



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

T E S I S

“VIABILIDAD Y EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS IMPLEMENTANDO UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO-LIMPIEZA AUTOMATIZADO”

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN DESARROLLO SUSTENTABLE

PRESENTA:

M. EN C. LUIS ALBERTO HERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ

DIRECTOR(ES) DE TESIS:

**DR. JOEL PANTOJA ENRÍQUEZ
DR. GUILLERMO ROGELIO IBÁÑEZ DUHARTE**

COMITÉ TUTORIAL:

**DR. JOEL MOREIRA ACOSTA
DR. ROILÁN IGLESIAS DÍAZ**

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, OCTUBRE DEL 2020.



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 20 de Noviembre de 2020
Oficio No. DGIP/CP/0178/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

C. Luis Alberto Hernández Domínguez
Candidato al Grado de Doctor en Ciencias en
Desarrollo Sustentable
UNICACH
Presente

Con fundamento en la **opinión favorable** emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **"Viabilidad y evaluación del rendimiento de módulos fotovoltaicos implementando un sistema de enfriamiento-limpieza automatizado"**, cuyo director de tesis es el Dr. Joel Pantoja Enríquez, quien avala el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección General a mi cargo **autoriza** la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Doctor en Ciencias en Desarrollo Sustentable**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección General de un ejemplar empastado.

Respetuosamente
"Por la Cultura de mi Raza"



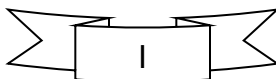
Lic. Aurora Evangelina Serrano Roblero
Directora General

C.c.p. Dr. Roberto Horacio Alboreo Arzate. Director de la Facultad de Ingeniería UNICACH. – Para su conocimiento
Dr. Arturo Carrillo Reyes. Coordinador de la Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión de Riesgos UNICACH. –
Para su conocimiento.
Expediente
*AESR/igp/rags



Libramiento Norte Poniente No. 1150, Colonia Lajas Maciel
CP 29039, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
Tel: (961)6170440 Ext. 4360
investigacionyposgrado@unicach.mx

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
75 años de creación y 20 de autonomía

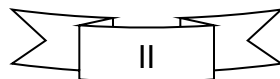


DEDICATORIAS

A la memoria de mi madre, a mi familia y a Dios.

“Nada vale la pena, ni no hay un esfuerzo real de por medio”

(LAHD 2010)



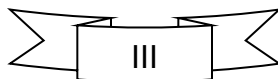
AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis el **Dr. Joel Pantoja Enríquez** y al **Dr. Guillermo Rogelio Ibáñez Duhate** por darme la oportunidad de trabajar bajo su dirección y por su importante apoyo para finalizar este trabajo. Así como a los doctores **Joel Moreira Acosta** y **Pascual López de Paz** por su valioso apoyo durante este proceso.

A la **Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH)** por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

A la empresa **ChiapaSolar S.C.** por el valioso apoyo para el suministro de equipos usados para desarrollo de la investigación.

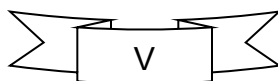
A mi tesista, el Ing. Gerardo López Marcilla, por los aportes y colaboración para el desarrollo de la investigación.



INDICE DE CONTENIDO.

ÍNDICE DE TABLAS -----	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS -----	IX
RESUMEN-----	12
ABSTRACT-----	14
INTRODUCCIÓN GENERAL -----	15
CAPÍTULO I.- ESTADO DEL ARTE-----	21
1.1.- INTRODUCCIÓN-----	21
1.2.- TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA -----	22
1.2.1.- Evolución de la Eficiencia.-----	24
1.2.2.- Generación de Electricidad.-----	26
1.2.3.- Costos de Generación.-----	28
1.3.- Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica. -----	29
1.4.- Enfriamiento y Limpieza para Módulos Fotovoltaicas.-----	35
1.5.- CONCLUSIÓN -----	46
CAPITULO II.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS-----	47
2.1.- Introducción-----	47
2.2.- Energía Solar-----	49
2.2.1.- La luz Solar-----	50
2.2.2.- Tipos de Radiación-----	52

2.2.3.- Hora Solar Pico -----	54
2.2.4.- Instrumentos de medición de Radiación Solar-----	55
2.3.- Energía Solar Fotovoltaica-----	57
2.3.1.- La celda Solar -----	58
2.3.2.- Tipos de celdas solares. -----	59
2.3.3.- Sistemas Fotovoltaicos.-----	62
2.3.4.- Módulo Fotovoltaico.-----	68
2.4.- Sistemas Electrónicos de control (Arduino).-----	75
2.5.- Modelo Matemático. -----	78
2.6.- Conclusión -----	81
CAPITULO III.- METODOLOGÍA (TÉCNICAS EXPERIMENTALES) -----	82
3.1.- Introducción. -----	82
3.2.- Funcionamiento del sistema automatizado de enfriamiento y limpieza. ---	82
3.2.1.- Componentes del Sistema de Control.-----	82
3.2.2.- Circuito en la placa fenólica o baquelita. -----	85
3.2.3 Conexiones de Arduino con placa fenólica. -----	86
3.3.- Descripción de los Componentes del Bombeo Fotovoltaico. -----	88
3.3.1.- Módulo FV de 100 Wp.-----	88
3.3.2.- Controlador de Carga.-----	89
3.3.3.- Bomba de Agua. -----	90



3.3.4.- Bateria de Descarga Profunda. -----	91
3.4.- Componentes de los Sistemas FV's para la prueba. -----	92
3.5.- Procedimiento de Evaluación. -----	93
3.6.- Análisis Costo-Beneficio. -----	95
3.7.- Análisis mediante Modelo Matemático.-----	97
3.8.- Conclusión -----	98
CAPITULO IV.- RESULTADOS Y DISCUSIONES-----	99
4.1.- Introducción. -----	99
4.2.- Evaluaciones previas. -----	99
4.2.1.- Evaluación 1 (35°C).-----	99
4.2.2.- Evaluación 2 (40 °C).-----	104
4.2.3.- Evaluación 3 (45°C).-----	108
4.2.4.- Cálculo de Eficiencias en las tres evaluaciones. -----	112
4.3.- Producción de Energía con Módulos FV de 255 Wp.-----	115
4.3.1.- Módulos FV desconectados. -----	115
4.3.2.- Sistema FV autónomo a 24 V. -----	118
4.4.- Proyección de Producción de Energía a mayor escala.-----	121
4.5.- Análisis de Costo-Beneficio del arreglo FV propuesto.-----	122
4.6.- Análisis comparativo con el Modelo Matemático. -----	124
4.6.1.- Altura de Película de Agua. -----	125

4.6.2.- Energía absorbida. -----	125
4.6.3.- Masa de agua necesaria.-----	126
4.6.4.- Potencia generada por el MFV. -----	128
CONCLUSIONES GENERALES.-----	129
REFERENCIAS -----	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Características eléctricas del Módulo FV de 100 Wp	88
Tabla 3.2.- Especificaciones técnicas del Controlador de carga.....	89
Tabla 3.3.- Especificaciones Técnicas de la Bomba de agua DP-35.....	91
Tabla 3.4.- Especificaciones Técnicas del Módulo FV de 255 Wp	92
Tabla 3.5.- Instrumentos de medición usados durante la evaluación	95
Tabla 4.1.- Eficiencia energética de la evaluación a 35 °C	113
Tabla 4.2.- Eficiencia energética de la evaluación a 40 °C	113
Tabla 4.3.- Eficiencia energética de la evaluación a 45 °C	114
Tabla 4.4.- Producción de energía al día por cada Módulo FV.....	118
Tabla 4.5.- Producción de energía al día por cada Módulo FV.....	121
Tabla 4.6.- Balance de costos de energía excedente por periodo.....	123
Tabla 4.7.- Ahorro neto por periodo	124
Tabla 4.8.- Incremento de temperatura promedio del agua durante el día	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Distribución de la demanda mundial de energía, 1990-2010 (Mtep)....	16
Figura 2.- Distribución de consumo mundial de Energía	17
Figura 3.- Incremento de la capacidad instalada de generación de electricidad de fuentes renovables al año 2025	18
Figura 1.1.- Tipos de materiales de Celdas Solares	24
Figura 1.2.- Estructura de un Módulo Fotovoltaico	26
Figura 1.3.- Evolución de la capacidad Instalada de algunas Energías Renovables	27
Figura 1.4.- Capacidad instalada de energía Solar Fotovoltaica hasta el 2015 (MW)	28
Figura 1.5.- Evolución de los costos de generación Fotovoltaica	29
Figura 1.6.- Esquema básico de un Sistema Fotovoltaico	30
Figura 2.1.- Distribución espectral de la Radiación Solar	53
Figura 2.2.- Tipos de Radiación	54
Figura 2.3.- Gráfica representativa de la Hora Solar Pico.....	55
Figura 2.4.- Piranómetro con Termopila y piranómetro con Celda FV.....	57
Figura 2.5.- Solarímetros portátiles digitales.....	57
Figura 2.6.- Representación física del efecto Fotovoltaico en una Celda Solar....	59
Figura 2.7.- Componentes de un SFCR.....	64
Figura 2.8.- Componentes de un SFVA	66
Figura 2.9.- Tipos de Módulos Fotovoltaicos	69
Figura 2.10.- Esquema de los parámetros eléctricos de una Celda Solar.....	70
Figura 2.11.- Efecto de punto caliente	73
Figura 2.12.- Efecto de sombreado por excremento de ave.....	74
Figura 2.13.- Plataforma Arduino.	78
Figura 3.1.- Plataforma Arduino Mega.	83
Figura 3.2.- Sensor de Temperatura.....	83
Figura 3.3.- Relevador de un canal.....	83
Figura 3.4.- Pantalla LCD.....	84
Figura 3.5.- Regulador de Voltaje.	84

Figura 3.6.- Placa Fenólica.	84
Figura 3.7. Diseño del circuito para el sistema de enfriamiento.....	85
Figura 3.8.- Placa de conexiones con pistas impresas.	86
Figura 3.9.- Componentes instalados en la placa de conexiones.	86
Figura 3.10.- Conexiones del módulo max6675 a Arduino.	87
Figura 3.11.- Conexiones del relevador de un canal a Arduino Mega.	87
Figura 3.12.- Conexiones de la pantalla LCD a Arduino Mega.	87
Figura 3.13.- Módulo FV de 100 Wp.	88
Figura 3.14.- Esquema de conexión del Controlador de carga.	90
Figura 3.15.- Medidas y partes físicas de la Bombad de agua.	91
Figura 3.16.- Baría Solar.	91
Figura 3.17.- Esquema de conexión del sistema de bombeo para enfriamiento. .	92
Figura 3.18.- Esquema de conexión del Sistema FV a 24V.	93
Figura 3.19.- Módulos FV: a) Con enfriamiento; b) Limpio; c) Sucio.	94
Figura 4.1.- Evolución del Voltaje en módulos FV.	100
Figura 4.2.- Evolución de la Intensidad en módulos FV.	100
Figura 4.3.- Evolución de la Temperatura en módulos FV.	101
Figura 4.4.- Evolución de la Temperatura del agua, ambiente y módulo FV.	102
Figura 4.5.- Evolución de la Potencia en módulos FV.	102
Figura 4.6.- Área de potencias en módulos FV.	103
Figura 4.7.- Área de Potencia neta en Módulos FV.	104
Figura 4.8.- Evolución del Voltaje en módulos FV.	104
Figura 4.9.- Evolución de la Intensidad en los módulos FV.	105
Figura 4.10.- Evolución de la Temperatura en módulos FV.	105
Figura 4.11.- Evolución de la Temperatura del agua, ambiente y módulo con técnica de enfriamiento.	106
Figura 4.12.- Evolución de las Potencias en módulos FV.	106
Figura 4.13.- Área de potencias en módulos FV.	107
Figura 4.14.- Área de potencias netas en módulos FV.	108
Figura 4.15.- Evolución del Voltaje en módulos FV.	108
Figura 4.16.- Evolución de la Intensidad en módulos FV.	109

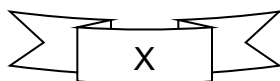


Figura 4.17.- Evolución de la Temperatura en módulos FV.....	109
Figura 4.18.- Evolución de la Temperatura del agua, ambiente y módulo con técnica de enfriamiento.	110
Figura 4.19.- Evolucion de la Potencia en módulos FV.	110
Figura 4.20.- Área de potencia en módulos FV.....	111
Figura 4.21.- Área de potencias netas en módulos FV.	112
Figura 4.22.- Variación de las Temperaturas en cada Módulo FV durante el día.	116
Figura 4.23.- Variación del Voltaje a circuito abierto e Irradiación durante el día.	116
Figura 4.24.- Variación de la I_{sc} e Irradiación durante el día.	117
Figura 4.25.- Variación de la Radiación, Temperaturas ambiente, agua y MFV's.....	119
Figura 4.26.- Variación del V_{mp}	119
Figura 4.27.- Variación de la I_{mp}	120
Figura 4.28.- Variación de la Potencia de los MFV's.	121

RESUMEN

El presente trabajo de investigación muestra el estudio del efecto de la temperatura y el polvo sobre la eficiencia de los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) durante la producción de energía. Esto se realiza mediante la implementación de un Sistema Automatizado de Enfriamiento y Limpieza (SAEL), el cual permite controlar la temperatura y limpiar la superficie de los Módulos Fotovoltaicos (MFV), usando agua como fluido de trabajo. Además, se realiza un análisis de Costo-Beneficio mediante la implementación del SAEL, y se sugiere el análisis comparativo mediante un modelo matemático existente, que permita predecir el comportamiento de los parámetros importantes para un SFV propuesto.

La evaluación se realiza usando 3 Sistemas FV, con Módulos de Silicio Policristalino de 255 Wp c/u: el primero, es acoplado al SEL (MFV1); el segundo, se evalúa con la superficie limpia, pero sin el SEL (MFV2); y el tercero, se evalúa con la superficie empolvada (MFV3). Las mediciones se realizaron cada 10 minutos durante 5 horas, con las siguientes configuraciones: A) módulos desconectados; B) Módulos conectados a un sistema aislado a 24V. En cada configuración, el SEL fue programado para mantener la temperatura a 40°C. El análisis de Costo-Beneficio se realiza mediante el balance neto de producción de energía eléctrica, costo del sistema de enfriamiento y costo comercial de la energía, y además, se considera la cantidad de CO₂ que se dejan de emitir. Por otro lado, el modelo matemático, es evaluado y comparado con los parámetros obtenidos en la práctica, dicho modelo predice la Potencia del Módulo, la energía calorífica absorbida y la masa de agua necesaria para un nivel de temperatura.

Los resultados obtenidos del estudio del Efecto de la Temperatura y el Polvo sobre la generación de Energía de los Sistema FV, muestran que: al reducir en 15 °C la temperatura de la superficie de los Módulos FV's (manteniéndolo a 40 °C) durante las horas pico de radiación, aumenta 35.45% de producción de energía, equivalente a 278.13 Wh/día. Además, si el sistema de enfriamiento es aplicado a un Arreglo de 10 Módulos FV, se obtiene una producción excedente de energía de 4.25 kWh/día. Por otro lado, se puede obtener un ahorro económico de \$100,350.00 durante la vida útil del Arreglo FV. Así también, se dejan de emitir 0.81 toneladas de dióxido de carbono al año.

Palabras Claves: Sistemas Fotovoltaicos, Eficiencia, Enfriamiento, Limpieza, Viabilidad.

ABSTRACT

This work presents the study of the effects of temperature and dust on the performance of Photovoltaics Systems (PVS) during power generation. The control of temperature and cleaning of the Photovoltaic Modules (PVM), was realized through an Automatic Cooling and Cleaning System (ACCS), using water as work fluid.

The test was realized using 3 PVS, with Polycrystalline Silicon Modules of 255 Wp each one: the first one, was coupled at the ACCS (PVM1); the second, was evaluated with the clean Surface, but without the ACCS (PVM2); and the third, was evaluated with the dusty Surface (PVM3). Measuring was realized each 10 minutes during 5 hours, with the next configurations: A) The PVMs disconnected; B) PVM's connected to off grid system to 24V. In each configuration, ACCS was programmed to maintain the Temperature to 40 °C.

The results obtained from effect of the temperature and dust on the behavior of PVS, show us that: to the reduce in 15 °C the Surface temperature of the PVM (keeping it at 40°C) during peak radiation hours, the energy generation increase 35.45%, equivalente to 278.13 Wh/day. Also, if the ACCS is applied to an array of 10 PV Modules, a surplus energy production of 4.25 kWh/day is obtained. On the other hand, an economic saving of \$100,350.00 Mx can be obtained during the useful life of the PV Modules. Also, they stop emitting 0.81 tons of carbon dioxide per year.

Key Words: Photovoltaic Systems, Efficiency, Cooling, Cleaning, Viability.

INTRODUCCIÓN GENERAL

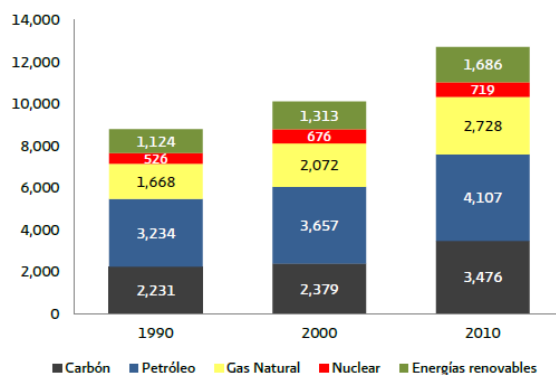
En las últimas décadas han surgido temas que generan inquietud en gran parte de la población (especialmente a investigadores de diversas áreas), tales como los relacionados con el incremento poblacional, degradación del ambiente, y por ende, las formas eficientes de producción de energías limpias. Como consecuencia surge la necesidad de encontrar un balance entre la conservación del medio ambiente, el desarrollo económico de los diferentes países y la satisfacción de todos los sectores de la población, los cuales se han conjugado en lo que hoy denominamos “Sostenibilidad”, que ha tenido un avance considerable y su popularidad ha llegado a varios países del mundo (Manzini y Macías, 2004).

Por otro lado, la sostenibilidad aplica en las formas de producción de energía como una de las necesidades básicas del individuo, el cual tiene que ser eficiente y limpia, ya que el uso desmedido de los recursos energéticos ha provocado que la disponibilidad de los recursos, año con año reduzcan en proporción al aumento de la población y que además se generen grandes cantidades de contaminantes durante dicha producción.

El incremento de la población en los últimos años ha sido considerable alrededor del mundo y por consecuencia, la demanda energética también ha incrementado. Según el Fondo de Población de Naciones Unidas a finales del 2050 la población mundial podría exceder a más de 9 mil millones de individuos, mientras que en la actualidad somos aproximadamente 7,000 millones (CINU, 2011).

Esto significa que a finales de siglo, la producción de energía debe incrementar alrededor de un 30% de lo que actualmente se produce para lograr satisfacer las

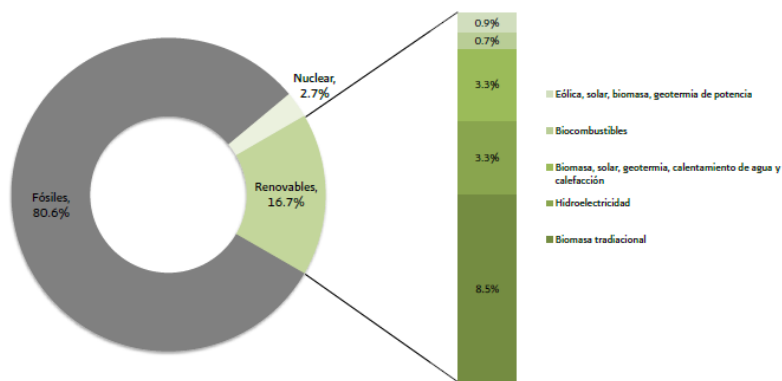
necesidades de la población mundial, con ello podemos imaginar que si en 2010 la producción de energía primaria fue de aproximadamente 12,879.3 millones de toneladas equivalentes de Petróleo (Mtep), se consideraría que para el 2050 se necesitaría producir por lo menos 17,000 Mtep. De la producción total de energía a nivel mundial, el 13.09 % corresponde a las energías renovables, equivalente a 1,686 Mtep, como se muestra en la Figura 1 (SENER, 2011).



Fuente: *International Energy Agency, 2012. World Energy Balances.*

Figura 1.- Distribución de la demanda mundial de energía, 1990-2010 (Mtep).

Por otra parte, la energía proveniente de las fuentes renovables suministró el 16.7% del consumo final de energía y de ello, menos del 1% corresponde a la energía Fotovoltaica (ver Figura 2). Así también, se sabe que la tasa de crecimiento de la energía fotovoltaica es aproximadamente del 58% anual promedio durante el periodo 2006-2011, por lo que se perfila como una de las soluciones para solventar la demanda de energía de la población mundial (SENER, 2012).



Fuente: *Renewables 2012, Global Status Report, REN21, 2012.*

Figura 2.- Distribución de consumo mundial de Energía.

En México las estadísticas se comportan de manera similar, las fuentes de energías renovables cubrieron el 6.9% de la producción nacional de energía en el 2011, de un total de 9,190.76 PJ. De acuerdo a las metas a largo plazo establecidas por la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) y en la Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, se plantea incrementar la producción de las energías Renovables a un 35% de la producción total nacional (SENER, 2012). Para lograr la meta de un incremento del 35% de la participación de las Energías Renovables para el año 2025, según las proyecciones elaboradas por la Secretaría de Energía (SENER), se estima que se alcanzará una capacidad instalada de 30,000 MW para la generación de electricidad, con un incremento de 18,716 MW en la capacidad instalada existente, del cual el 11.6% será a través de Tecnología Fotovoltaica (ver Figura 3). Como se puede observar, la participación de la tecnología Fotovoltaica es de gran importancia para logra dicha meta y por ello surge el interés para la inversión en esta tecnología limpia para cubrir la demanda energética de la población nacional (PRO MEXICO, 2011).

Tipo de energía	Servicio público	Autoabastecimiento	Generación distribuida*	Total	% Part.
Eólica	2,023.0	8,264.2	991.0	11,278.2	60.3
Geotérmica	102.0	-	34.4	136.4	0.7
Hidráulica	3,531.0	575.1	435.2	4,541.3	24.3
Solar	-	-	-	2,241.6	12.0
Fotovoltaica	5.0	600.5	1,567.1	2,172.6	-
Termosolar	14.0	-	55.0	69.0	-
Biomasa	-	324.2	194.3	518.5	2.8
Total	5,675.0	9,764.0	3,277.0	18,716.0	100.0

Fuente: SENER

Figura 3.- Incremento de la capacidad instalada de generación de electricidad de fuentes renovables al año 2025.

Dentro del Plan Nacional de Desarrollo (PND2013-2018), en su objetivo 3.5 indica hacer del desarrollo científico, tecnológico y de innovación, pilares para el progreso económico y social sostenible. Contribuyendo a que la inversión nacional en investigación científica y desarrollo tecnológico crezca anualmente y alcance un nivel del 1% del PIB. Y acorde con el Plan Estatal de Desarrollo 2013-2018, en el apartado 4, plantea conseguir un Chiapas Sustentable, a través de la gestión para la protección ambiental y el avance en la ciencia y tecnología. De este modo el avance en las tecnologías renovables, en especial de la fotovoltaica, juega un papel muy importante para lograr los objetivos de desarrollo en el país.

Aunado a esto, se han propuesto varios trabajos relacionados a la energía Fotovoltaica, entre los más significativos se encuentran la innovación de nuevas tecnologías en materiales, desarrollo computacional, fabricación de accesorios para aumentar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos, así como los sistemas de control, los cuales han permitido el avance en la tecnología fotovoltaica.

El avance en esta tecnología radica en el incremento de la eficiencia de los dispositivos (celdas solares), así como las buenas prácticas y la correcta instalación de los componentes de los Sistemas Fotovoltaicos. El componente

principal del Sistema Fotovoltaico, es el Generador (Módulo Fotovoltaico), este componente debe cumplir con las características necesarias para la operación a la cual será aplicada.

Sin embargo, aun cuando los componentes y accesorios del sistema Fotovoltaico sean las más adecuadas, así como la correcta instalación de los mismos sean los correctos, estos pueden tener bajo rendimiento durante su operación debido a que las condiciones del ambiente influyen en gran medida.

Dentro de los factores ambientales que afectan constantemente al generador, así como a los otros componentes, es el incremento de la Temperatura y el polvo que cubre la superficie de frontal de este dispositivo. Por tal motivo, provoca que la energía eléctrica generada para el consumo final sea menor a la calculada previamente en el Dimensionado, provocando que la demanda de energía del usuario no sea cubierta satisfactoriamente.

Se sabe que para la operación óptima del Generador Fotovoltaico, se debe reducir el nivel de temperatura y remover el polvo que se acumula sobre este. Para ello, se requiere de un sistema automatizado que nos garantice el enfriamiento y la limpieza de los Módulos Solares Fotovoltaicos durante la operación del mismo.

Con ello, es evidente que el rendimiento del Sistema fotovoltaico será mayor, garantizando así, el mayor aprovechamiento de la Radiación Solar. De este modo, se logra cubrir la demanda neta de energía eléctrica del usuario.

La importancia de esto, consiste en el ahorro económico reflejado al final de un periodo, debido a la generación de mayor cantidad de energía.

La presente investigación está estructurada de tal forma que en cada parte permita el mejor entendimiento de la temática en cuestión, desde el planteamiento

del problema a resolver hasta los resultados más representativos obtenidos durante la investigación, lo que nos permitirá validar la Hipótesis. A continuación se describe cada parte que conforma este documento:

En el Capítulo I, se describen los trabajos previos realizados en cada tipo de tecnologías existentes, así como las investigaciones desarrolladas durante los últimos años, que se relacionan con el tema en cuestión. Tales como: Desarrollo de equipos de enfriamiento y limpieza de Módulos Solares Fotovoltaicos, así también, análisis de costo-beneficio de Sistemas ya instalados y proyectados de forma teórica.

En el Capítulo II, se presenta la parte teórica que nos sirve de apoyo para contextualizar los conceptos que son principios fundamentales para el desarrollo de la investigación. Dentro de ellos se pueden mencionar: La Energía Solar, Tecnologías actuales aplicadas a las Celdas Fotovoltaicas, Características de los Sistemas Fotovoltaicos, Marcas y Costos, además de los principios de Sistemas de control (Arduino). Posteriormente, en el Capítulo III, abordamos la parte Metodológica de la Investigación. En ella se presenta el procedimiento desarrollado para alcanzar los objetivos, tales como: El diseño analítico y gráfico del prototipo propuesto, la construcción, las evaluaciones o mediciones realizadas. Se presentan los Resultados y Discusiones en el Capítulo IV, estos obtenidos a partir del desarrollo del análisis en la parte metodológica (Capítulo III). Finalmente, se emiten las Conclusiones del trabajo de Investigación (Capítulo V), con base a los objetivos planteados al inicio del desarrollo de la Investigación.

También se colocan otros apartados como las Referencias (de apoyo para realizar la investigación), Anexos, publicaciones, propuestas de investigación a futuro.

CAPÍTULO I.- ESTADO DEL ARTE

1.1.- INTRODUCCIÓN

Las necesidades energéticas alrededor del mundo han ido en incremento de manera exponencial en los últimos años, de tal modo que uno de los retos más relevantes a la que nos enfrentamos es la de satisfacer la demanda de la población actual y venidera. Sin embargo, no solo se trata de satisfacer dicha demanda, sino que debemos considerar reducir la contaminación en el ambiente y además que los costos de producción de la energía se reduzcan al máximo.

Una de las formas de producción de energía que está introduciéndose al mercado de manera importante, son las llamadas energías renovables. Entre las más destacadas se encuentran la Hidráulica, Eólica y la Fotovoltaica. Estas últimas son las consideradas como detonadoras en el cambio de la producción de energía limpia, eficiente y económica, que solventarán en gran medida, la demanda de energía eléctrica a nivel Mundial.

Dentro de las Energías Renovables se destaca, por el incremento de participación a nivel mundial, la Energía Solar Fotovoltaica. Esta ha aumentado su demanda en el mercado mundial, ya que los costos han reducido de manera significativa, sin embargo, la eficiencia ha sido una de las problemáticas de gran importancia para los investigadores.

En los generadores Fotovoltaicos existe una íntima relación entre la conversión de la Radiación Solar a Energía Eléctrica en Corriente Directa y el incremento de la Temperatura, el cual afecta de forma considerable en el aprovechamiento de los sistemas, es decir, la eficiencia decrece a medida que la Temperatura en los

Módulos Fotovoltaicos aumenta.

