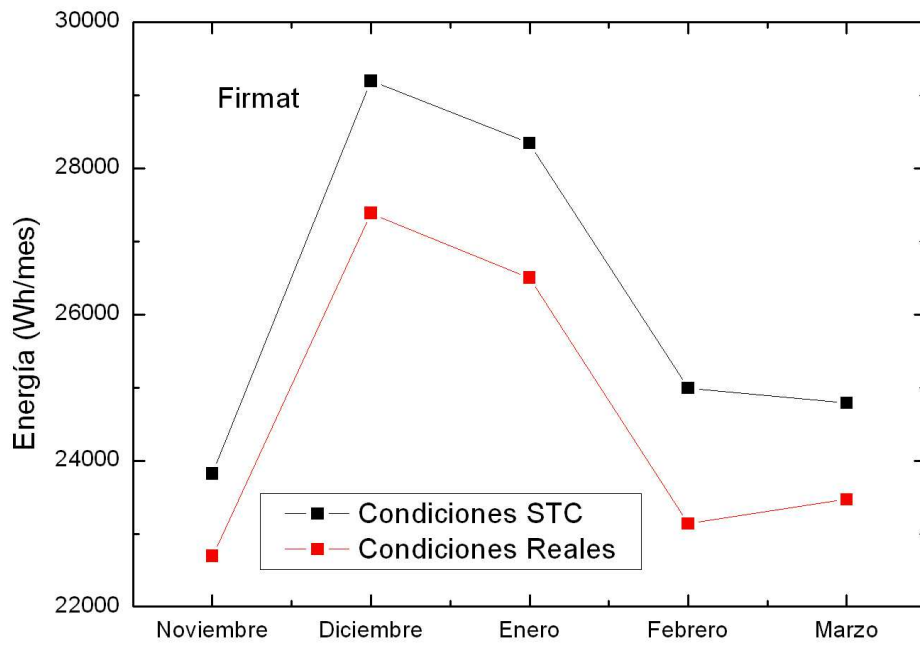


Figura 9: Energía mensual generada por un panel de 145 W_p ubicado en Firmat

En la Tabla 3 se presenta un cálculo de la energía total generada en los cinco meses considerados por un panel de silicio policristalino de $145 W_p$ ubicado en cada una de las cinco localidades. El cálculo se realiza para el panel a la temperatura estándar de $25\text{ }^\circ\text{C}$ y a la temperatura de operación predicha por el modelo de Mattei *et al.* También se calcula en cada caso la pérdida porcentual de energía generada.

Localidad	Energía Generada en condiciones STC [kWh]	Energía generada en condiciones reales [kWh]	Pérdida porcentual de energía generada
Tostado	121,6	112,7	7,3
Reconquista	126,3	117,6	6,9
Elisa	134,2	124,8	7,0
Cañada Rosquín	134,4	124,8	7,2
Firmat	131,1	123,2	6,1

Tabla 3: Energía total generada en cinco meses por un panel de $145 W_p$ ubicado en cada una de las cinco localidades, en condiciones de temperatura estándar y a la temperatura real de operación, y pérdida de energía por el efecto de la temperatura

Del análisis de las Figuras 5 a 9 y de la Tabla 3 se observa que la temperatura posee un efecto importante sobre el rendimiento de un panel fotovoltaico, provocando pérdidas en la energía generada de entre 6,1 y 7,3 % en los casos estudiados. Respecto de la energía generada en condiciones de STC, vemos que para estos meses de Noviembre a Marzo las localidades ubicadas en el centro-sur de la Provincia de Santa Fe presentan una generación de energía ligeramente mayor que las del norte (10 % mayor en Cañada Rosquín que en Tostado). Esta diferencia se mantiene luego de la corrección por efecto de la temperatura. La pérdida de energía por efecto de la temperatura es bastante pareja en todas las localidades del centro-norte (entre 6,9 y 7,3 %), mientras que Firmat (sur) se distingue con una menor pérdida de energía de 6,1 %. En este último caso, la menor temperatura de los paneles prácticamente compensa la menor insolación respecto de localidades como Cañada Rosquín o Elisa. Si se analiza con un poco más de detalle la causa de la menor pérdida de energía en Firmat, se encuentra que el origen está en la menor temperatura ambiente medida en esta localidad, ya que los valores promedio de velocidad del viento son similares a las registradas en las otras localidades.

