

## Eficiencia de las celdas solares

LESAGE, Frédéric †\*, SANDOVAL-VILLEGAS, Juan Carlos'', TOLOSA-GARMA, Irving'', QUINTAL-VÁZQUEZ, José Francisco'', AGUILAR-GÓMEZ, Alfredo'' y FUSTER, G''

*Université du Québec*

*Universidad Tecnológica de Cancún*

Recibido Enero 20, 2017; Aceptado Febrero 11, 2017

### Resumen

La eficiencia de los paneles solares, por especificación de fabricantes, es del 18% para paneles policristalinos y 24% para monocristalinos. La eficiencia depende de varios factores, siendo el más importante la cantidad de irradiación solar. Otros factores importantes pero en menor medida son la ubicación, ángulo de inclinación del panel solar, nubosidad, polvo y temperatura de la celda. En el presente trabajo se analiza el efecto que tiene la variación de la temperatura en una celda solar con respecto a la eficiencia de producir energía. El estudio se realizó en la ciudad de Cancún Quintana Roo en un período de una semana, empleando una celda solar policristalina con dimensiones de 50x50 mm, 0.5 V a 0.05 W. La celda solar se conectó a un equipo de medición para registrar su temperatura y su voltaje en circuito abierto y con una carga controlada de CD de 0.05 watts, las mediciones arrojaron que con una irradiación promedio de 801.67 W/m<sup>2</sup> y un rango de temperatura de 22.1 a 56.4°C la generación de energía, tienen una relación dependiente con respecto a la temperatura, es decir, cuando la temperatura aumenta, la eficiencia disminuye.

**Panel Solar, Eficiencia, Temperatura, Voltaje, Potencia**

### Abstract

The efficiency of photovoltaic solar panels (PV) is 18% for polycrystalline panels and 24% for monocrystalline. This efficiency depends on several factors, the most significant being the quantity of solar irradiation. Also important, but to a lesser degree, is the position and the angle of inclination of the PV, the quantity of dust suspended in the atmosphere, and the surface temperature of the PV. This document investigate how varying surface temperatures affect the overall efficiency of a solar panel to produce electricity. This experiment, conducted over one week, was developed in Cancun Quintana Roo, México, utilizing a polycrystalline solar cell, 50x50mm, 0.5V a 0.05W, which was connected to measuring equipment to record its surface temperature, its voltage in open circuit, and its voltage with a controlled DC load of 0.05 watts. The average measurements of solar irradiation and temperature were: 801.67 W/m<sup>2</sup> of solar irradiation and the temperature range was between 22.1 and 56.4 °C. This study will show how the electric power output of a polycrystalline solar cell correlates with changes in its surface temperature, that is to say, when temperature increases, power output decreases.

**Photovoltaic Panel, Efficiency, Temperature, Voltage, Electrical Power**

**Citación:** LESAGE, Frédéric, SANDOVAL-VILLEGAS, Juan Carlos, TOLOSA-GARMA, Irving, QUINTAL-VÁZQUEZ, José Francisco, AGUILAR-GÓMEZ, Alfredo y FUSTER, G. Eficiencia de las celdas solares. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2017. 4-10: 19-27

\*Correspondencia al Autor:( Correo Electrónico: Frederic.Lesage@uqo.ca)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La tecnología fotovoltaica para la generación de electricidad, como una fuente renovable, ha sido ya probada y funciona, sin embargo las celdas solares tienen una deficiencia de los semiconductores en general, que al incrementar su temperatura, su eficiencia se ve disminuida.

Las celdas solares en condiciones normales alcanzan temperaturas superiores a sus condiciones de diseño, que por lo general son a 25°C con una irradiación de 1 kW/m<sup>2</sup> y 1.5 de masa de aire, debido a la irradiación solar del día. Este exceso de temperatura provoca una menor eficiencia en el panel, ocasionando que se tenga que ocupar un mayor número de paneles solares para cumplir con la demanda instalada en un sistema fotovoltaico.