En este capítulo nos centraremos en el análisis de sistemas de enfriamiento y limpieza, automatizados que se han desarrollado con la finalidad de conseguir un mayor rendimiento de los sistemas Fotovoltaicos durante la generación de energía en los Módulos Fotovoltaicos, se describen además, los avances de la tecnología durante los últimos años, lo cual nos permite conocer la importancia del sistema propuesto en este proyecto de investigación.

1.2.- TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

La tecnología fotovoltaica surge como una opción ante la alta demanda de energía y por el agotamiento de los recursos energéticos existentes (crisis energética de los 70`s), tiene como finalidad reducir la contaminación al ambiente mediante el aprovechamiento del recurso Solar. Esta se basa en dispositivos llamados Celdas Solares, definida como “dispositivos que convierten la energía de la luz del sol en energía eléctrica en forma directa, sin la necesidad de piezas móviles o algún tipo de combustión” (Pereda, 2005).

La energía Fotovoltaica es considerada como fuente renovable de energía, ya que utiliza al Sol como energía primaria y como bien sabemos, el Sol nos provee de mucha energía durante el día y su capacidad parece ser ilimitada. La radiación incidente sobre la Tierra es equivalente a más de 800,000 GWh de energía al año, lo que representa alrededor de 35,000 veces el consumo mundial en ese tiempo, y es 500 veces mayor que el equivalente energético suministrado por todas las demás fuentes de energía. La energía solar que recibe cada año la península Arábrica, zona geográfica donde radican las mayores reservas de petróleo, es el

doble del equivalente energético de las reservas mundiales de petróleo. La superficie de la Tierra recibe en 30 minutos una cantidad de energía solar equivalente al consumo energético mundial (Jiménez *et. al*, 2012).

La tecnología Fotovoltaica tiene importantes ventajas comparada con otras fuentes renovables de energía, los cuales son (Jiménez *et. al*, 2012):

- Su conversión es la más instantánea de todas.
- Es modular y aditiva, es decir, puede generar desde valores de potencia menores que el Watt hasta decenas de MW.
- No tiene partes móviles y el costo de mantenimiento es el más bajo de todos.
- Es una tecnología madura y aceptada internacionalmente.
- Es una tecnología que permite generar empleos y un desarrollo industrial sustentable.
- Es altamente confiable al ser el Sol una fuente de energía limpia, inagotable y de acceso libre.
- Es la mejor opción en fuentes renovables de energía para introducir en un ambiente urbano.
- Es fácil de producir e instalar a escala masiva.
- Es el modo más accesible de proveer de energía a los millones de personas sin electricidad en el mundo.

En la actualidad, en el mercado mundial, existen diversas tecnologías de materiales para la elaboración de las celdas solares, tales como las basadas en materiales de Silicio (cristalino, policristalino y amorfo), las basadas en películas delgadas como las de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS) y Teluro de Cadmio (CdTe).



Figura 1.1.- Tipos de materiales de Celdas Solares.

1.2.1.- Evolución de la Eficiencia.

La Energía solar Fotovoltaica es un área tecnológica que ha creado un mercado, pero que sigue en un desarrollo acelerado para mejorar su eficiencia y disminuir sus costos. Actualmente, las celdas de Silicio Cristalino dominan el mercado fotovoltaico, con una participación de 85% de las tecnologías que lo conforman. Se espera que este material continúe como líder en el desarrollo de Tecnologías Fotovoltaicas por lo menos durante la siguiente década (MIT, 2016). Las celdas de Silicio Monocristalinas muestran eficiencias entre 14% y 24.7%, mientras que las celdas de Silicio Multicristalino van de 12% a 20.3% en condiciones normales (la eficiencia de las celdas cristalinas de Silicio puede disminuir con el aumento de la temperatura).

Debido a su costo, las tecnologías de Silicio actuales podrían utilizarse en instalaciones en escalas de GW sin avances tecnológicos considerables, aunque todavía es posible incorporar mejoras en cuanto a su eficiencia.

Actualmente existen celdas solares fabricadas con películas delgadas de materiales semiconductores colocados en capas sobre un soporte de bajo costo. Las categorías principales de películas delgadas son: Amorfas (a-Si), con eficiencias desde 4% hasta 11.1%; películas delgadas de Silicio Multiunión (a-

Si/ μ c-Si), con eficiencias de hasta 40%; celdas de Telurio de Cadmio (CdTe), con eficiencias de 16.5%, y celdas de Cobre-Indio-(di)Selenio (CIS) y Cobre-Indio-Galio-di(Selenio) (CIGS), con eficiencias de 7% a 19.5%.

Desde hace varios años se desarrollan celdas solares con materiales orgánicos, que se agrupan en celdas completamente orgánicas y celdas solares híbridas sensibilizadas con tintes. Sin embargo, no se ha probado si este tipo de celdas puede contribuir en grandes sistemas eléctricos y, junto con las películas delgadas avanzadas, son parte de las nuevas tecnologías que se han desarrollado recientemente.

Nuevas investigaciones apuntan a la posibilidad de fabricación de celdas con eficiencias significativamente más altas. Una de las propuestas consiste en apilar materiales de distinto grosor en una multiunión (tándem o sándwich), por ejemplo, utilizando cristales semiconductores de medidas nanométricas. Utilizando esta técnica podrían alcanzarse eficiencias de más de 40% a costos relativamente bajos, aunque estos resultados no se han alcanzado aún a nivel laboratorio (IEA, 2011).

Los módulos fotovoltaicos (Figura 1.2) son un conjunto de celdas interconectadas entre sí con la capacidad de entregar un amplio rango de potencias que puede llegar hasta los cientos de Watts. Un módulo fotovoltaico de silicio común consta de 60 a 96 celdas solares individuales de 15 cm², cada una con capacidad de producir de 4 a 5 Watts en hora pico. Las dimensiones típicas de los módulos fotovoltaicos comerciales son de 1 m por 1.5 m por 4 cm, con capacidad para generar una potencia pico de 260 a 320 Watts. Actualmente existe la posibilidad de incrementar la eficiencia en los módulos comerciales y de reducir el costo y la

complejidad de su fabricación, así como la cantidad de silicio necesaria para generar 1 Watt y la dependencia de plata para la metalización de los contactos (MIT, 2016).

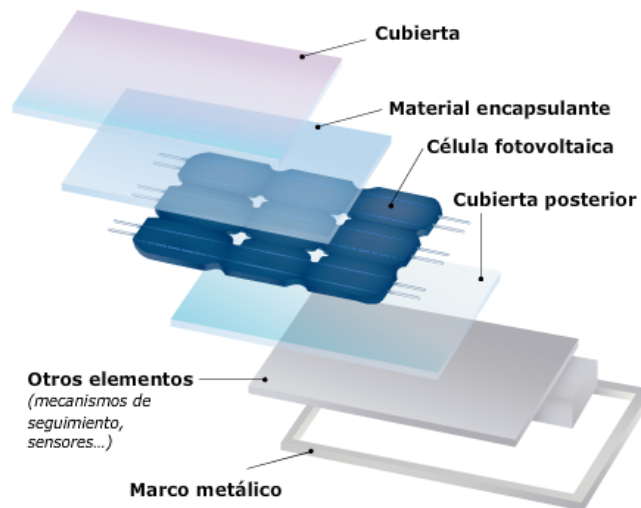


Figura 1.2.- Estructura de un Módulo Fotovoltaico.

La CFV consiste en enfocar la radiación solar en celdas pequeñas y de alta eficiencia, mediante la utilización de espejos, lentes o una combinación de ambos tipos de dispositivos. Las celdas que constituyen los módulos de CFV generalmente están fabricadas de varias capas, cada una de las cuales captura longitudes de onda específicas del espectro de luz solar. Aunque el costo de las celdas de CFV es mayor, éste se podría compensar con las altas eficiencias — más de 38% para las celdas y 25% en los módulos— que presentan y con el menor costo de las superficies reflejantes.

1.2.2.- Generación de Electricidad.

Al cierre de 2015, la capacidad total instalada mundial para generación eléctrica fue de poco más de 6,000 GW, de los cuales casi una tercera parte (1,985 GW) provino de energías renovables. Después de la hidroelectricidad y la Eolo-

electricidad, la energía solar cuenta con la mayor capacidad de generación, con 227 GW; la mayor parte de esta capacidad (222 GW) se concentra en sistemas fotovoltaicos —los 5 GW restantes corresponden a sistemas CSP—. Esta capacidad representa el 14.1% de la capacidad instalada de generación eléctrica a partir de energías renovables a nivel global (IRENA, 2016).

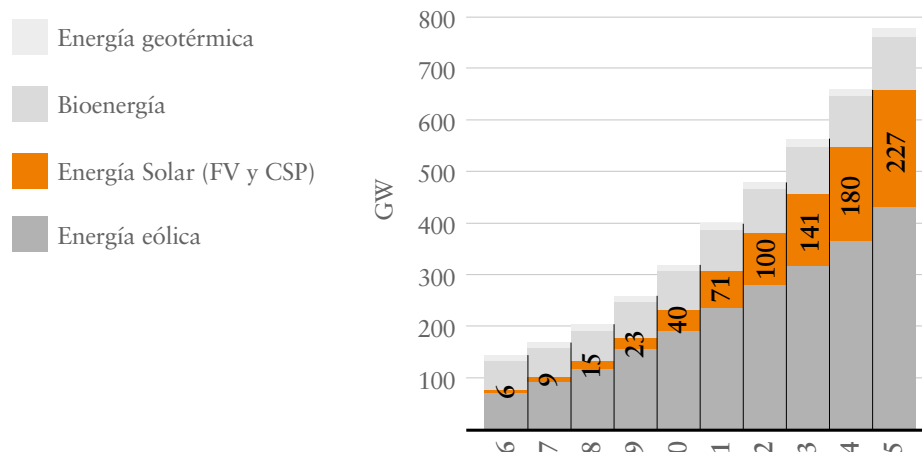


Figura 1.3.- Evolución de la capacidad Instalada de algunas Energías Renovables. Este crecimiento en la capacidad de generación a partir de centrales solares ha sido el más dinámico entre las energías renovables en los últimos 10 años. Las tasas de crecimiento anual en centrales solares, fotovoltaicas y de concentración, observaron valores de 49.2 y 30.9% en el periodo 2006-2015 respectivamente, las más altas a nivel mundial (tan sólo en 2015 se instalaron 48 GW de nueva capacidad).

Los países con mayor capacidad solar fotovoltaica instalada son China, Alemania, Japón, Estados Unidos, Italia, Reino Unido, España, Francia, India y Australia; juntos, estos países concentran 83% de la capacidad solar fotovoltaica global.

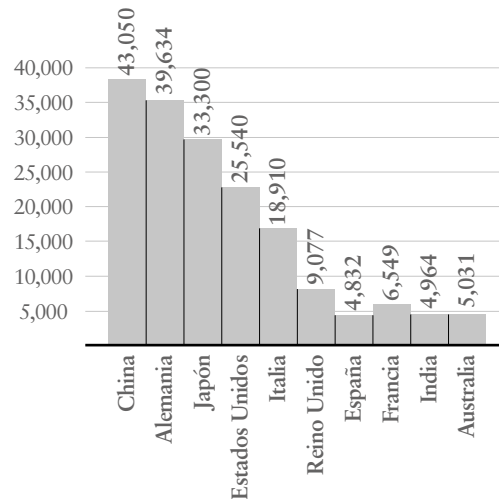


Figura 1.4.- Capacidad instalada de energía Solar Fotovoltaica hasta 2015 (MW).

1.2.3.- Costos de Generación.

Uno de los factores que han propiciado el crecimiento de las inversiones fotovoltaicas ha sido el descenso de los costos de esta tecnología. El costo de los módulos fotovoltaicos se ha reducido a la mitad en los últimos cinco años, incluyendo diferentes tecnologías, como los módulos de silicio cristalino y los de películas delgadas.

En diferentes sectores, cada uno con sus respectivas capacidades, se han observado disminuciones importantes en los costos de generación de electricidad. Actualmente, los menores costos se registran en el sector eléctrico con proyectos a gran escala, con capacidades instaladas superiores a los 100 MW; le sigue el sector comercial con sistemas instalados de capacidades de alrededor de 200 kW y por el último el sector residencial o de generación distribuida, con escalas más pequeñas (sistemas de 5.6 kW). Esta diferencia se debe principalmente a las economías de escala en cada una de las aplicaciones de esta tecnología.

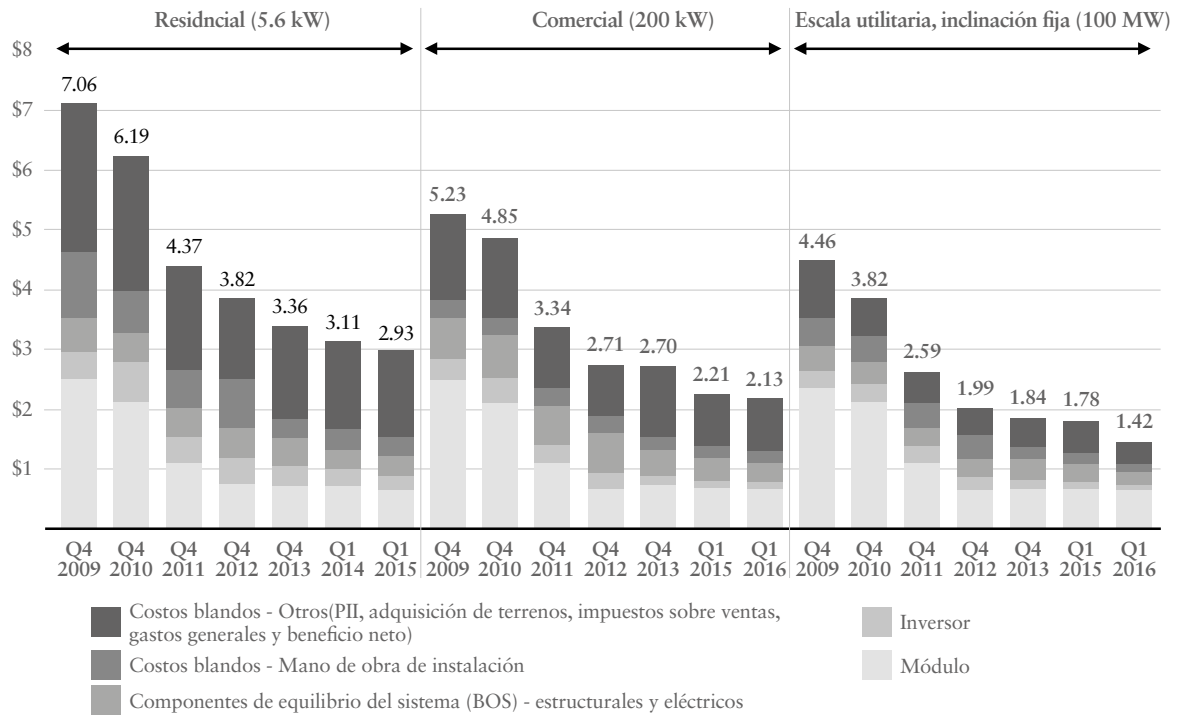


Figura 1.5.- Evolución de los costos de generación Fotovoltaica.

1.3.- Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica.

La Tecnología Fotovoltaica (TFV) integrada en el concepto de Sistema Fotovoltaico (SFV), es una de las llaves que puede sustentar la diversificación energética que en un futuro muy próximo nuestro país requerirá derivado del agotamiento de los recursos fósiles. Nuestro país cuenta con un amplio recurso solar estimado con una densidad energética promedio diario anual de 5.0 kWh/m²; y aprovechado la TFV, se podrían resolver los problemas energéticos que se tendrán en un futuro cercano derivado de la carencia de combustibles fósiles. Como un indicador, en una superficie de 100 m² y usando cualquiera de las TFV's comerciales, se puede generar la energía eléctrica suficiente para abastecer 10 hogares o viviendas típicas mexicanas con un área habitacional menor a 80 m². Lo anterior sugiere su uso en pequeños condominios verticales que podrían

construirse en sitios alejados de la red, ó inclusive, en las zonas urbanas en la modalidad de interacción con la red eléctrica convencional.

Un Sistema Fotovoltaico (SFV) es un conjunto de elementos formados por el generador FV y un conjunto de dispositivos eléctricos-electrónicos que permiten controlar, transformar, almacenar y distribuir la energía eléctrica producida por la TFV a un voltaje específico para su consumo por el usuario en las “cargas eléctricas” consideradas (aparatos eléctricos tales como lámparas, radios, bombas, motores, etc.). A dicho conjunto de dispositivos que acondicionan la potencia eléctrica para su uso respectivo que conforman lo que se le llama “balance del sistema”, (BOS por sus siglas en inglés: balance of system). La Figura 1.6 muestra un diagrama esquemático de un Sistema Fotovoltaico.



Figura 1.6.- Esquema básico de un Sistema Fotovoltaico.

Los SFV's basan su operación en unidades mínimas de transformación llamadas comúnmente celdas solares que se integran y encapsulan en unidades mínimas de potencia llamadas módulos fotovoltaicos (MFV) o generadores fotovoltaicos (GFV); ellos son los encargados de absorber la luz del Sol y convertir su energía en electricidad del tipo corriente continua (DC por sus siglas en inglés: Direct Current). La transformación se realiza de manera directa sin ningún proceso intermedio: si el GFV recibe luz solar, se genera electricidad, si no la recibe, no se

realiza la generación; en otras palabras, la generación de potencia eléctrica solo se realiza durante las horas sol, por lo que para tener disposición de la energía generada durante el día, hay que almacenarla. Esto representa uno de los pocos inconvenientes de la tecnología fotovoltaica. Sin embargo, tiene muchas ventajas respecto de otras tecnologías, las que la hacen un candidato excelente para la generación de electricidad en lugares remotos.

Los nichos de aplicación de los SFV's cubren prácticamente todos los ámbitos en donde se requiera electricidad para desarrollar actividades humanas. Se encuentran aplicaciones de ella en el ámbito rural, zonas urbanas, zonas remotas o aisladas, y aplicaciones espaciales. Para el caso de nuestro país, las aplicaciones rurales son las que más se habían fomentado por los diferentes organismos e instituciones debido a la falta de cobertura de la red eléctrica convencional. Este tipo de sistemas en donde el único generador es el Arreglo FV han recibido el nombre de autosustentados (SFV-A). Ejemplos típicos de estos sistemas han sido implementados por PEMEX, Secretaría de Marina, Secretaría de Comunicaciones, SEP, Secretaría de Desarrollo Social, FIRCO-SAGAR- PA, TELMEX, compañías televisivas, entre otras, que han tenido necesidad de elaborar proyectos de desarrollo social o técnico, en sitios apartados de la red eléctrica convencional, para los cuales la TFV ha sido la más apropiada, tanto técnicamente como económicamente.

En el caso de nuestro país, eso ha impulsado los proyectos para la interconexión a la red para uso doméstico, comercial y proyectos productivos agropecuarios; e inclusive ya se tienen en operación sistemas instalados de más de 100 kW, como es el caso de los proyectos de CFE en Santa Rosalía Baja California Sur (1.0

MW), Cerro Prieto BCS (5.0 MW); tiendas comerciales como Bodega Aurrera en Aguascalientes, Ags (174.24 kW), Sam's Club Cola de Ballena, La Paz BCS (200.5 kW), Centro de Energía en Durango, Dgo (500.0 kW); proyectos asociados a procesos productivos agropecuarios (ver Figura 1.2), aunado a otros proyectos.

En México como en muchos países, los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFV-A) han sido la mejor alternativa de electrificación para sitios alejados de la REC. Debido a la falta de cobertura de la REC, las aplicaciones rurales han sido fomentadas e implementadas por diferentes organismos gubernamentales, gobiernos municipales y compañías particulares. El primer programa social masivo impulsado por el gobierno Federal para la electrificación rural usando la Tecnología Fotovoltaica (TFV) fue el de PRONASOL 1988-1994, instalándose del orden de 1.4 MW-pico de paneles solares (ver fotografías en la g. No.8); así mismo, TELMEX, con su programa de telefonía rural instaló del orden de 1.3 MW-pico. La potencia pico instalada acumulada desde 1980 a 1992 fue aproximadamente de 3.7 MW [8]; y en el año 2007 se realizó una estimación de la TFV instalada obteniéndose un valor aproximado de 21 MW [9].

En 1994, la entidad gubernamental mexicana Fideicomiso de Riesgo Compartido, dependencia técnica de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Alimentación y Pesca (FIRCO-SAGARPA), adoptó el uso y promoción de Tecnologías basadas en las Energías Renovables, especialmente la FV, para aplicaciones agropecuarias. Con estos fines se unió a los esfuerzos de Sandia National Laboratories (SNL), organismo perteneciente al Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDOE), en la implementación de tecnologías de energía renovable en aplicaciones productivas, y acordaron promover, el uso de sistemas

de bombeo FV ya que representaba una alternativa conveniente para el abrevadero de animales en regiones apartadas de la red eléctrica convencional. Y para garantizar el éxito del programa, el FIRCO capacitó a personal técnico sobre la dinámica de identificación de proyectos factibles, operación de estos sistemas, dimensionamiento y evaluación técnica y económica de propuestas. Paralelamente, el personal técnico de Sandia puso en marcha un programa de capacitación y asesoramiento de proveedores, diseñadores y casas distribuidoras de material de bombeo y solar con el fin asegurar una máxima calidad en las instalaciones y productos instalados.

Los buenos resultados obtenidos en esta fase proporcionaron un incentivo para continuar el programa y extenderlo a otras aplicaciones como lo son la iluminación básica, refrigeración y comunicaciones. Durante los siguientes cinco años, se instalaron con éxito 195 sistemas de bombeo de distintas capacidades. Las experiencias y lecciones aprendidas en el desarrollo de éstos proyectos dieron como resultado un manual llamado “Guía para el Desarrollo de Proyectos de Bombeo de Agua con Energía Fotovoltaica”, que fue editado por el Southwest Technology Development Institute of New México State University (SWTSI-NMSU) en el año de 1999.

A raíz de los resultados obtenidos en dicho programa, el FIRCO solicitó un donativo al Banco Mundial, del Fondo Mundial del medio Ambiente (Global Environment Facility; GEF), para que dicha institución continuara impulsando las experiencias anteriores, mediante el establecimiento del “Proyecto de Energía Renovable para la Agricultura” (PERA), que consideró el fortalecer los cuadros técnicos, el establecer módulos demostrativos, y la promoción y difusión de la

tecnología FV.

Además de los proyectos FV's autónomos, los proyectos internacionales de la interconexión de los SFV's a la REC despertó mucho interés en nuestro país, tanto en sectores gubernamentales, privados y centros investigación porque representan una alternativa para la diversificación energética. A fines de los años 90's, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) establece alianzas estratégicas con CFE y la extinta compañía Luz y Fuerza del Centro para analizar el comportamiento de sistemas FV's interconectados a la red para aplicaciones residenciales de baja potencia. En el 2005 se instala el primer SFV interconectado a la red de distribución de Luz y Fuerza en el Distrito Federal con una potencia de 30.0 kW en un restaurant vegetariano llamado The Green Corner, cuyo propietario es el Sr. Bensi Levy, el cual ha sido monitoreado desde entonces por el IIE. Los resultados sobre el desempeño de dicha instalación despertaron mucho interés gubernamental, y por ese motivo y para establecer lineamientos de la interconexión, en Junio de 2007 la Comisión Reguladora de Energía (CRE) emite el modelo de Contrato de Interconexión a la REC, bajo el esquema de medición neta [11], para SFV's a lo más de 30.0 kW.

En el 2007, el IIE recibe financiamiento del Programa para el Desarrollo de las Naciones Unidas (UNDP por sus siglas en inglés: United Nations Development Programme in Mexico) y del Global Environment Facility (GEF) bajo el programa de Estrategias para la Mitigación del Cambio Climático para desarrollar el proyecto "Small grid connected photovoltaic systems.

1.4.- Enfriamiento y Limpieza para Módulos Fotovoltaicas.

El avance tecnológico de los sistemas de limpieza y de enfriamiento en Módulos FV, ha ido en incremento en los últimos años, de tal modo que se han realizado varias propuestas para reducir la temperatura de los generadores FV con la finalidad de incrementar la eficiencia. Por otro lado, en caso de los sistemas de limpieza no ha sido la excepción, ya que se han desarrollado prototipos que también permiten el incremento de su rendimiento.

Durante el periodo 2007 hasta el año pasado, se han desarrollado varias propuestas sobre el estudio de la influencia de la Temperatura y la limpieza, en la Eficiencia de los Módulos FV, donde se proponen modelos matemáticos y prototipos para la reducción de la Temperatura:

En 2007, J. K. Tonui y Y. Tripanagnostopoulos, en su Artículo titulado “**Air Cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements**” en donde investiga el rendimiento de dos improvisadas modificaciones de extracción de calor de bajo costo en el canal PV/T del sistema de aire para obtener alta temperatura de salida y enfriar el Módulo FV para incrementar la eficiencia a un nivel aceptable. En el cual sugieren el método del uso de una placa metálica delgada plana suspendida en medio y en la parte posterior de un canal de aire en la configuración de PV/T de aire. Se desarrolló y validó un método teórico con datos experimentales, en donde hubo concordancia entre los resultados predichos y los datos que se lograron medir. El modelo validado fue usado para el estudio del efecto del canal de profundidad.

G. Mittelman, *et al*, en 2009 publica su Artículo “**A model and heat transfer**

correlation for rooftop integrated photovoltaics with a passive air cooling channel", en donde realizan un análisis a escala y un estudio numérico de Módulos FV, implementando un canal de aire montado en la parte posterior de dichos Módulos FV. El canal provee velocidad de transferencia de calor sobre un rango práctico de condiciones de operaciones y geometrías. Desarrollan una correlación generalizada para el número de Nusselt promedio para el enfriamiento convectivo-radiactivo combinado para modificar los números de Rayleigh de 10^2 a 10^8 , la relación de expansión del canal es de 15 a 50 y los ángulos de inclinación de 30 a 90 grados. Se evalúa a una incidencia de radiación de 500 W/m^2 y a 1000 W/m^2 , en el que se puede encontrar un incremento de la eficiencia de 0.3 % y 0.5 %, respectivamente, incrementado el espacio del canal de 0.05 m a 0.2 m.

S. Dubey, *et al*, en 2009 publica su artículo "**Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector**" plantea un método para desarrollar una expresión analítica para la eficiencia eléctrica del módulo FV con y sin flujo en función del clima y otros parámetros. Se consideran cuatro diferentes configuraciones de Módulos FV para el estudio: Caso A (cristal a cristal del Módulo FV con ducto), Caso B (cristal a cristal del Módulo FV sin ducto), Caso C (cristal a tedlar con ducto), Caso D (cristal a tedlar sin ducto). Se encuentra que la configuración del sistema cristal a cristal del Módulo FV con ducto, es el que tiene mayor eficiencia eléctrica. Obteniendo una eficiencia promedio anual de 10.41%.

En 2010, A. Shahsavari y M. Ameri, en el Artículo titulado "**Experimental Investigation and Modeling of a direct-couple PV/T air collector**" presentan la modelación de un colector de aire FV/T de acoplamiento directo el cual es diseñado, construido y evaluado en la ubicación geográfica de Kerman, Irán. En

este sistema, se suspende una hoja de aluminio delgado en medio del canal de aire para incrementar la superficie de intercambio de calor y consecuentemente mejorar la extracción de calor de los paneles FV. Este sistema PV/T es evaluado con convección natural y forzada (con 2, 4 y 8 ventiladores en operación) y sus resultados inestables se presentan con y sin cajón de vidrio. Se desarrolla y valida un modelo teórico con datos experimentales, en donde se encontró concordancia entre los valores medidos y lo calculados por el modelo de simulación. Se realizan comparaciones entre el rendimiento eléctrico de diferentes modos de operación y se concluye que existe una cantidad óptima de ventiladores para lograr la eficiencia eléctrica máxima. También, los resultados muestran que el ajuste de la cubierta de los paneles fotovoltaico muestra un incremento en la eficiencia térmica y decrece en la eficiencia eléctrica del sistema.

