



“COLECTOR TÉRMICO FOTOVOLTAICO  
INTERCONECTADO A LA RED”

TESIS QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER  
EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN  
ENERGÍAS RENOVABLES PRESENTA:

Teresa Yadira Frías Martínez

Director de Tesis:

Dr. Yuri Vorobiev Vasilievitch

Octubre de 2012



TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN  
ENERGÍAS RENOVABLES, ESPECIALIDAD SOLAR  
FOTOVOLTAICA.

“COLECTOR TÉRMICO FOTOVOLTAICO  
INTERCONECTADO A LA RED”

Director de Tesis: Dr. Yuri Vorobiev Vasilievitch

Presenta: Ing. Teresa Yadira Frías Martínez.

Octubre de 2012



## CONTENIDO

Agradecimientos .....	4
Reconocimientos.....	5
<b>I. Resumen .....</b>	<b>6</b>
<b>II. Introducción .....</b>	<b>7</b>
1. Antecedentes.....	7
2. Hipótesis.....	8
3. Objetivo Principal .....	8
4. Objetivos Particulares.....	8
<b>III. Marco Teórico.....</b>	<b>10</b>
1. El Sol.....	10
2. Energía Solar .....	10
3. Constante Solar .....	11
4. Radiación Solar .....	11
5. Irradiación .....	12
6. Insolación .....	13
7. Hora Solar Pico.....	13
8. Mapas de Recurso Solar en el Estado de Hidalgo .....	14
9. Energía Solar Térmica.....	15
10. Sistema Solar Térmico .....	15
11. Energía Solar Fotovoltaica .....	17
12. Ventajas del Uso de Energía Fotovoltaica .....	17
13. El Efecto Fotovoltaico .....	18
14. Celda Fotovoltaica.....	18
15. Panel Fotovoltaico .....	20
16. Efecto de la Temperatura.....	21
17. Sistema Solar Fotovoltaico.....	21
18. Sistema Solar Fotovoltaico Interconectado a la Red.....	22
19. Aspectos Legales de los Sistemas Solares Fotovoltaicos Interconectados a la Red .....	24
20. Sistema Solar Hibrido Térmico Fotovoltaico.....	28



21. Tipos de Colectores PV/T.....	29
22. Ventajas de un Sistema Solar Hibrido Térmico Fotovoltaico .....	30
23. Transferencia de Calor .....	30
24. Sistemas Termosifón.....	32
<b>IV. Materiales y Métodos .....</b>	<b>33</b>
1. Propiedades Físicas y Químicas del Aluminio (Al) .....	33
2. Lámina de Aluminio.....	34
3. Propiedades Físicas y Químicas del Cobre (Cu) .....	35
4. Tubería de Cobre .....	36
5. Diseño de la Tubería.....	37
6. Demanda Energética de una Vivienda.....	39
7. Análisis de Resultados de Encuesta .....	40
8. Datos de la Región.....	43
9. Mediciones Iniciales .....	52
10. Diseño y Construcción del Prototipo.....	54
10.1. Características del Panel Fotovoltaico.....	54
10.2. Calculo del Número de Paneles Requeridos.....	55
10.3. Inclinación de los Paneles .....	56
10.4. Características de la Tubería Refrigerante.....	56
10.5. Características de la Superficie Absorbadora.....	57
10.6. Características de la Superficie Aislante .....	57
10.7. Características del Inversor .....	57
10.8. Sistema de Sujeción .....	58
10.9. Cableado.....	58
<b>V. Resultados y Discusión .....</b>	<b>60</b>
<b>VI. Conclusiones .....</b>	<b>64</b>
.....	64
.....	65
<b>VII. Anexos.....</b>	<b>66</b>
<b>VIII. Bibliografía.....</b>	<b>66</b>



## **AGRADECIMIENTOS**

Hay cosas en la vida que no tienen precio, y una de ellas es el apoyo de las personas que están alrededor de nosotros en los momentos en los que mas los necesitamos, sobre todo cuando están a tu lado sin esperar nada a cambio, por eso quiero aprovechar esta oportunidad para decirles: GRACIAS...

A Dios, que ilumina mi camino y me da fortaleza para nunca darme por vencida, a pesar de todos los obstáculos.

Al hombre y amor de mi vida, que siempre apoya mis locuras, Alejandro sé que no me equivoque al escogerte para compartir mi vida. A mi hija Aylin, una gran bendición en mi vida que me acompañó durante esta aventura y que estoy segura aprenderá a luchar como sus padres para lograr sus sueños. Ustedes son los motores que han impulsado mi vida, mi hermosa familia.

A mi Madre y a mis Abuelos Jorge y Amalia, que siempre han sido un ejemplo de lucha incansable y me enseñaron a nunca darme por vencida y cumplir mis sueños por mas difíciles que sean.

A mi hermana Yesica y a mis sobrinos Santy y Matty, gracias por estar a mi lado, por aguantar mi estrés, saben que ustedes son una parte muy importante de mi vida.

A mis admirados Doctores Yuri Vorobiev y Alberto Duarte, a mi Maestra y Amiga Thelma Altamirano, muchas gracias por confiar en mi trabajo y en mi capacidad.

A todos los que estuvieron involucrados en este reto, a todos los que un día me apoyaron, a los que me dieron un consejo, en fin, sé que esto no lo hubiera logrado sola, hay tantos a quienes debo decirles lo agradecida que estoy, que en realidad solo puedo decirles que están en mi corazón y que siempre contarán conmigo.



## **RECONOCIMIENTOS**

Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados CIMAV Chihuahua.

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN CINVESTAV  
Unidad Querétaro.

Coordinación General de Universidades Tecnológicas CGUT.

Universidad Tecnológica de Tula - Tepeji.

Programa Educativo de Energías Renovables, Mecatrónica y Procesos  
Industriales.



## I. RESUMEN

En la presente tesis se desarrolla un colector híbrido solar térmico fotovoltaico interconectado a la red, considerando que la energía solar es de las fuentes de energía renovable más prometedoras, dado que puede ser utilizada mediante paneles solares fotovoltaicos y mediante colectores térmicos.

Los sistemas fotovoltaicos, implican que los módulos reciben altas densidades de radiación, lo cual, supone un calentamiento excesivo del sistema, provocando, en términos generales una menor eficiencia de la celda y un deterioro de los materiales. Por lo anterior, es necesario que los sistemas de este tipo requieran un sistema de enfriamiento de las células fotovoltaicas.

El sistema de enfriamiento que se propone, es un sistema activo de circulación de un fluido térmico, que cumple con una función doble, primero enfría el módulo fotovoltaico, lo que mejora la eficiencia de las células y en segundo lugar, este fluido extrae una determinada cantidad de calor de las células, lo que permite aprovechar el calor y a su vez lo convierte en un colector térmico.

La construcción y diseño de un sistema solar térmico fotovoltaico es un solo panel es una solución viable que permitirá resolver problemas de eficiencia eléctrica del panel fotovoltaico y poder aprovechar la energía térmica.

Además, cuenta con un sistema de interconexión a la red, lo que permite el intercambio de energía eléctrica con la red eléctrica nacional de CFE y que se traduce en un ahorro tanto de energía, como de dinero para la población en general.

## II. INTRODUCCIÓN

### 1. ANTECEDENTES

Las energías renovables en los últimos años han sido una respuesta urgente a los efectos del calentamiento global, a cubrir la demanda de la población en relación a las necesidades de energía, pero también a buscar alternativas al uso de combustibles fósiles, que no son renovables y que además son contaminantes como la producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que influye directamente en la elevación de la temperatura promedio anual en la atmosfera; además de evitar el uso de energía nuclear, la cual, después de eventos como el de Fukushima sabemos que no es del todo viable. Por lo anterior, la posibilidad de utilizar las energías renovables, de forma controlada y para beneficio de la población, ha permitido el desarrollo de sistemas integrales de transformación, almacenamiento y distribución, como es el caso del área solar.

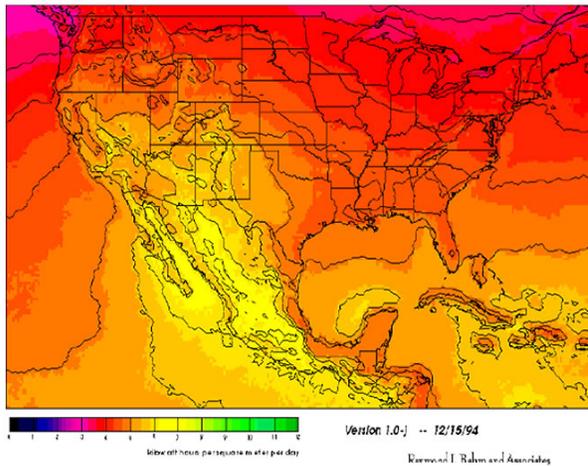


Fig. 1. Mapa de Recurso Solar en México.

En México, de acuerdo al mapa de recurso solar (Fig.1), contamos con gran potencial para el desarrollo de tecnologías encaminadas a la energía solar, la cual se divide en fotovoltaica y térmica, la primera enfocada a la producción de electricidad por medio de celdas, principalmente fabricadas de silicio, y la segunda, generalmente usada para calentar fluidos, por medio

de concentradores o colectores de cama plana. El uso de este tipo de energía para generar electricidad, no produce contaminantes, además del beneficio económico que representa.

