

## Capítulo 11 Evaluación del efecto de la radiación solar sobre la superficie de un sistema fotovoltaico

### Chapter 11 Evaluation of the effect of solar radiation on the surface of a photovoltaic system

TELLO-ARGÜELLES, Celeste Estefanía†, ESPINOSA-TRUJILLO, María Jesús\* y MEDINA-CARRIL, Diego Manuel.

*Universidad Tecnológica Metropolitana, Calle 111 por 46 y 48 No.315, Col. Santa Rosa, C.P. 97279, Mérida, Yucatán, México*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Celeste Estefanía, Tello-Argüelles* / **ORC ID:** 0000-0002-0401-7745, **Researcher ID Thomson:** AAR-3736-2020, **CVU CONACYT ID:** 1017320

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *María Jesús, Espinosa-Trujillo* / **ORC ID:** 0000-0002-2889-4849, **Researcher ID Thomson:** T-3632-2018, **CVU CONACYT ID:** 297283

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Diego Manuel, Medina-Carril* / **ORC ID:** 0000-0002-9583-6091, **Researcher ID Thomson:** T-5430-2018, **CVU CONACYT ID:** 297033

**DOI:** 10.35429/H.2020.5.196.209

C. Tello, M. Espinosa y D. Medina

maría.espinosa@utmetropolitana.edu.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ingeniería. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

## Resumen

A raíz de un estudio realizado en campo, se observó la disminución en la generación de la energía eléctrica, en una sección del emplazamiento fotovoltaico ubicado en la Escuela Preparatoria Uno de la UADY, el estudio consistió en analizar en horas solares pico la temperatura de la superficie de los módulos fotovoltaicos seleccionados con la finalidad de conocer la afectación que tiene la temperatura sobre la generación de la energía, tomando en consideración la información proporcionada por el fabricante de dichos módulos. El estudio se realizó en el mes de mayo considerado como el de mayor intensidad solar en la ciudad de Mérida, Yucatán. Los datos obtenidos se analizaron mediante herramienta estadística (STATA) y se modeló de acuerdo a una expresión matemática. Como resultado de lo anterior, se demostró que para esta instalación la temperatura disminuye en un porcentaje significativo la producción energética de la instalación fotovoltaica.

## Radiación solar, Temperatura, Eficiencia

### Abstract

Following a field study, the decrease in electricity generation was observed in a section of the photovoltaic installation located at UADY High School One, the study consisted of analyzing the surface temperature of the selected photovoltaic modules in peak solar hours in order to know the effect that temperature has on the generation of energy, taking into account the information provided by the manufacturer of the modules. The study was carried out in the month of May considered as the one with the highest solar intensity in the city of Merida, Yucatan. The data obtained were analyzed using a statistical tool (STATA) and modeled according to a mathematical expression. As a result, it was shown that for the photovoltaic installation under study, that the temperature decreased energy production by a 15 percent.

### Solar radiation effect, temperature, efficiency

## 11. Introducción

Las condiciones climáticas en el estado de Yucatán son variantes con respecto a otros estados; Mérida, Yucatán puede llegar a temperaturas de 40°C o 41°C en un día común, con un porcentaje de humedad del 60%, es por lo anterior que el cuerpo recibe una sensación de calor y al mismo tiempo transpira, todo esto ligado a su vez con la radiación solar.

El comportamiento de un sistema fotovoltaico en estas condiciones es único debido a que existen factores como altos niveles de humedad, así como altos niveles de radiación y por lo consiguiente de temperatura la cual tiene un efecto interesante en el comportamiento de los módulos fotovoltaicos.

En su artículo Cepeda (2017) analiza los aspectos que afectan las instalaciones y menciona que *“La eficiencia y potencia entregada por un panel fotovoltaico son condiciones que se ven afectadas, principalmente por aspectos ambientales y tecnologías utilizadas en su proceso de fabricación”* al cambiar las condiciones ambientales genera variaciones en la producción.

El presente documento se enfoca en el estudio de la temperatura de una sección de módulos mediante su caracterización, descripción de los componentes y factores que tienen relación con el aumento de la temperatura en la instalación, como la radiación, nubosidad y corrientes de viento. Asimismo, se pretende hallar la relación de la causa de recalentamiento y cómo influye el entorno en el sistema fotovoltaico.

Para caracterizar el proyecto se necesitaron instrumentos de medición como Termoanemómetro, Termolaser infrarrojo y Registradores de datos marca Hobo, así mismo uso de softwares como Sunearthtools.com, para conocimiento de rayos solares y sombras de un edificio, Solargis.com, para datos de radiación en la zona y Windfinder para velocidad y dirección del viento.

El estudio realizado tiene el objetivo de examinar el comportamiento de una instalación ubicada en un lugar en Mérida, Yucatán y en un periodo de tiempo definido, para servir de referencia en futuras investigaciones.

A continuación, se presentará la descripción de los factores que afectan a una instalación fotovoltaica y la metodología que se siguió para llevar a cabo esta investigación.

### 11.1 Marco teórico

En la vida cotidiana los seres humanos no pueden evitar el uso de la energía eléctrica, ya que se ha vuelto indispensable en actividades como cocina, transporte, vestimenta, entre otros aspectos de uso común.

