

## ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO MEDIANTE UN MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR AJUSTADO A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA

Orlando Miguel González López<sup>1</sup>, orlandogonzalezlopez@gmail.com

Eifren David Fernández Ballesteros<sup>1</sup>, eifrendfernandez@gmail.com

Mario Andrés Palacio Vega<sup>2</sup>, mario.palaciov@upb.edu.co

Rafael David Gómez Vásquez<sup>2</sup>, rafael.gomezv@upb.edu.co

<sup>1</sup>Estudiante Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana Montería.

<sup>2</sup>Docente Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana Montería.

### 1. INTRODUCCIÓN.

El desarrollo del modelo en este trabajo se centra en un enfoque novedoso para la determinación de la temperatura de un panel fotovoltaico en diversas condiciones de irradiación en el departamento de Córdoba, Colombia. Esta región se caracteriza por su influencia de viento en calma, la temperatura ambiental elevada (31 °C promedio) y alta humedad (80%), dichos valores no corresponden a los usados por los fabricantes de células fotovoltaicas, ya que mucho de estos evalúan el rendimiento de un panel en condiciones estándar propuestas por ellos (Temperatura 25 °C; irradiación de 1000 W / m<sup>2</sup>). Dada esta razón el modelo térmico desarrollado en este estudio emplea un análisis de transferencia de calor con el fin de estimar la temperatura de sistemas solares fotovoltaicos en la región cordobesa, debido al efecto que causa las variaciones de esta, en el rendimiento de un módulo PV.

El modelo de transferencia de calor analiza un panel solar expuesto a la radiación y convección natural mediante la aplicación de un balance energético usando la primera ley de la termodinámica, que tuvo en cuenta la energía de radiación del sol que incide sobre el panel y la energía que emana de la célula fotovoltaica a través de la convección natural y radiación. Sin embargo, para calcular la temperatura de la superficie del panel es necesario determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección, para la convección natural de la ley de enfriamiento de Newton. Por lo tanto, el número de Grashof, que representa los efectos de flotabilidad debido a la

convección natural, se empleó para calcular el coeficiente de transferencia de calor por las relaciones entre el número de Nusselt y el número de Rayleigh que son parámetros adimensionales.

Se desarrolló un proceso experimental con el fin de establecer una correlación empírica específica entre el número de Nusselt y Rayleigh para paneles fotovoltaicos estáticos con una inclinación de 0° que están sometidos la mayor parte del tiempo a convección natural

### 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.

El rendimiento de un panel solar fotovoltaico está determinado por varios factores, uno de ellos es la temperatura superficial, la cual se ve alterada por la radiación solar y variables ambientales. A medida que la temperatura superficial aumenta, el panel disminuye su rendimiento, siendo esta un obstáculo para la evaluación del verdadero potencial de futuras plantas energéticas y futuras investigaciones en la región.

Por esta razón se considera pertinente estudiar variables como la temperatura superficial de un panel solar, teniendo en cuenta las condiciones de operación a las cuales está sometido. Si bien el departamento cordobés se encuentra en la costa norte de Colombia y se caracteriza por la influencia de vientos calmados, alta temperatura ambiente (31 °C Promedio) y alta humedad (80%), Dichos valores no corresponden con las condiciones de ensayo a las que son sometidas las células fotovoltaicas por

parte de los fabricantes. Puesto que normalmente, para determinar la temperatura de operación, se hace uso de correlaciones matemáticas, las cuales pueden ser explícita o implícita, para lograr establecer *TPV*.

Un procedimiento implícito para estimar la temperatura de funcionamiento requiere el uso de la denominada Temperatura Nominal de Operación de la Celda (NOCT) por su sigla en inglés, que en este caso se define como la temperatura del panel fotovoltaico en la condición ambiental nominal terrestre (NTE): temperatura ambiente de 20 °C, una velocidad media del viento de 1 m/s, irradiancia de 800 W/m<sup>2</sup>, carga eléctrica cero, y libre de montajes orientadas perpendicularmente al “mediodía solar”. Por lo tanto, el empleo de la (NOTC), creará alta divergencia entre el comportamiento real de un panel fotovoltaico y el rendimiento calculado en condiciones normales por el fabricante. Por ello hace falta realizar una metodología que permita determinar la temperatura superficial de un panel solar en tiempo real y no con estas condiciones.