En nuestro estudio se utilizó una fotocelda con capacidad de producción de 0.5W y potencia de 0.05 W, fue instalada en condiciones normales de operación y se registraron: voltaje, corriente, potencia, temperatura e irradiación solar, en circuito abierto y también aplicando una carga electrónica a su capacidad óptima de la misma. Se descubrió que cuando la celda solar alcanza una temperatura de 42.8 °C, su eficiencia se ve reducida en un 6% bajo estas condiciones.

## Marco teórico

### Radiación

La radiación que procede directamente del sol, se refleja en varios componentes como son: nubes, vapor de agua, entre otros, siendo dispersada por las moléculas del agua, el polvo, por lo que la radiación solar que llega a una superficie puede ser de tres tipos:

- Radiación directa: es formada por los rayos solares, o sea que no llega a ser dispersada.

- Radiación difusa: es la procedente de toda la bóveda celeste, excepto la que llega al sol, originada por los efectos de dispersión.
- Radiación del albedo: es la procedente del suelo debido a la reflexión de parte de la radiación incidente sobre montañas y lagos. Cuando el sol está en la parte de abajo en el cielo, la radiación solar debe pasar a través de más atmósfera y se reduce por lo tanto por dispersión y absorción (Harper, 2010).

### Posición de los paneles solares

Debido a los diferentes tipos de radiación, el ángulo de elevación para un sistema de paneles solares es muy importante y por lo general, el ángulo óptimo de inclinación, es igual a la latitud (distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado de la Tierra), lo que asegura la máxima cantidad de luz solar expuesta durante el día, siendo la mejor orientación de los paneles solares hacia el sur, debido a que en el equinoccio se tiene el día con más sol, de 6:00 a 18:00 horas.

### Irradiación solar

La intensidad de luz solar se conoce como irradiancia (irradiación), su unidad de medición es el W/m<sup>2</sup> o kW/m<sup>2</sup>.

La máxima irradiancia que puede recibir un panel solar ocurre en un plano perpendicular y en un día sin nubes, lo cual ocurre al medio día, teniendo un valor entre 1 a 1.2 kW/m<sup>2</sup>.

Otra medida útil para este tipo de sistemas es la insolación, la cual nos indica la cantidad de energía solar recibida durante un intervalo de tiempo, su unidad es kW-hora/m<sup>2</sup> (kWh/m<sup>2</sup>).

En el cálculo del sistema fotovoltaico, se debe considerar la insolación diaria promedio y se expresa en horas solares pico (HSP), que se puede expresar como  $1 \text{ kWh/m}^2 = 1 \text{ HSP}$  y que varía de 3 a 7 HSP, en función del lugar (Harper, 2010). Para la ciudad de Cancún, la irradiancia para un día despejado es de  $5.8 \text{ kWh/m}^2$ .

### La posición de las celdas solares

Como la tierra está inclinada sobre su eje  $23^\circ.5$  que explica el distinto calentamiento de la tierra en función de su posición, durante un año; primavera, verano, otoño e invierno y también la duración del día y la noche.

El sol es más intenso si incide perpendicularmente con la superficie y la luz de verano es más intensa que la de invierno, por tal motivo el ángulo óptimo de elevación de la celda solar, depende de su latitud, para así asegurar la mayor cantidad de luz incidente durante un año. Se recomienda instalar las celdas solares con orientación hacia el sur, debido a la latitud, tendrá el mejor ángulo de incidencia con la superficie durante todo el año.

### Voltaje en circuito abierto

El voltaje en circuito abierto es la diferencia de potencial que se genera cuando no se conecta carga a la fotocelda y por lo tanto no hay flujo de corriente eléctrica y es el máximo voltaje que genera la celda solar. (Solar Energy, 2016)

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right) \approx \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0}\right) \quad (1)$$

Donde:

$V_{oc}$  Es el voltaje en circuito abierto

$K_B$  Es la constante de Boltzmann

$T$  es la temperatura de operación

$Q$  Carga electrónica

$J_{ph}$  Es la corriente fotogenerada

$J_0$  Es la corriente de saturación

Como se puede observar  $V_{oc}$  disminuye si incrementa la temperatura y también depende de la corriente de saturación de la celda solar y de la corriente fotogenerada.