La electricidad forma parte de nuestros días casi como respirar.

En su artículo, Mendieta (2017) menciona como la energía eléctrica influye en el ser humano: *“En definitiva, la disponibilidad de energía eléctrica provoca cambios en las formas de vida y conduce a la mejora de las condiciones de salud y educación de la población rural”*.

Con lo anterior se entiende que la sociedad se ha acostumbrado a emplear este recurso en cualquier actividad, uno de los aspectos que se observa continuamente es el uso de los combustibles fósiles como el petróleo, este tipo de producción de energía no es la adecuada por el alto nivel de contaminantes que emite al momento de ser quemado para su transformación.

Lo anterior abre paso a la consideración del uso de energías renovables, en 2020, Terol menciona lo siguiente:

*En la esfera de ciudad, los consumos de combustibles fósiles son directamente en forma de gasolina o diésel para los transportes [...], la gran alternativa de este siglo a los combustibles fósiles son las energías renovables, las cuales aprovechan flujos de la propia biosfera y por tanto se considera que son recursos ilimitados.*

Como sabemos se han descubierto energías alternativas, tales como la energía solar, geotérmica, eólica, marítima y la nuclear.

Actualmente la sociedad se ha interesado por la energía fotovoltaica y eólica; los comercios, industrias y residencias han instalado sistemas fotovoltaicos, esto debido a las dimensiones necesarias para su instalación, así como su rentabilidad. En cambio, un generador eólico demanda de más espacio para su instalación, por lo cual el costo aumenta y se vuelve menos viable para una residencia o comercio. En 2020, en su artículo Caicedo menciona que:

*La energía solar fotovoltaica, al igual que otras energías renovables, constituyen, frente a los combustibles fósiles un mejoramiento que se evidencia en que contribuyen al autoabastecimiento energético nacional y por lo tanto social, con un impacto comparativamente mucho menor que las fuentes convencionales de energía.*

Haciendo de esta una alternativa de energía que no representa un impacto tan grande en la huella de carbono.

En 2019, Barragán realizó un estudio en el que se tomaban en cuenta ciertos aspectos para la determinación de uso de tecnología en un proyecto rural *“los resultados señalan que en los tres enfoques la energía solar fotovoltaica y solar térmica tendrá más incidencia y aptitud en la escala urbana (posición 1 y 2 respectivamente), mientras que la energía mareomotriz es la menos apta (posición 11)”*.

También menciona que *“Al evaluar los factores que influirían en la promoción de las tecnologías, se advierte que los encuestados consideran los costos como el factor más influyente, seguido de la madurez de la tecnología y la existencia de leyes y regulaciones”*.

Con lo anterior se puede observar que dependiendo de cada territorio existen ciertas características que determinan la mejor opción de tecnología en energías renovables que se va a instalar, cabe recalcar que para realizar la encuesta del artículo anteriormente citado, se tomaron en cuenta aspectos como la radiación solar ya que esta varía dependiendo de la posición de los lugares distribuidos sobre la superficie del planeta. La cantidad de radiación en Mérida, Yucatán no es la misma que en la ciudad de México, debido a la nubosidad y su ubicación geográfica.

## 11.2 Celdas solares

Los módulos fotovoltaicos son los que hacen posible la generación de energía, pero ¿Cómo están compuestos? ¿Qué componentes hacen posible que generen electricidad?

Solar (2020) define lo que es un módulo fotovoltaico:

*Una célula solar fotovoltaica está constituida por un disco Monocristalino de silicio, dopado en su superficie superior (expuesta al Sol) [...] 36 células interconectadas y montadas entre dos láminas de vidrio que las protegen de la intemperie constituyen lo que se denomina un módulo fotovoltaico. (mjesus@hotmail.com)*

Con lo anterior se entiende la estructura interna de un módulo fotovoltaico y cómo viaja la energía a través de él hasta una carga. En cuanto a cómo hacen posible las celdas fotovoltaicas la generación de energía. Solar define la celda fotovoltaica de la siguiente manera:

*Una célula solar fotovoltaica está constituida por un disco Monocristalino de silicio, dopado en su superficie superior (expuesta al Sol) hasta hacerla de tipo n en un espesor de 0,6 mm, mientras que su parte inferior se deja de tipo p, con un espesor de hasta 0,4 mm. Así se produce una unión p-n paralela a la superficie iluminada de la célula. (mjesus@hotmail.com)*

Con lo anterior inferimos que las celdas fotovoltaicas son el componente base para la transformación de energía lumínica a energía eléctrica, que constituyen los componentes principales de un módulo fotovoltaico.

## 11.3 Radiación Solar

La radiación solar es la base de la generación eléctrica a partir de un módulo fotovoltaico, esto a su vez efectuado por una reacción química con el material semiconductor del que están hechas las celdas fotovoltaicas.

En 2020, en su artículo Guinand afirma que *“la radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarrojo y ultravioleta)”*

Tomando como base lo que afirma esta autora, entendemos que la radiación es la cantidad de rayos solares que inciden en un área limitada, en el caso de los módulos fotovoltaicos, al ser una superficie plana este permite la incidencia de los rayos de mejor forma. Con lo anterior hay que tener cuidado, ya que no por ser una superficie plana podrá aprovechar de manera correcta los rayos de sol que inciden en él, en la sección de Componentes geográficos de una instalación se explicará más a detalle los aspectos que pueden causar un mal aprovechamiento de la radiación solar.