### 3. OBJETIVOS

#### OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo matemático que permita determinar la temperatura superficial de un panel solar fotovoltaico, aplicando los principios de la transferencia de calor para las condiciones de operación del departamento de Córdoba.

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un modelo matemático de transferencia de calor para determinar la temperatura superficial de un panel solar fotovoltaico.
- 
- Validar el modelo matemático experimentalmente a través de la operación de un panel solar fotovoltaico.
- Optimizar el modelo matemático mediante factores de ajuste obtenidos a partir de la validación experimental.

### 4. REFERENTE TEÓRICO.

Para empezar, toda la radiación viaja a la velocidad de la luz lo que corresponde al productor de la longitud de onda y la frecuencia de la radiación o al cociente obtenido de la velocidad de la luz en el vacío dividido por el índice de refracción del medio a través del cual viaja:

$$c = \lambda \nu = \frac{c_0}{n}$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda en metros (o micrómetros [m], 1 micra = 10<sup>-6</sup> m),  $\nu$  es la frecuencia (en s<sup>-1</sup>),  $c$  es la velocidad de la luz en un medio (m/s),  $c_0$  es la velocidad de la luz en el vacío (m/s), y  $n$  es el índice de refracción del medio.

El Sol es una esfera con un diámetro de 13,9x10<sup>5</sup> kilómetros (aproximado), compuesta de muchas capas de gases, los cuales se cree son progresivamente más caliente hacia su centro. De la capa más externa se irradia la energía hacia el sistema solar, la cual tiene una temperatura aproximada de 5760 K (10.400 ° R). El centro del sol, sin embargo, puede estar a 20x10<sup>6</sup> K. (Goswami D. Y., 2015). El Sol emite energía a razón de 3,8x10<sup>23</sup> kW, que resulta de la conversión de 4,3x10<sup>9</sup> g/s de masa a energía. De este total, sólo una fracción muy pequeña, alrededor de 1,7x10<sup>14</sup> kW, es interceptado por la tierra, que se encuentra aproximadamente 150 millones de kilómetros del Sol. La energía solar es la fuente energética permanente más abundante del mundo. La cantidad de energía solar interceptada por el planeta tierra es 5000 veces mayor que la suma de las energías (nuclear terrestre, geotérmica, energías gravitacionales y la energía gravitatoria lunar). De esta cantidad, el 29% se refleja al espacio, 48% se convierte en calor de baja temperatura y la radiación de retorno al espacio, el 23% alimenta el ciclo de evaporación / precipitación de la biosfera, menos de 0,5% está representado en la energía cinética del viento - olas y en el almacenamiento de fotosíntesis en las plantas. (Goswami D. Y., 2015). Sabemos que continuamente llega energía del sol al planeta Tierra a razón de 1,7x10<sup>14</sup> kW, y la demanda energética per cápita puede llegar a ser de 10 kW en una población de 10 mil millones de habitantes

ocasionando una demanda energética mundial de  $10^{11}$  kW, por tanto si se aprovechara el 1% de la irradiancia<sup>1</sup> convirtiéndola en energía útil con una eficiencia del 10%, la energía solar podría satisfacer las necesidades energéticas de todas las personas en la Tierra, sin embargo el aprovechamiento de esta energía aun presenta limitaciones económicas y técnicas. (Goswami, Kreith, & Kreider, 2000)

Una correlación explícita semi-empírica fue propuesta por (Skoplaki, Boudouvis, & Palyvos, 2008) para módulos en condiciones de montaje arbitraria. La temperatura de la célula fotovoltaica y la eficiencia correspondiente se consiguen mediante la introducción de un parámetro adimensional de montaje  $\omega$  que depende de cuatro tipos de configuraciones de módulos (independientes, sobre cubierta plana, sobre techo inclinado, y paneles integrados a una fachada). Por otra parte, este modelo incluye tres variables ambientales disponibles (velocidad del viento, temperatura ambiente y la radiación solar). Esta correlación se debe utilizar para velocidad del viento  $\geq 1$  m/s, ya que el modelo ignora la convección libre y radiación, el último es importante sólo a velocidades de viento  $< 1$  m/s. Aunque los resultados obtenidos con esta metodología tienen buen acuerdo con los valores experimentales, las correlaciones propuestas ignoran la radiación y la convección libre