Por ello, el diseño y construcción de un colector solar híbrido térmico fotovoltaico parece una opción viable, pues es un sistema que no solo tiene como objetivo la absorción térmica, sino también, la producción de electricidad de manera simultánea, debido a la demanda tanto de



electricidad como agua caliente en los hogares y en las industrias, por lo anterior se considera útil el diseño y construcción de un dispositivo que pueda cumplir con ambas exigencias. Hay evidencia de diversas investigaciones desde mediados de los años 70's sobre este tipo de dispositivos por considerar las ventajas que implica el poder integrarlos en un solo sistema. La mayor desventaja se relaciona con la eficiencia del panel fotovoltaico, debido a que se ve afectada por el aumento de temperatura en las celdas, reduciendo considerablemente la calidad en lo que respecta a la generación de energía eléctrica, por tanto, al incluir un sistema de refrigeración, utilizando el flujo de agua a través de tuberías, absorbe el calor y mejora el rendimiento del panel, además de generar agua caliente debido a la absorción térmica.

## **2. HIPÓTESIS**

La temperatura de los módulos fotovoltaicos se incrementa al absorber la radiación solar, disminuyendo su eficiencia en porcentajes que van desde 0.25% al 0.45% por cada grado de temperatura.

Este efecto puede evitarse por medio de la extracción adecuada del calor con la circulación de un fluido a través del modulo, lo cual, absorbe el calor excedente, mejorando su eficiencia para producir electricidad, dando como resultado un colector hibrido solar térmico fotovoltaico, interconectado a la red para asegurar que las casas habitación siempre cuenten con un adecuado suministro de electricidad.

## **3. OBJETIVO PRINCIPAL**

- Proporcionar a la población de la región Tula – Tepeji electricidad y agua caliente en sus casas habitación, por medio del diseño y construcción de un colector hibrido térmico fotovoltaico interconectado a la red.

## **4. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Incrementar la eficiencia de producción de energía eléctrica de un modulo fotovoltaico.
- Obtener agua caliente, para uso domestico.
- Ahorro considerable en el consumo de combustibles fósiles de las familias.



- Implementación de nuevos materiales, lo que sin sacrificar la eficiencia hagan más económica y accesible la adquisición del colector.



### **III. MARCO TEÓRICO**

#### **1. EL SOL**

Es una esfera de gases inmensamente calientes que emana energía constante al exterior, su masa representa el 99.86% del total del sistema solar, es una esfera 109 veces el diámetro de la tierra, 70% de su peso es hidrogeno, 28% es helio, 1.5% es carbono, nitrógeno y oxígeno y el 0.5% restante son otros elementos.

Su energía viene de reacciones termonucleares que ocurren en su centro, donde la temperatura es entre 15 y 25 millones de grados centígrados.

#### **2. ENERGÍA SOLAR**

Se considera la fuente de energía más abundante en la Tierra, es renovable, disponible, gratuita y en cantidad muy superior a las necesidades energéticas de la población mundial, dirige los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la vida en el planeta, los ciclos del oxígeno, del agua, del carbono y del clima. El sol nos suministra alimentos mediante la fotosíntesis, y como es la energía del sol la que induce el movimiento del viento y del agua y el crecimiento de las plantas, la energía solar, es el origen de la mayoría de fuentes de energías renovables, tanto la energía eólica, la hidroeléctrica, la biomasa, y la de las olas y corrientes marinas, como de la energía solar propiamente dicha.

La energía solar se puede aprovechar de manera pasiva, es decir, sin la utilización de ningún dispositivo, solo mediante la adecuada ubicación, diseño y orientación de los edificios, empleando de forma correcta las propiedades fisicoquímicas de los materiales. Y de manera activa, captando energía térmica o generando electricidad, por medio de colectores solares térmicos y paneles fotovoltaicos.

Corresponde a una radiación electromagnética formada por un conjunto de longitudes de onda, en que su velocidad de propagación es de  $3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>. El sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión, que se llevan a cabo en su núcleo, por ello la generación de energía

proviene de la pérdida de masa del sol, que se convierte en energía de acuerdo a la ecuación de Einstein,  $E = mc^2$ , donde E es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m, considerando que c es la velocidad de la luz.

La energía solar emitida por el sol, no llega a tierra de manera uniforme. Varía según la hora del día, según la inclinación estacional del globo terráqueo respecto al sol, según las distintas zonas de la superficie terrestre, debido a los movimientos de la tierra y a la absorción de la radiación solar por parte de la atmosfera, etc.

### 3. CONSTANTE SOLAR

Es el flujo de energía proveniente del sol que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la tierra al sol, fuera de la atmosfera.

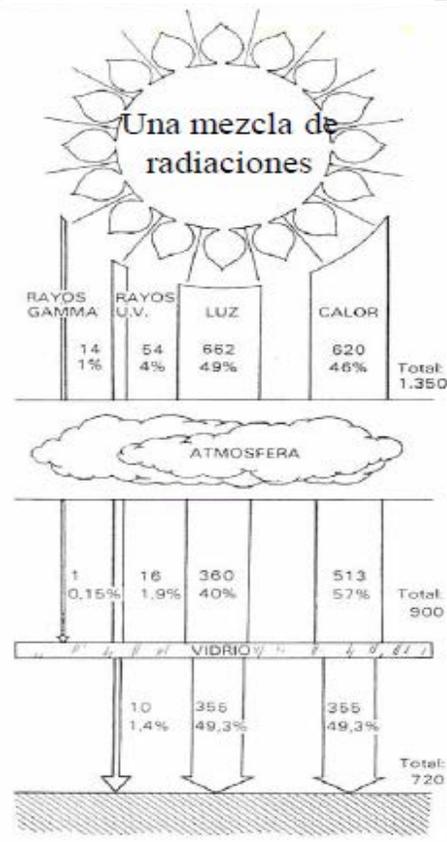
$G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$  (Nuevas mediciones  $1367 \text{ W/m}^2$ )

### 4. RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar que alcanza la tierra puede aprovecharse por medio del calor que genera y a través de la absorción por medio de dispositivos, como por ejemplo, un panel fotovoltaico. La radiación solar presenta variaciones según el horario, la latitud y las condiciones atmosféricas, considerando optimas condiciones el valor de la irradiación es de  $100 \text{ W/m}^2$  en la superficie terrestre.

La radiación solar, al atravesar la atmosfera, sufre una modificación en su espectro como consecuencia del efecto de filtro que ejerce la masa atmosférica. La mayor parte de la radiación ultravioleta es absorbida por

Fig. 2. Radiación Solar.





el ozono en la alta atmósfera, mientras la región visible de onda corta es dispersada por las moléculas de aire, dándole al cielo su característico tono azul. El vapor de agua de las capas bajas de la atmósfera es el causante de las características bandas de absorción en la región del infrarrojo cercano, fenómeno también producido en menor grado por el CO<sub>2</sub>.

La energía solar recibida cada 10 días sobre la tierra, equivale a todas las reservas conocidas de petróleo, carbón y gas, mientras que 86 minutos de radiación solar sobre la tierra equivalen a un año de la demanda energética mundial.

La radiación se clasifica como directa y difusa, considerando también la suma de ambas que se conoce como radiación global. Si es directa llega a la superficie de la tierra directamente con un valor de 1353 W/m<sup>2</sup>, que corresponde a la constante solar, y se mide con un pirheliómetro, mientras que, si es difusa se ve afectada por fenómenos de reflexión y refracción, además de los efectos de las nubes y otros elementos terrestres y atmosféricos, y se mide con un pirómetro o un albedómetro.

$$\text{Radiación Directa} = B$$

$$\text{Radiación Difusa} = D$$

$$\text{Albedo} = R$$

$$B + D + R = G$$

$$G = \text{Radiación Global}$$

Es importante resaltar que la radiación solar se ve afectada debido a los factores de la composición atmosférica, dado que debido al contenido en polvo y otros contaminantes de la atmósfera o la absorción que realizan el dióxido de carbono y el vapor de agua disminuyen la radiación incidente sobre la tierra.

## **5. IRRADIACIÓN**

$$\text{Irradiación} = I$$

$$I = G * \Delta t$$



Es la energía por unidad de área recibida en un cierto tiempo.

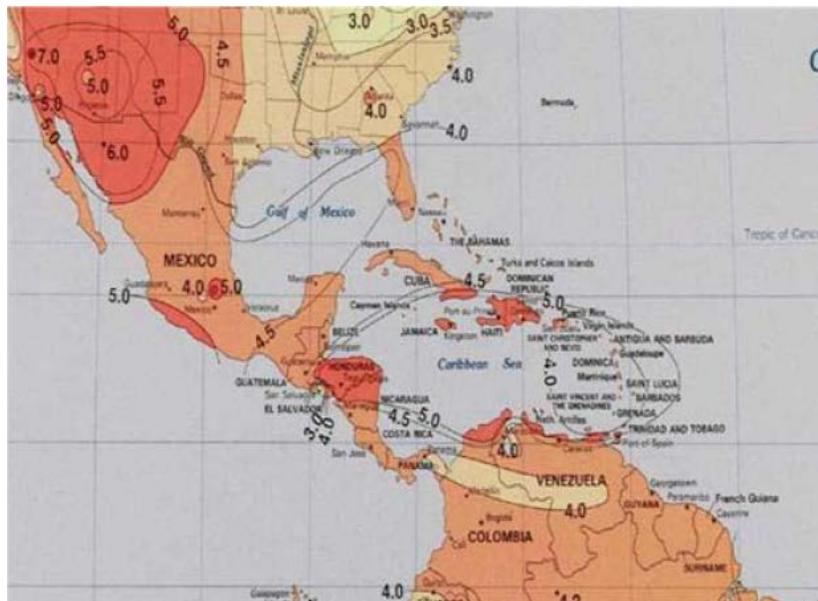
## 6 .INSOLACIÓN

Insolación = H

Es la cantidad de energía solar que recibe un área determinada, durante un periodo de tiempo dado. Se mide en kilowatt – hora por metro cuadrado, (kWh/m<sup>2</sup>). Los datos de insolación se presentan comúnmente como valores de promedio diario para cada mes, donde, la irradiancia máxima es la disponible al medio día solar de cualquier día dado, sin importar la estación del año. El medio día solar, es la hora en la que el sol llega a su apogeo durante su trayectoria a través del cielo. Mientras tanto, las horas de sol máximo, son el número equivalente de horas diarias en que la irradiancia solar alcanza un promedio de 1.0 kW/m<sup>2</sup>.