“An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector”, Artículo publicado en 2010 por F. Sarhaddi, *et al*, en ella se desarrolla un modelo detallado Térmico-FV para calcular los parámetros térmicos y eléctricos de un típico colector de aire PV/T. Los parámetros térmicos y eléctricos de un colector de aire PV/T incluye la temperatura de la Celda Solar, Temperatura de la superficie posterior, temperatura de salida de aire, voltaje de circuito abierto, corriente de corto circuito, voltaje de punto de potencia máxima, corriente de punto de potencia máxima, etc. Fueron realizadas algunas correcciones en el coeficiente de transferencia de calor para mejorar el modelo térmico del colector de aire PV/T. Se usó un mejor modelo eléctrico para aumentar la precisión de los cálculos de los parámetros eléctricos de colector de aire PV/T. Este modelo puede calcular, además, el Voltaje a circuito abierto, corriente a corto

circuito, voltaje a punto de potencia máxima, y corriente en punto de potencia máxima. Además, una expresión analítica para la eficiencia energética en general para un colector de aire PV/T es derivado en términos de parámetros térmico, eléctrico, diseño y climático. Se desarrolla un programa de simulación computacional con la finalidad de calcular los parámetros eléctricos y térmicos de un colector de aire PV/T. Los resultados de la simulación numérica están acorde con las mediciones experimentales. Se ha encontrado que la eficiencia térmica, la eficiencia eléctrica y la eficiencia energética en general del colector de aire es cerca del 17.18%, 10.01% y 45%, respectivamente, para una prueba con parámetros climáticos, de operación y de diseño.

Martín A. Green, en su Artículo titulado “**Solar cell efficiency tables (version 37)**” publicado en 2011, presenta el análisis de tablas con extensas listas de altas eficiencias independientes confirmadas para las celdas y módulos solares. Se resume la inclusión de los resultados en las tablas y revisan los nuevos resultados hasta el 2010.

En 2011, a través del Artículo titulado “Numerical investigations of solar cell temperature for photovoltaic concentrator system with and without passive cooling arrangements”, Sendhil K. Natarajan, *et al*, presentan un estudio numérico de una celda solar Fotovoltaica por concentración con un radio de concentración de 10x. Un modelo térmico de dos dimensiones ha sido desarrollado para predecir la temperatura del concentrador FV (Celda Solar y Lentes) con y sin dispositivos de enfriamiento pasivo. Basado en un modelo térmico, los resultados muestran que un máximo de cuatro aletas uniformes, de 5 mm de altura y 1 mm de espesor, se pueden usar de forma efectiva para reducir la temperatura de la celda solar.

Sumado a que, los efectos de la temperatura ambiente y la intensidad de radiación solar tienen en la temperatura de la celda solar, también son investigados para el sistema con y sin aletas de enfriamiento. Basados en la influencia de los parámetros de la temperatura ambiente y la radiación solar, dos correlaciones de temperatura de celdas solares separadas han sido propuestas para el sistema con y sin aletas de enfriamiento para predecir la temperatura de la celda solar para un rango de parámetros dados. En estudios previos, el modelo de 2-D fue extensivamente validado con un modelo integral unificado.

En 2012 H. G. Teo, *et al*, en el Artículo “**An active cooling system for photovoltaic modules**” presentan el diseño, construcción e investigación experimental de un sistema híbrido Solar/Fotovoltaico. Esto con el propósito de enfriar activamente la celda FV, para ello se diseñaron placas paralelas que permiten el flujo de aire en la parte posterior del panel FV. Los experimentos fueron mejorados con y sin enfriador activo. Sin el sistema de enfriamiento activo, las temperaturas de los módulos fueron altas y las celdas solares mantuvieron una eficiencia entre 8 y 9%. Sin embargo, cuando los módulos FV fueron operados bajo condición del sistema de enfriamiento activo, la temperatura decreció notablemente permitiendo una mayor eficiencia de las celdas solares entre el 12 y 14 %. Así también, se desarrolla un modelo de simulación de transferencia de calor para los perfiles de temperatura actual del Módulo FV en donde se obtiene la buena validación entre el simulador y los resultados experimentales.

En 2013, H. Bahaidarah, *et al*, en el artículo titulado “**Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back Surface water cooling for hot climatic conditions**”, reportan el desarrollo de un modelo numérico (eléctrico y térmico)

usando el software EES (Engineering Equation Solver). El modelo predice varios parámetros eléctricos y térmicos que afectan su rendimiento. Se investiga experimentalmente el efecto del enfriamiento del Módulo por incorporación de un intercambiador de calor (panel de enfriamiento) en la superficie posterior. Los resultados del modelo numérico se encuentran en concordancia con las mediciones experimentales de rendimiento para el clima de Dhahran, Arabia Saudita. Con un enfriamiento activo de agua, la temperatura del módulo decrece significativamente cerca del 20% destacando un incremento en la eficiencia del Panel FV por 9%.

En el Artículo titulado “**Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures**”, publicado en 2013, M. Chandrasekar, *et al*, presentan el desarrollo de un sistema de enfriamiento pasivo simple con estructura de algodón para un módulo fotovoltaico plano independiente. El rendimiento térmico y eléctrico del módulo FV plano con el sistema de enfriamiento, consiste en una estructura de algodón en combinación con agua, nanofluido de Agua/ Al_2O_3 y nanofluido de agua/ CuO . Los resultados experimentales también son comparados con el rendimiento térmico y eléctrico de un módulo FV plano sin sistema de enfriamiento.

En 2013, K. Moradi, *et al*, en su Artículo titulado “**A review of PV/T technologies: Effects of control parameters**”, realizan una reseña sobre los más grandes efectos de los parámetros de control en el rendimiento Térmico/Eléctrico de un colector PV/T son recopilados y revisados. Se proveen de tablas y figuras que muestran como el rendimiento PV/T pueden ser dadas en términos de esos parámetros. Y refiere sobre la mejora para la aprobación de los parámetros PV/T

para la optimización de esos parámetros, los cuales no han sido totalmente resueltos.

A. H. Alami, en 2014, en su Artículo titulado “**Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules**” investiga la utilización de la técnica de enfriamiento por evaporación pasiva para controlar el incremento de Temperatura de los Módulos FV que ocurre durante la absorción de la Irradiación Solar. El método involucra la incorporación una capa de arcilla sintética en la parte posterior del Módulo y permitiendo evaporar una capa delgada de agua, y así reducir la temperatura del Módulo. Los resultados han probado la viabilidad técnica del enfoque propuesto para exhibir un máximo crecimiento de 19.4% a la salida de Voltaje y 19.1% a la salida de Potencia. La incorporación de arcilla es muy efectiva, barata, silenciosa y amigable con el ambiente.

En el Artículo titulado “**Cooling of Photovoltaic module with temperature controlled solar collector**” publicado en 2014, el autor I. Ceylan, *et al*, fueron analizados experimentalmente diferentes sistemas PV/T para el enfriamiento de los Módulos FV. Se colocó una tubería simple en forma de espiral intercambiadora de calor con la finalidad de proporcionar enfriamiento activo. También, el sistema puede fácilmente ser aplicado a un sistema de gran escala. Como un resultado de la investigación experimental, las eficiencias de los módulos con enfriamiento fueron calculados en 13%, y las eficiencias de los módulos sin enfriamiento del 10%. Como la temperatura establecida incrementa, la temperatura del Módulo puede ser incrementado o decrecido. La temperatura del Módulo fue cambiada de acuerdo a la radiación solar y a la temperatura establecida. Como la radiación solar incrementa la temperatura del módulo decrece en este sistema experimental.

La Radiación solar no tiene nada que ver con la temperatura establecida para este sistema.

Ahmed Elnozahy, *et al*, en su artículo titulado **“Performance of a PV module integrated with standalone building in hot arid areas as enhanced by surface cooling and cleaning”**, publicado en 2015, investiga experimentalmente el rendimiento debido al enfriamiento y limpieza automáticos de la superficie del módulo FV, instalado en el techo de una construcción en un área árida caliente, el cual es comparado con un Módulo sin enfriamiento ni limpieza. El módulo enfriado es controlado automáticamente mediante el rechazo al ambiente de la temperatura de la energía solar no convertida de la parte posterior, manteniendo la temperatura de la superficie del Módulo siempre a la de la temperatura ambiente. Agregado a esto, su sistema controla el periodo de limpieza de la superficie frontal del Módulo FV. Los resultados demuestran un decrecimiento cerca del 45.5% y 39% en la temperatura del Módulo de la parte Frontal y posterior, respectivamente. Consecuentemente, el enfriamiento y la limpieza de la superficie del Módulo se obtiene una eficiencia de 11.7% en comparación al 9% del Módulo sin enfriamiento ni limpieza. Además, la máxima potencia de salida producida por el Módulo enfriado y limpiado es 89.4 W en comparación de 68.4 W del Módulo sin enfriamiento ni limpieza.

En 2015 M. Ebrahimi, *et al*, en su Artículo **“An experimental study on using natural vaporization for cooling of a photovoltaic solar cell”** proponen estudios que intentan investigar una nueva forma de enfriar las celdas solares usando vapor natural como enfriamiento. El rendimiento de una celda solar fue examinada en la luz Solar simulada. Se encuentra vapor natural en la parte

posterior de la celda FV verticalmente en varias distribuciones y diferentes velocidades de flujo másico. También fue analizado, el efecto de la temperatura del vapor natural en el rendimiento del enfriamiento. Los resultados indican que la Temperatura de las Celdas FV decrece significativamente con el incremento de la velocidad del flujo másico de vapor. A detalle, la Temperatura de la Celda FV decrece cerca de 7 a 16°C cuando la velocidad del flujo aumenta de 1.6 a 5 g/min. Esto provoca el incremento de la eficiencia cerca de 12.12 a 22.9 %. El mayor rendimiento de las celdas FV pueden ser obtenidos con alta velocidad de flujo de vapor natural.

El Artículo titulado “**A comparative study on using single and multi header microchannels in a hybrid PV cell cooling**” fue publicado en 2015 por M. Rahimi, *et al*, en donde reportan el resultado de una investigación de un enfriador de Celdas FV mediante la distribución de flujo. Esto fue hecho para comparar el rendimiento de enfriamiento en dos diferentes diseños de microcanales integrados a la celda FV. Dos tipos de microcanales, uno con monocabezal y otro con multicabezal, ambos con idéntico diámetro hidráulico de 0.667 mm. Fue utilizado agua como fluido de trabajo para enfriamiento. Los experimentos fueron conducidos a condiciones internas para varias velocidades de flujo de enfriamiento. La transferencia de calor mejora en esos diseños que fueron comparados y se observa que al remover el calor por el multicabezal del microcanal fue cerca del 19% mayor que el de monocabezal. Además, los resultados muestran un incremento del 28% en la generación de potencia eléctrica para el multicabezal.

En 2016, C. G. Popovicia, en su Artículo titulado “**Efficiency improvement of**

Photovoltaic Panels by using air cooled heat senks” presenta un enfoque numérico de la reducción de la temperatura de los paneles fotovoltaicos por disipadores de calor enfriados por aire. El disipador de calor es concebido como una pared acanalada, elaborado de un material de alta conductividad térmica. La eficiencia de enfriamiento es estudiado para diferentes configuraciones del disipador de calor, obteniendo por modificación del ángulo entre las láminas y la placa base. El modelo numérico fue realizado usando el software de ANSYS-fluent para flujo turbulento y los resultados son presentados para la temperatura promedio del Panel FV.

El Artículo titulado **“Efectos de la Temperatura en la Eficiencia de un Módulo Fotovoltaico”** publicado en 2016, el autor M. López, *et al*, se centra en concentrar 30 lecturas de Temperaturas usando sensores LM35, provenientes de un solo Módulo de los 24 en que consiste el SFV instalado en la Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas, con una potencia eléctrica de 6 kWp. Estos 30 Sensores darán una lectura individual y otra promedio con un muestreo por minuto hasta llegar a 10 muestras que arrojarán el promedio individual de la celda y del Panel en su totalidad. Otros 12 Sensores de Temperatura estarán dispuestos en puntos estratégicos, los cuales nos darán un Temperatura promedio individual, que será comparada y analizada por medio de tarjetas de adquisición de datos (DAQ), con interfaz a LABVIEW para su visualización. Los fabricantes indican y la literatura nos dice que la eficiencia de una celda vs el panel en su totalidad, difiere de un 1 a 3 % respectivamente. Por tal motivo, los resultados obtenidos en este trabajo nos darán la pauta para poder inquirir en dicha información para la toma de decisiones en lo que a orientación óptica se refiere a la hora de implementar estos sistemas.

M. Marengo en 2016, fue publicado el Artículo titulado “**Enfriamiento de un Panel Solar utilizando un fluido de trabajo sobre el**” El enfriamiento de un panel solar es muy importante para mantener la eficiencia del mismo al máximo. Al aumentar la temperatura, un panel solar produce menos potencia de la nominal, tomando como temperatura ideal la de condiciones estándar (25°C). Para mantener esta temperatura, se propone un método de enfriamiento simple basado en un fluido de trabajo (agua) que recorra la superficie del panel solar disminuyendo la temperatura de este. Se pretende mostrar un método de enfriamiento para un panel solar eficiente, económico y de bajo consumo de energía en condiciones de un clima tropical como la ciudad de Barranquilla.

En el Artículo titulado “Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for Photovoltaic Panel, part 1: Passive cooling techniques”, escrito por S. Nizetic´ a, *et al*, en 2017, se ocupa del análisis basado en técnicas de enfriamiento pasivo de Paneles FV (PVs). Fueron obtenidas una revisión y evaluación completa de las actividades de investigación y estudios en general relacionados al desarrollo de técnicas de enfriamiento pasivo para PVs. Una contribución importante del reporte de estudio de investigación es el análisis económico general para la opción del enfriamiento pasivo, así mismo para el aspecto ambiental. Fue considerada una planta FV de 30 kW como caso de estudio de acuerdo a la estimación de la LCOE para cada técnica de enfriamiento pasivo considerado para examinar el aspecto económico (en donde los datos de rendimiento general fueron usados con respecto al análisis obtenido de las técnicas de enfriamiento pasivo). Además, LCA fue también realizado con el fin de comprobar los aspectos ambientales de las técnicas de enfriamiento pasivo

de PVs considerados. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos y a las soluciones técnicas existentes, la opción más viable de enfriamiento pasivo actualmente, ambos desde el punto de vista técnico y económico, es la opción de enfriamiento basado en aire con aletas de Aluminio montado en la superficie posterior del Panel FV.

1.5.- CONCLUSIÓN

Con base a la información analizada se puede afirmar que para solventar la demanda de energía a nivel mundial en los próximos años, es de vital importancia el desarrollo de las energías renovables y como bien se menciona, la tecnología Fotovoltaica es una de las mejores opciones para abastecer dicha demanda, debido al crecimiento considerable que ha tenido durante los últimos años, en comparación a las otras fuentes de energías renovables. Sin embargo, se ha de considerar el mejoramiento de la eficiencia de los componentes de los Sistemas Fotovoltaicos, específicamente el del generador, con la finalidad de obtener un ahorro económico y por ende, reducir el retorno de inversión. Por lo pronto, la tecnología es joven y posibilita un arduo trabajo por parte de los investigadores en el área, para lograr que esta tecnología sea competente con las ya existentes.

CAPITULO II.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.- Introducción

Durante la historia de la humanidad, los sistemas energéticos han sido factor importante para el desarrollo de la misma. Este desarrollo radica en la estructuración de nuevos procesos para la transformación de la energía según sea la necesidad y el uso a la cual sea destinado.

La energía permite generar calor y trabajo a través de transformaciones apropiadas, es uno de los elementos más importantes para satisfacer las necesidades básicas de la humanidad. Su utilización va desde la cocción de alimentos hasta el procesamiento de insumos industriales.

Modernamente, la energía proviene de hidrocarburos, es decir, de derivados del petróleo: gasolina, diesel, Fuel oil pesado, etc. Sin embargo, las crisis energéticas contemporáneas, en particular la de 1973, cambia la perspectiva mundial sobre el consumo dispendioso de energía barata (hasta esa época). Se empezó a apreciar el agotamiento de los recursos energéticos (principales fósiles) y las Fuentes alternas de Energía recibieron un apoyo importante en su desarrollo, si bien proporcionalmente su porcentaje de aplicación es todavía limitado (Manzini Y Macías 2004).

Por otra parte, la conciencia mundial sobre el uso de recursos y la creciente preocupación sobre los impactos ambientales, está aumentando el protagonismo de las Fuentes Renovables de Energía. Sin embargo, esta misma sensibilización ocasiona que los nuevos proyectos de energización con Fuentes Renovables, en este caso, sean analizados con una perspectiva más estricta en todos sus

impactos.

Se denomina energía renovable, a aquella que en un período determinado natural, vuelve a estar disponible en una cantidad similar a la que se ha gastado; el lapso de tiempo es breve en un orden de magnitud a escala humana. Ello depende de la cantidad de energía que se consuma por unidad de tiempo. Por el mismo hecho de ser renovable, es un recurso inagotable que asegura el suministro energético, no sólo ahora sino en el futuro: por tanto es un recurso sustentable en el tiempo (Hermosillo *et al.* 1995). También posibilita una mejor planificación energética a todos los niveles: local, regional, nacional y mundial, así como un programa de ahorro y eficiencia en el uso de la energía.

Las energías renovables generan menos impactos ambientales que las energías convencionales, porque están integradas al entorno, dentro del gran ciclo natural de la energía que existe en el planeta.

Algunos ejemplos de Energías Renovables son: Solar térmica (se refiere a la captación de energía radiante del sol en forma de calor), Solar fotovoltaica (consiste en convertir la radiación solar en energía eléctrica directamente, mediante el efecto fotovoltaico), Eólica (convierte la energía contenida en el viento, en energía eléctrica o mecánica), Minihidráulica (consiste en aprovechar la energía potencial que contiene un curso de agua y transformarla en energía eléctrica; se consideran minihidráulicas a aquellas instalaciones que tiene una potencia igual o menor a 5 MW), Biomasa (convierte la energía química de las masas vegetales, obtenida por fotosíntesis, en energía calorífica, eléctrica o mecánica), Olas (se trata de convertir la energía de movimiento contenida en las olas para obtener electricidad), Residuos sólidos urbanos (RSU) (consiste en

obtener energía calorífica o eléctrica a partir de la contenida en los residuos domésticos, industriales o agrarios), Geotérmica (se trata de aprovechar la energía calorífica que existe en el interior de la Tierra para obtener calor o electricidad), Mareas (convierte la energía potencial que contienen las mareas, en electricidad) (Manzini y Macías 2004).

Si bien, este tipo de energía es la que se propone como la complementaria para cubrir la demanda energética y reduzca en tal medida la contaminación ambiental. Una de las fuentes de Energía Renovable que aportará en parte importante de dicha demanda es la Energía Solar Fotovoltaica.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación es importante conocer los principios fundamentales de la energía solar fotovoltaica, así también, sus clasificaciones y aplicaciones.

2.2.- Energía Solar

Dentro de las fuentes Renovables de Energía, el Sol es nuestra fuente de energía primaria. El Sol provee de la energía necesaria a todas las especies de nuestro planeta, esto con la finalidad de aportar en diversos procesos necesarios para la existencia de los mismos. Por otro lado, durante el proceso evolutivo del ser humano, ha descubierto procesos que permiten mejorar las condiciones de vida, haciendo uso de la energía proveniente del Sol.

Conforme las necesidades del Ser Humano incrementan, se han creado dispositivos tecnológicos que permiten solventarlas. Tal como es el caso de la necesidad energética, se han creado dispositivos que hacen uso de la Energía Solar para obtener energía ya sea como electricidad o aprovecharla en forma de

calor.

En este apartado se presentan conceptos básicos sobre esta fuente de energía primaria, proveniente del “Astro Rey”.

2.2.1.- La luz Solar

El Sol es una fuente inagotable de energía. Gracias a las reacciones nucleares que en él se llevan a cabo, nuestro planeta recibe un flujo de energía muy grande. Este llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética, con un espectro que abarca *longitudes de onda*, desde 0.2 μm hasta 2.6 μm ; la que comúnmente se le llama *luz solar*. Es importante establecer que la luz solar que nuestros ojos observan, llamado el espectro del visible, solo abarca un intervalo muy pequeño del espectro de las ondas electromagnéticas, siendo su rango desde 0.4 μm hasta 0.7 μm .

Ya que la luz solar es una forma de energía, las unidades de medición para ésta corresponderán a las de energía. En el sistema internacional la unidad de energía es el joule, J. Se establece el concepto de intensidad de la radiación ó irradiancia solar, simbolizada por G, como la energía radiante por unidad de área por unidad de tiempo que atraviesa una superficie imaginaria de área S, perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La relación entre dichas cantidades se expresa en la Ecuación 2.1:

$$G = \frac{E}{S} t \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Siendo E la magnitud de energía radiante que llega a la superficie determinada en un tiempo determinado.

Como la energía E es el producto de la potencia P por el tiempo, $E = Pt$, entonces,

la *irradiancia* G estará dada por la Ecuación 2.1, o sea,

$$G = \frac{P}{S} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Si la potencia P se mide en Watt (W) y el área S en metros

cuadrados (m^2), entonces la unidad para la *irradiancia* es: W/m^2 .

Se establece el concepto de *irradiación* como la densidad de energía acumulada o recibida en la unidad de tiempo, es decir, es la irradiancia acumulada sobre la superficie en la unidad de tiempo. Si H_s simboliza a la irradiación y t el tiempo medido en segundos (s), entonces:

$$H_s = G t \quad \text{Ecuación 2.3}$$

y la unidad para la *irradiación* es: $Ws/m^2 = J/m^2$

1 Joule (1 J) es la cantidad de energía que consume o produce una máquina con una potencia de 1 Watt en un segundo.

Si se expresa el tiempo en horas, h , ($1 h = 3,600 s$), entonces la unidad para la irradiación es: Wh/m^2 .

Generalmente, el valor de la irradiación se reporta como una acumulación de energía promedio durante un periodo de tiempo (día, mes, estacional, anual); por ejemplo:

$2 kWh/m^2 = 2,000 Wh/m^2$ al día = $60 kWh/m^2$ al mes (30 días).

$5 kWh/m^2$ promedio diario anual.

A la magnitud de la irradiancia recibida fuera de la atmósfera, considerando la distancia Tierra-Sol constante, se le llama la constante solar, y se simboliza por G_{Sol} . Un valor aceptado para la "constante solar" es $1,353 \pm 21 W/m^2$ (valor estándar NASA/ASTM 1977), aunque otros autores consideran en sus modelos un

valor de 1,367 W/m²; es decir la constante solar tiene una magnitud de:

$$G_{sol} = 1,353 \frac{W}{m^2} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

2.2.2.- Tipos de Radiación

La radiación solar sale del Sol en todas direcciones, viaja en línea recta a la velocidad de la luz y su intensidad disminuye de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco emisor. Debido a esto, se dice que la radiación solar fuera de la atmósfera está compuesta de rayos por lo que se le asigna un carácter *directo*, es decir, viaja directamente del foco emisor al captador, recibiendo el nombre de radiación directa normal.

Sin embargo, cuando ésta entra a la atmósfera, las partículas suspendidas (el aire, el ozono, las moléculas de agua, polvo, etc.), interactúan con los rayos directos del Sol absorbiéndolos, difractándolos, y reflejándolos. En consecuencia, un captador recibe en su superficie radiación solar de dos tipos: irradiancia directa e irradiancia difusa. La directa, ya ha sido definida como aquella radiación que llega al captador sin sufrir algún cambio de dirección en su trayectoria, desde el foco emisor hacia éste. La difusa, es la radiación que recibe o “ve” el captador como aquella que viene de la bóveda celeste. Ella está compuesta por dos componentes, la refractada y la reflejada. A la suma de las radiaciones directa y difusa se le conoce con el nombre de radiación global. En la Figura 2.1 se muestra un esquema representativo de dichas radiaciones.

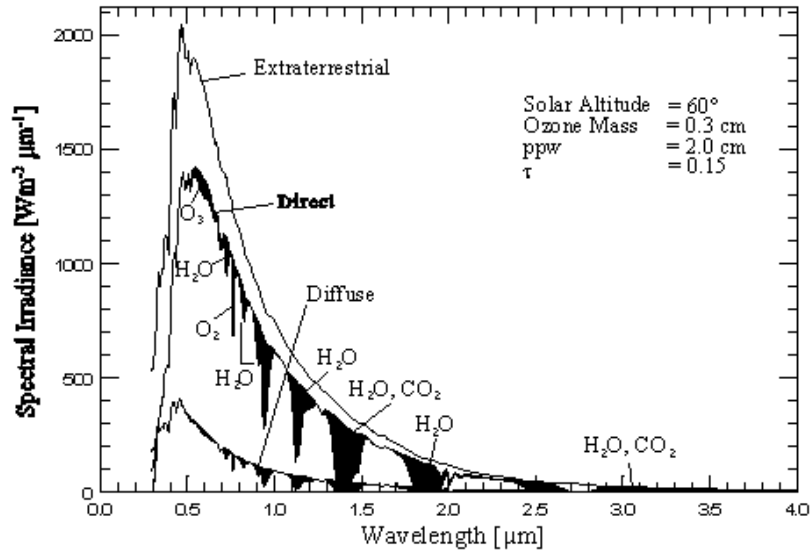


Figura 2.1.- Distribución espectral de la Radiación Solar.

Al considerar los efectos de atenuación que sufre la radiación directa al ingresar en la atmósfera se ha determinado que, durante un día completamente claro y sin partículas suspendidas, estando el Sol en el cenit del observador y al nivel del mar, la máxima irradiancia directa que se puede recibir en el captador es ligeramente menor de 1000 W/m^2 .



Figura 2.2.- Tipos de Radiación.

Desde un punto de vista operacional, los ingenieros dedicados a la aplicación de la energía solar han tomado como convención que, bajo las condiciones

anteriores, el valor para la máxima irradiancia directa que puede recibir un captador sea de 1000 W/m^2 . A éste valor se le conoce como el pico de la radiación solar.

A medida que se aumenta en altura sobre el nivel del mar, el espesor de la masa de aire disminuye, se reducen los efectos de atenuación y en consecuencia, la irradiancia directa sobre el captador tendrá valores ligeramente superiores al pico. Fuera de la atmósfera, el valor máximo de la irradiancia directa es el de la constante solar.

En un día despejado, la irradiancia global que recibe un captador tendrá como componente mayor la radiación directa, mientras que, en un día nublado, la componente mayor será la radiación difusa.

2.2.3.- Hora Solar Pico

Para la aplicación del Recurso Solar en los Sistemas Fotovoltaicos, los ingenieros de diseño han convenido en usar otra unidad de medición de energía para especificar la irradiancia.

Si se considera que un captador horizontal puede recibir una irradiancia directa aproximada de $1,000 \text{ W/m}^2$ bajo las condiciones de día claro, al nivel del mar y estando el Sol en el cenit del captador, entonces por convención a dicha cantidad se le ha llamado pico de la irradiancia. En consecuencia, si un captador recibe hipotéticamente un pico de irradiancia durante una hora, a la cantidad de energía recibida se ha convenido llamarla hora solar-pico, o simplemente hora-pico. Así, la transformación de unidades es:

$$1 \text{ hp} = 1 \text{ hora pico} = 1,000 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$$

Ya que el área bajo la curva de irradiancia contra tiempo es la irradiación, entonces desde el punto de vista geométrico, el Recurso Solar en un día expresado en horas-pico corresponde al área de un rectángulo cuya base es el número de horas en que supuestamente el captador ha estado recibiendo una irradiancia con una intensidad pico de $1,000 \text{ W/m}^2$.

Con la anterior definición se tendrá que, para conocer las horas-pico que un determinado sitio tiene como Recurso Solar, se dividirá el valor de la irradiación entre el pico de la irradiancia ($1,000 \text{ W/m}^2$); por ejemplo para una irradiación de 8.0 kWh/m^2 se tendrá una equivalencia de 8 horas solares pico. La Figura 2.3 muestra éste práctico concepto de unidad de energía. Así, las horas-pico son las horas en que el captador estuvo aparentemente recibiendo el valor pico de la irradiancia, es decir $1,000 \text{ W/m}^2$.

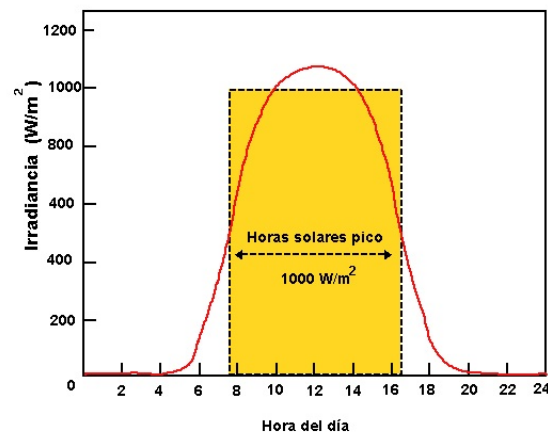


Figura 2.3.- Gráfica representativa de la Hora Solar Pico.