### Estado del arte

Investigaciones emplean las ecuaciones de transferencia de calor para modelar la temperatura de las células fotovoltaicas integradas en cubiertas de ETFE2. Este modelo tiene en cuenta parámetros de radiación, los efectos de la convección natural y las propiedades térmicas de los materiales de una célula fotovoltaica. El modelo fue validado experimentalmente usando una maqueta compuesta de PV y una estructura acolchada de ETFE de tres capas. Los experimentos se llevaron a cabo bajo cuatro condiciones climáticas típicas (de invierno

<sup>1</sup> Se llama irradiancia la cantidad de energía solar radiante que cae sobre una superficie por unidad de área y por unidad de tiempo. La irradiancia extraterrestre media normal para el rayo solar en los bordes exteriores de la atmósfera de la Tierra es de aproximadamente  $1,36 \text{ kW/m}^2$ .

soleado, invierno nublado, verano soleado y verano soleado). En cuanto a la temperatura, el modelo presenta un buen acuerdo, y validó la viabilidad de un modelo teórico. Variando condiciones atmosféricas, (Zhao, et al., 2015)

Se desarrolló un modelo térmico para paneles fotovoltaicos mediante el empleo de relaciones de transferencia de calor, para modelar el comportamiento de la temperatura en un módulo PV. Las metodologías introducidas pueden ser útiles para crear correlaciones empíricas entre Nusselt y de Rayleigh para paneles solares fotovoltaicos expuestos al clima local, es decir, el departamento de Córdoba. (Armstrong & Hurley, 2010)

La investigación realizada por (Delgado-Bonal & Martín-Torres, 2015) propone varias ecuaciones para calcular la temperatura de una célula fotovoltaica en función de variables como la temperatura ambiente, velocidad del viento y la humedad, teniendo en cuenta que ya se han desarrollado ecuaciones simplificadas para las condiciones del planeta tierra y que estas no son válidas para otros planetas como Marte, en el trabajo se desarrollaron ecuaciones simplificadas para calcular la temperatura de una célula solar bajo condiciones ambientales de Marte haciendo uso de parámetros como el número de Nusselt, Prandtl, Grashof todo con el fin de relacionar esta temperatura con el potencial que se requiere para diseñar vehículos de exploración alimentados con energía solar. Los investigadores (Du, y otros, 2016) realizaron un estudio paramétrico que muestra la influencia significativa de la radiación solar y velocidad del viento sobre la temperatura del panel fotovoltaico, se analizaron las características de temperatura del panel en escenarios realistas determinando que la variación de temperatura de un panel en un día es diferente a la de las condiciones climáticas estables debido al efecto de la histéresis térmica, usando como método la medición de la temperatura en tiempo real de las células solares en condiciones climáticas realistas se indica que con ciertos rangos de temperatura se presenta una pérdida de eficiencia aproximada del 2.9% y 9.0%.

Se discute brevemente la importancia que tiene la temperatura de funcionamiento de una célula solar, en el rendimiento eléctrico de instalaciones fotovoltaicas basadas en silicio. Anexa tabulaciones de correlaciones explícitas e implícitas encontradas en la literatura que vinculan esta temperatura con las variables climáticas estándar y las propiedades dependientes del material (Skoplaki & Palyvos, 2009)

Se estudia el rendimiento de un módulo fotovoltaico en función de variables ambientales como la irradiancia solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento. Presentan dos tipos de modelos simplificados: un modelo de temperatura de módulo fotovoltaico y un modelo de eficiencia eléctrica de módulo fotovoltaico. Estos modelos han sido validados utilizando datos experimentales de dos experimentos: un sistema fotovoltaico conectado a red de 850 Wp y un módulo p-Si con ocho sensores de temperatura integrados en el módulo. (Mattei, Cristofari, Muselli, & Poggi, 2006)

Desarrollan un modelo empírico que utiliza las especificaciones estándar junto con la radiación solar real y la temperatura de la célula para predecir las características de corriente de voltaje de un panel fotovoltaico en condiciones climáticas variables. El trabajo se centra en el modelado de la radiación solar sin nubosidad para proporcionar la insolación en un módulo fotovoltaico de cualquier orientación, situada en cualquier sitio. El modelo se construye en el entorno Matlab / Simulink para proporcionar una herramienta que se puede cargar en una biblioteca. (Dusabe, Munda, & Jimoh, 2009)