Conocer el territorio geográfico y factores ambientales como radiación, nubosidad y lluvias es impensable en el ámbito de las energías renovables, específicamente en la energía solar fotovoltaica. Para el diseño de una instalación fotovoltaica, en su artículo Trejos establece que *“Las diferentes condiciones ambientales de radiación, velocidad de viento, temperatura, lluvia, polvo, entre otros, a los que los paneles están expuestos afectan su producción energética”* (2020).

Los aspectos a evaluar como inclinación de los módulos, antes de llevar a obra una instalación fotovoltaica se deben estudiar detenidamente para que no existan fallos de ningún tipo, para poder tener el mayor aprovechamiento del recurso que proporciona el Sol.

## 11.4 Efecto fotovoltaico

La sociedad ha observado el uso y los beneficios de las energías alternativas específicamente en la energía solar fotovoltaica, porque además de generar un beneficio económico también contribuye al cuidado del medio ambiente. La energía fotovoltaica es posible por la existencia de los fotones, como su nombre lo dice, estos a su vez provienen del sol que es la fuente de energía más grande del mundo.

¿Cómo ocurre la producción de electricidad a partir de los rayos solares?, esta es una pregunta que muchas personas se hacen a menudo. El sol emite energía, misma que llega a la tierra como fotones los cuales son captados por las celdas solares de un módulo fotovoltaico, que por medio de un material semiconductor rompen la barrera prohibida y permite el paso de corriente a través del circuito.

En 2020, Flores establece que el efecto fotovoltaico “*se produce en algunos elementos químicos (silicio, germanio, etc.) es la capacidad de absorber fotones (partículas de luz) y liberar a continuación una corriente continua de electrones*” (Pag. 29).

Con base a lo presentado anteriormente se puede discernir la forma en la que ocurre el efecto fotovoltaico, por lo tanto, se puede afirmar que los fotones que son absorbidos por la celda, son los que realmente producen la energía eléctrica. Componentes en el armado de una instalación fotovoltaica interconectada a la red. En el caso de este proyecto la instalación era interconectada a la red por lo tanto sus componentes son únicamente los módulos fotovoltaicos, los inversores, dos cajas combinadoras, un tablero de distribución y un medidor bidireccional. En la Especificación CFE G0100-04 se establece que los componentes de un sistema fotovoltaico interconectado a la red deben ser los siguientes: “*Generadores fotovoltaicos, subsistema de acontecimiento de potencia, interfaz a la red, carga local y Punto de interconexión*”.

Como ya se había mencionado anteriormente una instalación fotovoltaica interconectada a la red está constituida por un inversor, módulos fotovoltaicos, cajas combinadoras, medidor bidireccional y tableros de distribución.

Flores también menciona que un sistema fotovoltaico interconectado a la red consta principalmente de los siguientes componentes:

- 1) Arreglos de módulos fotovoltaicos.
- 2) Estructura de soporte y cimientos del arreglo.
- 3) Reguladores de voltaje y otros controles, típicamente un controlador de carga de batería, un inversor de corriente CD/CA o un rectificador CA/CD.
- 4) Baterías de almacenamiento eléctrico y recinto para ellas.
- 5) Instrumentos.
- 6) Cables e interruptores.
- 7) Red eléctrica circundante.
- 8) Cercado de seguridad, sin incluir las cargas eléctricas. (*mjesus@hotmail.com*)

El generador fotovoltaico es lo que anteriormente se menciona como captador solar, el subsistema de acondicionamiento de potencia se menciona como inversor, Interfaz con la red es lo que se menciona como medidor, en este caso bidireccional y la red eléctrica es la conexión a CFE.

## **11.5 Desarrollo de la investigación**

### **11.6 Problemática**

La capacidad instalada de emplazamiento fotovoltaico en el edificio de la Biblioteca en la escuela Preparatoria Uno es de 10 kW, sin embargo, lo generado bajo condiciones de campo eran únicamente 8 kW, es por ello que se realizó un estudio de campo para corroborar si la disminución de la eficiencia energética de la instalación era por el incremento de temperatura, ya que se había realizado una revisión de todos los aspectos que podrían provocar este comportamiento y se encontraban en buenas condiciones.

### 11.7 Hipótesis

El comportamiento de los módulos fotovoltaicos analizados presenta variaciones de temperatura entre sí.

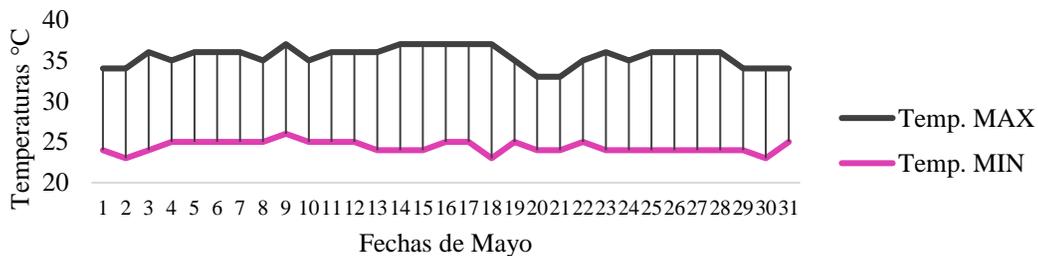
La temperatura disminuye la eficiencia de los módulos fotovoltaicos en más del 10%.