2.2.4.- Instrumentos de medición de Radiación Solar

La manera de establecer la magnitud de la radiación solar en un sitio determinado, sobre la superficie terrestre, es mediante mediciones de forma directa de ésta. Esto se puede hacer mediante varias formas, unas cualitativas y otras

cuantitativas. Las cualitativas permiten tener una idea de cómo es la radiación solar más no su magnitud. El heliógrafo es un aparato que mide las horas de Sol más no la magnitud de la irradiancia. Las cuantitativas proporcionan la magnitud de la irradiancia e irradiación con precisiones que dependen del aparato que se usa para medirla. Las unidades más comunes para establecer la magnitud de la irradiación solar son las siguientes:

$$1 \text{ Langley/h} = 1 \text{ cal/cm}^2\text{h} = 3.687 \text{ Btu/ft}^2\text{h} = 11.63 \text{ Wh/m}^2$$

Dado que la irradiancia solar global tiene dos componentes, la directa y la difusa, los aparatos de medida deben diseñarse para identificar las magnitudes de cada una. La irradiancia global se mide con un instrumento llamado *piranómetro*. Este aparato mide el flujo de radiación solar o irradiancia que se recibe en una superficie horizontal absorbente de forma directa y difusa. También, se pueden usar celdas solares como instrumentos de medida de la radiación solar debido principalmente a que al absorber a la luz solar, la corriente de corto circuito generada por la celda es directamente proporcional a la intensidad de la radiación solar; y aunque la sensibilidad y el rango espectral de las celdas solares es bajo comparado con la de los piranómetros, su costo, sencillez y fácil manejo (sólo se requiere de un multímetro de buena calidad) las han hecho muy populares para medir la irradiancia “*in situ*”. La Figura 2.4 muestra los piranómetros que se usan comúnmente para cuantificar la radiación solar.



Figura 2.4.- Piranómetro con Termopila y piranómetro con Celda FV.

Por otro lado, existen los instrumentos portátiles denominados “Solarímetros”, los cuales son digitales y registran las mediciones de forma instantánea, tiene la ventaja que de que su tamaño permite transportarla y usarla de forma sencilla.



Figura 2.5.- Solarímetros portátiles digitales.

2.3.- Energía Solar Fotovoltaica

La Energía Solar Fotovoltaica es considerada una de las formas de energías con mayor crecimiento en los últimos años, dentro de las energías renovables. Esta forma de energía consiste en la transformación directa de la Energía Solar a Energía Eléctrica en Corriente Continua, sin el uso de piezas móviles. Esto se logra a través de dispositivos semiconductores llamados Celdas Solares.

La particularidad de esta tecnología es, que requiere de poco mantenimiento y su uso es amigable con el ambiente. Además, que con la energía solar disponible en el planeta, se perfila como la tecnología más prometedora en los próximos años, dentro de la industria energética.

2.3.1.- La celda Solar

La conversión de la luz solar en electricidad a través del fenómeno físico conocido como “efecto fotovoltaico” se realiza en un dispositivo fabricado con semiconductores en donde se absorbe la luz solar y ésta es convertida en electricidad, sin ningún proceso intermedio. A la unidad mínima de conversión de luz solar en electricidad se le ha llamado “celda solar” y representa la base para la formación de estructuras de potencia eléctrica o GFV. A los diferentes materiales con que se basa la fabricación de celdas solares forman lo que se conoce con el nombre de Tecnologías Fotovoltaicas.

El Efecto Fotovoltaico se puede definir de la siguiente manera: Cuando en un dispositivo se crea una fuerza electromotriz o una diferencia de voltaje debido a la absorción de la luz solar, se dice que se está llevando a cabo el Efecto Fotovoltaico (FV). Bajo estas condiciones, si se le conecta una carga, se producirá una corriente eléctrica que será capaz de realizar un trabajo en ella. La corriente producida es proporcional al flujo luminoso recibido en el dispositivo. En una celda solar, el efecto fotovoltaico se presenta como la generación de voltaje en sus terminales cuando está bajo iluminación. Si a las terminales de la celda solar se le conecta un aparato eléctrico, por ejemplo, una lámpara, entonces ésta se encenderá debido a la corriente eléctrica que circulará a través de ella (ver Figura 2.6). Esto representa la evidencia física del efecto fotovoltaico.

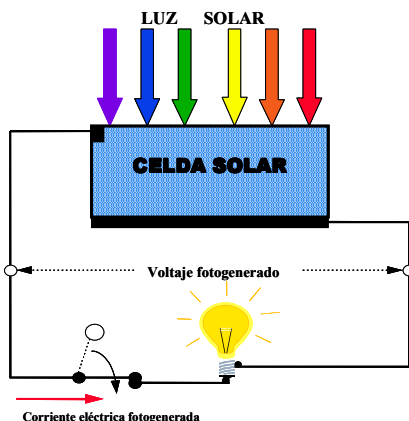


Figura 2.6.- Representación física del efecto Fotovoltaico en una Celda Solar.

2.3.2.- Tipos de celdas solares.

Gracias al avance en la tecnología de fabricación de semiconductores en película delgada, actualmente se tienen una variedad muy amplia de dichos materiales que han sido considerados, con base a sus características ópticas y eléctricas, como buenos candidatos para formar una celda solar. Entre estos, el que ha recibido un fuerte impulso en la investigación y desarrollo tecnológico es el silicio amorfo hidrogenado (a-Si). En consecuencia, se han desarrollado celdas a nivel experimental y comercial basadas en a-Si. Su proceso de producción es más barato en comparación con el x-Si; sin embargo su eficiencia es menor con valores máximos del 9.5% para una unión simple, y hasta 11.7% para una triple unión. A nivel comercial la eficiencia para una triple unión apenas llega al 10.4%. El inconveniente de éste material es la degradación debido al conocido efecto Staebler- Wronski, sin embargo, la compañía United Solar Ovonic ha elaborado celdas de triple unión a nivel experimental con eficiencias estables del 13%. La eficiencia para productos comerciales fluctúan desde 5% para celdas doble unión, hasta 10.4% para celdas triple unión. Actualmente el uso de estas celdas solares es muy común ya que se les puede encontrar en relojes, calculadoras, sistemas

de señalización y hasta módulos con 64 Watt de potencia, con garantía de fábrica por 20 años, con los que se puede dimensionar sistemas de potencia. La Figura 2.8 muestra fotografías del silicio en sus diferentes configuraciones sólidas: monocristal, policristal y amorfo.

Otros compuestos semiconductores en película delgada que han sido considerados para aplicaciones fotovoltaicas son el telurio de cadmio (CdTe), el cobre-Indio-Galio diselenio (CIGS) y el CuInSe_2 . Las celdas solares elaboradas con estos compuestos presentan grandes expectativas de aplicación comercial ya que las eficiencias experimentales son del orden de 16.8%, 18.8%, y 13%, respectivamente. Las tres tecnologías están disponibles comercialmente aunque con eficiencias menores a las experimentales (10.7%, 13.4%, y 9%, respectivamente) y aparentemente satisfacen la combinación requerida de bajo costo y eficiencia de conversión aceptable. La Figura 2.9 muestra un par de fotografías de las tecnologías de CdTe y CIGS y las estructuras representativas de dichos dispositivos.

Por otra parte, se ha impulsado mucho la investigación y desarrollo tecnológico en celdas solares combinadas con el objeto de incrementar la eficiencia de conversión. Como ejemplo tenemos la celda solar HIT (Heterojunction with an Intrinsic Thin layer) desarrollada por SANYO con la que han logrado eficiencias experimentales del 22%, mientras que en su línea de producción comercial han llegado al 20.2% de eficiencia. Aún más, esta compañía ha lanzado al mercado celdas bifaciales usando dicha tecnología para las que han alcanzado hasta el 24.2%.

En el caso de mejoras en la tecnología de m-Si, la aplicación de capas

pasivadoras, superficies texturizadas en ambas caras de la oblea de m-Si y contactos traseros como los implementados por SunPower, han permitido alcanzar hasta el 23% de eficiencia en celdas de laboratorio. Y por el mismo camino, BP Solar con su celda “Saturno” la que utiliza contactos enterrados frontales y superficie texturizada, les han permitido alcanzar el 20.1% de eficiencia en celdas de laboratorio.

Existen otra clase de celdas solares basadas en monocristales de compuestos semiconductores tales como arseniuro de galio (GaAs) o fosfuro de indio (InP), materiales cuya elaboración es muy cara pero que satisfacen los requerimientos de alta eficiencia y bajo peso (GaAs presenta el récord de más alta eficiencia 31.3%), características que las hacen ideales para las aplicaciones espaciales. Para este tipo de aplicaciones, donde se busca bajo peso y alta eficiencia, la relación costo/beneficio es pequeña.

También se ha impulsado líneas de investigación y desarrollo tecnológico en celdas fotoquímicas basadas en tintes sensitivos, como las desarrolladas por Sharp, entre otros laboratorios, para las cuales se ha logrado una eficiencia del 10.4% en área pequeña (1.0 cm^2) y hasta 6.3% para un submódulo de 26.5 cm^2 de área. El programa Japonés ha considerado como meta para el 2030 llegar al 15% de eficiencia en áreas de 1 cm^2 , y en producto comercial al 8% para áreas de 900 cm^2 .

Con respecto a materiales orgánicos como lo son los polímeros semiconductores, se han realizado notables esfuerzos de investigación que han permitido elaborar celdas solares con eficiencias alrededor de 3%. Aunque muy modesta, las celdas solares orgánicas muestran un potencial de aplicación alto debido a los bajos

costos del dispositivo.

Otra forma de incrementar el rendimiento de generación de potencia eléctrica en términos de un área de captación es por medio de la concentración de luz solar sobre el captador. El efecto neto de un sistema FV con concentración solar (C-FV) se observa en la reducción del costo de la generación de electricidad producida y el aumento en la densidad de potencia. Esta característica hace muy atractivo el uso de concentradores solares (CS) sobre las celdas solares, unidad base de un sistema FV, para crear sistemas de generación de potencia eléctrica de mayor densidad energética y menor costo comparados con aquellos que no usan tales dispositivos. En consecuencia, el resultado de concentrar la luz en una celda solar es reducir el costo de generación de potencia eléctrica. La Figura 2.10 muestra dos fotografías de la tecnología actual de sistemas de concentración de potencia con aplicación para interconexión con la red.

2.3.3.- Sistemas Fotovoltaicos.

Los sistemas Fotovoltaicos se definen como el conjunto de componentes electrónicos interconectados entre sí, que transforman, almacenan y aprovechan la energía radiante del Sol en energía eléctrica, ya sea en corriente directa o en corriente alterna. Para ello, existen dos tipos de sistemas: Aislados o Autónomos (Off Grid) y la interconectada a la Red Eléctrica (On Grid).

Los componentes que pueden formar a los sistemas fotovoltaicos pueden ser:

- **El Generador Eléctrico**, conocido como Módulo Fotovoltaico, es un dispositivo que convierte en forma directa la radiación solar en energía eléctrica,
- **El Inversor de Corriente**, consiste en un dispositivo electrónico que permite que la energía eléctrica generada en corriente directa o continua (CD; CC), se pueda

usar en corriente alterna (CA). Existen dos tipos principales de inversores para los interconectados a la Red: Inversores Centrales y los Microinversores.

- **Controlador de Carga.** Es un dispositivo electrónico que permite el flujo adecuado de la energía generada por el Módulo Fotovoltaico hacia la Batería y hacia el Inversor o la carga, según sea el caso. Permite a su vez, regular el voltaje requerido por los componentes mencionados, así también, sirve como sistema de protección cuando hay sobre corriente e impide el flujo inverso de la energía.

- **Acumulador de Energía.** Convencionalmente conocido como batería, permite almacenar la energía generada por el Módulo Fotovoltaico, para su posterior uso. Es importante saber que esta batería es diferente a la de uso convencional en automóviles, ya que esta permite descargas profundas y lentas.

2.3.3.1.- Tipos.

Los sistemas fotovoltaicos pueden ser conectados a la Red o fuera de ello, estos consisten en:

- **Sistema Fotovoltaico Interconectada a la Red.** Un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red (SFCR) es un sistema cuya función es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada en la red convencional. Como se muestra en la Figura 2.7, un SFCR se compone del generador fotovoltaico, un inversor DC/AC y un conjunto de protecciones eléctricas.

La energía producida por este sistema será consumida parcial o totalmente en las cercanías, y la energía sobrante será inyectada en la red para su distribución a otros puntos de consumo. Es común que existan mecanismos de retribución económica que compensan al propietario del sistema por la energía que su

sistema intercambia con la red. Pueden distinguirse, de forma simplificada, dos esquemas: la retribución con prima (*feed-in tariff*) y el balance neto (*net-metering*). En el mecanismo de retribución con prima, generalmente el propietario del SFCR recibe ingresos derivados de la energía total producida (independientemente de la que haya sido consumida en las cercanías del SFCR). En este caso, el diseño no necesita considerar un consumo a satisfacer, como sí será el caso en los sistemas autónomos o de bombeo. Con este mecanismo, el objetivo del diseñador es que la producción anual del sistema sea la máxima posible sin tomar en consideración los consumos cercanos (siendo posible instalar un SFCR sin ningún consumo asociado). Este mecanismo favorece la implantación de los sistemas fotovoltaicos cuando el coste de la energía producida es superior al de la tarifa eléctrica convencional (sin tener en consideración las externalidades ambientales). Aunque formalmente favorece la generación distribuida, sin ningún condicionante adicional puede ocasionar un crecimiento desordenado que disocie las ubicaciones de los sistemas fotovoltaicos de los centros de consumo.

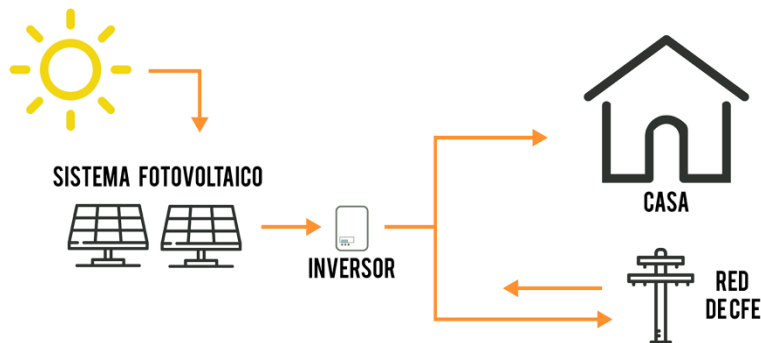


Figura 2.7.- Componentes de SFCR.

Tradicionalmente se distingue entre SFCRs instalados sobre suelo y en edificación. Dentro de los instalados sobre suelo existen los sistemas estáticos,

con una inclinación y orientación fija, y los sistemas de seguimiento, que varían la posición del generador a lo largo del día y año para maximizar la radiación efectiva incidente. En los instalados sobre edificación es frecuente diferenciar los sistemas según el grado de integración del sistema con el edificio. Así, existen tres casos en lo que a disposición de módulos se refiere: general, superposición de módulos e integración arquitectónica. Considera que existe integración arquitectónica cuando los módulos cumplen una doble función energética y arquitectónica y además sustituyen elementos constructivos convencionales o son elementos constituyentes de la composición arquitectónica. Se supone que existe superposición arquitectónica cuando la colocación de los módulos se realiza paralela a la envolvente del edificio.

- **Sistemas Fotovoltaicos Autónomos.** Un sistema fotovoltaico autónomo (SFVA) produce energía eléctrica para satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, empleando un sistema de acumulación energético para hacer frente a los períodos en los que la generación es inferior al consumo.

Los sistemas domésticos (SHS) suelen incorporar únicamente cargas en continúa. Por esta razón, no es necesario que el SFVA incluya un inversor. Estos sistemas están compuestos por el generador, un acumulador electroquímico y un regulador de carga y descarga. Cuando el consumo incluye cargas de alterna es necesario que el SFVA incluya un inversor. Cabe la posibilidad de que el consumo esté compuesto por cargas en corriente continua y en alterna, o exclusivamente por cargas en alterna. El funcionamiento del inversor puede ocasionar la circulación de transitorios de corriente que el regulador no es capaz de gestionar correctamente. Por este motivo, es recomendable que el inversor esté conectado directamente a

la batería, y no a la salida del regulador. Los inversores para SFVA suelen incorporar un mecanismo de regulación de descarga que permite esta conexión. El funcionamiento de estos inversores es, en muchos aspectos, similar al de los inversores de conexión a red pero con varias peculiaridades. La principal diferencia está en su salida: dado que estos inversores no están conectados a una red con la que sincronizar, deben funcionar como fuentes de tensión (y no como fuentes de corriente, caso habitual en los SFCR). Por lo general no incluyen un buscador del punto de máxima potencia.

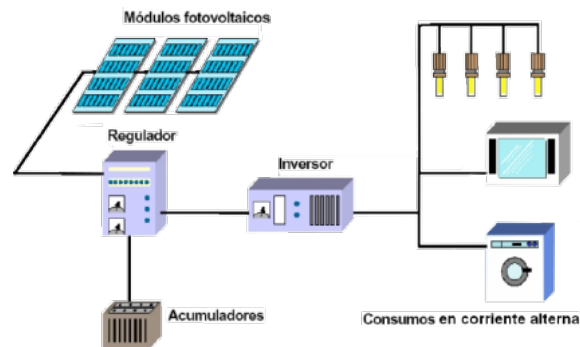


Figura 2.8.- Componentes de un SFVA.

Como caso especial destacan los sistemas híbridos. Como se entenderá en la descripción de los métodos de dimensionado de los SFVA, existe una probabilidad no nula de fallo de suministro. Así, durante un año típico, es previsible que un porcentaje de la energía demandada por la red de consumo no pueda ser correspondida por el SFVA. El dimensionado de un SFVA consiste, por tanto, en elegir los tamaños de generador y acumulador como una solución de compromiso entre mínima probabilidad de fallo y mínimo coste. Sin embargo, existen ciertas aplicaciones que no pueden estar sometidas a cortes de suministro (principalmente las aplicaciones profesionales) o redes de consumo de un tamaño tal que exigen un generador y acumulador excesivamente grandes. En estos

casos el SFVA incluye un grupo electrógeno que suministra la energía deficitaria y permite reducir el tamaño del SFVA. Un SFVA puro implica una inversión elevada pero supone unos costes de mantenimiento muy bajos. Por el contrario, un grupo electrógeno es una adquisición poco costosa pero está asociado a costes de mantenimiento no despreciables, principalmente en zonas remotas. La combinación de ambos permite reducir el tamaño del generador FV y el acumulador con la aportación energética del grupo, mientras que el generador fotovoltaico permite reducir las horas de funcionamiento del grupo, y por tanto el gasto en combustible y consiguiente mantenimiento. De aquí se sigue que el dimensionado de estos sistemas es, nuevamente, un ejercicio de optimización. El control de arranques y paradas del grupo vendrá definido por el funcionamiento de los equipos de consumo. Para aquellas cargas que no puedan asumir un corte de suministro el grupo funcionará como equipo de emergencia, activándose para alimentar estas cargas a partir de un nivel de alerta. En otros casos, bastará con que el grupo mantenga el nivel de flotación de la batería. En general, el inversor y el grupo electrógeno no funcionarán simultáneamente y no existirán problemas de sincronismo. En aquellos casos en los que exista la posibilidad de activación conjunta de estos dos equipos, se deberá incluir un mecanismo de sincronización entre ambos.

2.3.3.2.- Aplicaciones.

Dentro de las aplicaciones más comunes de los sistemas Fotovoltaicos se encuentran:

1.- Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a red para casa habitación con tarifa DAC, comercios e industrias.

- 2.- Sistemas Fotovoltaicos Interconectados, destinado a la venta de energía eléctrica.
- 3.- Sistemas autónomos para casa habitación.
- 4.- Bombeo Fotovoltaico autónomo.
- 5.- Alumbrado de calles (Alumbrado público).
- 6.- Riego Fotovoltaico.
- 7.- Cerco Eléctrico.

Como bien se ha mencionado, es necesario que la producción de energía sea la adecuada para el mejor aprovechamiento de los sistemas en cualquiera de sus aplicaciones. Por tanto, nos permite la reducción de costos de inversión de los sistemas Fotovoltaicos.

2.3.4.- Módulo Fotovoltaico.

Los módulos Fotovoltaicos son dispositivos constituidos por celdas solares (unidad mínima del dispositivo Fotovoltaico), que se encuentran interconectadas entre sí, para generar la energía necesaria requerida en sistemas de aplicación real.

Estos dispositivos pueden clasificarse de acuerdo al tipo de material, por la capacidad de generación o bien, por la tecnología aplicada en ellos.

2.3.4.1.- Clasificación.

- **Tipo de Material.** Como se ha mencionado en el apartado 2.3.2, los tipos de materiales con que pueden elaborarse los módulos Fotovoltaicos y que actualmente se encuentran en el mercado Internacional son: Las de Silicio (Monocristalino, Policristalino y Amorfo), las de película delgada (CIGS y CdTe).

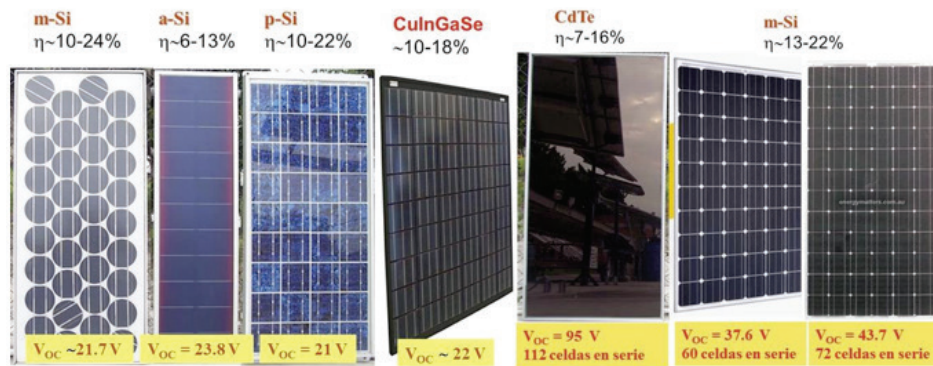


Figura 2.9.- Tipos de módulos Fotovoltaicos.

- Capacidad de Generación.

Los módulos Fotovoltaicos pueden clasificarse por su capacidad de generación de energía, el cual va relacionado con el número de celdas que contiene cada una de ellas, estas pueden ser de 60 celdas o bien, de 72 celdas. Por otro lado, algunos le asignan la clasificación por voltaje nominal a la que puede trabajar, es decir, Módulos Fotovoltaicos de 12 V o de 24 V.

2.3.4.2.- Características Eléctricas.

La tecnología de elaboración de celdas solares está basada en materiales semiconductores monocristalinos, policristalinos y amorfos, los cuales, dependiendo del tipo de semiconductor, se pueden elaborar en película delgada (del orden de 1 μm de espesor) o gruesas (del orden de cientos de micra de espesor). Las celdas solares se identifican por parámetros eléctricos como lo son: el Voltaje a circuito abierto (V_{CA}), la corriente de corto circuito (I_{CC}), que son los valores máximos en Voltaje y Corriente que genera la celda bajo condiciones de iluminación; el voltaje V_M y la corriente I_M para la máxima generación de potencia eléctrica P_M ($P_M = V_M I_M$); y la eficiencia de conversión, definida como la razón entre la máxima potencia generada a la potencia de la radiación solar incidente; todos ellos medidos bajo condiciones estándares de prueba (STC: potencia de la

radiación solar de 1.0 kW/m^2 ó 1 Sol; temperatura de celda de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y masa de aire AM1.5). La Figura 2.10 muestra una representación esquemática de dichos parámetros.

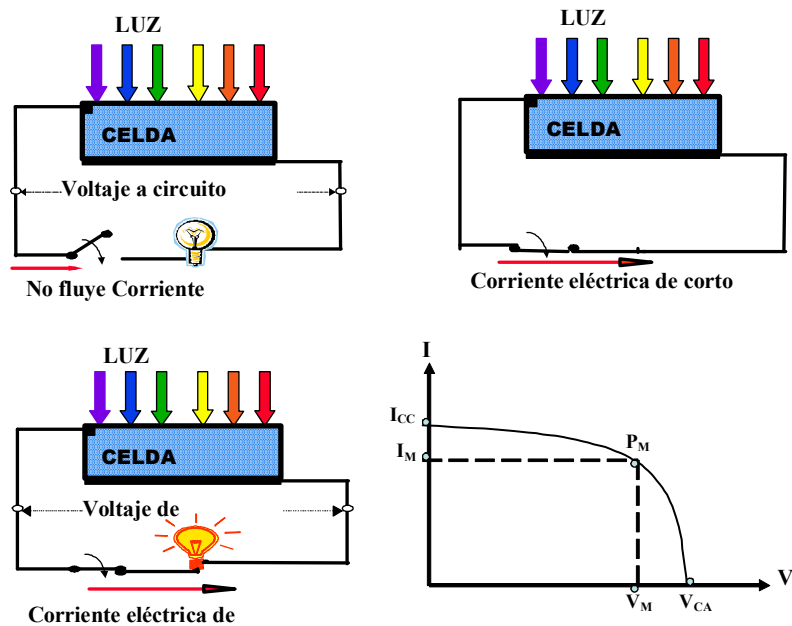


Figura 2.10.- Esquema de los parámetros eléctricos de una Celda Solar.

La potencia eléctrica generada en una celda solar es pequeña, por lo que, para incrementar ésta, es necesario interconectarlas entre sí para formar los módulos fotovoltaicos, los que a su vez, se identifican por sus parámetros eléctricos V_{CA} , I_{CC} , V_M , I_M y P_M ó Potencia pico, que es la Potencia máxima que genera el módulo cuando sobre él incide una irradiancia de 1 kW/m^2 , cuyo valor se conoce como el pico de la radiación solar.

Se encuentran en el mercado diferentes tipos de celdas y módulos solares; pero a nivel de investigación, donde se busca obtener de la celda solar la máxima potencia manteniendo los costos de elaboración al mínimo, hay una gama amplia de materiales semiconductores y estructuras en desarrollo.

2.3.4.3.- Efecto de la Temperatura en la Eficiencia.

Los Paneles Fotovoltaicos presentes en el mercado deben cumplir ciertas normativas (dependiendo del territorio en el que estén) pero un elemento que traen todos sin excepción es una caracterización particular de los datos más importantes a la hora de considerar adquirir uno (ver apartado 2.3.4.2).

- Potencia máxima P_{mpp} . Corresponde a la potencia máxima que es capaz de entregar el panel fotovoltaico, el área más grande bajo la curva de corriente-voltaje.
- Dimensiones. Largo, alto, ancho del panel completo, así como las dimensiones de las celdas fotovoltaicas.
- Tipo. Celdas de Silicio monocristalino, policristalino, etc.
- Características Térmicas. Coeficientes Térmicos (α , β , γ) que cuantifican cuanto varían el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), Corriente de corto circuito (I_{sc}) y la potencia máxima (P_{mpp}) en función de la temperatura de la celda. Cada panel fotovoltaico cuenta con sus propios parámetros térmicos, y han sido definidos para poder caracterizar su funcionamiento y respuesta (tal como aparece en la figura 2.10). Su definición es la siguiente:

$$\alpha = \frac{\partial I_{sc}}{\partial T}$$

$$\beta = \frac{\partial V_{oc}}{\partial T}$$

$$\gamma = \frac{\partial P_{mpp}}{\partial T}$$

La relación entre la temperatura de la celda fotovoltaica y la potencia de salida está dada por la ecuación:

$$P = P_{mpp} \left[1 + \frac{\gamma}{100} (T_{celda} - 25) \right]$$

T_{celda} : Temperatura de la celda (°C).

γ = Coeficiente térmico de potencia (%/°C), que indica que mientras más baja sea la temperatura de la celda (mientras más cercana sea a los 25 °C) mayor será la potencia nominal de salida. Esto se puede llevar a términos de eficiencia de conversión del panel fotovoltaico.