La corriente de saturación se puede expresar como:

$$J_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_N}{L_N N_A} + \frac{D_P}{L_P N_D} \right) \quad (2)$$

El Fill factor, representa la calidad de la celda solar, y se puede calcular con:

$$FF = \frac{(J_{mpp})(V_{mpp})}{J_{sc}V_{oc}} \quad (3)$$

$J_{mpp}V_{mpp}$  es la máxima potencia de la celda solar,  $J_{sc}V_{oc}$  es la corriente en corto circuito del voltaje en circuito abierto.

Y finalmente el cálculo de la eficiencia de la celda solar se puede expresar como:

$$n = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (4)$$

Donde mpp es el punto de potencia máxima

$P_{in}$  Es la irradiancia en  $\text{W/m}^2$

$J_{sc}$  Típicamente es de  $35 \text{ mA/cm}^2$

FF está en un rango de 0.75 a 0.8

Por lo tanto su eficiencia se encuentra entre el 17 y 18%.

Para la potencia máxima producida por la celda solar, se tiene la ecuación:

$$P_{max} = I_m(V_{max}) = FF(I_{sc})(V_{oc}) \quad (5)$$

La eficiencia de las celdas solares también puede ser formulada de la siguiente forma:

$$n = \frac{(I_{sc-max})(V_{oc-max})}{A_C(\text{nivel de irradiación})} \quad (6)$$

Al incrementar la radiación solar, el voltaje de circuito abierto Voc incrementa logarítmicamente, mientras que la corriente de corto circuito Isc se incrementa linealmente, y da como resultado un incremento de la potencia. También al incrementar la temperatura, la eficiencia disminuye a consecuencia del bajo voltaje Voc, y un ligero decremento de la corriente de corto circuito (S. Mekhilef, 2012). NOCT (Operación Normal de temperatura de la celda) es la temperatura de la celda cuando opera en circuito abierto a una temperatura ambiente de 20°C a AM 1.5 (masa de aire) y una irradiación de  $G=0.8 \text{ kW/m}^2$  y la velocidad del viento no mayor de 1 m/s (S. Mekhilef, 2012).

La siguiente expresión muestra la relación lineal entre la irradiancia solar GM y la diferencia entre la temperatura de la celda y la temperatura ambiente (TM-Ta). Cabe mencionar que la ecuación sólo tiene en cuenta la temperatura ambiente, sin embargo descuida los datos de la velocidad del viento, lo que puede ocasionar algún error en la temperatura de la celda, aunque es posible que la temperatura del módulo no sea con altas velocidades de viento.

Existe un modelo, que proporciona un término adicional para explicar la velocidad del viento con respecto a la temperatura de la Celda solar. La siguiente relación muestra la temperatura de la fotocelda sin considerar la velocidad del viento.

$$TM = Ta + \frac{T_{NOCT}-20^\circ}{800} GM \quad (7)$$

Donde:

TM Es la temperatura nominal de la celda en °C.

Ta Es la temperatura ambiente en °C.

GM Es la irradiancia solar en W/m<sup>2</sup>

$T_{NOCT}$  Es la temperatura nominal de la celda en operación

En la ciudad de Cancún se ha registrado una velocidad del viento, que en promedio es de 2 m/s, sin embargo si se desea considerar el viento, se tiene la siguiente relación, donde, la temperatura de la celda está dado por:

$$TM = Ta + \frac{T_{NOCT}-20^\circ}{800} GM \left( \frac{9.5}{5.7+3.8 \cdot w} \right) \left( 1 - \frac{n_{cell}}{T_\alpha} \right) \quad (8)$$

Donde:

w es la velocidad del viento

T es la transmitancia de la parte frontal del módulo

$\alpha$  es la medida de absorción de radiación del módulo

$T\alpha$  es la fracción de incidencia de luz absorbida por la celda solar, usualmente es de 0.9 .