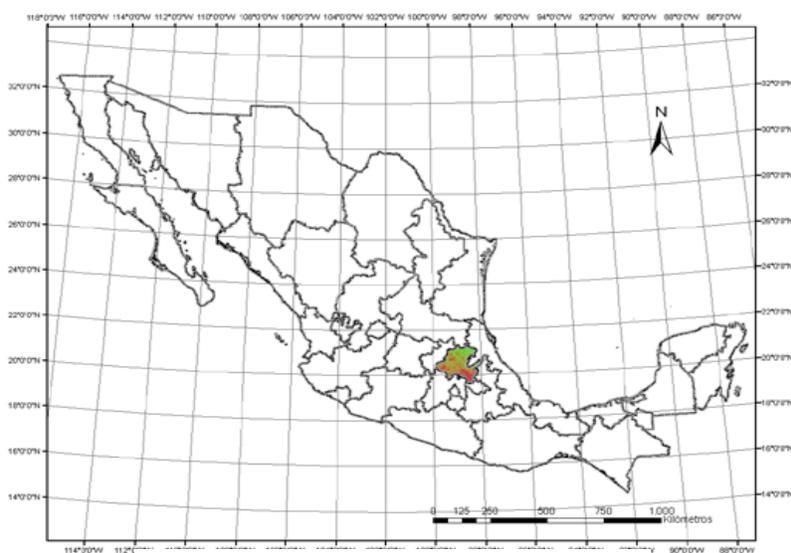
## 7. HORA SOLAR PICO

Es la energía disponible del sol obtenida por la integración de la irradiancia respecto al tiempo, expresado en horas de máxima irradiancia.

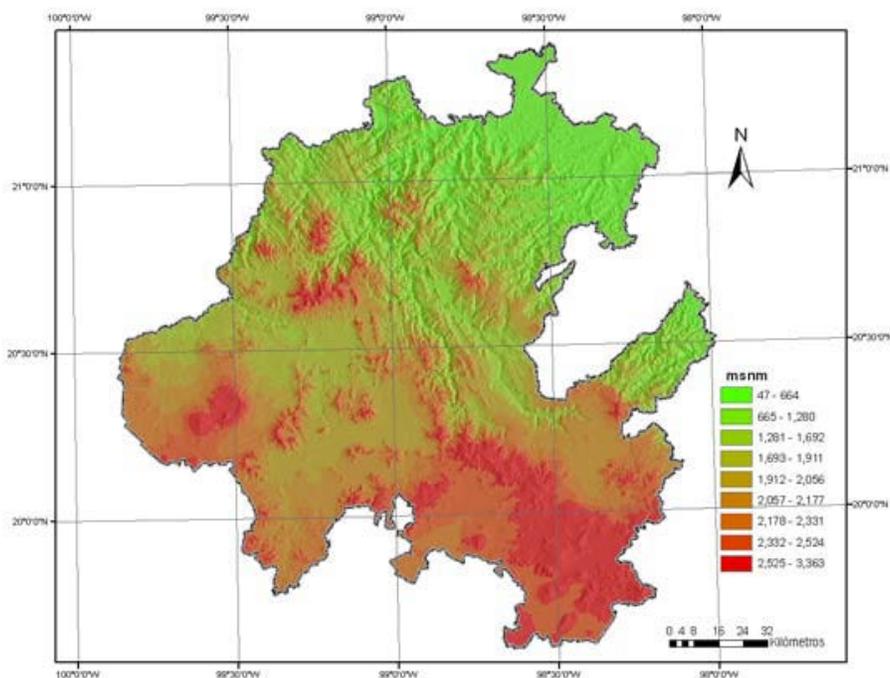


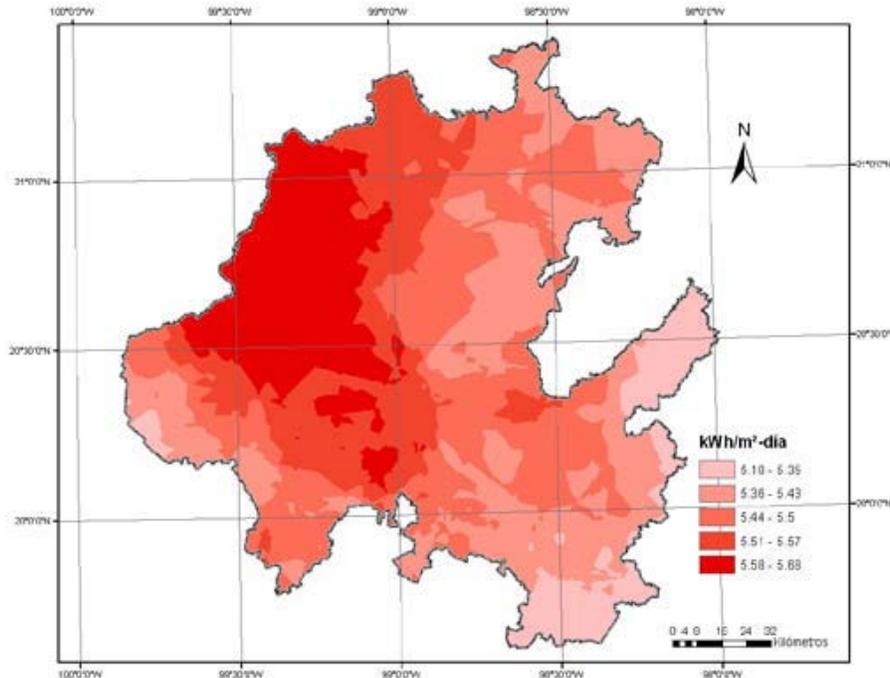
Mapa 1. Horas pico en la Republica Mexicana.

## 8. MAPAS DE RECURSO SOLAR EN EL ESTADO DE HIDALGO



Mapa 2. Ubicación del Estado de Hidalgo.





Mapa 3 y 4.. Irradiación Solar en el Estado de Hidalgo.

## 9. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

También conocida como energía termosolar, es el aprovechamiento de la energía del sol para generar calor, por medio del uso de colectores o paneles solares térmicos básicamente nos sirve para calentar el agua u otro tipo de fluidos.

El funcionamiento de la captación de energía solar térmica se basa en lo siguiente: el primer paso es captar los rayos solares mediante colectores o paneles solares, después a través de este panel solar hacemos pasar agua u otro fluido de características similares, de esta manera una parte del calor absorbido por el panel solar es transferido al agua y de esta forma ya puede ser directamente usada o almacenada para que hagamos uso de el cuando lo necesitemos.

## 10. SISTEMA SOLAR TÉRMICO

Los dispositivos de este tipo son diseñados para captar la radiación solar, transformarla en energía térmica y así elevar la temperatura de un fluido.



Principalmente consta de 3 partes; el colector plano que capta la energía del sol y la transfiere al fluido, el sistema de tuberías por donde circula y el termotanque, en el cual se almacena el agua caliente, funcionan bajo el efecto termosifónico, ya que el agua caliente es más ligera que la fría, por lo tanto tiende a subir, debido a la diferencia de temperaturas se establece una circulación natural, sin necesidad de ningún equipo de bombeo.

En función de la temperatura que puede alcanzar el fluido, se dividen en dos grupos, los de concentrador, que enfocan la energía dispersa para alcanzar temperaturas superiores a los 100°C; mientras los colectores planos, son dispositivos más simples que permiten obtener energía calórica de baja temperatura, inferiores a 100°C.

Existen colectores planos con cubierta, que se componen de una cubierta de vidrio, una placa captadora aislada térmicamente en la parte inferior y están lateralmente contenidos en una caja de metal o plástico. Mientras que los colectores al vacío, se encuentran proyectados para reducir las dispersiones de calor hacia el exterior, el calor que cada tubo de vacío capta se transfiere a la placa, que generalmente es de cobre y esta dentro del tubo, por lo tanto, el líquido portador del calor se calienta y gracias al vacío, se reduce al mínimo la dispersión de calor hacia el exterior. En su interior la presión del aire es muy reducida, de forma que impide la cesión de calor por conducción. En la fase de montaje, el aire entre el absorbedor y el vidrio de la cubierta es aspirado y hay que asegurar una hermeticidad perfecta y perdurable en el tiempo.

El rendimiento de un sistema solar térmico depende de varios factores, tales como las condiciones climáticas locales, área y tipo de colector solar, carga térmica, incluso la temperatura ambiente puede influir de manera notable sobre el rendimiento del sistema.