La eficiencia eléctrica de un panel fotovoltaico tiene relación con la fracción de potencia eléctrica generada versus la cantidad de energía solar incidente sobre la superficie.

$$\eta_{el} = \frac{P}{GA}$$

A: Área superficial del panel (m²).

G: Radiación solar incidente (W/m²).

P: Potencia eléctrica generada (W).

2.3.4.4.- Efecto del polvo en la Eficiencia.

Otro de los efectos importantes de las condiciones de operación que afectan a los Módulos FV son las partículas de polvo, nieve u otros elementos que cubren la superficie frontal de estos dispositivos, como se mencionó con anterioridad, el Módulo Fotovoltaico tiene un recubrimiento de vidrio en la parte más externa del conjunto, además posee un marco de aluminio que puede actuar como disipador del calor. El vidrio permite pasar el máximo de fotones hacia la Celda FV para que ocurra el efecto Fotovoltaico y pueda producir energía eléctrica en corriente continua. Sin embargo, cuando ésta cubierta de vidrio se ensucia (se cubre de polvo), la eficiencia del dispositivo se ve afectada.

Las pérdidas por suciedad, se refieren a la pérdida de Potencia del Módulo FV, como resultado de la acumulación en la superficie del mismo, que no superan los 10 micrómetros de diámetro.

La suciedad viene generada por las diferentes fuentes como: el viento, erupciones volcánicas, polución industrial, movimiento de vehículos, entre otras causas.

Además de la pérdida de producción de energía en los Módulos FV, a causa de la suciedad, algunos tipos como las hojas, excrementos de aves o concentraciones localizadas de mugre, provocan el efecto de “punto caliente o hotspot”.

Para explicar el punto caliente, imaginemos una serie de 10 células FV conectadas en serie, y una de ellas se halla sombreada por alguna suciedad localizada, no es capaz de realizar el efecto fotovoltaico. Lo que sucedería que la energía generada por el resto de las células FV se disiparían en forma de calor a través de ña célula sombreada, ya que esta haría de resistencia al conjunto en serie de las células.



Figura 2.11.- Efecto de punto caliente.

El efecto podría dañar al Módulo FV, en caso de no realizar las acciones pertinentes de mantenimiento.

Tipos de Suciedad.

Por lo general, existen dos tipos de sombreado a causa de la suciedad, el sombreado suave y el sombreado duro.

El sombreado duro es el que ocurre cuando un sólido como el polvo obstruye la luz del sol de forma clara y definible. Por otro lado, el sombreado suave tiene lugar cuando algunas partículas como el smog en la atmósfera, o algo de polvo en la superficie del Módulo FV, reducen la intensidad general de irradiación solar que es absorbida por las Celdas FV.

Cada uno de estos tipos de sombreado por suciedad tiene unos efectos diferentes en el Módulo FV. El sombreado suave reduce la corriente del Módulo, pero mantiene el voltaje con el mismo valor. En cambio, el sombreado fuerte depende de qué células estén sombreadas para el rendimiento del Módulo FV. Si algunas células están sombreadas, siempre y cuando el resto reciban irradiancia solar, habrá flujo de corriente. Tal y como se explicó antes, es posible que surja el efecto de foco caliente, pero se puede solventar con un diodo de derivación, aunque la intensidad sería menor, en cualquier caso. En el caso de que todas las células se encuentren bajo un sombreado fuerte, el Módulo FV no producirá corriente.

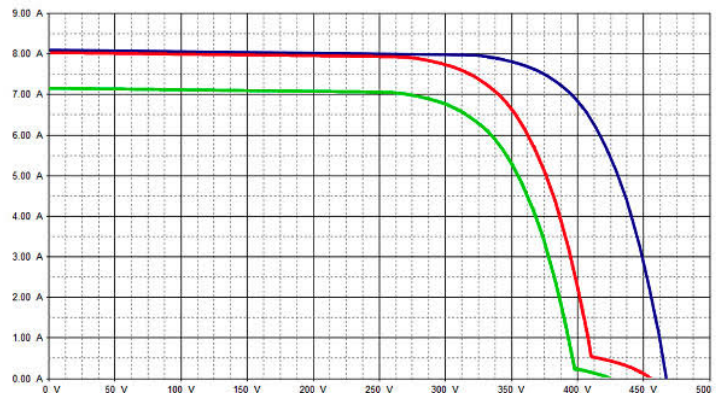


Figura 2.12.- Efecto de sombreado por excremento de ave.

Como se puede observar, se efectúa una pérdida de potencia considerable, aunque para el sombreado suave sea a través del decremento de corriente y para el sombreado duro, sea a través de la pérdida de tensión.

2.4.- Sistemas Electrónicos de control (Arduino).

¿Qué es Arduino?

Arduino es una plataforma de prototipos de código abierto basado en hardware y software fácil de usar. Las placas Arduino son capaces de leer entradas (la luz en un sensor, la pulsación de un botón, o un mensaje de Twitter) y convertirla en una salida (la activación de un motor, encender un LED, publicar algo en línea). Todo esto se define por un conjunto de instrucciones programadas a través del Software Arduino (IDE).

A través de los años Arduino ha sido el cerebro de miles de proyectos. Una comunidad mundial de los fabricantes (estudiantes, aficionados, artistas, programadores y profesionales) se ha reunido alrededor de esta plataforma de código abierto, y sus contribuciones han añadido una increíble cantidad de conocimiento accesible que puede ser de gran ayuda tanto para los principiantes como para expertos.

Arduino nació en Italia en instituto de diseño IVREA como una herramienta de prototipado fácil, rápida, dirigido a estudiantes sin experiencia en electrónica ni programación. Tan pronto como llegó a una comunidad más amplia, la placa Arduino comenzó a cambiar para adaptarse a las nuevas necesidades y desafíos, diferenciándose de otras placas de 8 bits más simples con productos para aplicaciones de la IoT (Internet of Things), impresión 3D, wearable (vestibles) y

entornos embebidos. Todas las placas Arduino son completamente de código abierto, permitiendo a los usuarios crear de forma independiente y, finalmente, adaptarlos a sus necesidades particulares. El software también es de código abierto, y está creciendo a través de las aportaciones de los usuarios en todo el mundo.

¿Porque Arduino?

Gracias a su sencilla y accesible experiencia de usuario, Arduino se ha utilizado en miles de diferentes proyectos y aplicaciones. El software de Arduino es fácil de usar para los principiantes, pero lo suficientemente flexible para los usuarios avanzados. Se ejecuta en Mac, Windows y Linux. Los profesores y los estudiantes lo utilizan para construir los instrumentos científicos de bajo coste, para demostrar los principios de química y física, o para iniciarse en la programación y la robótica. Diseñadores y arquitectos construyen prototipos interactivos, músicos y artistas lo utilizan para instalaciones y experimentar con nuevos instrumentos musicales. Los fabricantes, por supuesto, lo utilizan para construir muchos de los proyectos expuestos en la Maker Faire, por ejemplo. Arduino es una herramienta clave para aprender cosas nuevas. Cualquier persona - niños, aficionados, artistas, programadores - puede comenzar a jugar simplemente siguiendo paso a paso las instrucciones de un kit, o compartir ideas en línea con otros miembros de la comunidad de Arduino.

Hay muchos otros microcontroladores y plataformas de microcontroladores disponibles para computación física. Parallax Basic Stamp, de Netmedia BX-24, Phidgets, Handyboard del MIT, y muchos otros ofrecen una funcionalidad similar. Todas estas herramientas toman los detalles sucios de programación de

microcontroladores y lo envuelve en un paquete fácil de usar. Arduino de la misma forma simplifica el proceso de trabajar con los microcontroladores, pero ofrece algunas ventajas para los profesores, estudiantes y aficionados interesados sobre otros sistemas:

- Accesibles: Las placas Arduino son relativamente baratos en comparación con otras plataformas de microcontroladores. La versión menos costosa del módulo Arduino puede ser montado a mano, e incluso los módulos de Arduino premontados cuestan menos de \$500 Mx.
- Multiplataforma: El software de Arduino (IDE) se ejecuta en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux. La mayoría de los sistemas de microcontroladores se limitan a Windows.
- Ambiente de programación limpio y simple: El software de Arduino (IDE) es fácil de usar para los principiantes, pero lo suficientemente flexible para aprovecharlo también por los usuarios avanzados. Para los profesores, se basa convenientemente en el entorno de programación Processing (Lenguaje muy utilizado en diseño), por lo que los estudiantes que aprenden a programar en ese entorno estarán familiarizados sobre cómo funciona el Arduino IDE.
- Software de código abierto y extensible: El software de Arduino está publicado como herramientas de código abierto, disponible para la extensión por programadores experimentados. El lenguaje se puede ampliar a través de bibliotecas C++, y la gente con ganas de entender los

detalles técnicos pueden dar el salto de Arduino para el lenguaje de programación AVR C en el que se basa. Del mismo modo, puede agregar código AVR-C directamente en sus programas de Arduino si quieres.

- Hardware de código abierto y el extensible: Los planos de las placas Arduino se publican bajo una licencia de Creative Commons, por lo que los diseñadores de circuitos experimentados pueden hacer su propia versión del módulo, ampliándolo y mejorándolo. Incluso los usuarios con poca experiencia pueden construirla con el fin de entender cómo funciona y ahorrar dinero.

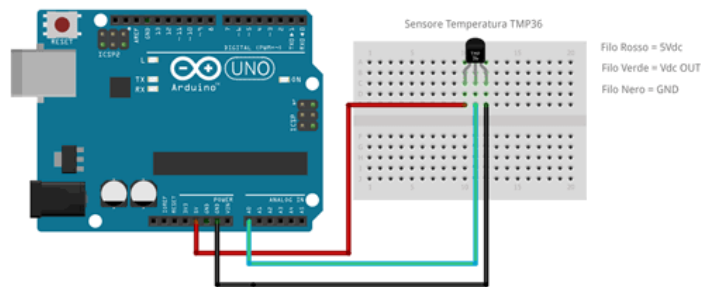


Figura 2.13.- Plataforma Arduino.

2.5.- Modelo Matemático.

En el modelo analítico se considera la transferencia de calor unidimensionalmente, para evitar los cálculos engorrosos de ecuaciones diferencial parciales de segundo orden, con lo que se asume que el panel solar está aislado en la parte inferior y sus laterales.

El flujo de agua que pasa por encima del panel se considera como un canal abierto, se usó modelos matemáticos como el de Manning para describir el comportamiento del fluido. La transferencia de calor se usó el método de resistencias térmicas y se supuso que está en estado estable.

a) Altura de la película de agua

Las ecuaciones que definen el comportamiento del fluido en el canal abierto son:

$$\text{Área de contacto} = 1.57y$$

$$\text{Perímetro} = 1.57 + 2y$$

$$\text{Radio Hidráulico} = \frac{1.57y}{1.57 + 2y}$$

Usando la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} (\text{Área})(\text{Radio Hidráulico})^{\frac{2}{3}} (\sqrt{\text{Pendiente}})$$

Posteriormente se busca Raynols:

$$R_e = \frac{(\text{Velocidad})(\text{Longitud característica})}{\text{Viscosidad cinemática}}$$

Así también, se requiere encontrar Nusselt:

$$N_u = \frac{hl}{k} = 0.664R_e^{0.5}Pr^{\frac{1}{3}}$$

Esto se realiza con la finalidad de hallar el coeficiente de convección. K es el coeficiente de conducción, Pr es Prandtl que se obtiene de tablas y l es la longitud característica.

b) Cálculo de la Energía Absorbida.

En promedio la irradiación es de 1000 W/m², en este caso el fluido de trabajo el cual es agua absorbe una parte de la radiación, el porcentaje de radiación absorbida más la reflejada está cerca del 50%, por tanto la radiación transferida a la celda es el 50% de la que llega. Tenemos que el calor disipado es:

$$\dot{Q} = G (\alpha\tau)(\text{Área}) - \text{Potencia del MFV}$$

La Temperatura de celda se calcula de la siguiente forma:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{convección} + \dot{Q}_{Radiación}$$

$$\dot{Q} = \varepsilon\sigma A(T^4 - T_{Ambiente}^4) + hA(T - T_{Ambiente})$$

Transferencia de masa hacia la atmósfera

Una cantidad de agua se evaporara del panel, para calcularlo se Usa el número de Grashof para saber la proporción entre las fuerzas de flotación y las viscosas.

(Yunus A.cengel, 2011)

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

En donde:

g es la aceleración de la gravedad (m/s²)

β = es el coeficiente de expansión térmica.

T_s es la temperatura de la superficie.

T_∞ es la temperatura ambiente.

L es la longitud característica.

ν es la viscosidad cinemática.

La difusión molecular en el agua es muy importante por ende se calcula el número de Schmidt.

$$D_{Agua} = (1.87 \times 10^{-10}) \frac{T^{2.072}}{P}$$

La transferencia de masa dada en el volumen de control que comprende al espacio entre el panel solar y el aire (el canal por donde fluye el agua) elimina una cantidad de calor por evaporación por tanto se debe cuantificar a través del número de Sherwood.

$$h_{masa} = \frac{(No\ de\ Sherwood)D_{Agua}}{L}$$

$$\dot{m}_{vapor} = h A (6.22 \times 10^{-3})$$

c) Potencia del Módulo FV.

La variación de la potencia se rige con la siguiente formula:

$$P = P_{m\acute{a}x} \left[1 + \frac{\gamma}{100} (T - 25^{\circ}\text{C}) \right]$$

γ Es una variación de porcentaje del voltaje y depende de la celda.

2.6.- Conclusión

En el contenido se tiene la teoría suficiente para realizar las investigaciones planteadas para alcanzar los objetivos, los cuales se centran principalmente en los principios teóricos de la generación de energía a través de la tecnología Fotovoltaica. El contenido organizado en este apartado, se elaboró de acuerdo a las etapas durante el desarrollo de investigación, desde las definiciones básicas hasta las ecuaciones y tecnologías de control requeridas para la investigación.

CAPITULO III.- METODOLOGÍA (TÉCNICAS EXPERIMENTALES)

3.1.- Introducción.

En este apartado se describe métodos experimentales realizados para el trabajo de investigación, se plantean los procedimientos, equipos usados e instrumentos requeridos para la recolección de datos y la posterior evaluación.

3.2.- Funcionamiento del sistema automatizado de enfriamiento y limpieza.

El sistema de control, usa la plataforma de código abierto Arduino, que permite mantener la temperatura del Módulo FV, al nivel deseado. Cuando la plataforma detecta la temperatura indicada en el programa, a través de un sensor de temperatura acoplada a la superficie posterior del Generador FV, manda una señal para activar una bomba de agua que se alimenta de energía eléctrica en corriente directa a 12V. La bomba, suministra el agua necesaria sobre la superficie frontal del Módulo FV hasta alcanzar el nivel de temperatura por debajo de lo indicado en el programa, una vez logrado, la bomba se apaga de forma automática. El agua que fluye sobre el Módulo FV, es recolectada en el recipiente del que fue tomado por la bomba, lista para volver a usarse.

3.2.1.- Componentes del Sistema de Control.

El sistema de control se programó en plataforma Arduino, en ella se implementaron sensores de temperaturas, pantallas LCD y módulos captadores de información eléctrica que son la base de esta automatización.

El sistema de control contiene los siguientes componentes, que permitieron automatizar eficientemente el método de enfriamiento:

- Arduino Mega. Plataforma base en donde se conectaron los componentes necesarios para la automatización.

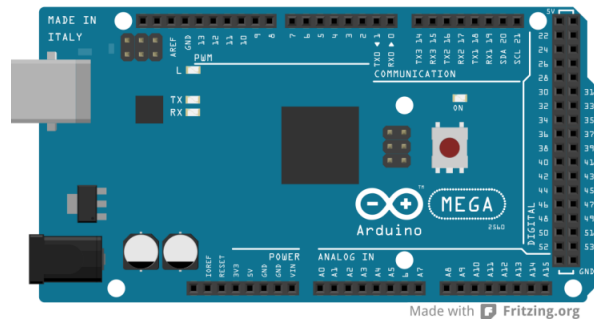


Figura 3.1.- Plataforma Arduino Mega.

- Módulo max6675 y termopar tipo K. Requerido para reconocer los niveles de temperatura experimentados por el Módulo FV que recibirá el proceso de enfriamiento por agua.

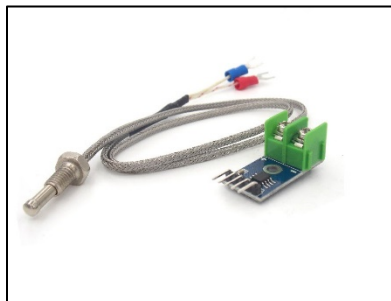


Figura 3.2.- Sensor de Temperatura.

- Relevador de un canal. Este dispositivo nos permite controlar el encendido y apagado del sistema de bombeo de agua.



Figura 3.3.- Relevador de un canal.

- Pantalla LCD 20x4. Permite visualizar los datos de temperatura alcanzadas por el Módulo FV, medidas por el sistema.

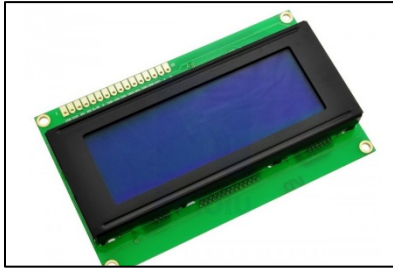


Figura 3.4.- Pantalla LCD.

- Reguladores de voltaje step down LM2596. Permite regular el voltaje entre la fuente y la plataforma, así como el de las cargas, tal como la bomba.

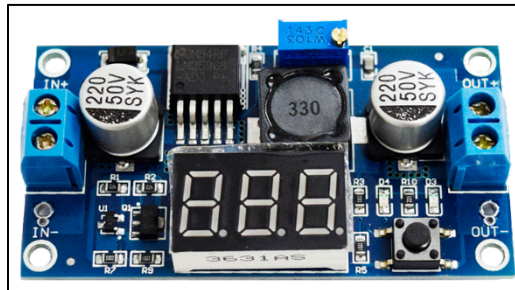


Figura 3.5.- Regulador de Voltaje.

- Placa fenólica o baquelita (10cm x 10 cm). La base para colocar los componentes requeridos para automatizar el sistema.

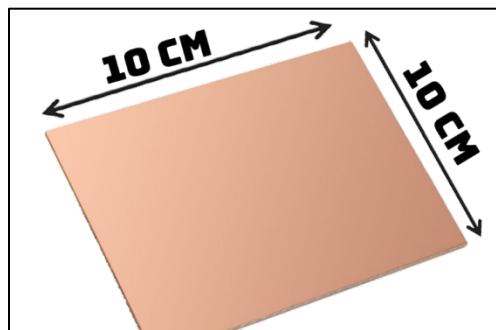


Figura 3.6.- Placa Fenólica.

3.2.2.- Circuito en la placa fenólica o baquelita.

Para poder crear el circuito electrónico que lleva la placa, se usa el programa PCB Wizard. Este es un programa nos permite crear esquemas de circuitos electrónicos y obtener el diseño del circuito impreso físicamente, con la finalidad de grabar las pistas a una baquelita.

Al crear el circuito en PCB Wizard marcamos los espacios donde se conectarán los sensores y pantalla que conforman el sistema de automatización y control.

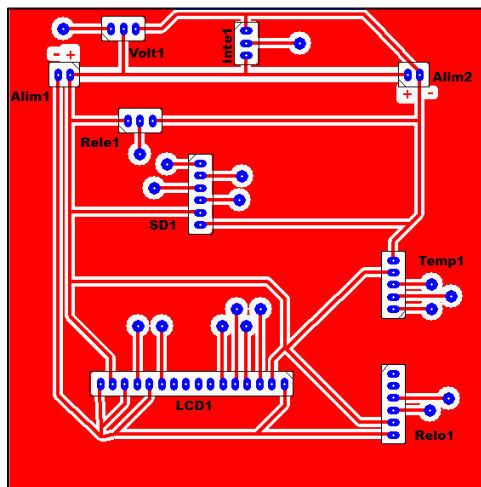


Figura 3.7. Diseño del circuito para el sistema de enfriamiento.

En la Figura 3.7 se muestra el diseño del circuito electrónico del sistema de automatización y control. De donde:

- Volt1: Es el sensor de voltaje.
- Inte1: Es el sensor de intensidad.
- Rele1: Es el relevador.
- SD1: Es el módulo microSD.
- Temp1: Es el módulo de temperatura max6675.
- Relo1: Es el módulo reloj ds3231.

- LCD1: Es la pantalla LCD de 20X4.
- Alim1 y Alim2: Entradas de alimentación.

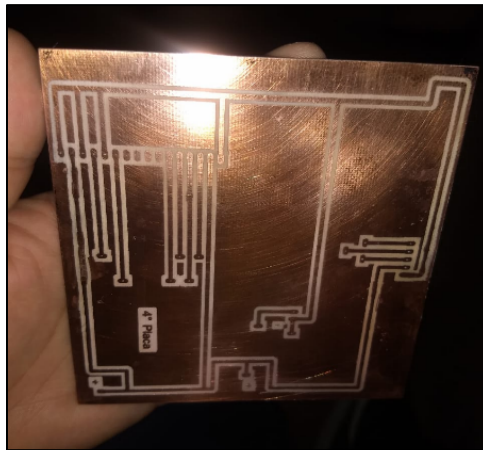


Figura 3.8.- Placa de conexiones con pistas impresas.

Al tener la placa lista, se perfora la baquelita en los puntos ya asignados y se sueldan los componentes.

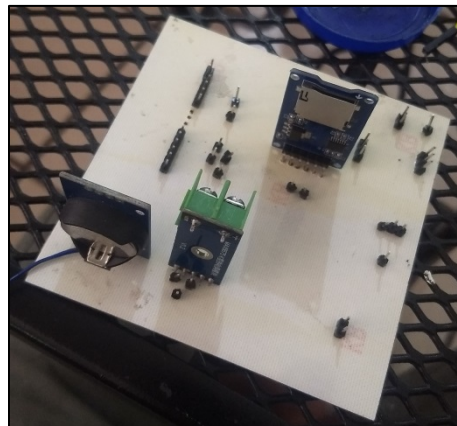


Figura 3.9.- Componentes instalados en la placa de conexiones.

3.2.3 Conexiones de Arduino con placa fenólica.

Uno de los problemas más comunes en fallas en un sistema electrónico que trabaja con Arduino, es la mala conexión que hay en la placa fenólica. Esto es debido principalmente por la calidad que estén los cables dupont jumper. En este caso fue de suma importancia usar cables dupont jumper de buena calidad y nuevos, para evitar fallas en el sistema.

En las siguientes imágenes se muestran las conexiones de los sensores que conforman el sistema de automatización hacia Arduino Mega.

- Módulo max6675 a Arduino.

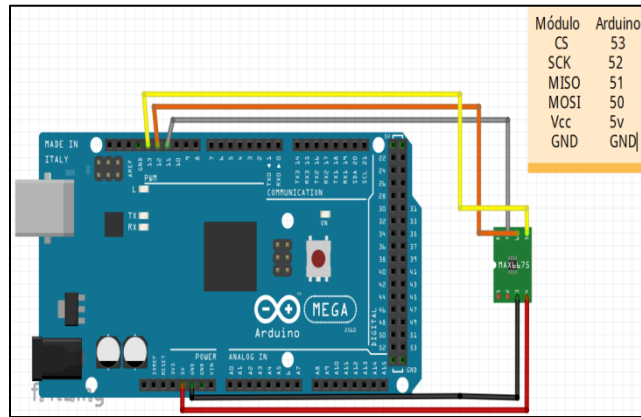


Figura 3.10.- Conexiones del módulo max6675 a Arduino.

- Relevador de un canal a Arduino Mega.

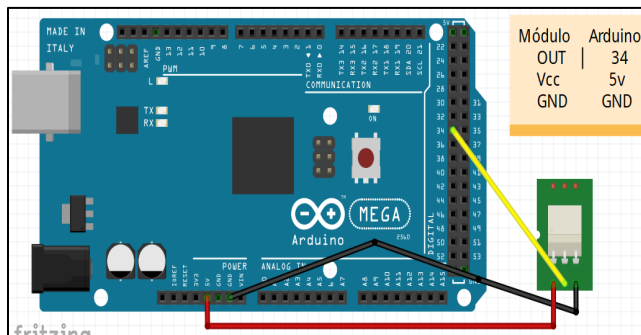


Figura 3.11.- Conexiones del relevador de un canal a Arduino Mega.

- Pantalla LCD a Arduino Mega.

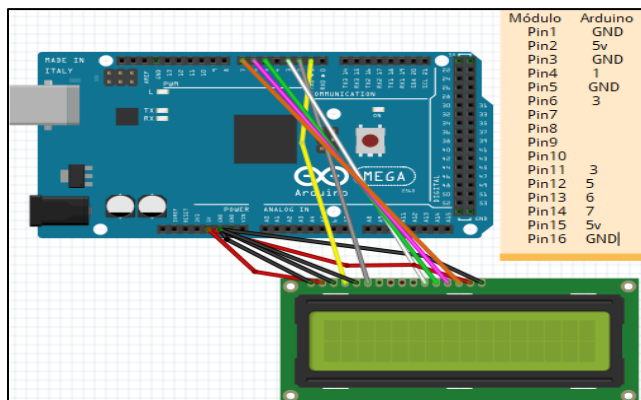


Figura 3.12. Conexiones de la pantalla LCD a Arduino Mega.

3.3.- Descripción de los Componentes del Bombeo Fotovoltaico.

El Sistema de Arduino es esencial para el control de flujo de agua para conservar el nivel de temperatura, para ello se requiere del sistema de bombeo que realice el trabajo y permitir el flujo del agua desde un contenedor hacia la superficie frontal Módulo FV. El sistema de Bombeo usado, consiste en un sistema FV autónomo a 12 V, conformada por: un Módulo FV de 100 Wp, un controlador de carga de 10 A a 12/24V, una Batería de aplicación Fotovoltaica de Plomo-Ácido a 12 V, un Bomba Superficial de 12 V en corriente directa con flujo de 700 litros por hora.

3.3.1.- Módulo FV de 100 Wp.

El Módulo FV de 100 Wp, es de Silicio Policristalino, tiene garantía de 12 años con una producción hasta del 90% y más del 85% hasta 25 años.

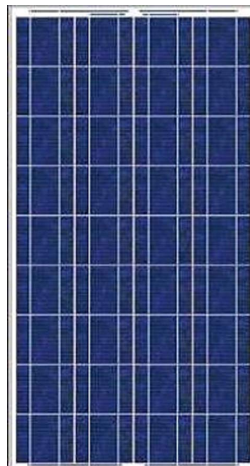


Figura 3.13.- Módulo FV de 100 Wp.

Tabla 3.1.- Características eléctricas del Módulo FV de 100 Wp

Potencia	100W
Voltaje de Circuito abierto(V_{oc}/V)	21.61
Corriente de Corto Circuito (I_{sc}/A)	5.74
Voltaje Optimo de circuito (V_{mp}/V)	17.70
Corriente de Circuito Óptima (I_{mp}/A)	5.65
Eficiencia de Módulo	14.63%

3.3.2.- Controlador de Carga.

Descripción:

El controlador de carga solar de esta serie es un tipo de controlador de carga y descarga solar inteligente y multifuncional. Todos los parámetros de control se pueden restablecer de manera flexible para satisfacer sus diferentes necesidades.

Tabla 3.2.- Especificaciones técnicas del Controlador de carga.

Tipo	Controlador de carga solar
Modelo	CMTD-2410
Material	El plástico
Color	Negro
Tensión nominal	12V / 24V (Auto Switch)
Max. Corriente de carga / descarga	10A
Max. Voltaje de entrada del panel Solar	≤50V
Detener la tensión de carga	14.7V / 29.4V
Recuperación de baja tensión	12.2V / 24.4V
Protección de baja tensión	10.5V / 21.0V
Voltaje / corriente de salida USB	5V / 2A
Tamaño del artículo	13 * 6.8 * 2.5 cm / 5.12 * 2.67 * 0.98 in
Peso del artículo	120 g ~ 152 g / 4.23 oz ~ 5.38 Oz
Tamaño del paquete	14 * 8 * 4cm / 5.51 * 3.15 * 1.57 in

Características:

- Visual LCD símbolo gráfico, pulsación breve.
- Sistema de identificación automática de nivel de tensión, modo de carga inteligente PWM.
- Parámetros ajustables de control de carga / descarga, modos de funcionamiento ajustables de cargas.
- Selección múltiple de batería.