El efecto de la temperatura en el voltaje de salida en circuito abierto del panel solar es:

$$V_{oc} \approx \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_0} \right) \quad (9)$$

Se puede ver el voltaje en circuito abierto, que es directamente proporcional a la temperatura, sin embargo la corriente de saturación;  $J_0$  está en función de la temperatura, es decir que al incrementar ésta, disminuye el voltaje en circuito abierto. Se puede mejorar el voltaje de salida, si la operación del panel solar es en condiciones de mayor radiación solar y menor temperatura de operación.

También se menciona que graves factores afectan la eficiencia de las celdas de los PV, como son la intensidad de la radiación solar, la calidad de los semiconductores utilizados y la temperatura de operación de las celdas PV, de estos factores controlando la temperatura, es el método más práctico para incrementar la eficiencia de las celdas. La relación entre la temperatura de las celdas monocristalinas de silicón y la eficiencia, indican que la producción de electricidad disminuye aproximadamente del 0.4 al 0.5% (Atkin & Farid, 2015).

## Descripción del Método

### Metodología

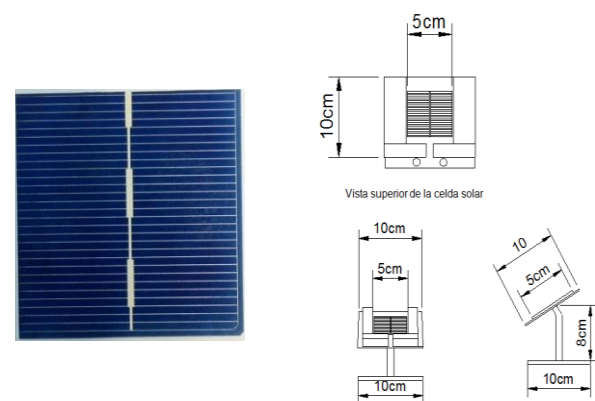
Se tiene como objetivo conocer la eficiencia de las celdas solares, en condiciones ambientales de la región de Cancún, Quintana Roo. Se diseñó un sistema de prueba para verificar las mediciones eléctricas en circuito abierto y aplicando una carga eléctrica controlada; siendo muy importante identificar el comportamiento del voltaje de salida con respecto a la temperatura de la celda solar para conocer su eficiencia y su punto óptimo de operación. Se ha sometido a pruebas reales, registrando las mediciones a través de un equipo de adquisición de datos y una carga electrónica, registrando la radiación solar y la velocidad del viento.

1. Se diseñó el procedimiento de mediciones y registro de los parámetros eléctricos de una celda solar policristalina de 50x50 mm, 0.5 V a 0.05 W. Colocada la celda solar a 20° hacia el sur, los parámetros que se registraron fueron el voltaje en circuito abierto y la temperatura, por períodos de las 8:00 am a 17:00 hrs.
2. Al mismo tiempo se registró la irradiación solar y la velocidad del viento. Por los mismo periodos de tiempo.
3. Mediciones del voltaje con una carga electrónica aplicada. Se hicieron mediciones de voltaje aplicando una carga electrónica y por lo tanto se da un flujo de corriente y demanda de una potencia. Al mismo tiempo se registran los valores de la temperatura en la celda solar, irradiación y la velocidad del viento.

## Diseño y construcción de las bases para las celdas solares

Las bases de las celdas se diseñaron e implementaron con trovicel, cuyas características técnicas son: la resistencia a la fricción, tracción, elasticidad y con resistencia a altas temperaturas.

Se utilizó una celda solar policristalina de 50 mm x 50 mm x 0.02mm de 0.5 V, 0.1 A y 0.05W. La celda solar opera mediante sus características de diseño y especificaciones de fabricantes, en condiciones normalizadas definidas son; 25°C, 1000W/m<sup>2</sup> de irradiación solar y Masa del aire de 1.5.



**Figura 1** Celda solar de 0.50mm x 0.50mm x 0.02mm de 0.5 V, 0.1 A y 0.050W y diseño de la base

Fuente: [www.everredtronics.com](http://www.everredtronics.com) y diseño propio de la base

### Conexiones de medición

El equipo de adquisición de datos, Keysight 34970A, registra la temperatura de la celda solar y el voltaje en circuito abierto. La irradiación solar se midió con el piranómetro modelo 8-48 de la marca Eplab.