### Modelación matemática de fenómenos de transferencia de calor

En esta sección se muestra el modelo térmico base usado para el desarrollo de este trabajo. Dicho modelo se basa en un método de balance de energía el cual se expresa mediante los mecanismos de transferencia de calor que participan en un panel PV expuesto a la radiación solar con el viento en calma. El balance de energía se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen e la referencia.** y se expresa en la Ec.(1) como:

$$\dot{q}_{\text{absorbido}} - \dot{q}_{\text{radiación}} - \dot{q}_{\text{convección}} = \dot{q}_{\text{PV}} \quad \text{Ec.(1)}$$

Este balance de energía es similar a la aplicada para colectores solares, donde  $\dot{q}_{\text{convección}}$  es la energía emitida por convección al medio ambiente,  $\dot{q}_{\text{radiación}}$  representa la radiación emitida a los alrededores,  $\dot{q}_{\text{PV}}$  corresponde al cambio de energía interna en el módulo fotovoltaico.

La notación de algunos libros de transferencia de calor señala a la potencia calorífica con minúscula:  $q$  (W) en lugar de señalarla con mayúscula y un punto, como es usual en los libros de termodinámica. El presente trabajo optó por seguir aquella notación sin embargo para efectos del balance energético se escogió  $\dot{q}$  flujo de calor por unidad de área ( $W/m^2$ ).

La variación de la temperatura del módulo fotovoltaico se ve afectada principalmente por las fluctuaciones de la radiación solar incidente. En este sentido, la Ec.(2) determina el comportamiento del flujo de calor por radiación solar absorbida por un panel PV ( $\dot{q}_{\text{absorbido}}$ ).

Considerando la relación de la irradiancia solar directa como la irradiancia solar total ( $I_C$ ), y la capacidad de absorción de PV ( $\alpha$ ).

$$\dot{q}_{\text{absorbido}} = \alpha \cdot I_C \quad \text{Ec.(2)}$$

La pérdida de energía debido a la radiación es causada por la diferencia de temperatura entre el módulo PV y los cuerpos de los alrededores. La tasa de radiación de energía por unidad de superficie viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann. La transferencia de calor por radiación se calcula como:

$$\dot{q}_{\text{radiación}} = \dot{q}_{\text{Frontal}} + \dot{q}_{\text{Posterior}} \quad \text{Ec.(3)}$$

Así, los flujos de calor a partir de un módulo fotovoltaico son (Zhao, et al., 2015):

$$\begin{aligned} \dot{q}_{Frontal} = & F_{Frontal-Cielo} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{Cielo} \\ & \cdot (T_{PV}^4 - T_{alrededores}^4) \\ & + F_{Frontal-Suelo} \cdot \sigma \\ & \cdot \varepsilon_{Suelo} \\ & \cdot (T_{PV}^4 - T_{alrededores}^4) \end{aligned} \quad \text{Ec.(4)}$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_{Posterior} = & F_{Posterior-Cielo} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{Cielo} \\ & \cdot (T_{PV}^4 - T_{alrededores}^4) \\ & + F_{Posterior-Suelo} \cdot \sigma \\ & \cdot \varepsilon_{Suelo} \\ & \cdot (T_{PV}^4 - T_{alrededores}^4) \end{aligned} \quad \text{Ec.(5)}$$

Donde  $\varepsilon$  representa la emisividad del panel,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $T_{PV}$  y  $T_{alrededores}$  son, respectivamente, las temperaturas del panel y el medio ambiente. En las ecuaciones anteriores la emisividad se considera como sigue en la ecuación (Zhao, et al., 2015).

$$\varepsilon_{Cielo} \approx \varepsilon_{Suelo} = 0.727 + 0.006 \cdot T_{rocío} \quad \text{Ec.(6)}$$

Donde  $T_{rocío}$  para efectos de la presente investigación es reemplazada por la ecuación propuesta por el investigador que proporciona una aproximación de la temperatura de rocío en función de la humedad relativa (RH) y la temperatura de los alrededores ( $T_{alrededores}$ ).

$$T_{rocío} = T_{alrededores} - \left( \frac{100 - RH}{5} \right) \quad \text{Ec. (6.5)}$$