- Batería protección contra sobrecalentamiento, baja tensión / protección contra polaridad inversa.
- Protección contra sobrecargas y cortocircuitos.
- Con salida doble USB 5V.



Figura 3.14.- Esquema de conexión del Controlador de carga.

3.3.3.- Bomba de Agua.

La bomba de agua superficial funciona en Corriente Directa a 12 V, algunas de sus características y beneficios son:

- Funcionamiento suave y silencioso.
- Puede funcionar en seco por tiempos breves.
- Accesorios de fácil instalación.
- Auto-cebante.
- Diafragma de santopreno.
- Válvula check incluida en el cuerpo de la bomba.
- Válvula resistente a la corrosión.

Tabla 3.3.- Especificaciones Técnicas de la Bomba de agua DP-35.

Voltaje de operación	12V
Temperatura máxima del líquido	60°C (140°F) Max
Capacidades de cebado (succión)	1.8m (6 pies)
Presión máxima	40 PSI (2.8 bar)
Medida de conexiones de entrada y salida	1/2" NPT y manguera
Peso	1.80 kg (4 libras)
Gasto (GPM/LPM)	3.3 gal /12.5 l
Presión máxima	35/2.4
Carga dinámica máxima	8 m
Tipo de trabajo Intermitente	(No diseñado para uso continuo)

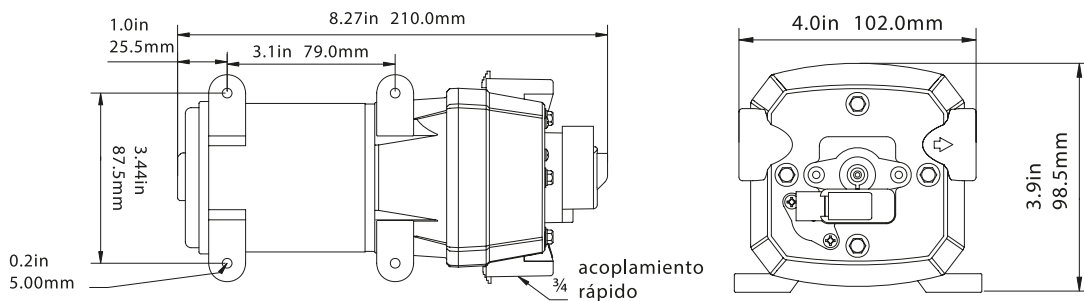


Figura 3.15.- Medidas y partes físicas de la Bomba de agua.

3.3.4.- Batería de Descarga Profunda.

La batería es de descarga profunda a 12 V de 115 Ah de Plomo-Ácido, nos permitirá el arranque de la Bomba de agua y el acoplamiento al controlador de carga.



Figura 3.16.- Baría Solar.

Cada uno de los componentes fueron conectados con la finalidad de poder controlar el flujo de agua cuando la temperatura del módulo prueba incrementa su temperatura, con ello mantener al nivel de temperatura deseado.



Figura 3.17.- Esquema de conexión del sistema de bombeo para enfriamiento.

3.4.- Componentes de los Sistemas FV's para la prueba.

Para las mediciones, en el primer caso, solo se usan 3 generadores FV de tipo Silicio Policristalino, de 255 Wp cada una.

Tabla 3.4.- Especificaciones Técnicas del Módulo FV de 255 Wp.

Electrical Specification		Mechanical Specifications	
Dato Eléctrico STC (25 °C; 1,000 W/m ² ; 1.5 AM)		Cell.	Polycrystalline Silicon Solar Cells 156mm*156mm/6In
P _{max} (W _p).	255	No. of Cells.	60 (6 * 10) Pcs.
V _{mp} (V).	30.2	Dimension of Module.	1638mm * 982mm * 40mm (64.5In * 39.0In * 1.57In)
I _{mp} (A).	8.43	Weight.	18.0 kg
V _{oc} (V).	37.4	Front Glass.	3.2mm (0.13 In) tempered glass
I _{sc} (A).	9.0	Frame.	Anodized aluminum alloy
Module Efficiency (%).	15.85	Juntion Box.	IP67

Para el segundo caso (sistema FV autónomo a 24 V), además de los Módulos FV, se usan dos Baterías de aplicación FV a 12 V cada una y 95 Ah, tres controladores de carga PWM de 20 A y 12/24 V cada una, inversor de corriente de 1000 W a 24 V DC/120 V AC, 3 bombillos incandescentes de 75 W a 120 V cada uno.

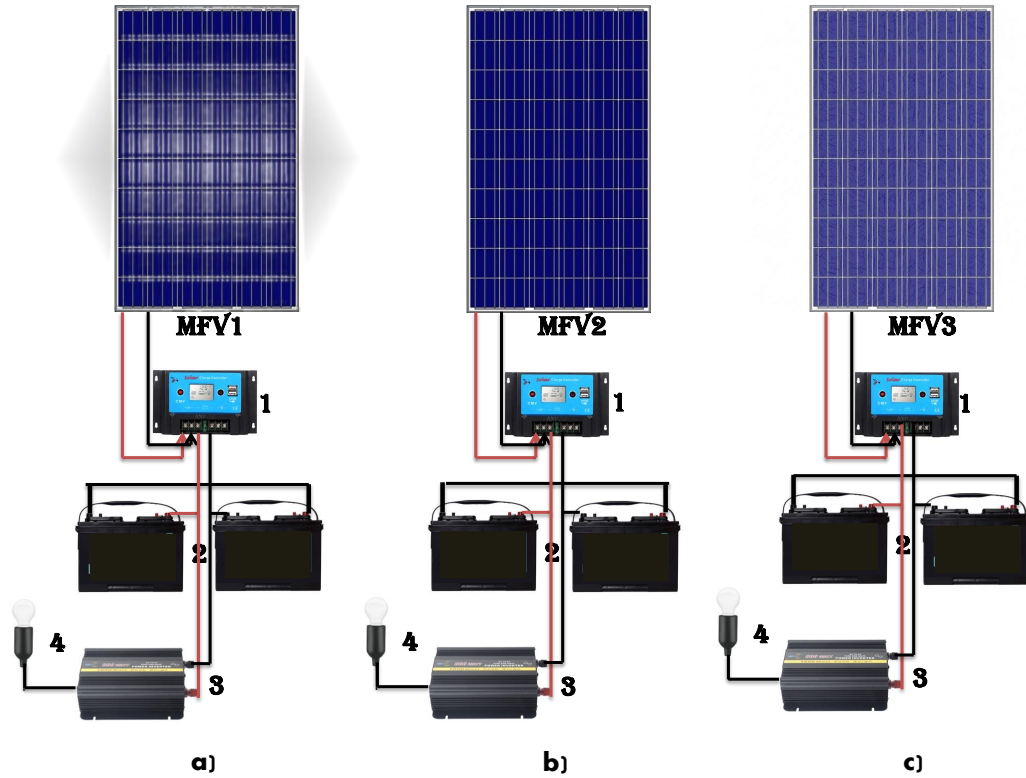


Figura 3.18.- Esquema de conexión del Sistema FV a 24V.

Los inversores y las cargas (focos incandescentes) se han usado para poder descargar las baterías de forma simultanea mientras estas se cargan con la energía generada por los Módulos FV. Esto garantiza que exista un flujo real de energía desde el Generador FV hacia las Baterías.

3.5.- Procedimiento de Evaluación.

Para la evaluación, se consideran tres Módulos FV, el primero acoplado al sistema de enfriamiento y limpieza (MFV1), el segundo caso sin el sistema pero con la superficie frontal del Módulo FV limpio, el tercero sin el sistema y con la superficie frontal del Módulo FV sucio (empolvado).



Figura 3.19.- Módulos FV: a) Con enfriamiento; b) Limpio; c) Sucio.

La plataforma Arduino fue programada para mantener la temperatura en la superficie del Módulo a 40 °C. Se usa un recipiente con 50 litros de agua para enfriar los módulos.

Las mediciones se realizan cada 10 minutos, durante un periodo de 6 horas, con las siguientes configuraciones:

a).- 3 Módulos FV desconectados. En ella se midieron la Intensidad a corto circuito (I_{sc}) y el Voltaje a circuito abierto (V_{oc}). Para obtener los valores de dichas características eléctricas, se mide en corto circuito, directamente de los cables positivo y negativo del Módulo FV.

b).- 3 Sistemas FV autónomos a 24 V (ver figura 3). Se obtienen valores de Intensidad a Potencia Máxima (I_{mp}) y Voltaje a potencia máxima (V_{mp}), con ayuda de un multímetro de gancho y los datos proporcionados por el controlador de carga del mismo Sistema FV.

Así también, en ambos casos, se registran los parámetros de Temperaturas (en la superficie de los Módulos FV, el ambiente y del agua), y Radiación incidente.

Posteriormente, se calcula la energía producida durante el día por cada Módulo

FV (MFV1, MFV2 y MFV3) y la diferencia de generación de energía entre cada uno de ellos.

Para las mediciones y obtención de los datos se usaron instrumentos de mediciones eléctricas convencionales:

Tabla 3.5.- Instrumentos de medición usados durante la evaluación.

Solar Power Meter TES-1333	Infrared Thermometer	Multimeter UT-203	Multimeter UT-601C	Screen Digital Thermometer
Proporciona datos de Irradiación durante los días de medición de energía producida por los módulos FV.	Proporciona datos de Temperatura del Fluido de Trabajo (Agua).	Permite conocer el flujo de Corriente del Módulo hacia las Baterías durante las pruebas en el Sistema a 24 V.	Nos proporciona Voc e Isc de los Módulos desconectados.	Permite monitorear la temperatura de cada uno de los Módulos FV.
				

3.6.- Análisis Costo-Beneficio.

a) En el Análisis de costo-Beneficio, se consideran los resultados obtenidos de las mediciones de donde obtenemos la producción de energía en cada caso: Módulo FV sucio en condición ambiental de operación, Módulo FV limpio en condición ambiental de operación y, Módulo FV con el sistema de enfriamiento.

b) Por otro lado, se realizó una proyección de los costos por consumo de energía de la red eléctrica convencional.

c) Posteriormente, se realiza un balance de los costos por ahorro de energía con el uso del sistema de enfriamiento, considerando la capacidad máxima de limpieza y enfriamiento del sistema de bombeo FV.

d) Finalmente, se realiza un análisis de la cantidad de CO₂ que se deja de emitir con el uso del sistema de enfriamiento, que es proporcional a la cantidad de energía ahorrada al año. El análisis consiste en el cálculo de la *Huella de Carbono*, que refiere a las emisiones de CO₂ para módulos fotovoltaicos y su comparación con las emisiones obtenidas por método convencional.

El análisis para obtener la reducción de CO₂ se realizó comparando la energía eléctrica anual mínima que consumiría una casa en tarifa DAC por fuentes convencionales a obtenerlo de energía solar por medio de módulos fotovoltaicos.

Esto se logra al emplear la fórmula:

$$\text{Emisión Anual convencional} = \text{Consumo anual} \times \text{Gramos de CO}_2$$

Para calcular las emisiones de CO₂, referentes al coeficiente de emisiones anual de acuerdo con la Comisión Reguladora de Energía [4].

El factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional, correspondiente al año 2018, es: 0.527 *tCO₂MWh*; esta cifra es empleada como el incremento en gramos de CO₂ que produciría seguir consumiendo energía de esta fuente

Para obtener el ahorro de CO₂ al utilizar los Sistemas FV, se tomó en cuenta en este documento el coeficiente de 32 *gCO₂MWh*, como el incremento en gramos de la energía generada por un panel fotovoltaico según la formula siguiente:

$$\text{Emisión anual con Energía Solar FV} = \text{Consumo anual} \times \text{Gramos de CO}_2 \text{ de FV}$$

Por lo tanto, el resultado deriva también en el ahorro que el panel fotovoltaico

realiza:

$$A = E_c - E_s$$

Donde A es el ahorro en energía, E_c la energía convencional y E_s la energía solar FV.

Esto nos sirve para tener un estimado del impacto medio ambiental que produce el uso de los paneles fotovoltaicos, por lo cual asegurar mayor eficiencia incrementa el efecto al pilar medio-ambiental de la sustentabilidad del sistema.

3.7.- Análisis mediante Modelo Matemático.

Para el análisis comparativo de los parámetros Térmicos durante la interacción entre el Módulo FV y el fluido de trabajo, se aplica un modelo analítico para el cálculo adecuado del flujo, y la transferencia de calor necesaria para mantener la temperatura ambiente en el panel. La comparación se realiza con los parámetros obtenidos durante la experimentación a escala real, por lo que los dispositivos usados son los explicados en los apartados 3.3 y 3.4, para ver el comportamiento del flujo en el panel y que consecuencias muestra.

En el modelo analítico se considera la transferencia de calor unidimensionalmente, con lo que se asume que el panel solar está aislado en la parte inferior y sus laterales.

El flujo de agua que pasa por encima del panel se considera como un canal abierto, se usó modelos matemáticos como el de Manning para describir el comportamiento del fluido. La transferencia de calor se usó el método de resistencias térmicas y se supuso que está en estado estable.

Los datos a analizar con este modelo son los siguientes:

- Altura de la película de agua.
- Energía Absorbida.
- Transferencia de masa hacia la atmósfera.
- Potencia del Módulo FV.

Finalmente, con ayuda de los parámetros encontrados y con la finalidad de facilitar los cálculos, se elabora un programa de simulación mediante el lenguaje de programación de Visual Basic con macros desde Excel, con el cual nos permitirá proyectar los parámetros para instalaciones de mayor dimensión.

3.8.- Conclusión

Con base a la metodología realizada, se pudieron obtener los datos de forma exitosa, así como los cálculos requeridos para el análisis de la Producción excedente de energía eléctrica generada, la proyección para un sistema equivalente a la capacidad de bombeo del sistema, el análisis de ahorro económico y la cantidad de CO₂ que se dejan de emitir con el uso de este sistema de enfriamiento. Finalmente, la propuesta de análisis mediante un modelo matemático que permita calcular la cantidad de agua requerida para el enfriamiento.

CAPITULO IV.- RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1.- Introducción.

Con base a las pruebas realizadas, mencionadas en el apartado de Metodología, se encuentra la importancia que tiene la temperatura sobre la producción de energía de los Módulos FV's, así como lo importante que es el mantenimiento preventivo (limpieza) de la superficie de los mismos. Con el control de estos parámetros, se puede aprovechar en mayor medida la generación de energía mediante estos dispositivos, que en principio, son amigables con el ambiente.

Por otra parte, en los resultados del análisis comparativo de costo-beneficio, nos muestra la rentabilidad de estos dispositivos.

Finalmente, la modelación nos muestra la conveniente de la predicción teórica para conocer la cantidad de agua requerida para el proceso, así como la generación aproximada del Módulo FV, y además, la proyección a una mayor escala.

4.2.- Evaluaciones previas.

Para el inicio del análisis del efecto de la temperatura y el polvo sobre la producción de energía de los Módulos FV, se realizaron tres evaluaciones previas, en las que se recabaron datos de los parámetros eléctricos (voltaje, intensidad, temperaturas y potencia).

4.2.1.- Evaluación 1 (35°C).

En la gráfica 4.1, se muestran el promedio de voltajes por hora que produjeron los dos Módulos FV. Se puede observar que el módulo con el sistema automático de limpieza y enfriamiento produjo más voltaje que el módulo sin la técnica de enfriamiento.

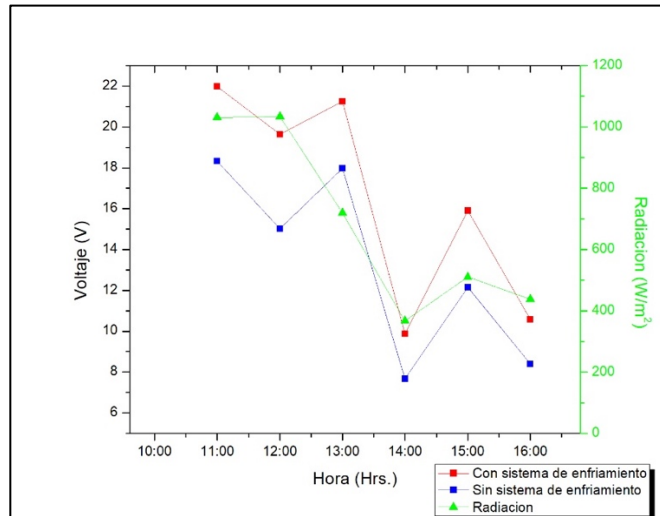


Figura 4.1.- Evolución del Voltaje en módulos FV.

En la figura 4.2, se muestran el promedio de las intensidades por hora que generaron los dos módulos fotovoltaicos. Se observan que las dos líneas que representan los módulos siguen un patrón semejante. Esto nos muestra que los módulos fotovoltaicos evaluados produjeron intensidades similares.

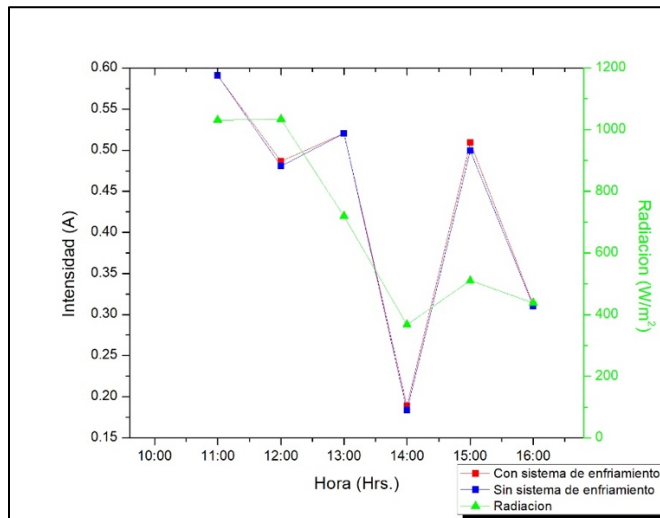


Figura 4.2.- Evolución de la Intensidad en módulos FV.

En la figura 4.3, muestra el promedio de las temperaturas por hora que tuvieron los dos módulos fotovoltaicos. El módulo con el sistema automático de limpieza y enfriamiento mantuvo una temperatura casi constante de 35 °C, que fue el valor de la temperatura con la que se programó. Por el contrario, la temperatura del otro

módulo evaluado fue muy variable, y se llegó a elevar aproximadamente el doble que el módulo con el sistema automático de limpieza y enfriamiento a las 13:00 horas.

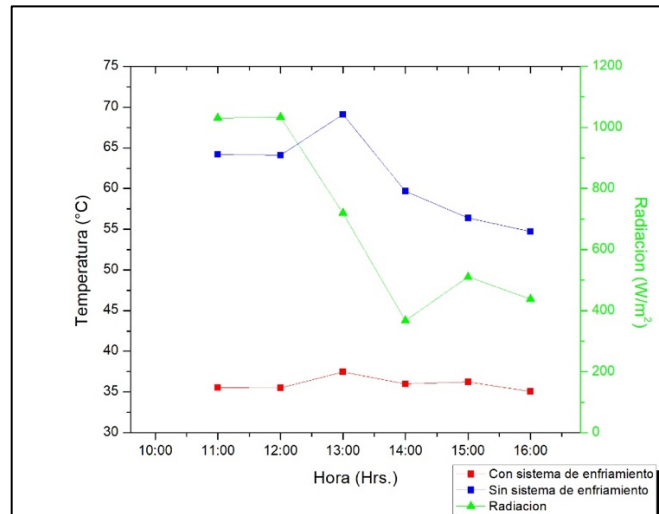


Figura 4.3.- Evolución de la Temperatura en módulos FV.

En la figura 4.4, se muestra el promedio de temperaturas por hora del agua, el ambiente y el módulo con sistema automático de limpieza y enfriamiento.

Se observa que el agua aumentó de temperatura rápidamente de 11:00 hrs. a 12:00 hrs. Esto se debe, a que el agua recibió la radiación más alta durante ese día. A las 13:00 horas obtuvimos la temperatura más alta del agua, eso conlleva a tener la temperatura más alta del módulo fotovoltaico, ya que la sustracción del calor del módulo hacia el agua era más complicada. Respecto a la temperatura ambiente, no se pudieron observar relaciones con la temperatura del módulo fotovoltaico.

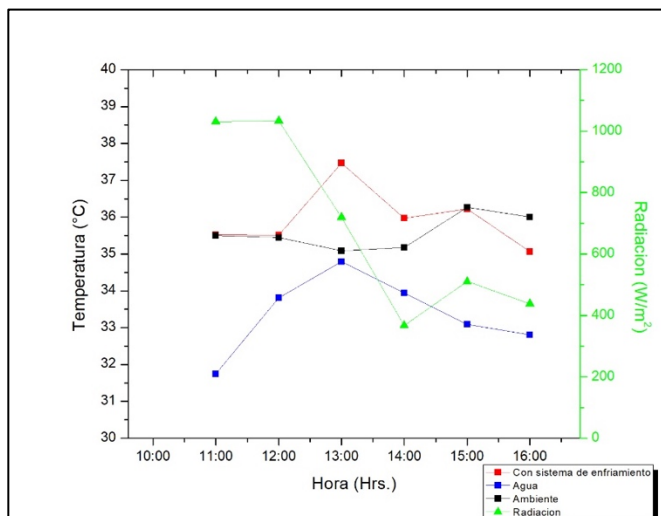


Figura 4.4.- Evolución de la Temperatura del agua, ambiente y módulo FV.

En la figura 4.5, se muestran el promedio de la potencia por hora que produjeron los dos módulos fotovoltaicos. Se puede observar que el módulo con el sistema automático de limpieza y enfriamiento produjo más potencia que el módulo sin la técnica de enfriamiento.

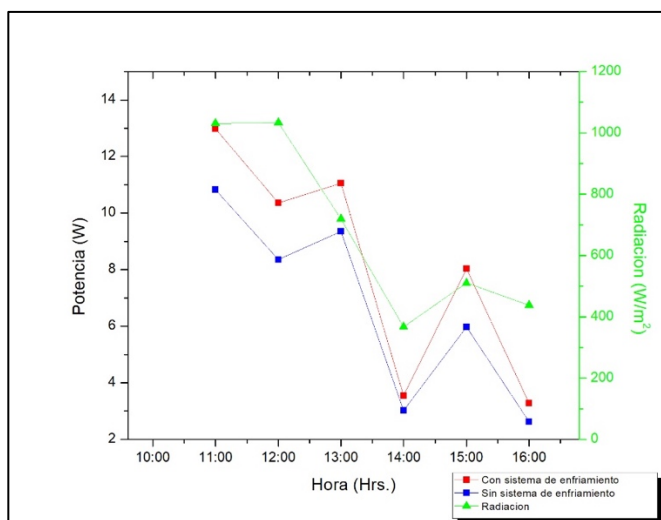


Figura 4.5.- Evolución de la Potencia en módulos FV.

En la figura 4.6, muestra la Potencia generada de los dos módulos evaluados, representándolas como áreas bajo la curva dibujada. Se observa que el módulo con sistema de enfriamiento tiene un área que sobresale de la otra, ya que, ese módulo generó más potencia.

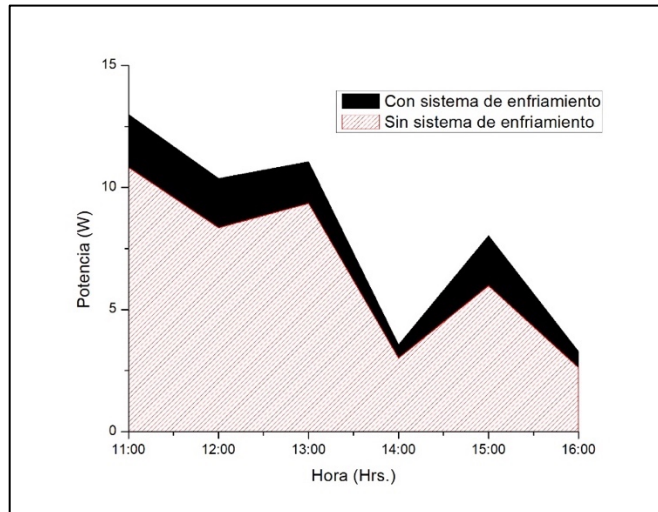


Figura 4.6.- Área de potencias en módulos FV.

En la figura 4.7 nos muestra la Potencia generada del módulo sin sistema de enfriamiento y la potencia resultante al restar la potencia del módulo con el sistema de enfriamiento y la potencia consumida por la bomba sumergible.

Se puede observar que entre las 11:00 a 13:00 hrs. hay una mayor generación de Potencia respecto a al módulo sin sistema de enfriamiento, gracias a una mayor radiación en ese rango de tiempo. Esto origina a que los módulos fotovoltaicos evaluados generen más energía, pero al igual, aumente sus temperaturas operativas. Esto hace que el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza se active por más tiempo, ya que, deben de mantener la temperatura del módulo fotovoltaico por debajo a 35 °C para este caso, y en consecuencia se tenga un mayor consumo de energía, obteniendo una menor energía generada como se observa en la figura 4.7 en el rango aproximadamente de las 11 hrs. a 12 hrs.

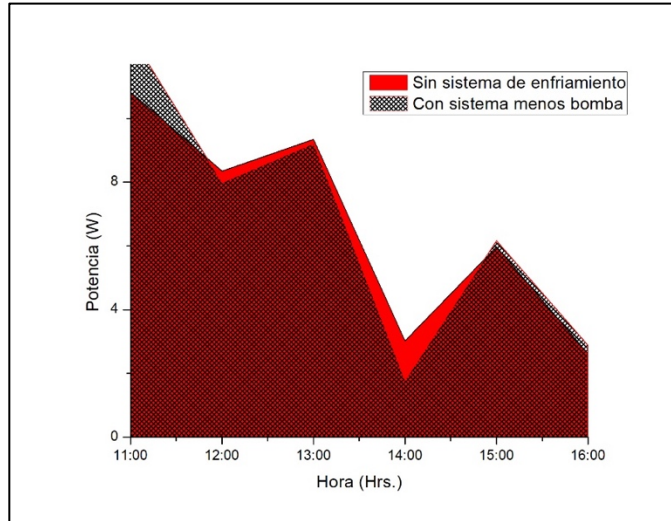


Figura 4.7.- Área de Potencia neta en Módulos FV.

4.2.2.- Evaluación 2 (40 °C).

En la figura 4.8 al igual que en la primera evaluación, el módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza generó mayor voltaje que el módulo sin el sistema de enfriamiento.

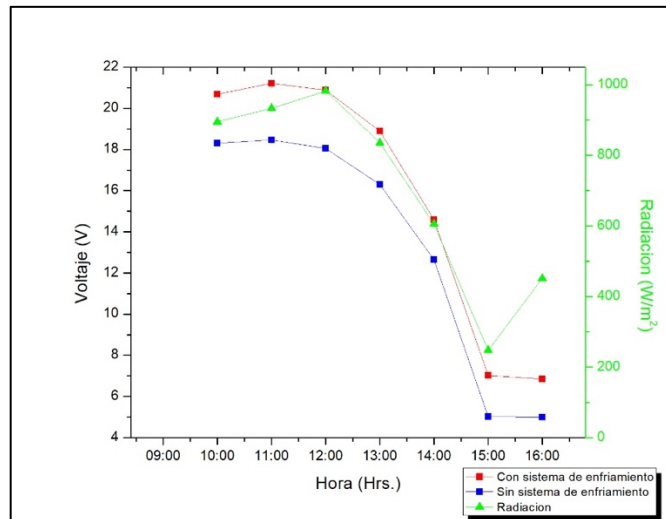


Figura 4.8.- Evolución del Voltaje en módulos FV.

En la figura 4.9, los módulos evaluados generaron intensidades similares, solo variando por centésimas de amperaje, que es algo insignificante.

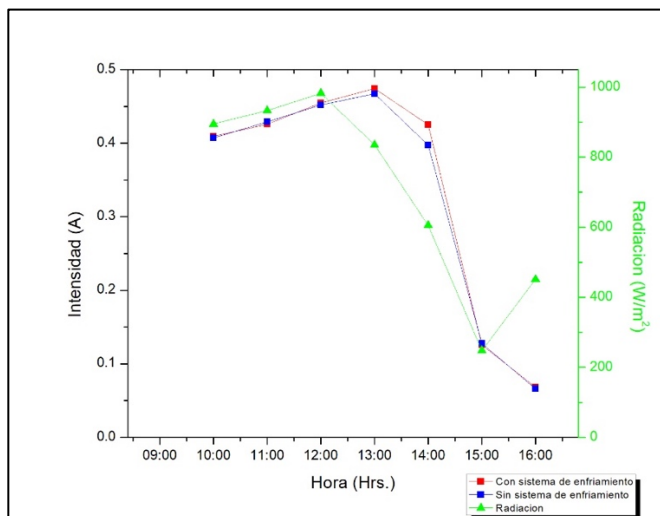


Figura 4.9.- Evolución de la Intensidad en los módulos FV.