Para la medición del viento se utilizó un anemómetro de hilo caliente.

Para las actividades desarrolladas, durante el proceso de la investigación de la eficiencia de las celdas solares, con respecto a su temperatura y voltaje, se utilizaron los siguientes equipos de medición:

1. Fuente de carga eléctrica de CD de 300 watts BK PRECISION Serie 8500, el cual aplica una carga electrónica a la celda solar, es decir demanda una carga específica de operación, para conocer su corriente, voltaje y potencia.
2. Equipo de adquisición de datos de 20 canales Keysight 34970A, para registrar las mediciones de voltaje, temperatura y el voltaje generado por el piranómetro por la radiación solar en la celda solar.
3. Equipo de Radiación solar piranómetro negro y blanco modelo 8-48 con factor de conversión de:  $775 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ , el cual se empleó para la medición de la irradiación, incidente sobre la superficie del área estudio.
4. Equipo anemómetro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de aire en túnel de viento para registrar la velocidad del mismo en tiempo real, los cuales se guardan en una memoria externa, que posteriormente se emparejan sincronizados con los datos del equipo Keysight 34970A.

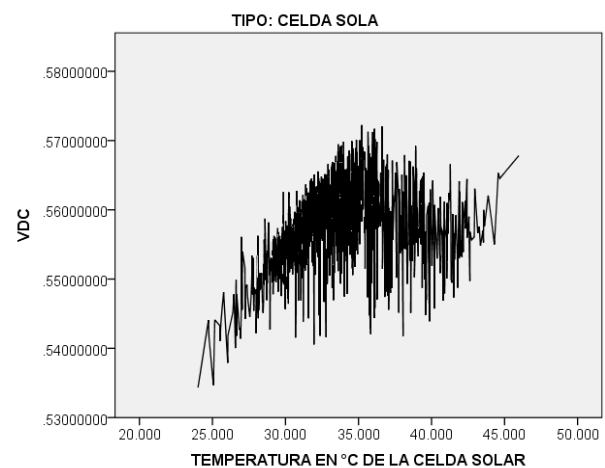
## Resultados

### Análisis de la eficiencia de las celdas solares en circuito abierto y con carga

#### Análisis de la celda solar

En el gráfico 1 se muestran los datos de las mediciones de voltaje y temperatura de la celda solar, durante 6 hrs.

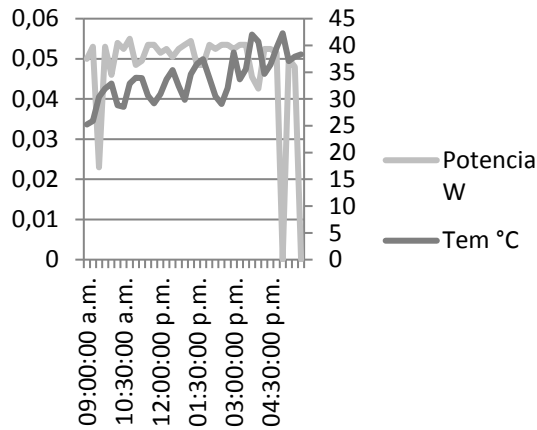
De las 9:31 a las 15:31 hrs., en el eje Y se observa el voltaje que se mantiene en un valor de 0.55V mientras no supera los 35°C de temperatura, ésta inicia en 24.92°C a las 9:31 am, llegando a un valor máximo de 48.2°C. También se puede observar cómo el voltaje disminuye cuando la temperatura de la celda se va incrementando. Se consideraron únicamente como mediciones válidas para el experimento aquellas en las que la radiación solar es mayor o igual a  $941 \text{ W/m}^2$ .