Los términos  $F$  en los flujos de calor de radiación de calor corresponden a los factores de visión. Esos términos se calculan como:

$$F_{Frontal-Cielo} = \frac{1 + \cos(\theta)}{2} \quad \text{Ec.(7)}$$

$$* F_{Frontal-Suelo} = \frac{1 - \cos(\theta)}{2} \quad \text{Ec.(8)}$$

$$F_{Posterior-Cielo} = \frac{1 + \cos(\pi - \theta)}{2} \quad \text{Ec.(9)}$$

$$* F_{Posterior-Suelo} = \frac{1 - \cos(\pi - \theta)}{2} \quad \text{Ec.(10)}$$

Donde  $\theta$  representa el ángulo de inclinación respecto a la horizontal. En este trabajo se emplea el módulo PV en posición horizontal, por esta razón  $\theta = 0$  en la ecuación (7) (8) (9) y (10).

Flujo de calor por Convección.

La pérdida de energía por convección es causada por la diferencia de temperatura entre el módulo PV y el aire circundante, y se define como:

$$\dot{q}_{convección} = h(T_{PV} - T_{alrededores}) \quad \text{Ec.(11)}$$

Para el cálculo de los efectos de convección natural, se utiliza el número de Grashof  $Gr$ . El cual Depende de la geometría de la superficie, así como de su orientación. También depende de la variación de la temperatura en la superficie y de las propiedades termofísicas del fluido implicado

El número de Grashof el cual es adimensional, representa la relación de fuerzas de flotación y fuerzas viscosas en oposición que actúan sobre el fluido

$$Gr = \frac{g\beta(T_{PV} - T_{alrededores})L_c^3}{\nu^2} \quad \text{Ec.(12)}$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\beta$  es el coeficiente de expansión de volumen,  $L_c$  representa la longitud característica de la geometría y  $\nu$  la viscosidad cinemática del fluido. El número Grashof se emplea para calcular el coeficiente de transferencia de calor por las relaciones empíricas entre el número de Nusselt  $Nu$  y el número de Rayleigh  $Ra$ . Ambos parámetros están relacionados de acuerdo con la Ec. (13 - 14).

El número de Nusselt representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa. Entre mayor sea el número de Nusselt, más eficaz es la convección. Un número de Nusselt de  $Nu = 1$  para una capa de fluido representa transferencia de calor a través de ésta por conducción pura.



$$Nu = \frac{hL_c}{k} = M \cdot Ra^n \quad \text{Ec.(13)}$$

Donde  $Ra$  es el número de Rayleigh,  $M$  y  $n$  son valores constantes que dependen de la geometría de la superficie y el régimen de flujo. El número de Rayleigh es el producto de los números de Grashof y de Prandtl como se evidencia en la siguiente ecuación.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad \text{Ec.(14)}$$

Después de manipulaciones matemáticas de las ecuaciones (12) (13) (14) y el coeficiente de transferencia de calor resulta:

$$h = M \frac{k}{L_c} \left[ \frac{g\beta(T_{PV} - T_{alrededores})L_c^3}{\nu^2} Pr \right]^n \quad \text{Ec.(15)}$$

Cabe resaltar que esta investigación se centra en la determinación de los valores de las constantes  $M$  y  $n$  ajustadas para evaluar el coeficiente de transferencia de calor por convección en módulos fotovoltaicos ubicados en Córdoba, Colombia.

### Flujo de calor en el módulo fotovoltaico.

El flujo de calor en módulo representa la tasa de energía almacenada o perdida por el sistema debido a su interacción térmica con el entorno. La temperatura TPV representa la cantidad de energía térmica almacenada en los componentes del módulo. Por lo tanto, se emplea la Ec.(16) para tener en cuenta las propiedades térmicas de los materiales que componen el panel fotovoltaico.

$$\dot{q}_{PV} = \frac{dT_{PV}}{dt} \sum C_i \cdot \rho_i \cdot x_i \quad \text{Ec.(16)}$$

### 5. METODOLOGÍA.

La implementación de un modelo computacional se hace necesario debido al elevado número de variables, ecuaciones y parámetros que describen la transferencia de calor en la superficie de un panel solar fotovoltaico, dicho modelo debe permitir determinar la temperatura superficial de un panel en escenarios que correspondan con las condiciones de operación del departamento de Córdoba y de la posibilidad de ser usado en otras regiones.