Con un sistema adecuado a las necesidades de la casa habitación se pueden satisfacer la mayor parte de los requerimientos de agua caliente, sin tener que pagar combustible, aun cuando el costo inicial es mayor que el de un calentador común (boiler), se recupera la inversión en un plazo razonable. Además de contribuir también con la



conservación del ambiente, pues al no usar combustibles fósiles, evitamos la emisión de gases de efecto invernadero.

Para poder instalar un sistema adecuado hay que tomar en cuenta el número de personas y los hábitos en la casa habitación, además de los usos extra que se le dan al agua caliente, como lavado de ropa o trastes.

### **11. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

El término fotovoltaico, engloba el conjunto de tecnologías que nos permiten la conversión directa de la luz solar en electricidad, mediante dispositivos electrónicos llamados células o celdas.

1941	Primer celda solar, de selenio con una eficiencia de 1%.
1955	Western Electric por primera vez comercializo células solares.
1958	El Vanguard I, fue el primer satélite solar, disponía de un módulo fotovoltaico para alimentar un trasmisor de 5 miliwatios. Por el costo de las celdas, eran usadas solo en la industria aeroespacial.
1973	El embargo petrolero iniciado por los países de la OPEP, despertó el interés en el uso de celdas solares. En esta etapa, la energía fotovoltaica dejo de ser solo de uso aeroespacial, para comenzar a tener usos terrestres.
	El avance más grande desde la década de los 50` s es la fabricación de celdas de silicio y en la actualidad en celdas que combinan varios semiconductores conectados, formando celdas multiunión.

### **12. VENTAJAS DEL USO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

- No precisan suministro de combustible alguno para su operación.
- Son absolutamente no contaminantes.
- Son muy fiables, su operación y mantenimiento son muy sencillos y al alcance de personal escasamente especializado.
- Sus costos actualmente se ha ido reduciendo considerablemente.
- Su vida útil es muy larga, probablemente superior a los 30 años, sin que muestren apenas degradación.



### **13. EL EFECTO FOTOVOLTAICO**

Fue descubierto por el físico francés Edmund Becquerel en 1839. La conversión de la energía solar en electricidad depende del efecto fotoeléctrico, que es la emisión de electrones de una superficie sólida cuando se irradia con emanaciones electromagnéticas.

Los fotones de la luz solar, inciden sobre la celda fotovoltaica, pudiendo ser reflejados, absorbidos o pasando a través de la misma, sin embargo, solo los fotones absorbidos pueden generar energía eléctrica, ya que la energía del fotón se transfiere a un electrón que es capaz de escapar de su posición normal para formar parte de la corriente en un circuito eléctrico.

### **14. CELDA FOTOVOLTAICA**

Las celdas fotovoltaicas, se componen por capas de semiconductores, que están dopados para formar la parte positiva y la parte negativa para dar lugar a la formación del campo eléctrico, pueden ser tipo "p" o tipo "n", la razón para usar estos materiales, es que a bajas temperaturas funcionan como aislantes y al aumentar la temperatura como conductores.

Las células solares están fabricadas con dos o más capas de semiconductores, entre las cuales, se forma un campo eléctrico suficiente como para separar las cargas de signo diferente y permitir la generación de corriente cuando reciben radiación luminosa.

Su estructura básica es una oblea de silicio contaminada con pequeñas cantidades de fósforo y boro para crear en su superficie frontal un campo eléctrico interno. Se deposita por impresión en ambas caras un enrejado de plata y/o aluminio que se utilizan como electrodos para extraer la corriente eléctrica generada en el interior de la celda. La celda tiene un recubrimiento anti reflejante para hacerla oscura y que atrape mas luz.

El 80% de la luz absorbida se convierte en calor, el 20% restante transfiere la energía a los electrones de los átomos de silicio en forma análoga a una bola de billar cuando choca con otra, los electrones son liberados del átomo y pueden moverse en la oblea. El campo eléctrico

atrae los electrones a la superficie de la celda y se acumularan ahí, dando como resultado un voltaje medible exteriormente, lo que produce el efecto fotovoltaico.

En las células fotovoltaicas lo más común es utilizar como elemento semiconductor el silicio. Las hay de silicio monocristalino, policristalino y amorfo como lo muestra la Fig.2. a continuación:

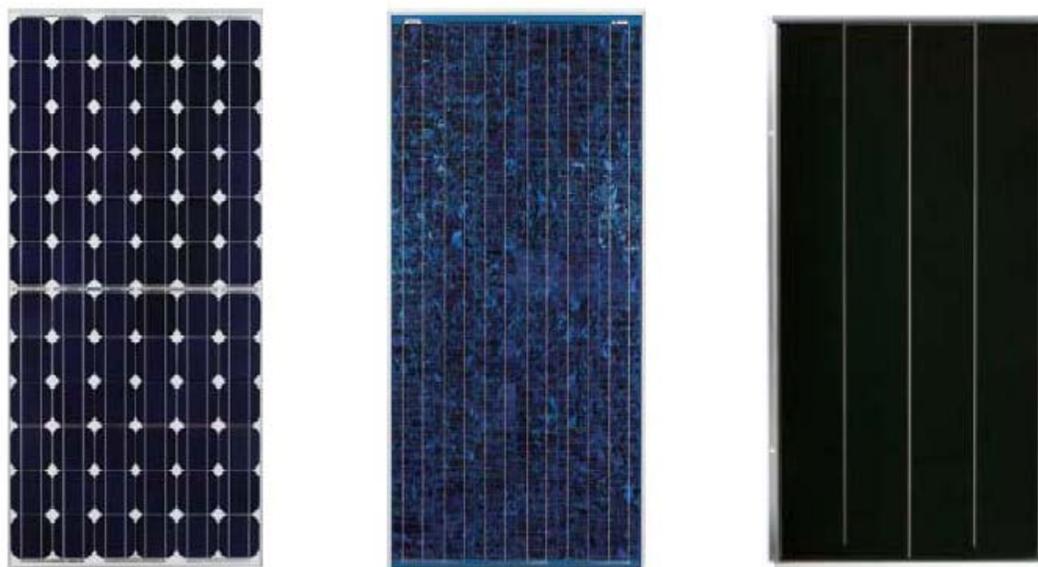


Fig. 3. Celdas de Silicio Monocristalino, Policristalino y Amorfo.

Tipo de material	Rendimiento en condiciones ideales de laboratorio	Rendimiento en paneles comerciales
Silicio Puro monocristalino	24,70%	16%
Silicio puro policristalino	19,80%	14%
Silicio amorfo	13,00%	8%
Teluro de cadmio	16,00%	8%
Arseniuro de Galio	25,70%	20%
Diseleniuro de cobre en indio	17,00%	9%
Tándem	35,00%	No disponible en versión comercial

Tabla 1. Rendimiento de los paneles según material de fabricación.



## **15. PANEL FOTOVOLTAICO**

Una celda solar fotovoltaica aislada, proporciona una potencia reducida, con el fin de obtener potencias múltiples para aparatos de media potencia, hace falta unir un cierto número de celdas en serie, con lo que se aumenta la tensión de la corriente.

Un panel, colector, o también llamado modulo fotovoltaico está conformado por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la luz solar que incide sobre ellos. En un modulo fotovoltaico, hay un número determinado de celdas que al estar interconectadas producen la cantidad de electricidad que según el caso se requiere, también los módulos pueden interconectarse hasta lograr el voltaje necesario para la iluminación, el bombeo de agua, entre otros.

Es importante destacar que las conexiones entre paneles se hacen en serie para alcanzar la salida de voltaje deseada y en paralelo para lograr la cantidad de corriente necesaria. Además una celda solar fotovoltaica caliente disminuye su eficiencia, por lo que es importante mantener una temperatura lo más baja posible, lo que se puede lograr por medio de un sistema de enfriamiento o tratando de proveer de buena ventilación a cada panel que forma el sistema.

La tabla 2, nos muestra los detalles de algunos sistemas fotovoltaicos que han sido instalados entre 1976 y 2010, lo cual, nos permite conocer el estado del arte de los mismos.

Punto	Laboratorio	Potencia (kWp)	Eficiencia electrica (%)	X (FC)	Año
1	Sandia	1	12.7	50	1976
2	Spectrolab	11	10.9	25	1978
3	IES-UPM (Ramon Areces)	1	10	40	1978
4	U.Toulouse (Sophocles)	1	10	40	1978
5	Sandia (Martin Marietta)	10	9	40	1978
6	Ansaldo (PCA)	1	10	40	1978
7	SOLERAS Saudi Arabia (Martin Marietta)	360	10	40	1981
8	BDM Corp. Office Block., Albuquerque	50	9.7	15<X<60	1982
9	Sky Harbour Airport Phoenix	250	10.5	50<x<500	1982
10	Entech Austin System	300	16.5	22	1990
11	Entech CSW solar park	100	14	15<X<60	1995
12	IES-UPM/BP Solar (EUCLIDES)	450	18.5	30	1999
13	Amonix (Glendale)	100	27	250	2000
14	FISE y Loffe de Rusia	2	24.9	300	2003
15	Solar Systems (White Cliffs)	100	**	100	2005
16	Solar Farm in Broken Hill (Australia)	1000	**	X>500	2006
17	ENEL Italia	2.9	**	700	2008
18	ENEL Italia	3.9	**	380	2008
19	ENEL Italia	4	**	25	2008
20	Concentrix FLATCON	5.67	27	385	2008
21	SunCube	4.4	27.5	**	2010

Tabla 2. Estado del arte de los paneles fotovoltaicos.