### 11.8 Proyecto

El proyecto de investigación permitirá conocer el efecto de la temperatura en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos, haciendo un estudio de campo para obtener datos reales y específicos de temperatura y velocidad del viento que permitirán demostrar el comportamiento en las diferentes condiciones climáticas que prevalecen en el sitio de la instalación. Cuando se realiza una instalación fotovoltaica es necesario dimensionarla atendiendo dos principios fundamentales: la demanda de energía (kW) y la potencia a instalar (Wp), pero para ello se deben tomar en cuenta otros aspectos, entre ellos las condiciones climáticas que prevalecen en el lugar de la instalación. Una de las principales problemáticas que se registran en los sistemas fotovoltaicos es la disminución de su eficiencia causada por la temperatura del módulo.

En la ciudad de Mérida, Yucatán históricamente se tiene registro de que los veranos son cortos, opresivos y parcialmente nublados y los inviernos son calientes, bochornosos y mayormente despejados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 18 °C a 36 °C y rara vez baja a menos de 14 °C o sube a más de 39 °C, con base a dicha información podemos inferir que la temperatura en la superficie de los módulos fotovoltaicos instalados en esta zona podría llegar a temperaturas por encima del dato histórico (Gráfica 11.1).

**Gráfico 11.1** Temperaturas registradas en el mes de Mayo



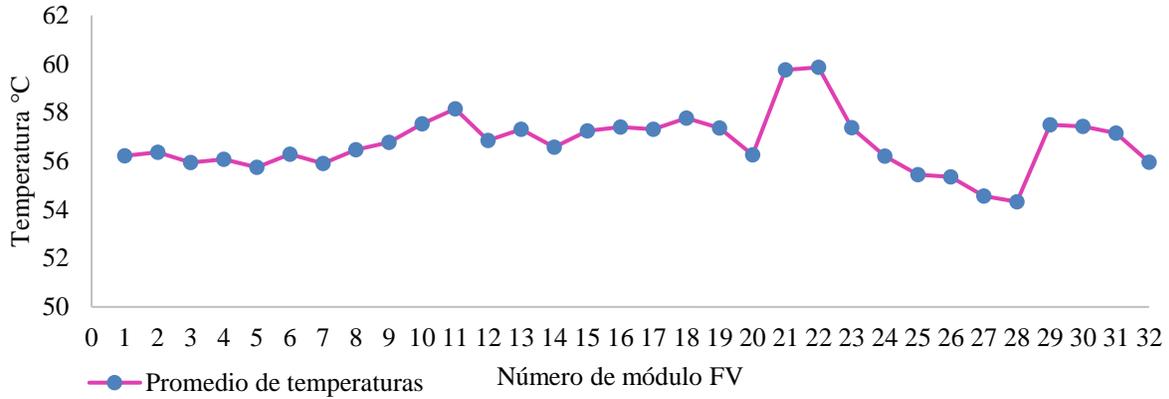
Fuente: Weather Spark.

**Tabla 11.1** Temperatura de módulos fotovoltaicos generada (14:00 hrs)

Módulo	Promedio de temperaturas						
1	56.22	9	56.77	17	57.31	25	55.45
2	56.36	10	57.53	18	57.77	26	55.35
3	55.94	11	58.15	19	57.37	27	54.56
4	56.07	12	56.85	20	56.26	28	54.33
5	55.75	13	57.31	21	59.76	29	57.50
6	56.28	14	56.58	22	59.86	30	57.43
7	55.90	15	57.25	23	57.38	31	57.15
8	56.47	16	57.40	24	56.21	32	55.96

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 11.2** Temperatura de módulos fotovoltaicos generada (14:00 hrs)



Fuente: Elaboración propia

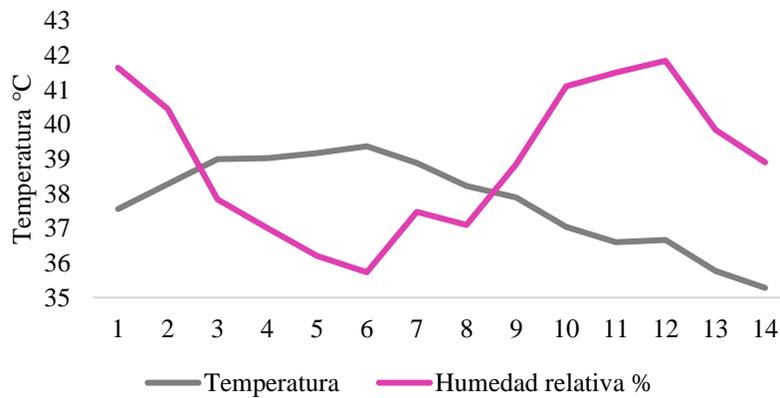
Como se observa en la gráfica anterior las temperaturas registradas en la superficie de los módulos fotovoltaicos a las 14:00 hrs oscilan entre los 54°C Y los 60°C.