Así pues, las ecuaciones de transferencia de calor, mostradas se han modelado en el Software MATLAB & SIMULINK, de manera que se tuviese la posibilidad de calcular la temperatura superficial de un módulo fotovoltaico en condiciones reales de operación, para las horas críticas de radiación comprendidas entre las (10:00 y las 14:00), en cualquier día del año, para cualquier ubicación geográfica y una orientación de (0°).

La estructura del modelo en Simulink consta de un subsistema, al cual ingresan las variables de entrada que corresponden a los parámetros térmicos del escenario y del panel de evaluación. En el interior del subsistema se encuentran las ecuaciones constitutivas de la modelación de la transferencia de calor en un panel fotovoltaico descritas previamente en la sección 0, también se acopla un factor de ajuste que se encarga de acercar el valor arrojado por el modelo a los valores tomados en la validación experimental.

### 6. RESULTADOS

De acuerdo con la modelación matemática de la transferencia de calor en un panel solar fotovoltaico descrita en la sección se desarrolló el modelo computacional en el software MATLAB & SIMULINK que se muestra en la figura 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** observe que el modelo consta de un subsistema llamado (Modelo transferencia de calor) al cual ingresan los parámetros y algunas variables de entradas como humedad relativa, Irradiancia, temperatura ambiente y entrega como resultado la temperatura del panel, los flujos de calor emitidos y el coeficiente de transferencia de calor **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

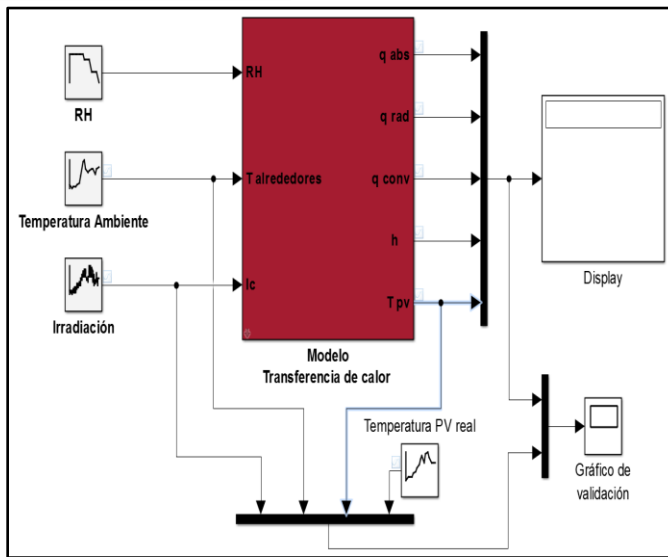


Figura 2. Estructura final del modelo. (Autor)

### Evaluación del modelo

Evaluando el modelo final, se evidencia el ajuste de la temperatura predicha (teórica) con respecto a la temperatura observada (real), describiendo un comportamiento muy similar una con otra, de hecho, el valor del Error Medio Absoluto (MAE) usado para medir la cercanía de predicciones es cercano a los 3,1 K, valor que se encuentra dentro de un rango aceptable para este tipo de modelos (0,9 – 4,6 K).

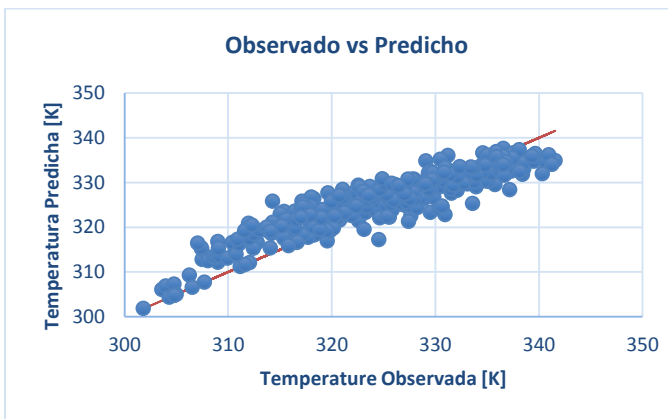


Figura 3. Temperaturas observadas vs Predichas. (Autor)