A partir de los 25°C que se considera una temperatura estándar, el modulo empieza a perder voltaje a una razón aproximada de 83 mV por grado centígrado que aumente la temperatura de la celda. El modulo pierde potencia a razón aproximada de 0.5% por grado centígrado que aumente la temperatura de la celda.

Valores típicos de funcionamiento a 1kW/m <sup>2</sup>					
Temperatura de la unión	T <sub>j</sub>	(°C)	25	45	60
Voltaje nominal de la batería		(V)	12	12	12
Potencia máxima (± 10%)	P <sub>M</sub>	(W)	47.5	43.4	40.2
Voltaje a máxima Potencia	V <sub>M</sub>	(V)	17	15.44	14.27
Corriente a máxima Potencia	I <sub>M</sub>	(A)	2.8	2.81	2.82
Corriente de corto circuito	I <sub>CC</sub>	(A)	3.05	3.07	3.08
Voltaje a circuito abierto	V <sub>CA</sub>	(V)	21.6	20	18.9

Tabla 3. Valores promedio del funcionamiento de un panel fotovoltaico.

## 17. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Los sistemas fotovoltaicos pueden estar equipados con acumuladores que durante el día se encargan de almacenar energía que se podrá utilizar por la noches, en días lluviosos, pero que del mismo modo pueden estar interconectados a la red eléctrica.



Hay 2 tipos de sistemas fotovoltaicos:

**Autónomos:** En este caso no hay una red de distribución pública disponible, lo que significa que la electricidad que se produce se utiliza de manera directa o utilizando un inversor, y se almacena en baterías para su uso por las noches o en periodos de escases de luz solar. En México, los sistemas de este tipo se han instalado por lo general, en zonas rurales aisladas de la red eléctrica.

**Interconectados a la red:** Este tipo de sistemas se encuentra instalado en lugares donde se cuenta con conexión a la red eléctrica disponible, dada la legislación existente en México, los excedentes generados por el sistema fotovoltaico se inyectan a la red a través de un medidor bidireccional, una ventaja importante de este tipo de sistemas es que no requiere un banco de baterías por ello, el costo disminuye y lo hace más accesible.

Además los sistemas fotovoltaicos, utilizan otros dispositivos como cables para las conexiones y los inversores, los cuales sirven como convertidores electrostáticos, que por medio de componentes electrónicos de potencia, convierten la corriente directa en corriente alterna.

Los paneles pueden montarse en el techo de una casa, buscando el ángulo de inclinación y la orientación adecuados, para lo cual, requieren una estructura de soporte, la cual, está diseñada con un bastidor que sujeta el panel, un sistema de sujeción y la estructura de soporte que deben estar diseñados para soportar al menos 10 años de exposición a la intemperie y a factores ambientales, generalmente, se utiliza aluminio anodizado, acero inoxidable o hierro galvanizado, con todos los tornillos de acero inoxidable. La razón por la cual se usan este tipo de materiales es porque el aluminio anodizado es de poco peso y mucha resistencia, mientras el acero inoxidable es resistente a un ambiente corrosivo, de calidad y largo periodo de vida, aunque a más alto costo.

## **18. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED**

Básicamente un sistema fotovoltaico interconectado a la red se compone de un arreglo fotovoltaico que se integra por un determinado número de

módulos, el cual, depende de la potencia nominal requerida en el arreglo y de la potencia pico de los módulos seleccionados. El voltaje de salida del arreglo, se obtiene mediante la conexión en serie de un número determinado de módulos y la potencia, a través de la conexión en paralelo de dichas series.

El acondicionamiento de la potencia eléctrica generada por el arreglo fotovoltaico (corriente directa), se realiza mediante un inversor, que convierte la corriente directa producida por el generador fotovoltaico a corriente alterna, en fase y a la frecuencia de la red para una conexión segura y confiable del sistema a esta.

Por lo general este tipo de sistemas se instalan sobre el techo de las construcciones, lo que permite proveer de mayor y mejor exposición a los rayos solares. Es importante considerar que este tipo de conexiones siguen las normas y recomendaciones de carácter general y las que ya están establecidas en particular para este tipo de aplicaciones como la IEEE Std. 1547 (IEEE, Estándar for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems).

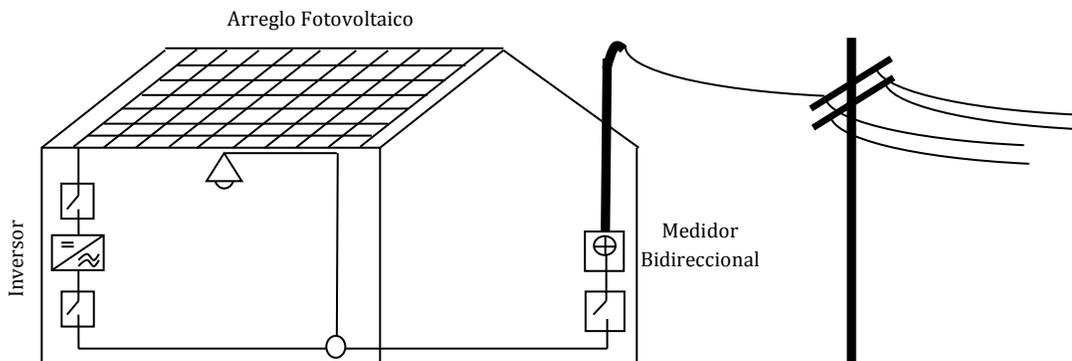


Fig. 4. Diagrama Básico de un Sistema Interconectado a la Red

En este esquema la fuente de energía que provee la electricidad a las cargas es transparente en todo momento para el usuario, dado que la calidad de la energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico es similar a la de la red eléctrica convencional. Cuando existe un déficit entre la demanda de electricidad en el inmueble respecto a la generación fotovoltaica, este diferencial es cubierto con electricidad proveniente de la red eléctrica convencional. En caso contrario, cuando se presenta un excedente entre la demanda respecto a la generación



fotovoltaica, éste es directamente inyectado a la línea de distribución del proveedor del servicio eléctrico.

En nuestro país la Comisión Federal de Electricidad, ofrece contratos de interconexión a la red, con la instalación de medidores de tipo bidireccional, los cuales, registran tanto la energía que entra al servicio como la energía que sale, la cual es generada por el sistema fotovoltaico.

Dentro de las ventajas de un sistema fotovoltaico interconectado a la red, esta la facturación, la cual, depende de la diferencia entre los registros de entrada y salida de energía en el medidor, puede presentarse el caso en que la diferencia es mayor que cero, quiere decir que se consume más energía de la que genera y la compañía cobrara esa diferencia, que la diferencia sea igual a cero, lo que significa que se consumió la misma energía que se genero y se envió a la red, por lo tanto, se cobra la tarifa mínima establecida en el contrato de suministro normal, y por último, cuando la diferencia es menor de cero, lo que significa que el sistema fotovoltaico genero más energía que la que se consumió, lo que se traduce al cobro de la tarifa mínima establecida en el contrato de suministro normal y además el almacenamiento virtual de energía que se irán descontando de los recibos subsecuentes que presenten diferencias mayores a cero.

## **19. ASPECTOS LEGALES DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A LA RED**

En México, la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, tiene como objeto el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica. El Estado se compromete a promover la eficiencia y sustentabilidad energética, así como la reducción de la dependencia de los hidrocarburos como fuente primaria de energía.

La Secretaría de Energía dentro de sus funciones deberá incluir la construcción de las obras de infraestructura eléctrica necesarias para



que los proyectos de energías renovables se puedan interconectar con el Sistema Eléctrico Nacional y definir estrategias para fomentar aquellos proyectos que a partir de fuentes renovables de energía provean energía eléctrica a comunidades rurales que no cuenten con este servicio, estén o no aislados de las redes eléctricas.

A toda persona física de nacionalidad mexicana o persona moral constituida conforme a las leyes mexicanas y con domicilio en territorio nacional, que genere electricidad a partir de energías renovables, se le conoce como: Generador. Los suministradores deberán celebrar contratos de largo plazo con los generadores que utilizan energías renovables que cuenten con un permiso, conforme a las directrices expedidas. El Sistema Eléctrico Nacional recibirá la electricidad producida con energías renovables excedentes de proyectos de autoabastecimiento o por proyectos de cogeneración de electricidad de conformidad con lo establecido en el artículo 36 bis de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.

El Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Renovable o Sistema de Cogeneración en Pequeña Escala, se aplica a personas físicas o morales, que sean generadores con fuente de energía renovable y cogeneración a pequeña escala, usuarios con servicio de uso residencial de hasta 10 kW y usuarios con servicio de uso general en baja tensión de hasta 30 kW, la vigencia del contrato es indefinida y no se requiere permiso de generación eléctrica, dado que es un contrato anexo al de suministro normal. El Generador, se hace cargo de toda la inversión que se requiera para la construcción e instalación de equipos que se requiere.

En el caso del Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Renovable o Sistema de Cogeneración en Mediana Escala se aplica a personas físicas o morales, que sean generadores con fuente de energía renovable y cogeneración en media tensión, usuarios con servicio de hasta 500 kW, la vigencia del contrato es indefinida y no se requiere permiso de generación eléctrica, dado que es un contrato anexo al de suministro normal.