CONCLUSIONES

Encontramos que el método propuesto por Mattei *et al.* (2006) es el que mejor ajusta los valores experimentales medidos de temperatura del panel para la región central del país. Este método tiene en cuenta la influencia de la radiación y de las variables ambientales temperatura ambiente y velocidad del viento. El método estándar de estimación de la temperatura de un panel (basado en la T_{NOCT}) puede dar valores que están hasta $20\text{ }^\circ\text{C}$ por encima de las temperaturas medidas, lo cual sobre-estimaría la pérdida por temperatura en la energía generada.

Con la tecnología de paneles de Silicio policristalino estudiada y para el período de tiempo considerado, la pérdida por efecto de la temperatura en la energía generada por un panel es de alrededor del 7 % para la región centro-norte santafesina, y cae al $\sim 6\%$ para la región sur. Respecto de la energía total generada en condiciones reales de operación, las diferencias entre las localidades consideradas no sobrepasan el 10 %. Sin embargo, para obtener datos más concluyentes este estudio debería extenderse a un período de tiempo mucho más largo, teniendo en cuenta la dispersión interanual de la radiación solar.

Contando con series de datos confiables de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento, el método propuesto en este trabajo permite calcular la potencia a instalar considerando el efecto de la temperatura de los paneles, y eventualmente seleccionar la tecnología de fabricación que mejor se adapte al régimen de temperaturas del lugar donde se instalarán.

NOMENCLATURA

T_a :	temperatura ambiente
I :	radiación en el plano del panel
T_{NOCT} :	temperatura de operación nominal de la celda
I_{NOCT} :	800 W/m^2
$T_{a, NOCT}$:	$20\text{ }^\circ\text{C}$

v_w : velocidad del viento cercana a la superficie del panel.

REFERENCIAS

A. Goetzberger, V.U. Hoffmann (2005). *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer-Verlag, Berlin, Cap. 3.

Mattei M, Notton G, Cristofari G, Muselli M, Poggi P. (2006). Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. *Renew Energ*; 31, 553-567.

Romero F. C. (1995). Cálculo de la Temperatura de Operación de Células Solares en un Panel Fotovoltaico Plano, Depósito Legal: M -14226-1995 ISSN: 1135-9420 ÑIPO: 402-02-001-x

Skoplaki E, Boudouvis AG, Palyvos JA. (2008). A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Sol Energ Mat Sol C*; 92, 1393-1402.

Koehl M., Heck M., Wiesmeier S., Wirth J. (2011). Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering. *Sol Energ Mat Sol C*; 95, 1638-1646.

Kurtz S., Whitfield K., Miller D., Joyce J., Wohlgemuth J., Kempe M. (2009). Evaluation of high-temperature exposure of rackmounted photovoltaic modules. In: 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). 2399-2404.

Markvart T (2000). *Solar electricity*. 2nd edition. Chichester: Wiley;

ABSTRACT:

Due to the influence of the temperature of a photovoltaic panel on its energy efficiency, different mathematical models that acceptably predict the final temperature of a panel depending on climatic variables were compared. For this purpose, experimental data taken from a photovoltaic system located in the city of Rosario were used, applying five known models and evaluating which one provides the best fit to the actual measured values. After choosing the most appropriate model, the operating temperature of a panel located at different points of the Santa Fe Province - for which data from the Solarimetric Network are available - was calculated. The theoretical energy generated at standard temperature conditions, and the energy losses due to the actual operating temperature of the panel, were calculated.

Keywords: panel temperature, photovoltaic system, power delivered, solar radiation.