**Tabla 11.2** Temperatura ambiente registrada (20/Mayo/2019)

Temperatura	Humedad relativa %	Temperatura	Humedad relativa %
37.56	41.634	38.22	37.1
38.28	40.45	37.89	38.85
39	37.834	37.04	41.1
39.03	37.01	36.6	41.5
39.17	36.2	36.66	41.84
39.37	35.73	35.77	39.85
38.89	37.48	35.28	38.91

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 11.3** Temperatura ambiente registrada



Fuente: Elaboración propia

**11.9 Ubicación geográfica del edificio**

El estudio se efectuó en las instalaciones del centro educativo Escuela Preparatoria Uno de la Universidad Autónoma de Yucatán ubicado en la calle 41 s/n, Col. Cd. Industrial, Mérida, Yucatán. Este centro educativo cuenta con una instalación fotovoltaica que fue dimensionado para producir 10 kW en potencia máxima, disminuyendo así un 60% del consumo del edificio en el que está instalado.

El edificio en el que se realizó el análisis de campo tiene una latitud de 20.9777° y una longitud de -89.5990°, la trayectoria del viento indica que las corrientes llegan al edificio desde el sureste, con corrientes de hasta 10m/s.

## 11.10 Metodología

Para llevar a cabo el estudio de la situación antes mencionada se realizaron las siguientes actividades:

- Selección de grupo de módulos fotovoltaicos con los que se realizará el estudio.
- Caracterización de la superficie de los módulos fotovoltaicos.
- Medición de temperatura en la superficie de los módulos fotovoltaicos
- Análisis de producción
- Análisis de datos obtenidos.

Para la obtención de datos reales se realizó un estudio de campo con el objetivo de examinar las temperaturas reales a las que llegaban los módulos fotovoltaicos mencionados anteriormente, seguido a esto se propuso una hipótesis que llevaría un proceso de estudio para saber si esta se acepta o se rechaza. Se presenta un análisis de la afectación del viento en la temperatura de los módulos.

Finalmente se presenta la observación del fenómeno causado por la radiación solar en los módulos fotovoltaicos, así como una propuesta de posible solución a la problemática encontrada.

## 11.11 Selección de grupo de módulos fotovoltaicos con los que se realizará el estudio

Para este proyecto fue necesario el uso de una instalación fotovoltaica que esté en uso debido a que se necesitaba corroborar que no existieran fallos en el sistema y ningún otro tipo de riesgo que estuviera generando variaciones en la producción, hay que recordar que durante la generación de electricidad con paneles fotovoltaicos no hay emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>), por lo que este tipo de energía es respetuosa con el medio ambiente y actualmente es la más instalada en el sector de Mérida.

Al iniciar el proceso de selección, se analizó cuál de los edificios en el interior de la Escuela Preparatoria Uno de la UADY podría aportar mayor confiabilidad a la investigación, se utilizó el criterio de seguridad y una altura que no representara un riesgo mayor, además de aspectos que no presentara sombreado y finalmente se decidió que el lugar en el cual se llevaría a cabo el proyecto era el edificio de Biblioteca (Figura 11.1). Esta instalación fotovoltaica es la que no ha presentado ningún tipo de falla, ni ha disminuido su producción desde el momento en el que se instaló, en los emplazamientos ubicados en los edificios de aulas, usualmente presentan condiciones que podrían poner en duda los resultados de la investigación, actualmente la instalación ayuda al ahorro del 80% de la energía consumida en la biblioteca.

**Figura 11.1** Edificio seleccionado para el estudio



*Fuente: Elaboración propia*

Los módulos fotovoltaicos utilizados en esta instalación fueron de marca Sunwalt bifacial Monocrystalino de 315 W. El edificio en el que se realizaron las mediciones cuenta con 4 arreglos fotovoltaicos de 16 módulos cada uno, haciendo un total de 64 módulos. Estos conectados en series de 32 módulos que se dirigen a 2 inversores FRONIUS sin transformador (Figura 11.2).

**Figura 11.2** Inversores Fronius utilizados en la instalación



*Fuente: Elaboración propia*

### 11.12 Caracterización de módulos fotovoltaicos

Para tener una mayor certeza del estudio realizado se debía tener la mayor cantidad de muestras posibles, considerando lo anterior se decidió caracterizar los módulos fotovoltaicos de tal forma que se tomaron 12 mediciones a cada módulo, colocando los puntos de muestreo de manera simétrica para tener la caracterización del módulo completo, de esta manera se pudo obtener el promedio de la temperatura del módulo por día.

La idea de caracterizar un objeto, cuando se realiza algún estudio, es para modelar las condiciones que prevalecen en el equipo o su alrededor, esto a su vez da la pauta de estar midiendo la estructura completa del módulo, así cuantas más mediciones mayor certeza tendrá el resultado o el estudio. Al registrar la temperatura en un solo punto tienes mayor rango de incertidumbre ya que no se puede asegurar que la medición se tome siempre en el mismo punto, obteniendo un promedio de temperaturas aceptable para el estudio. Los datos se tomaron de esa manera debido a dos aspectos, tener mayor cantidad de muestras de temperatura de la superficie de los módulos fotovoltaicos y para poder cumplir los supuestos de la prueba estadística T de Student, los cuales se muestran a continuación:

1. Muestra aleatoria
2. Independencia de observaciones.
3. Distribución normal o  $n > 30$  en cada uno
4. Varianzas iguales.