El Programa Nacional de Vivienda 2007 – 2012, por medio de la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), apuesta por un desarrollo habitacional sustentable, por medio de políticas que permitan una mejor calidad de la vivienda, ofreciendo mayor confort y salud, para los habitantes, además de contribuir a la protección del medio ambiente y los recursos naturales.

Los recursos provenientes de un crédito, se pueden complementar con subsidio federal por medio de la CONAVI, incrementándose hasta un 20% si es que la casa habitación cumple con parámetros de sustentabilidad, teniendo en cuenta que el desarrollo habitacional sustentable, considera el análisis del sitio, el uso eficiente de agua y energía, la adaptabilidad al medio ambiente, entre otros aspectos.

Si la vivienda se adquiere por medio de un crédito INFONAVIT, esta institución otorga un monto adicional en función de la capacidad de pago, si es que la vivienda cuenta con ecotecnologías incorporadas, que permitan el ahorro de agua y energía.

También se cuenta con el Programa Transversal de Vivienda Sustentable, que cuenta con un convenio de colaboración entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Secretaría de Energía y la Comisión Nacional de Vivienda, quienes promueven la inclusión de criterios de sustentabilidad en la política de vivienda y el desarrollo de proyectos habitacionales del Gobierno Federal, abordando como temas principales el ahorro de agua, de energía y el manejo adecuado de residuos sólidos. Lo anterior para favorecer la aplicación de incentivos fiscales, económicos y financieros, contar con un certificado de vivienda sustentable y apoyar el desarrollo del mercado de tecnología eficiente, aplicable a la construcción de la vivienda.

Hasta el 31 de diciembre de 2011, CFE contaba con un total de 612 contratos de interconexión a pequeña o mediana escala, dividido por entidades federativas de la siguiente manera:

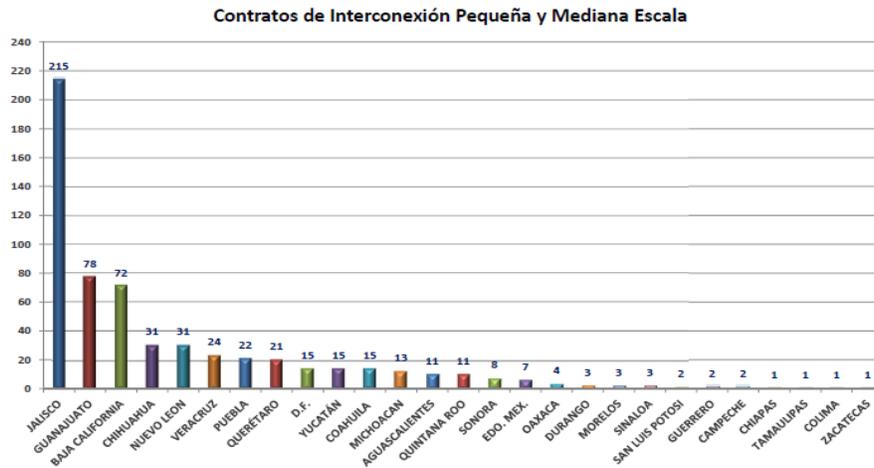


Fig. 5. Contratos de interconexión por entidad federativa.



Fig. 6. Numero de personas físicas y morales con contrato de interconexión.

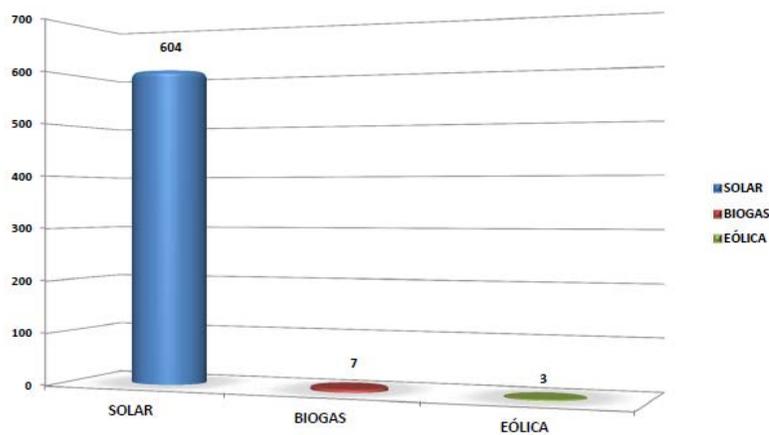


Fig. 7. Tipo de energía utilizada para la generación de energía eléctrica.

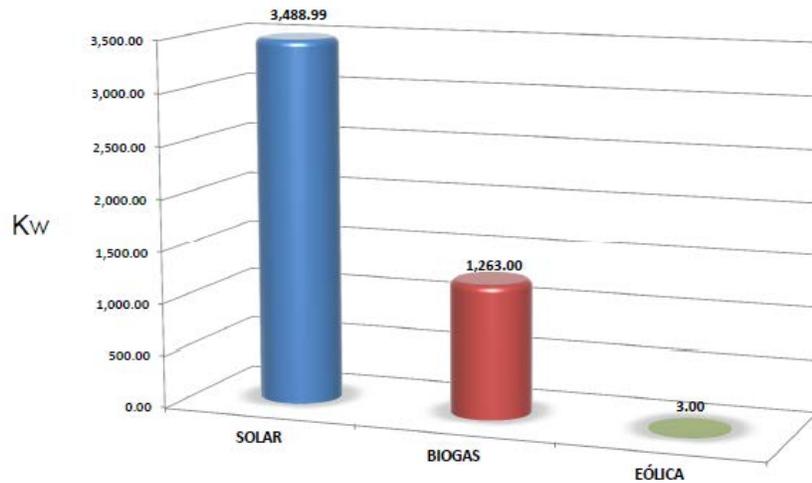


Fig. 8. Potencia contratada por tipo de generación.

## 20. SISTEMA SOLAR HIBRIDO TÉRMICO FOTOVOLTAICO

Los módulos fotovoltaicos, funcionan mejor en la gama ultravioleta del espectro solar, la radiación infrarroja no incrementa la producción de electricidad, sin embargo, aporta calor, lo cual, reduce la eficiencia de un modulo fotovoltaico. Mientras los captadores térmicos, utilizan precisamente el espectro infrarrojo, para generar calor, sin utilizar para nada la radiación ultravioleta, por lo tanto, por si solo cada sistema aprovecha solo una parte del espectro, por ello, al juntarlos en un colector hibrido, aprovechan un rango amplio de la energía contenida por la radiación solar.

Los sistemas híbridos se basan en el principio de los sistemas de energía térmica, se hace circular por un conducto un fluido que se calienta por la energía recibida por el sol, este conducto, se localiza detrás de una superficie de absorción de los rayos solares. De este modo se obtiene energía eléctrica a través de celdas y energía térmica a través del fluido.

Básicamente el sistema solar hibrido térmico fotovoltaico que se plantea se compone del modulo fotovoltaico, que se encarga de la generación de electricidad, añadiendo una capa absorbidora, la cual, se forma de una lamina de aluminio, a la cual esta adherida la tubería de cobre, que sirve como refrigerante para el modulo fotovoltaico y al mismo tiempo calienta el agua que circula por la tubería.

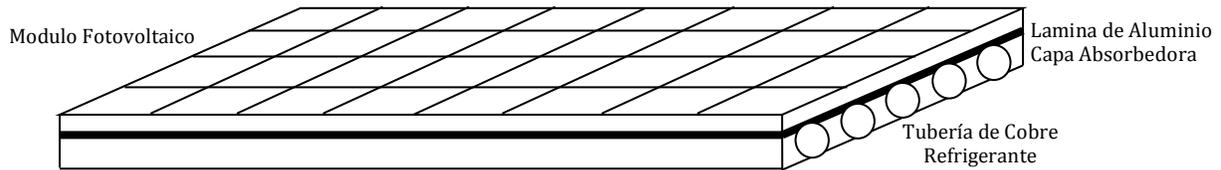


Fig. 9. Composición básica de un colector híbrido.

## 21. TIPOS DE COLECTORES PV/T

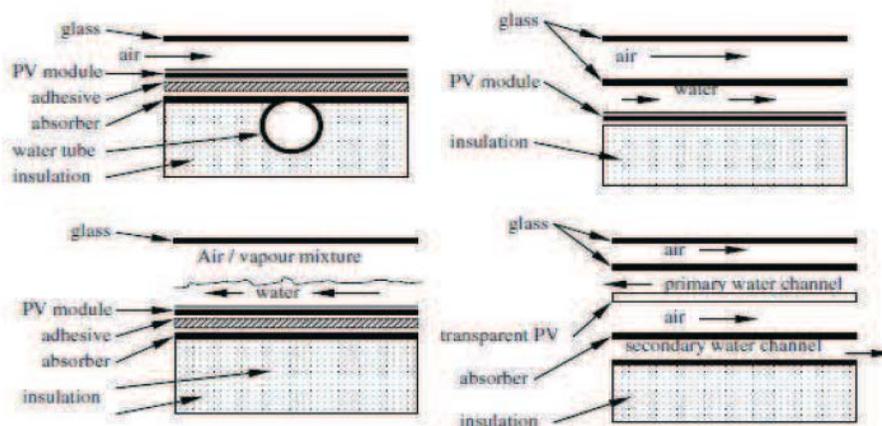
Este tipo de paneles se clasifican principalmente según dos criterios importantes la concentración o no del colector y el tipo de fluido de trabajo:

Colectores PV/T planos: Son muy similares a los colectores térmicos planos, con la única salvedad de que incluyen un modulo fotovoltaico sobre la capa absorbedora.