En la figura 4.10 se observa que el módulo con el sistema automático de limpieza y enfriamiento mantuvo una temperatura casi constante de 40 °C, que fue el valor de la temperatura con la que se programó. En el rango de las 13:00 hrs. a 15:00 hrs. se observa el decrecimiento de la temperatura de ambos módulos fotovoltaicos, a causa de la disminución de radiación. Al incrementar la radiación a partir de las 15:00 hrs. la temperatura de ambos módulos fotovoltaicos comenzó a aumentar.

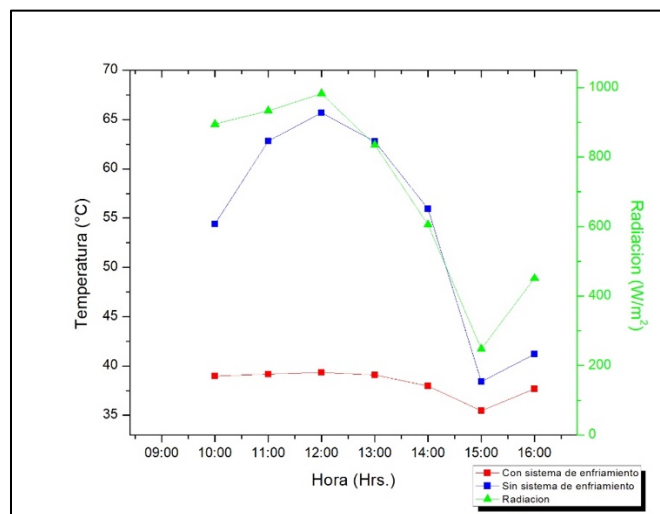


Figura 4.10.- Evolución de la Temperatura en módulos FV.

Se puede observar en la figura 4.11, que el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza pudo controlar con más eficacia la temperatura del módulo fotovoltaico

a su límite programado (40 °C). Esto fue gracias a que el agua no llegó a igualar la temperatura programada.

Como se puede deducir, la temperatura ambiente muestra mínimas relaciones con la temperatura del módulo fotovoltaico.

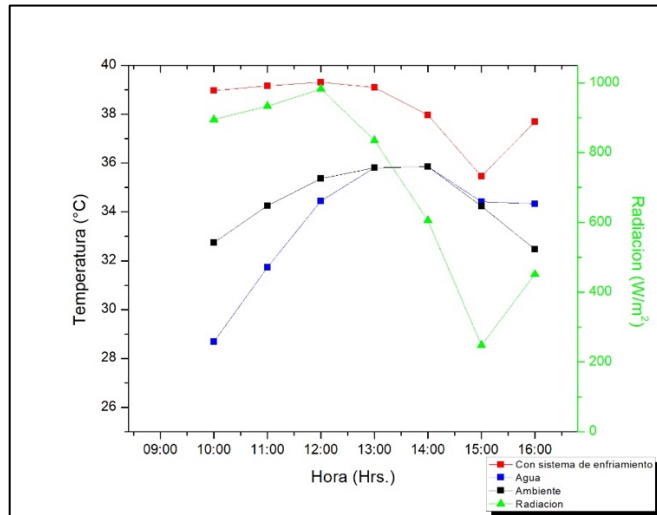


Figura 4.11.- Evolución de la Temperatura del agua, ambiente y módulo con técnica de enfriamiento.

En la figura 4.12, el módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza generó mayor potencia que el módulo sin el sistema de enfriamiento. Se observa que, entre menor radiación incide a los módulos, menores potencias generan.

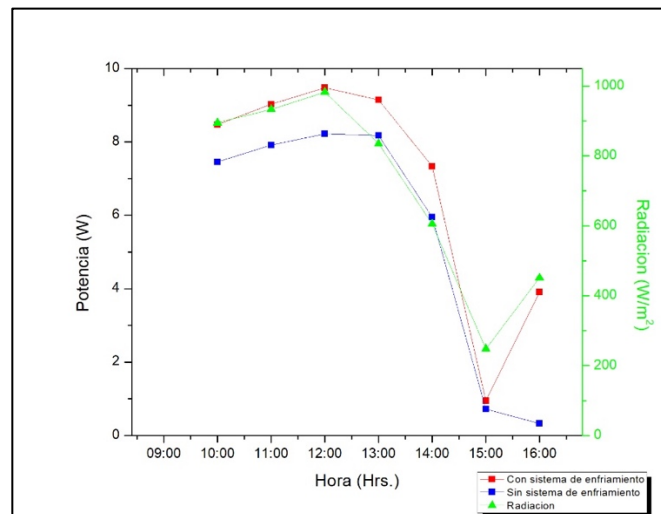


Figura 4.12.- Evolución de las Potencias en módulos FV.

En la figura 4.13, muestra una mayor área sombreada del módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza, donde este logró generar una mayor potencia durante el día.

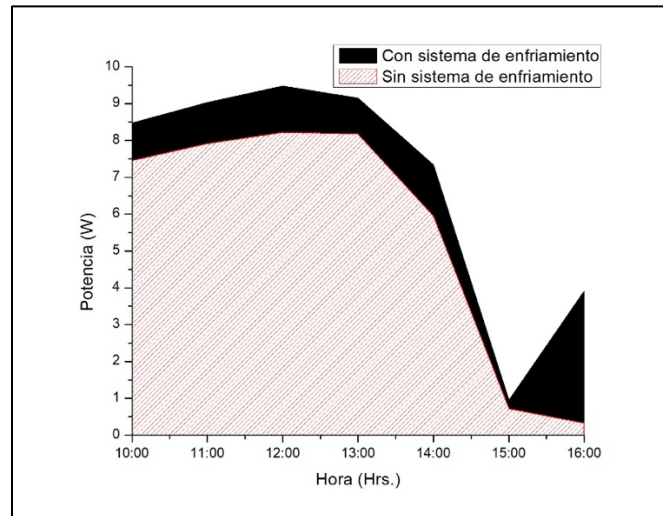


Figura 4.13.- Área de potencias en módulos FV.

En la figura 4.14 se puede observar que, a pesar de la sustracción de energía por el consumo de la bomba sumergible, la potencia generada por el módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza siguió siendo superior durante todo el día a comparación del otro módulo fotovoltaico evaluado. Esto fue, porque el sistema no fue activado durante mucho tiempo, ya que podía mantener la temperatura por debajo de la programada. Así, ahorrándonos mucha más energía que en la evaluación 1.

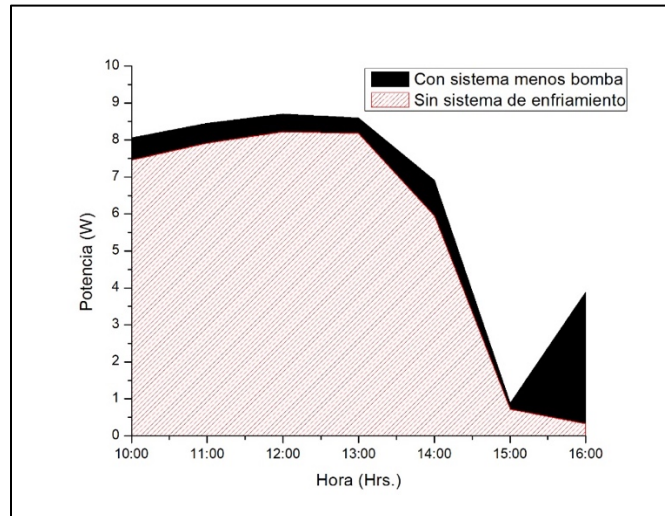


Figura 4.14.- Área de potencias netas en módulos FV.

4.2.3.- Evaluación 3 (45°C).

En la figura 4.15, el módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza generó mayor voltaje que el módulo sin el sistema de enfriamiento.

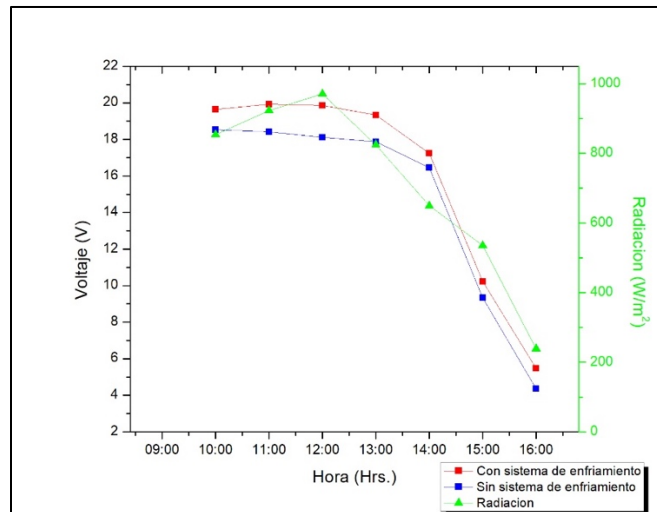


Figura 4.15.- Evolución del Voltaje en módulos FV.

En la figura 4.16, los módulos evaluados generaron intensidades similares, solo variando por centésimas de amperaje, que es algo insignificante.

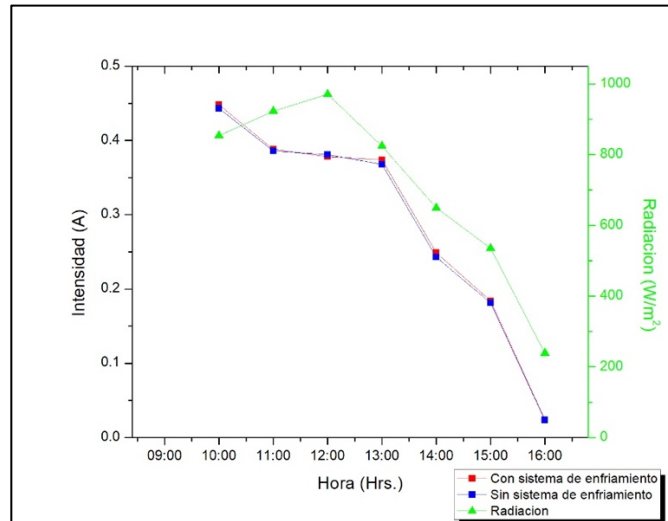


Figura 4.16.- Evolución de la Intensidad en módulos FV.

En la figura 4.17, se puede observar una menor temperatura del módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza que el otro módulo evaluado. El sistema pudo controlar la temperatura satisfactoriamente por debajo de la temperatura límite (45°C).

El módulo fotovoltaico sin el sistema de enfriamiento y limpieza casi logra a tener temperaturas similares a del módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza aproximadamente a las 16:00 hrs.

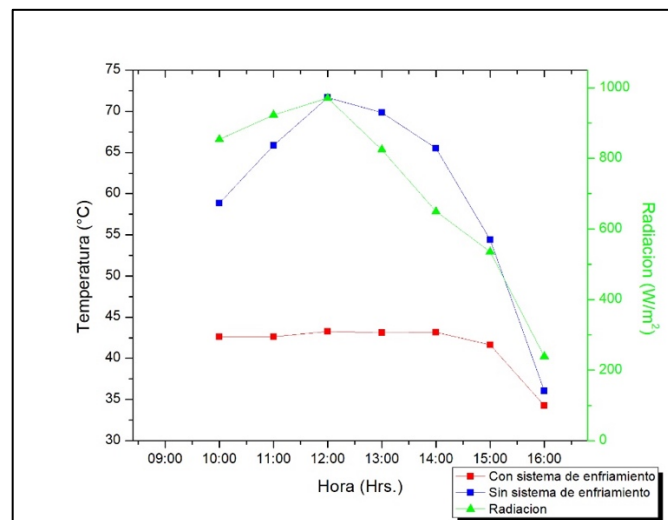


Figura 4.17.- Evolución de la Temperatura en módulos FV.

En la figura 4.18 se logra apreciar que, aunque hay un aumento importante de

temperatura en el agua, este logra mantener fácilmente la temperatura límite programada (45°C). Al igual que en las otras evaluaciones, la temperatura ambiente tiene muy poca relación con la temperatura del módulo evaluado.

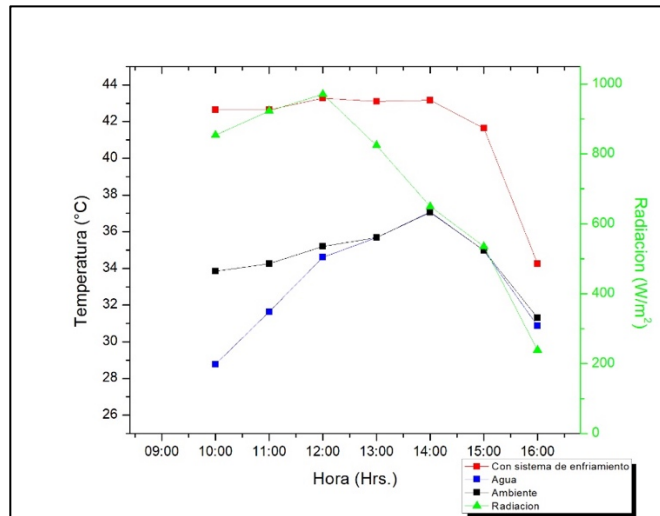


Figura 4.18.- Evolución de la Temperatura del agua, ambiente y módulo con técnica de enfriamiento.

En la figura 4.19, el módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza generó mayor potencia que el módulo sin el sistema de enfriamiento.

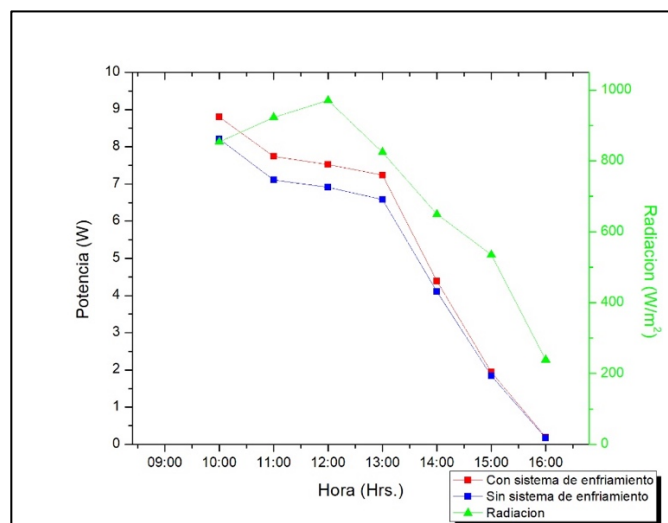


Figura 4.19.- Evolucion de la Potencia en módulos FV.

En la figura 4.20 muestra una mayor área sombreada del módulo con el sistema

automatizado de enfriamiento y limpieza. Al módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza se le puede observar muy poca ganancia de energía en relación al módulo de referencia, en comparación a las evaluaciones anteriores. Esto se debe a que el módulo FV con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza en esta evaluación, operara con una mayor temperatura limite programada en el sistema (45 °C). Esto hace que el módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza generara menor voltaje, y por consiguiente menor potencia.

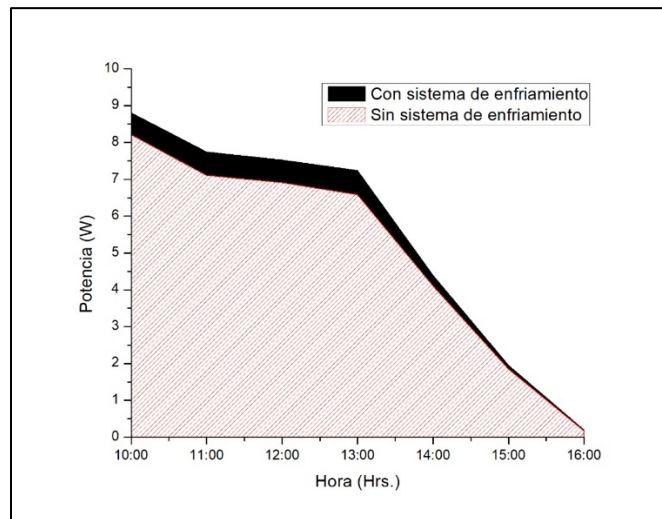


Figura 4.20.- Área de potencia en módulos FV.

En la figura 4.21, se observa que la energía sobrante de la resta de la energía consumida por la bomba sumergible a la energía generada por el módulo fotovoltaico con el sistema automatizado de limpieza e enfriamiento, no decayó por debajo de la energía generada por el módulo fotovoltaico sin sistema de enfriamiento, a pesar que no hubo una diferencia de generación de energía tan notoria del módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza al módulo sin sistema de enfriamiento, como se explicó anteriormente. No hubo un decaimiento, porque el sistema de enfriamiento y limpieza no estuvo activo por mucho tiempo, ya que difícilmente el módulo con el sistema automatizado de enfriamiento y limpieza lograba alcanzar la temperatura limite programada (45°C), después de que el sistema se activara y bajara su temperatura.

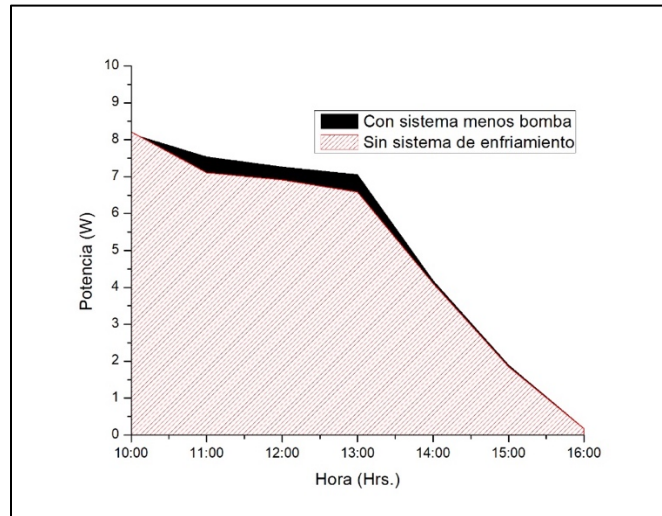


Figura 4.21.- Área de potencias netas en módulos FV.

Se puede observar que, en las tres gráficas que muestran el voltaje, el módulo que tiene el sistema automático de limpieza y enfriamiento produjo más voltaje.

Las tres gráficas que exponen las intensidades, muestran líneas sobrepuestas, porque los módulos prácticamente generaron en los tres días de evaluación la misma corriente que su adversario.

4.2.4.- Cálculo de Eficiencias en las tres evaluaciones.

En las siguientes tablas se muestra las eficiencias energéticas de los dos módulos puestos a prueba en los tres días diferentes.

En la tabla 4.1, muestra un aumento de eficiencia del módulo fotovoltaico que tiene el sistema automatizado de limpieza y enfriamiento de 22.7% respecto al módulo estándar, pero al restarle el consumo de la bomba sumergible, la eficiencia decae hasta 1.34%. La disminución de 21.36%, se debe a que la temperatura programa es muy baja, esto hace que la bomba tenga que trabajar más tiempo para poder mantener los 35°C. Si bien, a esta temperatura, el módulo fotovoltaico que tiene el sistema automatizado de limpieza y enfriamiento generó más energía que el módulo estándar, al restarle la energía excesiva consumida durante el día de la bomba sumergible, se vuelve la temperatura menos conveniente de las tres evaluadas.

Tabla 4.1.- Eficiencia energética de la evaluación a 35 °C.

Nombre	Energía Generada (Wh)	Eficiencia (%)	Eficiencia respecto al módulo estándar (%)	Energía consumida por cargas (Wh)
Radiación	4100.51	No aplica	No aplica	No aplica
Estándar o Normal	40.14	4.94	No aplica	No aplica
Sistema automático	49.25	6.06	22.69	No aplica
Sistema automático menos el consumo de la bomba	40.68	5.01	1.34	8.57

En la tabla 4.2, muestra un aumento de eficiencia de 24.7% respecto al módulo estándar y al restarle el consumo de la bomba sumergible decae a 17.36%. Ya que su temperatura operativa del módulo fue programada a 40°C, la técnica de enfriamiento podía mantener con más facilidad esa temperatura, ya que se mantuvo activado por menos tiempo la bomba sumergible, a lo que se resulta a menos energía consumida. Al aumentar 5°C la temperatura operativa del módulo, no causó una disminución de generación de energía. Por lo tanto, esta temperatura operativa para el módulo fotovoltaico resultó las más viable.

Tabla 4.2.- Eficiencia energética de la evaluación a 40°C.

Nombre	Energía Generada (Wh)	Eficiencia (%)	Eficiencia respecto al módulo estándar (%)	Energía consumida por cargas (Wh)
Radiación	4056.37	No aplica	No aplica	No aplica
Estándar o Normal	38.75	4.82	No aplica	No aplica
Sistema automático	48.32	6.01	24.7	No aplica
Sistema automático menos el consumo de la bomba	45.48	5.66	17.36	2.84

En la tabla 4.3, muestra un aumento de eficiencia de 8.26% respecto al módulo

estándar y al restarle el consumo de la bomba sumergible decae a 3.76%. A 40°C, que fue la temperatura programa, el módulo fotovoltaico sufre una disminución de eficiencia respecto al módulo estándar. Esto sucede a que la temperatura operativa del módulo fotovoltaico que tiene el sistema automatizado de limpieza y enfriamiento se acerca más a la temperatura operativa del módulo estándar. Aunque no todo es negativo en esto, ya que la temperatura es más elevada (comparando a las pruebas anteriores), a la técnica de enfriamiento le resulta más fácil controlarla, a lo que resulta un menor consumo energético por parte de la bomba.

Tabla 4.3.- Eficiencia energética de la evaluación a 45°C.

Nombre	Energía Generada (Wh)	Eficiencia (%)	Eficiencia respecto al módulo estándar (%)	Energía consumida por cargas (Wh)
Radiación	4142.44	No aplica	No aplica	No aplica
Estándar o Normal	34.93	4.25	No aplica	No aplica
Sistema automático	37.82	4.61	8.26	No aplica
Sistema automático menos el consumo de la bomba	36.25	4.42	3.76	1.57

En conclusión, las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 nos muestran un aumento de producción de energía para el módulo fotovoltaico que tiene el sistema automatizado de limpieza y enfriamiento, esto hace que aumentar su eficiencia respecto a la cantidad de energía solar que pueda transformar a energía eléctrica, y al igual aumentar la eficiencia respecto al módulo estándar. El sistema automático menos el consumo de la bomba obtiene una menor eficiencia ya que en ese concepto se le resta la energía consumida de la bomba sumergible. A pesar de esta disminución de energía, aún se mantiene una mayor eficiencia respecto al módulo estándar, aunque con diferentes cantidades por día, resultando la temperatura de 40°C de la segunda evaluación, la que dio mejores resultados.

4.3.- Producción de Energía con Módulos FV de 255 Wp.

Una vez realizadas previas, se puede deducir que la temperatura óptima para la producción de energía es a los 40°C, por lo que se procede a aplicar el sistema automatizado en Módulos FV con mayor capacidad de producción, los cuales son usados en sistemas autónomo y de interconexión a la red eléctrica.

4.3.1.- Módulos FV desconectados.

En la evaluación de los Sistemas FV para el análisis de la influencia de la Temperatura y limpieza sobre la producción de energía sobre los Módulos FV, se encontraron los siguientes resultados:

Durante las mediciones previas, con los Módulos FV desconectados, se logra mantener la Temperatura del Generador FV (PVM1) a 40 °C durante el periodo de evaluación, mientras que los Módulos FV sin el sistema de enfriamiento y limpieza, limpio y sucio, se mantuvieron por encima de los 45 y 47 °C, respectivamente.

En la Figura 4.22, se observa que la diferencia máxima de temperatura es de 13 °C entre el PVM1 y PVM2, y de 18 °C entre el PVM1 y PVM3, a las 13:00 hrs.

Así también, se puede apreciar la variación en la temperatura del agua, incrementando su temperatura en un máximo de 7 °C, muestra de la absorción de calor del generador FV (PVM1).

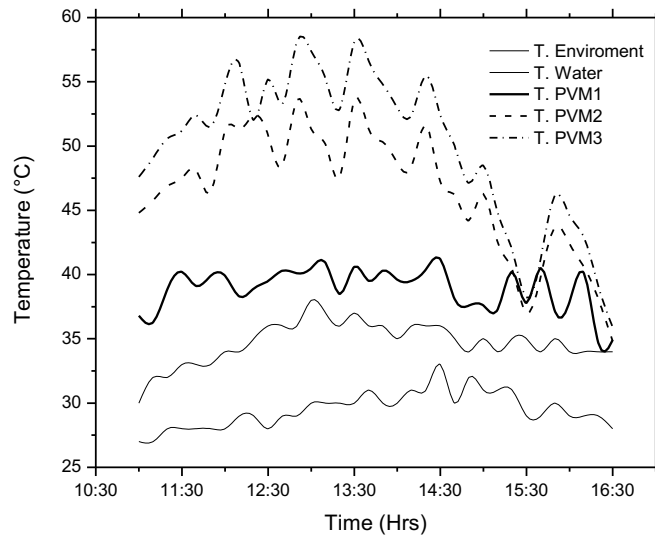


Figura 4.22.- Variación de las Temperaturas en cada Módulo FV durante el día.

En la Figura 4.23, se muestra la variación del Voltaje a circuito abierto (V_{oc}), de los tres Módulos FV y la variación de la Incidencia de radiación durante el día. Se puede apreciar que el V_{oc} del Módulo FV con el sistema de enfriamiento y limpieza (PVM1), se separa de los otros dos (PVM2 y PVM3). La diferencia entre ellos, se mantiene en un rango de 3 a 5 unidades.

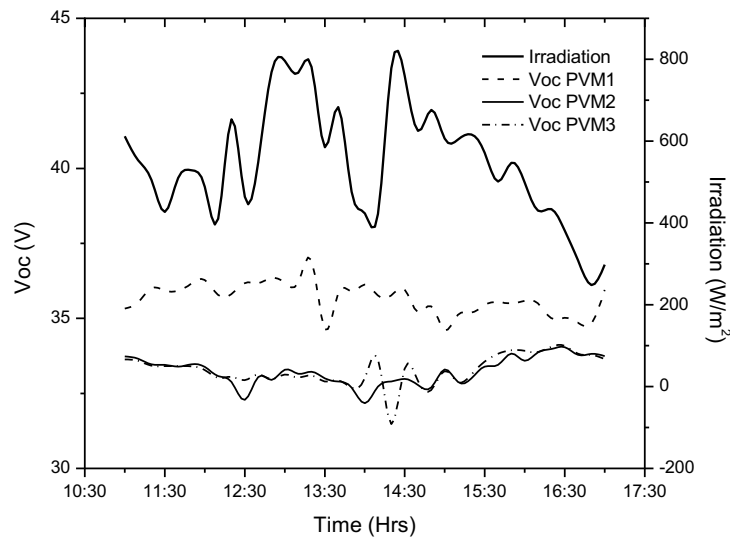


Figura 4.23.- Variación del Voltaje a circuito abierto e Irradiación durante el día.

En la Figura 4.24 se presenta la variación de la Intensidad de corriente a corto circuito (I_{sc}) de los Módulos FV, en ella se puede apreciar que la Intensidad de corriente del PVM1 es superior a la I_{sc} de los PVM2 y PVM3 durante todo el periodo. Sin embargo, es importante mencionar que la variación de la I_{sc} entre el PVM2 y PVM3 es superior a la diferencia entre el PVM1 y PVM2.