Tomando las 12 mediciones por módulo fotovoltaico se obtenía un promedio, cada cadena contenía 32 módulos por lo que se cumplen los supuestos 1, 2 y 3, en el apartado de análisis datos se muestra más a detalle esta parte.

### 11.13 Medición de temperatura

Los equipos utilizados para la medición de temperatura fueron dos Termolaser 568 IR marca FLUKE de medición puntual con 1% o 1°C de incertidumbre, un registrador de datos marca HOBO y un Termoanemómetro CFM master II digital con 1% o 1 m/s de diferencia (Figura 11.3).

**Figura 11.3** Equipos utilizados para mediciones

Fuente: Elaboración propia

El equipo de medición FLUKE Termolaser fue calibrado con ayuda de un termómetro patrón que fue tomado como referencia para verificar la certeza de los datos a meCoord

Las mediciones se realizaron en intervalos de tiempo definidos siendo estas mediciones cada hora, justo el tiempo para medir los 64 módulos, por la cantidad de módulos fotovoltaicos y el periodo de tiempo para tomar las mediciones se utilizaron dos Termolaser y las mediciones fueron tomadas simultáneamente a cada cadena.

Las mediciones efectuadas se realizaron en dos semanas diferentes.

La primera semana se realizó una medición de 12 horas, de 7:00 am a 7:00 pm, en toda la instalación del edificio de Biblioteca de la Escuela Preparatoria Uno; al realizar esta medición se tomaron muestras de las dos cadenas de manera simultánea con dos equipos de Termolaser FLUKE.

En la segunda semana las mediciones fueron tomadas de la misma forma por toda una semana completa, solo que en este caso tomando en cuenta solo las horas solares pico, las mediciones fueron efectuadas de 10:00 am a 2:00 pm.

#### 11.14 Análisis de producción energética

Se analizó el comportamiento de la producción energética y su disminución con respecto a la temperatura. Se tomó en consideración la siguiente fórmula utilizada por Mattei *et.al* en 2006:

$$\eta = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_r) + \gamma \text{Log} \phi_r] \quad (1)$$

Donde:

$\eta$ = eficiencia real del módulo fotovoltaico.

$\eta_r$ = es el valor de referencia de la eficiencia del módulo a una temperatura de 25°C.

$\beta$ = Constante para el silicio. (.0044°C)

$\gamma$ = Constante para el silicio. (0)

$T_c$ = Temperatura de la celda.

$T_r$ = Temperatura de placa. (25°C)

$\Phi_r$ = Irradiación (1000 W/m<sup>2</sup>)

Basándose de la formula anterior se adaptó a los datos de medición, con lo cual se obtuvo el siguiente modelo matemático:

$$K_T = 1 + \frac{C_T(T_{celdas} - 25^\circ C)}{100} \tag{2}$$

Donde:

$K_T$ : Porcentaje de potencia que entrega el módulo.

$C_T$ : Coeficiente de temperatura del módulo fotovoltaico.

$T_{celdas}$ : Temperatura de las celdas.

Aplicando esta fórmula, tomando en cuenta la muestra de datos en hora pico, la máxima producción de la instalación es de 10kW por lo que se busca comprender la causa de que la producción sea solo de 8kW al día, se llegó a lo siguiente:

$$K_T = 1 + \frac{C_T(T_{celdas} - 25^\circ C)}{100}$$

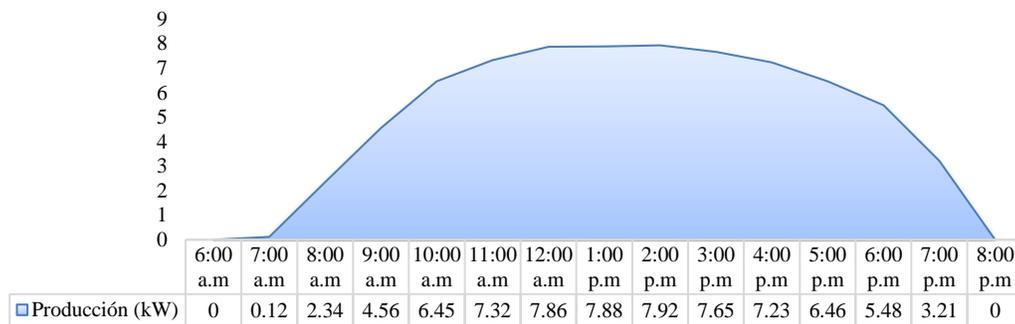
$$K_T = 1 + \frac{-0.40 (61^\circ C - 25^\circ C)}{100}$$

$$K_T = 1 - 0.1144$$

$$K_T = .856$$

Lo cual significa que el módulo solo entregará el 85.6% de su potencia pico a esa temperatura. Este porcentaje de pérdidas puede variar con respecto a la temperatura a la que se encuentre el modulo fotovoltaico. Por lo tanto, se estima que en el caso de un día soleado se presenta un porcentaje de pérdidas en la producción del 15 %. En la Gráfica 11.4 se muestra el comportamiento característico de producción en un día soleado:

**Gráfico 11.4** Producción del sistema en un día soleado



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica anterior se muestra una producción de un día soleado, que no sobrepasa los 8 kW de producción, cabe recalcar que la instalación fotovoltaica fue dimensionada para generar 10 kW.