Colectores PV/T con concentración: Dado que los módulos fotovoltaicos son caros, se puede utilizar la concentración con el fin de incrementar el nivel de radiación que incide sobre los mismos.

Agua como fluido de trabajo: Depende de lo que se utiliza, ya sean láminas o tubos, los tipos de absorbedores o distintos canales.

Aire como fluido de trabajo: Son modelos con flujo de aire, ya sea por encima o por debajo del absorbedor o por ambos.



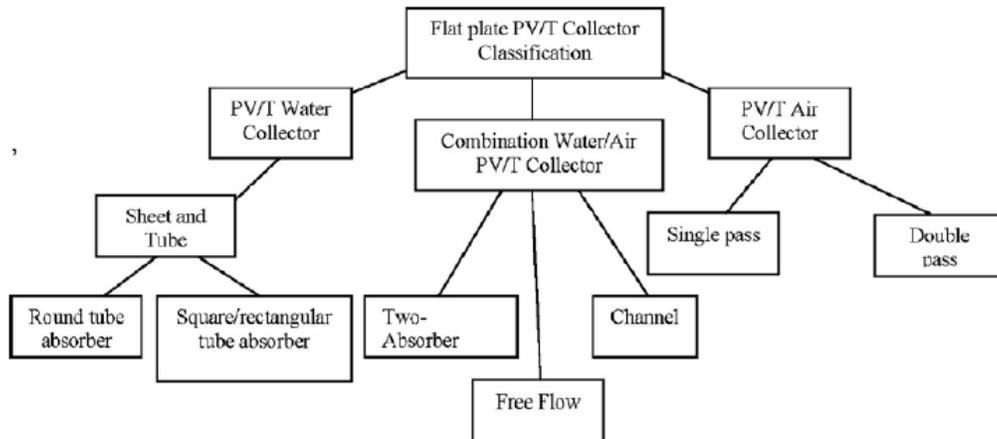


Fig. 10. Tipos de colectores PV/T con agua como fluido de trabajo.

## 22. VENTAJAS DE UN SISTEMA SOLAR HIBRIDO TÉRMICO FOTOVOLTAICO

- Aumento en la potencia fotovoltaica del modulo y mayor tiempo de vida útil, al disminuir la temperatura de funcionamiento.
- Calentamiento de agua y producción de energía eléctrica para uso industrial y domestico en un solo sistema.
- Reducción de espacio y costos requeridos para la instalación del colector térmico y modulo fotovoltaico.
- Menor impacto ambiental.

## 23. TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor lo podemos definir como la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia, mientras la temperatura, es una medida de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas individuales de una sustancia. Por lo anterior, cuando se agrega calor a una sustancia, sus átomos o moléculas se mueven mas rápido y su temperatura se eleva o viceversa.

Cuando dos cuerpos que tienen distintas temperaturas se ponen en contacto entre si, se produce una transferencia de calor desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. La transferencia de calor se puede realizar por medio de 3 mecanismos: conducción, convección y radiación.



**Conducción:** La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los mejores conductores de calor son los metales. La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor.

Para un volumen de espesor  $\Delta x$ , con área de sección transversal  $A$  y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes  $T_1$  y  $T_2$ , con  $T_2 > T_1$ , se encuentra que el calor  $\Delta Q$  transferido en un tiempo  $\Delta t$  fluye del extremo caliente al frío. Si se llama  $H$  (en Watts) al calor transferido por unidad de tiempo, la rapidez de transferencia de calor  $H = \Delta Q/\Delta t$ , está dada por la ley de la conducción de calor de Fourier.

$$H = dQ/dt = - kA dT/dx$$

Donde  $k$  (en  $W/mK$ ) se llama conductividad térmica del material, magnitud que representa la capacidad con la cual la sustancia conduce calor y produce la consiguiente variación de temperatura; y  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura. El signo menos indica que la conducción de calor es en la dirección decreciente de la temperatura.

**Convección:** La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

En la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmósfera por conducción y radiación cerca de la superficie, es transportado a otras capas o niveles de la atmósfera por convección. Un modelo de transferencia de calor  $H$  por convección, llamado ley de enfriamiento de Newton, es el siguiente:



$$H = h A (T_A - T)$$

Donde h se llama coeficiente de convección, en  $W/(m^2K)$ , A es la superficie que entrega calor con una temperatura  $T_A$  al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T.

#### **24. SISTEMAS TERMOSIFÓN**

Es un método de circulación de fluidos que se realiza de manera natural, sin utilizar alguna bomba o algún mecanismo, la circulación se lleva a cabo dadas las propiedades del líquido, como la densidad y la temperatura, quiere decir que cuando el líquido se calienta posee una densidad baja, con la cual, tiene la capacidad de subir, mientras que cuando está frío su densidad es alta, y puede desplazarse a las zonas inferiores. Cuanto mayor sea la diferencia de longitud, mayor será la corriente inducida por la misma diferencia de temperatura, lo anterior se repite de manera constante, por lo cual, el sistema está calentando constantemente hasta que llega a la temperatura pico, la cual, también depende de la radiación solar, el clima, etcétera.

El funcionamiento de este tipo de sistemas es muy simple, por lo cual, el riesgo de averías es escaso, los costos bajos y con resultados excelentes en zonas con una radiación solar alta. No dependen de electricidad.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

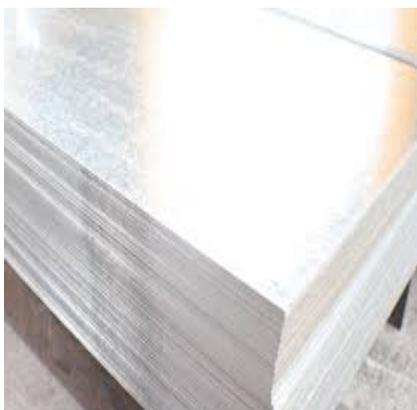


Fig. 11. Aluminio (Al)

### 1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL ALUMINIO (AL)

<b>Nombre</b>	Aluminio
<b>Símbolo</b>	Al
<b>Serie Química</b>	Metales del bloque p
<b>Masa atómica</b>	26.9815386
<b>Dureza Mohs</b>	2.75
<b>Estado ordinario</b>	Sólido
<b>Densidad</b>	2698.4 kg/m <sup>3</sup>
<b>Punto de fusión</b>	660 °C / 933.47 °K
<b>Punto de ebullición</b>	2519 °C / 2792 °K
<b>Conductividad eléctrica</b>	37.7 x 10 <sup>6</sup> S/m
<b>Conductividad térmica</b>	237 W/(K x m)

Es un metal no ferroso, de color blanco y de los más ligeros, con alta reflectividad de la luz y el calor. El aluminio puro es demasiado blando, por lo que con las aleaciones adecuadas obtiene resistencias comparables con el acero.

El aluminio, es un metal que proporciona dureza con bajo peso, fácil de pulir, tenaz, dúctil y maleable, con gran resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica.

## 2. LÁMINA DE ALUMINIO

Derivado de las características que se mencionan, entre las razones para el uso del aluminio en este proyecto es su grado de reflectividad en la luz y con la radiación solar, la cual, varía de acuerdo al grado de energía o las condiciones superficiales del metal, siendo la más alta del 75% en un rango de rayos ultravioleta, 85% en el rango de luz visible y sobre un máximo de 95% en el rango de radiación infrarroja.

Se utilizarán láminas de diferentes tipos, con el fin de buscar la que mejor efecto tenga sobre el prototipo.

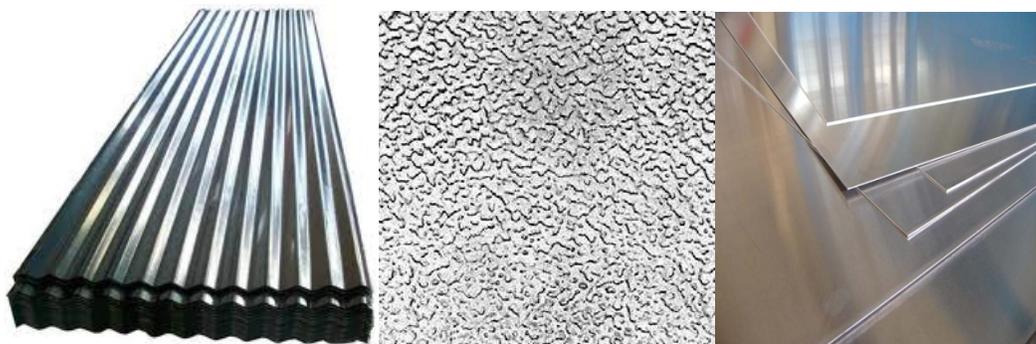


Fig. 12. Laminas de Aluminio



Fig. 13. Cobre (Cu)

### 3. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL COBRE (Cu)

<b>Nombre</b>	Cobre
<b>Símbolo</b>	Cu
<b>Serie Química</b>	Metales en transición
<b>Masa atómica</b>	63.536
<b>Dureza Mohs</b>	3.0
<b>Estado ordinario</b>	Sólido
<b>Densidad</b>	8960 kg/m <sup>3</sup>
<b>Punto de fusión</b>	1084.62 °C / 1357.77 °K
<b>Punto de ebullición</b>	2927 °C / 3200 °K
<b>Conductividad eléctrica</b>	58.108 x 10 <sup>6</sup> S/m
<b>Conductividad térmica</b>	400 W/(K x m)

El cobre es uno de los metales de mayor uso, de los más resistentes, de color pardo rojizo, del grupo de los metales nobles junto a la plata, el oro y el platino, es común encontrarlo en estado puro, formando óxidos o en combinación con azufre.