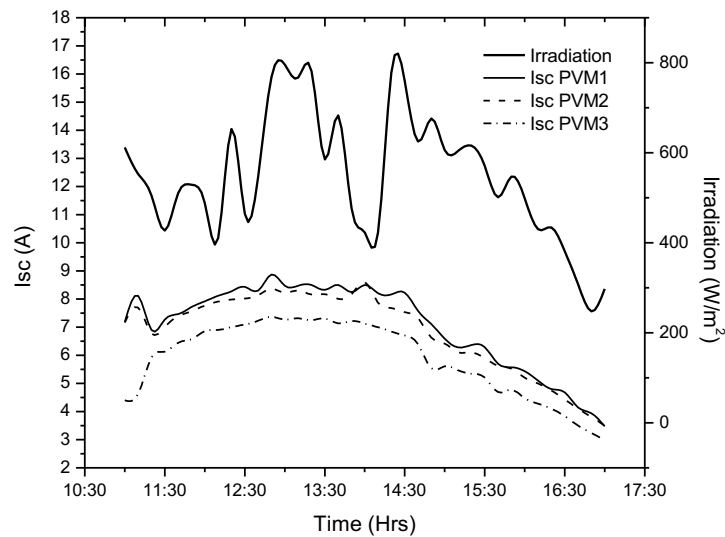


Figura 4.24.- Variación de la Intensidad a corto circuito e Irradiación durante el día. Los valores obtenidos, tanto de V_{oc} e I_{sc} , así como los de Radiación y de Temperaturas, nos dan una idea previa sobre el comportamiento entre los parámetros eléctricos y la Temperatura, los cuales presentan la misma tendencia que los de los Sistemas a evaluar.

Considerando los valores de I_{sc} y V_{oc} obtenidos, como reales y aplicados a la expresión de la Potencia, podemos encontrar los siguientes valores:

$$P = I V$$

Tabla 4.4.- Producción de energía al día por cada Módulo FV.

No.	Tipo	Producción (Wh/día)	Excedente de Producción	MFV1 MFV2	MFV2 MFV3	MFV1 MFV3
1	MFV1	1,510.62				
2	MFV2	1,357.38	(Wh/día)	153.24	187.58	340.82
3	MFV3	1,169.80	(%)	11.29	16.04	29.13

Es importante recordar que la Potencia, en este caso, no existe debido al I_{sc} .

4.3.2.- Sistema FV autónomo a 24 V.

Para la segunda configuración, se realizan mediciones durante 5 horas, de los cuales se pretenden obtener datos de Voltaje e Intensidad de Corriente a Potencia Máxima, manteniendo la Temperatura de la superficie del Módulo FV por debajo de los 40 °C, y de ello, se obtienen los siguientes resultados:

En la Figura 4.25, se presenta la variación de la Temperatura del ambiente, del agua, de los Módulos FV y la Radiación. En ella se puede observar la diferencia que existe entre la Temperatura del Módulo FV 1 y los Módulos FV 2 y 3, la cual varía entre 10 y 15 unidades. Es evidente que la Temperatura en el Módulo FV 1 se mantiene en los 40 °C debido al Sistema de enfriamiento y limpieza. En el caso de los Módulos FV 1 y 2, difieren solamente en 3 unidades, debido a la capa de polvo que cubre al Módulo FV3.

Así también, se puede observar que la temperatura en el agua incrementa conforme transcurre el día, esto es debido al calor que extrae del Módulo FV1. El cual incrementa hasta en 10 unidades en relación a su temperatura inicial (25 °C).

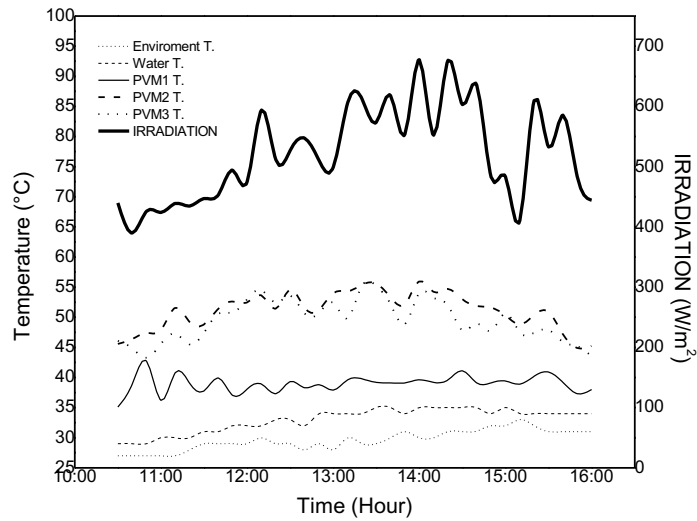


Figura 4.25.- Variación de la Radiación, y Temperaturas ambiente, agua y MFV.

En la Figura 4.26, podemos observar la variación de los Voltajes a potencia máxima de los Módulos FV, los valores registrados entre el Módulo FV 1 y 2, son muy parecidos, e inferior al voltaje del Módulo FV 3, debido al efecto que ocurre en la intensidad. Esto es, que a pesar de que el voltaje es mayor, la intensidad decrece.

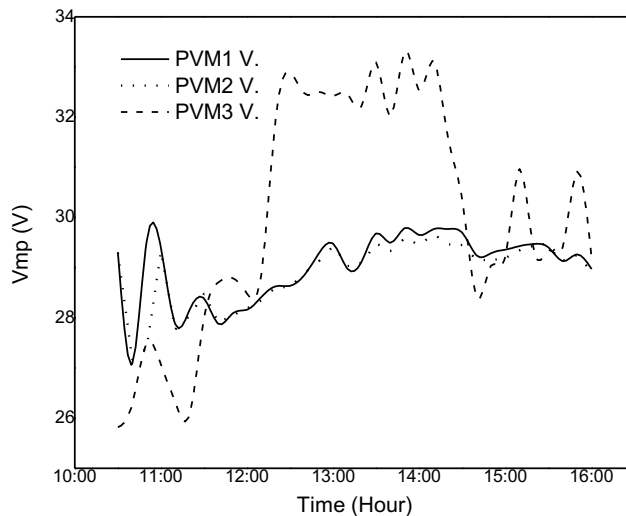


Figura 4.26.- Variación del Voltaje a potencia Máxima.

En la Figura 4.27 se muestra la variación de la Intensidad a potencia máxima de cada uno de los Módulos FV, como bien se mencionó en el párrafo anterior, la intensidad del Módulo FV1 supera en 1.8 unidades al Módulo FV 2 y por 2.3 unidades al Módulo FV 3. Lo que nos permite demostrar que el sistema de enfriamiento y limpieza permite mayor producción al reducir la temperatura de operación de los Módulos FV.

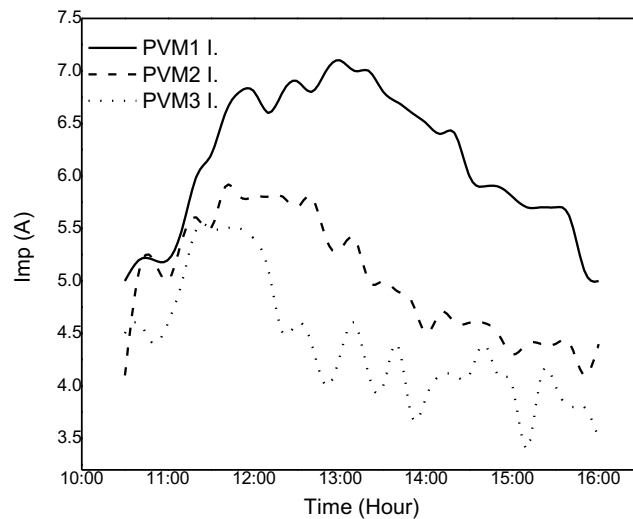


Figura 4.27.- Variación de la Intensidad de corriente a potencia máxima.

Para una mejor interpretación de los valores obtenidos durante el análisis, en la siguiente Figura, se muestra la variación de la Potencia de los módulos FV's.

La producción de Energía del Módulo FV1 es de 1,062.74 Wh/día, la del Módulo FV 2 es de 863.91 Wh/día y la del Módulo FV 3 es de 784.61 Wh/día.

Tomando como base la producción del Módulo FV 1, que corresponde a 1,062.74 Wh/día, se observa que genera 23.01% de energía excedente, respecto al Módulo FV2. Y con respecto al Módulo 3, genera 35.45 % de energía excedente. La diferencia de producción entre el Módulo FV 2 y 3 es de 10.11% (en este caso, se

considera el Módulo FV2 como base, respecto al Módulo FV3).

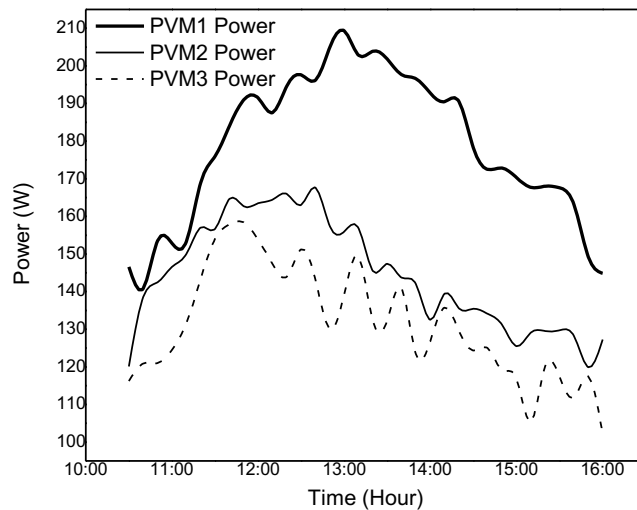


Figura 4.28.- Variación de la Potencia de los Módulos FV.

En resumen, se pueden describir las siguientes cantidades:

Tabla 4.5.- Producción de energía al día por cada Módulo FV.

No.	Tipo	Producción (Wh/día)	Excedente de Producción	MFV1 MFV2	MFV2 MFV3	MFV1 MFV3
1	MFV1	1,062.74				
2	MFV2	863.91	(Wh/día)	198.83	79.30	278.13
3	MFV3	784.61	(%)	25.34	10.11	35.45

4.4.- Proyección de Producción de Energía a mayor escala.

Con base al análisis de efecto de la Temperatura y polvo en la producción de energía de los Sistemas FV, se consideran los siguientes parámetros para el balance de producción de energía.

- Se obtiene un excedente de producción de energía equivalente al 35.45%, con el uso del Sistema de enfriamiento y limpieza de Módulos FV, equivalente a 278.13 Wh/día.

- La capacidad de bombeo de agua del sistema de enfriamiento y limpieza es de 10 m.
- La medida de los módulos FV de 255 Wp es de 99 cm de ancho, que es la parte donde se coloca la tubería para la caída de agua suministrada por la bomba.

Por tanto, se deduce que el sistema nos permite limpiar y enfriar un arreglo de 10 Módulos FV, que es equivalente a 2.55 kWp instalados. Esto es equivalente a una producción de 11.99 kWh, considerando la condición de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, con 4.7 HSP (horas promedio de radiación solar a 1,000 W/m²).

El 35.45% equivalente de esta producción de energía diaria es de 4.25 kWh/día, que corresponde al excedente diario de producción, en comparación a los Módulos que operan sin el sistema de enfriamiento y limpieza.

De acuerdo a las mediciones realizadas durante el proceso de enfriamiento del Módulo FV, se sabe que la bomba consume 100 Wh al día, si consideramos que para 10 Módulos se requiere mayor tiempo de enfriamiento, y esta se proyecta de manera lineal de acuerdo a la proporcionalidad de la presión y el flujo de agua, se deduce que el consumo energía diario de la bomba es de 1 kWh. Por lo tanto, la producción neta excedente de los 10 Módulos FV es de 3.25 kWh/día.

4.5.- Análisis de Costo-Beneficio del arreglo FV propuesto.

En el Análisis de costo-beneficio se consideran 2 partes importantes, primeramente la viabilidad económica del sistema de enfriamiento y por otro lado, la viabilidad ambiental, es decir, la cantidad de CO₂ que se deja de emitir

considerando el ahorro de energía mediante el uso del sistema de enfriamiento y limpieza.

a) Viabilidad económica.

Considerando que el precio actual de la Energía Eléctrica en nuestra localidad es de \$0.67 Mx/kW (Tarifa Básica), obtenemos un ahorro aproximado de \$3, 974.94.

La producción diaria podría proyectarse a los años de vida útil del sistema de enfriamiento y limpieza (SEL), correspondientes a 5 años a partir de los cuales obtenemos una producción excedente de 5.93 MW durante este periodo.

Sin embargo, sabemos que por la capacidad instalada, se puede considerar que el sistema FV aplicaría para una casa habitación que se encuentra en tarifa Doméstica de Alto Consumo (DAC), donde el consumo es superior a los 10 kW al día, en el cual el precio supera los \$4.00 Mx/kW. Por tanto, la proyección para este último caso, se puede apreciar de mejor forma en la siguiente tabla:

Tabla 4.6.- Balance de costos de energía excedente por periodo.

Energía excedente generada (kW)		Costo de energía (DAC)	Ahorro por periodo
Al día	3.25	\$4.00/kW	\$13.00
Al año	1,186.25		\$4,745.00
Vida útil del S.E.L. (5 años)	5,931.25		23,725.00
Vida útil de SFV (30 años)	35,587.50		\$142,350.00

Para obtener el ahorro neto, se considera el precio total del SEL, el cual tiene un precio promedio de \$7,000.00, en la siguiente tabla se muestran los ahorros netos por periodo:

Tabla 4.7.- Ahorro neto por periodo.

Periodo	Costo del SEL	Ahorro neto
Al día	\$7,000.00	-----
Al año		-----
Vida útil del S.E.L. (5 años)		\$16,725.00
Vida útil de SFV (30 años)	\$42,000.00	\$100,350.00

Como podemos observar, el ahorro neto del sistema del SEL, durante la vida útil del Sistema FV, es de \$100, 350.00, equivalente al ahorro de energía.

b) Viabilidad Ambiental.

Así mismo, la reducción de emisiones de CO₂ es un análisis importante para los sistemas FV, esto se ve reflejado con los siguientes cálculos del consumo anual mínimo de una casa-habitación en tarifa DAC como:

$$\text{Consumo} = (359.70 \text{ kWh/mes})(12 \text{ meses}) = 4,316.4 \text{ kWh/año}$$

La emisión por energía convencional por medio de la ecuación (1) nos da como resultado:

$$E_c = (4.32 \text{ MWh})(0.527 \text{ TCO}_2/\text{MWh}) = 2.28 \text{ TCO}_2$$

De acuerdo a la ecuación (2) las emisiones de la solar fotovoltaica es:

$$E_{FV} = (4.32 \text{ MWh})(32 \text{ gCO}_2/\text{MWh}) = 138.24 \text{ gCO}_2 = 0.00014 \text{ TCO}_2$$

Por lo tanto, el ahorro de Emisión neto se obtiene de la ecuación (3):

$$AE = 2.28 \text{ TCO}_2 - 0.00014 \text{ TCO}_2 = 2.27986 \text{ TCO}_2$$

Se puede concretar que existe un ahorro en emisiones de CO₂ anuales arriba del 90 por ciento utilizando un sistema fotovoltaico, del cual el SEL aporta el 35.45%, es decir, un ahorro de 0.81 TCO₂ anuales.

4.6.- Análisis comparativo con el Modelo Matemático.

Con base a las ecuaciones planteadas del Modelo Matemático, se obtienen los

siguientes resultados, de acuerdo a las condiciones reales a las que se evaluaron los Módulos FV's.

4.6.1.- Altura de Película de Agua.

$$Q = \frac{1}{n} A R_H^{\frac{2}{3}} \sqrt{\phi}$$

$$v = \frac{1}{n} R_H^{\frac{2}{3}} \sqrt{\phi}$$

$$Q = A v$$

$$A = \frac{Q}{v}$$

$$A = \frac{0.000208 \text{ m}^3/\text{s}}{0.19 \text{ m/s}} = 0.0011 \text{ m}^2$$

$$y = A/b$$

$$y = \frac{0.0011 \text{ m}^2}{0.94 \text{ m}} = 0.0001177 \text{ m}$$

4.6.2.- Energía absorbida.

Para el cálculo de la energía absorbida, se procede a calcular la energía absorbida por el módulo fotovoltaico, mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = G (\alpha\tau)A - P_{\text{máx}}$$

Debido a que la constante solar es de 1000 W/m², se considera como base para la incidencia de radiación sobre el módulo FV, además se toma en cuenta que las pérdidas por las nubes, es del 50%. Por lo que se evalúa con una incidencia de radiación de 500 W/m².

$$\dot{Q} = (500 \text{ W})(0.9)(1.48) - (255 \text{ W}) = 411 \text{ W}$$

Por lo que el Módulo FV, absorbe 411 W de calor.

Otra forma de evaluar la cantidad de calor, se puede realizar mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}$$

$$\dot{Q} = \varepsilon\sigma A (T_{mfv}^4 - T_{amb}^4) + hA (T_{mfv} - T_{amb})$$

En la ecuación anterior, debido a la diferencia de temperatura muy baja que existe entre la superficie del MFV y la temperatura ambiente, el valor del calor transferido por radiación es muy bajo, por lo que para este análisis, lo despreciamos.

$$411 \text{ W} = \left(250.03 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}\right) (1.48 \text{ m}^2) [T_{MFV} - (25 \text{ } ^\circ\text{C})]$$

$$T_{MFV} = 26.11 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Es la temperatura ideal a la cual se puede mantener para poder retirar la cantidad de calor que se disipa del Módulo FV, el factor de incremento, sin importar el nivel al que se encuentre es de 1.11 °C.

El valor del coeficiente de transferencia de calor por convección se obtiene a través de las siguientes expresiones:

$$R_e = \frac{v L}{\nu} = \frac{\left(0.19 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (1.57 \text{ m})}{1 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 298,300$$

$$N_u = \frac{h L}{k} = (0.664)^2 \sqrt{R_e} \sqrt{P_r} = 638.28$$

$$h = 250.03 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

4.6.3.- Masa de agua necesaria.

Para el cálculo de la transferencia de masa (cantidad de agua) que se requiere para mantener el Módulo FV a la temperatura deseada, se usa la siguiente expresión:

$$Q = m C_p \Delta T$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura, entre el agua y el Módulo FV.

Mediante el balance de energía, podemos obtener la cantidad de agua necesaria para mantener la superficie del Módulo FV al nivel de temperatura deseado. De acuerdo a los datos obtenidos, el Módulo FV se mantuvo a 40 °C y la temperatura máxima alcanzada por el agua fue de 34 °C.

$$Q_{MFV} = Q_{agua}$$

$$m_{MFV} C_{p-MFV} \Delta T_1 = m_{H2O} C_{p-H2O} \Delta T_2$$

$$m_{H2O} = \frac{m_{MFV} C_{p-MFV} \Delta T_1}{C_{p-H2O} \Delta T_2} = \frac{(18 \text{ kg})(800 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(55^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})}{(4,186 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(34^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})} = 5.7 \text{ kg}$$

Como en la práctica se ha usado un recipiente con 50 L de agua, equivalente a 50 kg aproximadamente, Se puede obtener la temperatura máxima del agua que alcanza durante el proceso de enfriamiento, con una Temperatura inicial de 25 °C:

$$T_{H2O-f.} = \frac{m_{MFV} C_{p-MFV} \Delta T_1}{C_{p-H2O} m_{H2O}} + T_{i-H2O} = 26.03^\circ\text{C}$$

Tabla 4.8.- Incremento de temperatura promedio del agua durante el día.

HORA	T _{i-H2O} (°C)	T _{i-MFV} (°C)	T _{H2O-f} (°C)
10:00	29	46.5	28.5
11:00	30.7	50.3	29.7
12:00	32.7	52.5	31.6
13:00	34.3	54.1	33.7
14:00	34.8	53.6	33.6
15:00	31.7	48.8	31.3
16:00	31	43.7	30.3

Para saber la cantidad de agua mínima requerida para mantener la temperatura del Módulo FV en su nivel ideal, se tiene que:

$$m_{H2O} = \frac{m_{MFV} C_{p-MFV} \Delta T_1}{C_{p-H2O} \Delta T_2} = \frac{(18 \text{ kg})(800 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(56^\circ\text{C} - 26^\circ\text{C})}{(4,186 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(26^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})} = 103 \text{ kg} = 103 \text{ L}$$

4.6.4.- Potencia generada por el MFV.

La potencia generada por el Módulo FV, varía con respecto a la temperatura, la cual se puede calcular con la siguiente expresión:

$$P = P_{m\acute{a}x} \left[1 + \frac{\gamma}{100} (T_{mfv} - 25^{\circ}C) \right]$$

$$P = (255W) \left[1 + \frac{(-0.48\%/^{\circ}C)}{100} (40^{\circ}C - 25^{\circ}C) \right] = 236 W$$

Como se puede observar, el resultado mostrado, corresponde a la potencia que genera manteniendo la temperatura del Módulo FV a 40 °C. Sin embargo, la potencia que genera con la temperatura más alta de las mediciones realizadas, se calcula a continuación:

$$P = (255W) \left[1 + \frac{(-0.48\%/^{\circ}C)}{100} (56^{\circ}C - 25^{\circ}C) \right] = 217 W$$

Es importante mencionar, que de acuerdo a las mediciones, los valores son proporcionales, debido a que la radiación incidente no alcanzó los 1000 W/m².

Con base a nuestros cálculos teóricos, si tenemos un almacenamiento de más de 103 L de agua, inicialmente a una temperatura de 25 °C, podemos obtener un máxima potencia si enfriamos el Módulo FV a 26 °C:

$$P = (255W) \left[1 + \frac{(-0.48\%/^{\circ}C)}{100} (26^{\circ}C - 25^{\circ}C) \right] = 254 W$$

CONCLUSIONES GENERALES.

En el estudio realizado del efecto de la Temperatura y el polvo en la producción de energía de los Sistemas FV, se concluye que:

- 1.- El enfriamiento de la superficie de los Módulos FV incrementa 25.34% la producción de energía.
- 2.- La presencia de polvo sobre la superficie de los Módulos FV, reduce 10.11% de la producción de energía.
- 3.- El sistema de enfriamiento y limpieza nos permiten obtener un incremento de 35.45% en la producción de energía de los Sistemas FV, si se mantiene la superficie de los Módulos FV a una Temperatura a 40 °C y libre de polvo.
- 4.- La generación neta excedente de Energía de los Sistemas FV con un arreglo de 10 Módulos FV usando un sistema de enfriamiento y limpieza, es de 4.25 kWh/día.
- 5.- Mediante el uso de un sistema de enfriamiento-limpieza, se dejan de emitir 0.81 TCO₂ al año.
- 6.- El ahorro económico neto, con el uso de un sistema de enfriamiento-limpieza, es de \$100, 350.00 durante la vida útil del arreglo Fotovoltaico (10 piezas).
- 7.- Para la aplicación del sistema de enfriamiento-limpieza en un sistema FV con un arreglo de 10 Módulos FV, se requieren 1030 litros de agua para reducir en 30 °C la temperatura.

REFERENCIAS

- [1] Paulo Carreño King. ProMéxico, Unidad de Inteligencia de Negocios. “La Industria Solar Fotovoltaica en México”. 2017.
- [2] Aarón Sánchez Juárez, Dalia Martínez Escobar, Rocío de la Luz Santos Magdaleno, José Ortega Cruz y Pedro Andrés Sánchez Pérez. Instituto de Energías Renovables (IIER-UNAM). “Aplicaciones Fotovoltaicas de la Energía Solar en los sectores residenciales, servicio e industrial”. 2017.
- [3] Enríquez Harper. “El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaico”. Ed. LIMUSA. México, D.F. 2012.
- [4] S. Mekhilef, R. Saidur, M. Kamalisarvestani. **Effect of dust, humidity and air velocity of photovoltaic cells**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 2920-2925.
- [5] Adel A. Hegazy. **Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors**. Renewable Energy 22 (2001) 525-540.
- [6] Shaharin A. Sulaiman, Haizatul H. Hussain, Nik Siti H. Nik Leh, and Mohd S. I. Razali. **Effects of Dust on the Performance of PV Panels**. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol:5, No:10, 2011.
- [7] Kamran Moradi, M. Ali Ebadian, Cheng-Xian Lin. **A review of PV/T technologies: Effects of control parameters**. International Journal of Heat and Mass Transfer 64 (2013) 483–500.
- [8] Gur Mittelman, Aiman Alshare, Jane H. Davidson. **A model and heat transfer correlation for rooftop integrated photovoltaics with a passive air cooling channel**. Solar Energy 83 (2009) 1150–1160.
- [8] H.G. Teo, P.S. Lee, M.N.A. Hawlader. **An active cooling system for photovoltaic modules** (H. G. Teo, et all). Applied Energy 90 (2012) 309–315.
- [10] Swapnil Dubey, G.S. Sandhu, G.N. Tiwari. **Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector**. Applied Energy 86 (2009) 697–705.
- [11] J.K. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos. **Air Cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements**. Solar Energy 81 (2007) 498–511.
- [12] Morteza Ebrahimi a, Masoud Rahimi. Alireza Rahimi. **An experimental study on using natural vaporization for cooling of a photovoltaic solar cell**. International Communications in Heat and Mass Transfer 65 (2015) 22–30.
- [13] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, M. Mahdavi Adeli. **An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector**. Applied Energy 87 (2010) 2328–2339.
- [14] Masoud Rahimi, Masomeh Asadi, Nooshin Karami, Ebrahim Karimi. **A comparative study on using single and multi-header microchannels in a hybrid PV cell cooling**. Energy Conversion and Management 101 (2015) 1–8.
- [15] Maicol Manuel Marenco Marriaga. **Enfriamiento de un Panel Solar utilizando un fluido de trabajo sobre él**. 13 February 2016.
- [16] Faustino Chenlo Romero. **Cálculo de la Temperatura de Operación de Celdas Solares en un Panel Fotovoltaico Plano**. Septiembre, 2002.

- [17] Ángela Aguirre L., Diego Hernández B., Leiny Ordoñez A., Lisbeth Martínez O. **Comparación de eficiencias de conversión de energía en celdas FV de Silicio Monocristalino, Policristalino y Amorfo para mediciones meteorológicas de la ciudad de Santiago de Cali.**
- [18] S. Nizžetic, A.M. Papadopoulos, E. Giama. **Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, part I: Passive cooling techniques.** Energy Conversion and Management 149 (2017) 334–354.
- [19] Cătălin George Popovicia, Sebastian Valeriu Hudișteanua, Theodor Dorin Mateescua, Nelu-Cristian Cherecheșa. **Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks.** Energy Procedia 85 (2016) 425 – 432.
- [20] Ilhan Ceylan, Ali Etem Gurel, Husamettin Demircan, Bahri Aksu. **Cooling of a photovoltaic module with temperatura controlled solar collector.** Energy and Buildings 72 (2014) 96–101.
- [21] MESSINA-LÓPEZ, Victor*, DIBENE-ARRIOLA, Luis y PAREDES-VAZQUEZ, César. **Efectos de la Temperatura en la eficiencia de un Módulo Fotovoltaico.** Septiembre 2016 VOL.3 No.8 65-77.
- [22] Abdul Hai Alami. **Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules.** Energy Conversion and Management 77 (2014) 668–679.
- [23] A. Shahsavari, M. Ameri. **Experimental investigation and modeling of a direct-couple PV/T air collector.** Solar Energy 84 (2010) 1938–1958.
- [24] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa and Wilhelm Warta. **Solar cell efficiency tables (version 37).** Prog. Photovolt: Res. Appl. 2011; 19:84–92.
- [25] J.K. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos. **Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation.** Renewable Energy 32 (2007) 623–637.
- [26] Sendhil Kumar Natarajan, Tapas Kumar Mallick, Matty Katz, Simon Weingaertner. **Numerical investigations of solar cell temperature for photovoltaic concentrator system with and without passive cooling arrangements.** International Journal of Thermal Sciences 50 (2011) 2514e2521.
- [27] M. Chandrasekar, S. Suresh, T. Senthilkumar, M. Ganesh karthikeyan. **Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures.** Energy Conversion and Management 71 (2013) 43–50.
- [28] K. SOPIAN, K. S. YIGIT, H. T. LIU, S. KAKAC and T. N. VEZIROGLU. **Performance analysis of photovoltaic Thermal air heaters.** Energy Convers. Mgmt Vol. 37, No. 11, pp. 1657-1670, 1996.
- [29] H. Bahaidarah, Abdul Subhan, P. Gandhidasan a, S. Rehman. **Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back Surface water cooling for hot climatic conditions.** Energy 59 (2013) 445e453.
- [30] Ahmed Elnozahy, Ali K. Abdel Rahman, Ahmed Hamza H. Ali, Mazen Abdel-Salam, S. Ookawara. **Performance of a PV module integrated with standalone building in hot arid areas as enhanced by surface cooling and cleaning.** Energy and Buildings 88 (2015) 100–109.
- [31] Cepeda, Juan. Sierra, Adriana. **Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones.**
- [32] K. A. Moharran, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, H. El-Sherif. **Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling.** Ain Shams Engineering

Journal (2013) 4, 869-877.