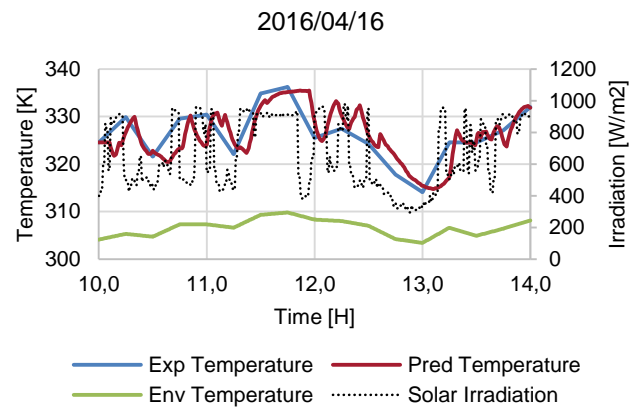


Figura 4. Comportamiento del modelo día 16/04/16. (Autor)

### 7. CONCLUSIONES.

- El modelo matemático de transferencia de calor en un panel solar fotovoltaico, desarrollado en el software Matlab&Simulink es una excelente herramienta para estudios futuros del comportamiento de la temperatura superficial de módulos solares ubicado en el departamento de Córdoba. Puesto que cuenta con factores propios y constantes ajustadas a las condiciones de la región.
- Este modelo de transferencia teórico se desarrolló basándose en la ecuación de balance de energía en donde se expresó que la diferencia entre la ganancia de energía absorbida y la pérdida de energía era igual a la energía convertida en el panel, la cual se llamó  $\dot{q}_{PV}$ .
- Las comparaciones entre los resultados experimentales y numéricos se centraron en el valor de la temperatura. Para estos valores el error medio absoluto fue de 3,3 K lo que validó la viabilidad del modelo encontrándose dentro del rango aceptable para este tipo de modelaciones.
- Por otra parte, es de resaltar que se notó un mejor ajuste del modelo cuando se ingresaron las variables humedad relativa y temperatura ambiente en la emisividad del flujo de calor por radiación, de hecho, se disminuyó el error en casi 1,2 K del modelo en fase inicial que

contenía solo la temperatura de rocío como variable en la emisividad.

- La optimización del modelo se logró mediante el uso de datos conseguidos en la validación experimental realizada a través de la operación de un panel solar fotovoltaico ubicado en el departamento. De dicha optimización se obtuvieron dos factores de ajustes que influían de manera directa en el flujo energético de convección en las ecuaciones modeladas. Los valores resultantes de los procesos convergentes son:  $M = 1,236053871$  y  $n = 0,294933077$

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- Armstrong, S., & Hurley, W. G. (2010). A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*(30), 1488-1495.
- Delgado-Bonal, A., & Martín-Torres, F. J. (2015). Solar Cell Temperature on Mars. *Solar Energy*, 74-79.
- Du, Y., Fell, C. J., Duck, B., Chen, D., Liffman, K., Zhang, Y., . . . Zhu, Y. (2016). Evaluation of photovoltaic panel temperature in realistic scenarios . *Energy Conversion and Management* , 60-66.
- Dusabe, D., Munda, J., & Jimoh, A. (2009). Modelling of cloudless solar radiation for PV module performance analysis. *Journal of Electrical Engineering*, 60, 192-197.
- Goswami, D. Y. (2015). *Principles of solar engineering*. New York: Taylor & Francis Group.
- Goswami, D. Y., Kreith, F., & Kreider, J. F. (2000). *Principles of solar engineering*. Philadelphia: Taylor & Francis Group.
- Mattei, M. a., Cristofari, C., Muselli, M., & Poggi, P. (2006). Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. *Renewable energy*, 553-6567.
- Pellegrino, M. C. (2009). Outdoor Measurements for an Effective PV Modules Temperature Characterization . *EU PVSEC Proceedings* .
- Siddiqui, M. U. (2012). Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions. *Solar energy*, 86(9), 2620-2631.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34(1), 23-29.
- Skoplaki, E., Boudouvis, A., & Palyvos, J. (2008). A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 1393-1402.
- Vengatesh, R. P., & Rajan, S. E. (2011). Investigation of cloudless solar radiation with PV module employing Matlab-Simulink. *Solar Energy*, 85, 1727-1734.
- Zhao, B., Chen, W., Hu, J., Qiu, Z., Qu, Y., & Ge, B. (2015). A thermal model for amorphous silicon photovoltaic integrated in ETFE cushion roofs. *Energy Conversion and Management*, 440-448.