**Gráfico 1** Gráfica del voltaje en circuito abierto y temperatura de la celda solar

*Fuente: Elaboración propia a partir de las mediciones registradas*

En gráfico No. 2 En una medición de las 8:00 am a las 18:00 hrs. Se observa la potencia de la celda solar, que inicia en 0.05W, con respecto a la temperatura en 25°C, que corresponde al NOCT (Operación Normal de temperatura de la celda) y opera bajo sus características de diseño, 0.5 V, 0.1 A y 0.05W. Cuando la temperatura empieza a incrementar, su potencia empieza disminuir, hasta encontrar un punto de operación con oscilaciones en el rango de 0.05W que claramente se observa como disminuye su potencia al incrementar la temperatura de la celda solar, que cuando llega a un valor de 42.27°C la potencia disminuye a cero.



**Gráfico 2** Potencia y temperatura de la fotocelda con carga

Fuente: Elaboración propia a partir de las mediciones registradas

**Resultados**

Durante éste proceso, se registraron las mediciones de temperatura y voltaje, se graficaron los datos y se hizo un análisis descriptivo, obteniendo las medidas de tendencia central.

El voltaje de la celda solar, generó en promedio 0.4585 V en 11hrs de medición, con una irradiación promedio de 524 W/m<sup>2</sup>, su potencia fue de 0.0463W con una temperaturas promedio de 33.95 °C, en la celda solar.

Medidas de tendencia centrales	Voltaje	Temperatura °C	Potencia W	Irradiación Wm <sup>2</sup>
Media	0.4581698	33.95314	0.04633628	524.443
Mediana	0.5343578	34.593	0.052	499.920
Desviación std	0.1605471	4.304475	0.0144458	353.382

**Tabla 1** Medidas de tendencia central de la celda solar

Fuente: Elaboración propia a partir de las mediciones registradas

De acuerdo la relación del voltaje en circuito abierto, [2] el voltaje está en función de la temperatura T, sin embargo la corriente de saturación J<sub>0</sub>, también está en función de la temperatura.

En la tabla No. 1 de las medidas de tendencia central, se puede apreciar, que arrojó una temperatura promedio de 33.9 °C y un voltaje de 0.45 V, cuando su diseño de operación es de 25°C para producir 0.5V.

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right) \approx \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0}\right) \quad (10)$$

	Voltaje	Tem °C	Irradiación Wm <sup>2</sup>
102 (VDC)	1.00	-0.493	0.711
Tem C	-0.493	1.000	-0.632
Irradiación Wm <sup>2</sup>	0.711	-0.632	1.000

**Tabla 2** Matriz de correlaciones entre elementos, el voltaje es en circuito abierto

Fuente: Elaboración propia a partir de las mediciones registradas

La matriz de correlación escalar de los tres parámetros (voltaje en circuito abierto, Temperatura de la celda solar y la irradiación solar, tienen la siguiente correlación, la dependencia del voltaje con respecto a la temperatura, tiene un valor de -0.4 que se interpreta como una correlación negativa de débil a media, es decir; a mayor temperatura, menor voltaje.

La correlación se calcula a partir de las puntuaciones obtenidas en una muestra de dos variables.

Sin embargo la correlación del voltaje en circuito abierto y la irradiación solar, es de 0.711 es positiva y considerable, a sabiendas que, deben incidir los fotones en el semiconductor, para producir el efecto fotoeléctrico.

VDC					
Voltaje en Circuito abierto	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	38.020	20	1.901	121.809	.000
Dentro de grupos	57.556	3688	.016		
Total	95.575	3708			

**Tabla 3** Anova de Voltaje en circuito abierto, con la temperatura como factor

Fuente: Elaboración propia a partir de las mediciones registradas

Como se muestra en la tabla No 3, la prueba Anova en la relación del voltaje como variable dependiente y la temperatura como factor, el valor de significancia es 0.000 y este valor es menor que 0.05.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula de que no existe relación entre el voltaje producido en circuito abierto y el nivel de temperatura que alcanza la celda solar, por la irradiación, es decir si hay una relación de dependencia del voltaje, con respecto a la temperatura que alcanza la celda solar.

### Prueba de muestras emparejadas

También se hicieron las mediciones aplicando una carga electrónica, manteniendo la potencia a sus especificaciones de diseño de la celda solar (0.05W).