Los 0.56 kW restantes obtenidos en la formula aplicada anteriormente, son pérdidas por factores diferentes al aumento en la temperatura del emplazamiento, factores como: suciedad, inclinación, orientación, que, al ser estudiados en publicaciones de otros autores, no representan grandes pérdidas.

En 2017 Díaz establece que “El ángulo óptimo de un sistema fotovoltaico debe coincidir con la latitud del lugar” (pag. 106), lo anterior considerando los cambios de inclinación del sol durante los meses del año.

**11. 15 Análisis de datos obtenidos**

Al analizar los datos obtenidos en la investigación de campo se observó que la temperatura varía con el paso de las corrientes de viento procedentes del Sureste, se tomó como muestra la temperatura de un módulo.

En el proceso se midió la temperatura en el momento que no había corrientes de viento significativas y se tomaba una lectura, siendo mayor en 1°C que al momento de dejar pasar el viento.

Esto se realizó como muestra de que el viento influye en el cambio de temperatura de los módulos fotovoltaicos. Esto debido a uno de los tres tipos de transferencia de calor, la convección, el modulo se calienta, viento pasa por encima y se lleva cierta cantidad de calor con él a otra parte.

Con respecto a los datos obtenidos de las mediciones de temperatura de los módulos, se analizaron los datos obtenidos con un software de análisis estadístico y se plantearon las hipótesis mencionadas anteriormente.

Para el análisis estadístico se utilizó la prueba de datos no paramétricos de T de Student, este se realizó en el software STATA, con el cual se obtuvieron los datos que se muestran a continuación:

**Tabla 11.3 Análisis de datos STATA**

Paired t test						
Variable	Obs	Mean	Std. Err.	Std. Dev.	[95% Conf. Interval]	
DIA 111	32	53.04094	.3191876	1.805598	52.38995	53.69193
DIA 211	32	50.91906	.2203728	1.246617	50.46961	51.36852
Diff	32	2.121875	.4934174	2.79119	1.115544	3.128207
Mean (diff) = mean (DIA111 - DIA211)				t = 4.3004		
Ho: mean (diff) = 0			degrees of freedom = 31			
Ha: mean (diff) < 0		Ha: mean (diff) ≠ 0		Ha: mean (diff) > 0		
Pr (T < t) = 0.9999		Pr ( T  >  t ) = 0.0002		Pr (T > t) = 0.0001		

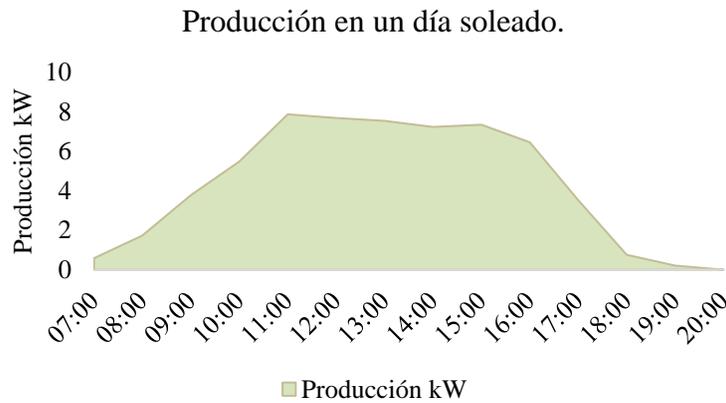
*Fuente: Elaboración propia*

En el análisis con T de Student se busca que el valor obtenido de p sea menor a 0.05 ya que esto nos dará una certeza de un 95% dejando sólo un margen del 5% de error en el estudio realizado.

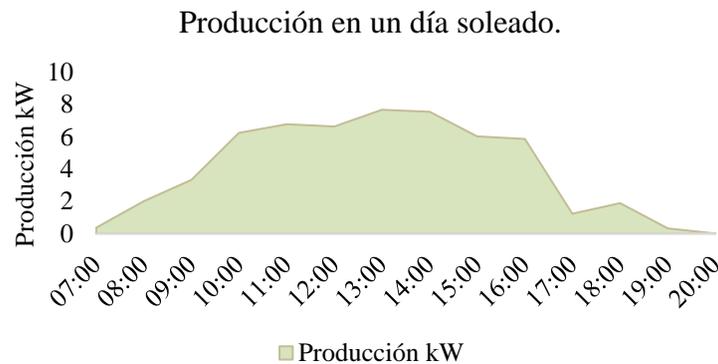
Se realizó el mismo análisis con todos los grupos de datos para demostrar estadísticamente la hipótesis inicial.

En los datos presentados anteriormente se muestra que el valor obtenido de p es  $0.05 > 0.0002$  por lo tanto la Hipótesis no se rechaza. Es decir, existe diferencia significativa entre las temperaturas de los módulos fotovoltaicos.

Entre los registros de datos se obtuvieron temperaturas de hasta 61°C en la superficie del módulo fotovoltaico, esto afectó la producción evitando que llegué a la capacidad que en un principio se consideró. En las Gráficas 11.5 y 11.6 se muestran el comportamiento de la producción en días representativos, el día soleado y nubosidad media, respectivamente:

**Gráfico 11.5** Producción de instalación en un día soleado

Fuente: Elaboración propia con el software Fronius Web

**Gráfico 11.6** Producción de instalación en un día con nubosidad media

Fuente: Elaboración propia con el software Fronius Web

Observando las gráficas anteriores, se infiere que la nubosidad, así como la temperatura afecta directamente a la producción de energía eléctrica de la instalación fotovoltaica de estudio. De igual forma se observa que al permanecer la nubosidad por mucho tiempo afecta en la producción, haciendo que se produzcan 3 kW menos de lo que debería producirse. Cabe recalcar que los datos obtenidos se dieron en un periodo de días soleados y con una ligera de nubosidad, es por ello que se muestra la producción representativa de esos dos días.

### 11.16 conclusiones y recomendaciones

Con este estudio se analizaron los componentes que pueden afectar a la instalación fotovoltaica, considerando principalmente el factor de la temperatura.

Se analizaron los datos obtenidos con una corrida estadística aplicando T de Student, esto para comprobar o desaprobar la hipótesis de que el comportamiento de los módulos fotovoltaicos analizados presenta variaciones de temperatura entre sí. Al haberse tomado 32 muestras se permite el uso de esta prueba estadística para evaluar la hipótesis presentada.

Se observó que en la potencia instalada era de 10 kW y la producción de energía en la Escuela Preparatoria Uno, no sobrepasaba los 8 kW, con los resultados obtenidos mediante la investigación se estima que el 85% de la potencia instalada es lo que se está generando. En el caso del día soleado, se presenta un porcentaje de pérdidas en la producción del 15% de la misma potencia instalada por el factor temperatura.

Como se observa en las gráficas analizando las dos posibles situaciones, soleado y medio nublado, en un día soleado, el paso de una nube por encima de la ubicación de la instalación puede disminuir su producción de 7.85 kW hasta 4.5 kW. En un día medio nublado se muestran variaciones en la producción pero que a su vez no afecta en gran medida el rendimiento de la instalación.

Relacionando el comportamiento de la temperatura en instalación fotovoltaica y el enfriamiento por las corrientes de viento se podría establecer un mecanismo de enfriamiento a módulos fotovoltaicos que favorecería a la producción de energía eléctrica de la misma, utilizando el sistema de barrido de calor por convección.

### 11.17 Referencias

- Cepeda, J. (2017) Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus posibles soluciones. Bogotá, Colombia.
- Mendieta Vicuña, D.; Escribano, J.; Esparcia, J. (2017). Electrificación, desarrollo rural y buen vivir. Cuadernos Geográficos 56(2), 306-327
- Terol Calvo, S. (2020). El acceso a la energía distribuida en conjuntos residenciales. Evaluación de sistemas fotovoltaicos comunitarios en la Villa Olímpica (Doctoral dissertation).
- Caicedo Vargas, J. S. (2020). Evaluación técnico ambiental para la implementación del sistema fotovoltaico para la iluminación de la vía nacional que cruza la ciudad de Sogamoso (Boyacá).
- BARRAGÁN-ESCANDÓN, E. A., et al. (2019). “Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica”. Bitácora Urbano Territorial, 29 (2): 39-48.
- Solar, E. (2020). Energía Solar. Acceso em, 15(03).
- Guinand Rodríguez, K. J., & Quintero Santana, S. (2020). Protocolo y procedimiento aplicado a instrumentación piranómetro para medición de radiación solar. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_automatizacion/776](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion/776)
- Trejos, L.A (2020). Análisis del comportamiento de arreglos fotovoltaicos con degradación operando bajo condiciones de sombreado parcial. Publicación semestral de carácter técnico-científico / Universidad EIA, Envigado (Colombia).
- Flores Azcanio, L. N. (2020). Evaluación técnica para el uso de energía fotovoltaica en la extracción de agua subterránea en la Ciudad de México (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.)
- Díaz Santos, Raynel & Castro Fernández, Miguel & Santos Fuentefria, Ariel. (2017). Influencia del ángulo de inclinación de los módulos solares en la generación de electricidad de una central fotovoltaica. Especificación CFE G0100-04 Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red.
- Fronius (2019) Solarweb. Fronius, Yucatán, México: Solarweb: Recuperado de: <https://www.solarweb.com/Chart/Chart?pvSystemId=a3e82262-c9d2-4474-a9ee-d2daea38416d>
- Solargis (2019) Solar resource maps of Mexico. Mexico, Mexico City: Solargis. Recuperado de: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/mexico>
- Weatherspark (2019) Temperatura promedio Mérida. Mérida, Yucatán. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/d/12379/5/31/Tiempo-promedio-el-31-de-mayo-en-M%C3%A9rida-M%C3%A9xico#Sections-Temperature>