En una comparación de los voltajes de la celda solar, en circuito abierto y aplicando una carga de 0.05W, con la prueba T, para conocer si hay diferencia en los voltajes, la tabla No. 4 muestra que el grado de significancia es menor de 0.05, que corresponde al valor de referencia, por lo tanto se concluye que existe una diferencia entre las medias de voltaje en circuito abierto y aplicando la carga electrónica.

### Cálculo de la Anova del voltaje en la celda solar, aplicando una carga electrónica, de 0.05W

Voltaje	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1.082	20	.054	10.287	.000
Dentro de grupos	19.387	3688	.005		
Total	20.469	3708			

**Tabla 4** Prueba Anova del voltaje con una carga electrónica de 0.05 W y la temperatura de la celda solar

Fuente: Elaboración propia a partir de las mediciones registradas

En la tabla No. 4 se muestra que sí existe una relación de dependencia del voltaje, con respecto a la temperatura de la celda solar, aplicando una carga electrónica, debido a que el valor de significancia de la Anova es menor de 0.05.

### Cálculo de la Anova de la potencia la celda solar, aplicando una carga electrónica, de 0.05W

Potencia					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	.011	20	.001	10.299	.000
Dentro de grupos	.194	3688	.000		
Total	.204	3708			

**Tabla 5** Prueba Anova de la potencia y la temperatura de la celda solar

Fuente: Elaboración propia a partir de las mediciones registradas

En la tabla No. 5 se observa que el nivel de significancia es menor a 0.05, en el cálculo de la Anova entre la potencia de la celda solar, como variable dependiente y la temperatura de la celda solar, como variable independiente. Por lo tanto si hay una relación de dependencia.



### Agradecimientos

Para llevar a cabo esta investigación, se requirieron recursos económicos para la adquisición de equipo de laboratorio, que fue adquirido por la aprobación de la red temática de colaboración académica de la convocatoria de PRODEP.

### Conclusiones

En el registro de las mediciones de la celda solar, se identificó su colocación a  $20^\circ$  con dirección al sur, para que reciba la mayor cantidad de irradiación durante el día y durante todo el año. También se identificó la capacidad de producción de voltaje en circuito abierto, que fue en promedio de: 0.45 V, la potencia promedio fue de 0.046 W, y la temperatura promedio del panel de  $33.9^\circ\text{C}$ . Con la prueba de Anova de la potencia y la temperatura de la celda solar, cuando el valor de significancia es menor a 0.05, ( $0.000 < 0.05$ ) se concluye que hay diferencia significativa, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación, que sí hay una dependencia de la potencia con respecto a la temperatura de la celda solar. Aún hace falta identificar los rangos de producción de energía, con bajos valores de irradiación solar y cómo afecta el viento en su producción.

La investigación implicó hacer mediciones en tiempo real, de los parámetros eléctricos de la celda solar y fue durante diez días, corroborando mediciones de voltaje, corriente, irradiación solar y viento, donde este último registró en promedio un valor de 1.5 m/s. La limitación que se tuvo fue hacer las mediciones en distinto día de la celda con carga. Sin embargo se puede decir que a menor temperatura de operación en la celda solar, éstas operarán de forma más eficiente, y trabajarán aún mejor en lugares frescos con grandes cantidades de irradiación solar.

### Recomendaciones

Un siguiente estudio puede ser cómo afecta el viento en la temperatura de la celda solar y en qué periodo de tiempo se tiene la mayor producción de energía, debido a las horas de irradiación solar durante el año en la ciudad de Cancún Q. Roo.

### Referencias

- Atkin, P., & Farid, M. M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*, 217-218.
- Harper, E. (2010). En *El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos* (pág. 145). México: Limusa.
- Manzano, V. (1995). *Inferencia estadística*. Madrid: Ra-Ma Editorial.
- S. Mekhilef, R. S. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable Sustainable Energy*, 16(6), 2920-2925.
- Solar Energy, t. p. (2016). *Arno Smets, Klaus Jäger, Olindo Isabella, Miro Zeman, René van Swaaij*. Cambridge: UIT Cambridge.