Tiene excelentes propiedades mecánicas, es amagnético, muy maleable y dúctil, lo que permite su uso en la producción de láminas delgadas y la fabricación de cables eléctricos muy finos, se puede soldar, permite tratamientos térmicos como el temple y el cocido, además de la fabricación de piezas por fundición y moldeo, este material tiene buena



resistencia a la corrosión, a la exposición atmosférica, al agua y algunos ácidos, por lo que en situaciones normales no se corroe.

Es el mejor conductor eléctrico, después de la plata, a la cual aventaja por tener un precio más bajo, es el mejor conductor de calor, lo que explica su uso en este proyecto, pues suele utilizarse en situaciones en que se desea calentar o enfriar rápidamente, en dispositivos refrigerantes, intercambiadores de calor, etc.

Tiene la ventaja de poder ser re utilizado indefinidamente porque no pierde sus propiedades físicas o químicas en el reciclaje.

#### **4. TUBERÍA DE COBRE**

Un tubo es un producto hueco, de sección normalmente redonda y periferia continua, que es utilizado generalmente para el transporte de líquidos o gases.

Por las características del cobre es común utilizar la tubería de este material, de manera masiva en muchos tipos de instalaciones, pues dentro de sus principales ventajas, tenemos la rapidez y facilidad de las tareas de preparación y colocación de tuberías, además son fabricadas por extrusión y estiradas en frío. La extrusión permite tubos de una sola pieza, sin costura, de paredes lisas y tersas, asegurando la resistencia a la presión de manera uniforme y un mínimo de pérdidas de presión por fricción en la conducción de fluidos. Las tuberías de cobre pueden ser flexibles o rígidas, en el caso de las rígidas, son ideales para la conducción de fluidos en instalaciones fijas. Por su resistencia a la corrosión, se asegura una larga vida útil. La unión de la tubería, se realiza por medio de la soldadura capilar, la cual, asegura que el conjunto de conexiones quede bien sellado.



Fig. 14. Tubo de Cobre Rígido y Flexible.

## 5. DISEÑO DE LA TUBERÍA

Con la finalidad de convertir la radiación solar en energía térmica o fotovoltaica se utilizan los colectores, que se encargan de que la radiación tenga incidencia en una superficie sólida, aumentando su temperatura, la cual requiere transferir el calor que ha generado a un fluido y/o produciendo electricidad que después tendrá el uso que se requiera según las necesidades.

Cuando las aplicaciones requieren temperaturas menores a  $70^{\circ}\text{C}$ , el tipo de colector más utilizado es el de tipo cama plana. Donde la eficiencia térmica, se define como la cantidad de calor útil obtenida, dividida por la cantidad de calor incidente considerando que su diferencia representa las pérdidas de energía hacia el ambiente circundante. El diseño del colector de cama plana está ya estandarizado, lo que varía son los tipos de materiales utilizados, y el diseño de la tubería, como en el caso de la Fig. 8, el fluido ingresa al colector y fluye por el cabezal inferior que reparte el flujo entre los tubos elevadores, que descargan sus flujos hacia el cabezal superior que conduce el fluido rumbo a la salida del colector.

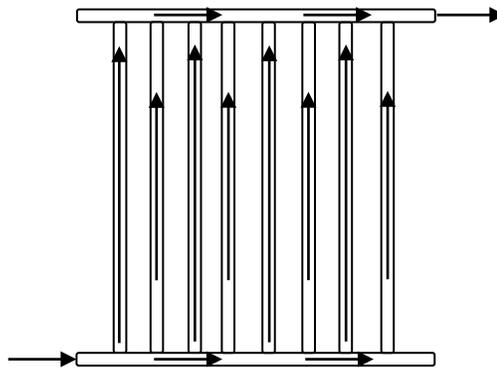


Fig. 15. Colector de cama plana.

En la Fig. 15, podemos ver que el fluido entra al cabezal inferior y se reparte entre los tubos elevadores, hasta llegar al cabezal superior, destacando que los flujos distribuidos en los tubos elevadores pueden o no ser iguales entre sí, dependiendo de la presión que se genera a lo largo de su trayectoria. Según el extremo del cabezal que se obstruye puede haber distribución tipo "U" y tipo "Z", la más recomendable en este caso es la distribución "Z" (Fig. 16), ya que el fluido sube por todos

los elevadores recorriendo trayectorias similares y obteniendo así, temperaturas iguales debido al flujo homogéneo.

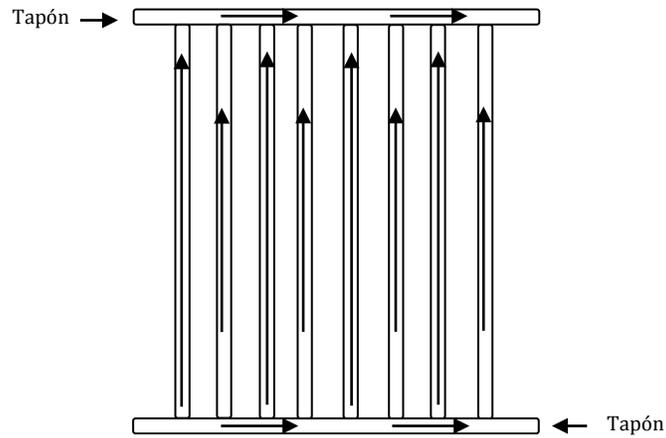


Fig. 16. Colector con distribución tipo "Z".

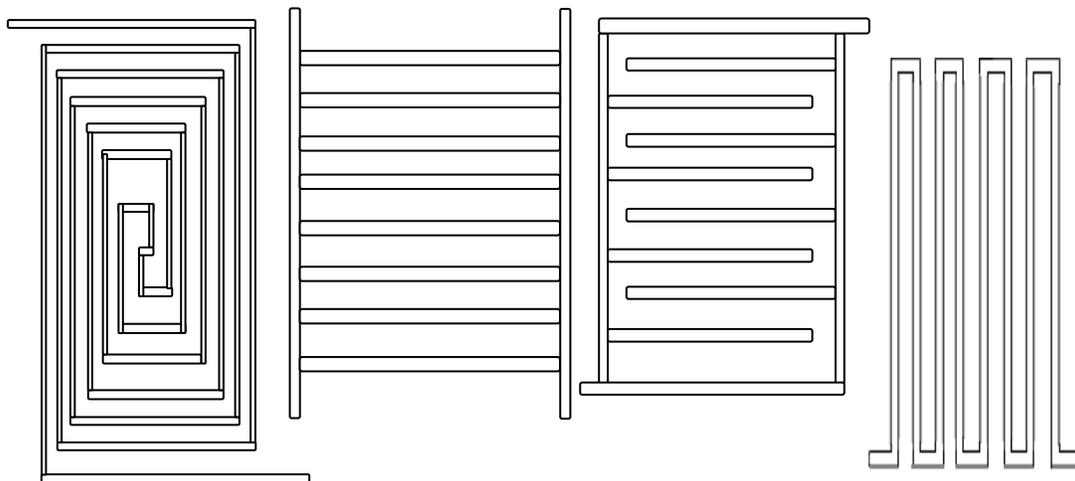


Fig. 17. Otros tipos de distribución para tuberías.



## 6. DEMANDA ENERGÉTICA DE UNA VIVIENDA ENCUESTA

Con el fin de determinar la factibilidad de un sistema híbrido térmico fotovoltaico interconectado a la red eléctrica y su instalación en casas habitación de interés social, se solicita su apoyo para responder las siguientes preguntas:

Datos del domicilio:

Colonia:	
Municipio:	

Características de la vivienda:

Tipo de casa:	Propia	( )	Rentada	( )	Prestada	( )
No. de habitantes:			No. de cuartos:			
No. de focos:			No. de Contactos:			
No. de focos normales:			No. de focos ahorradores:			
¿Qué tipo de combustible utiliza para el calentador de agua (Boiler)?						
Capacidad del contenedor de combustible:	30 Kg	( )	20 Kg	( )	Otro	( )
¿A qué temperatura suele utilizarlo?	Muy Caliente	( )	Caliente	( )	Tibia	( )
¿Cuántas personas se bañan al día en su casa?			Tiempo promedio que tardan:			

Aparatos electrodomésticos:

Televisor	( )	DVD	( )	Refrigerador	( )
Estéreo	( )	Horno de Microondas	( )	Computadora	( )
Video	( )	Lavadora	( )	Grabadora	( )
Plancha	( )	Secadora	( )	Horno eléctrico	( )
Otros:					

¿Estaría interesado en adquirir un sistema que le permita ahorrar electricidad y combustible en su casa habitación?

Si ( ) No ( ) ¿Por qué? \_\_\_\_\_

¿Conoce los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica y sus ventajas?

Si ( ) No ( ) ¿Por qué? \_\_\_\_\_

¿Cuánto dinero consideraría invertir en un sistema que le ofrezca estos beneficios?

Menos de \$5,000.00 ( ) Más de \$5,000.00 ( ) Otra Cantidad \_\_\_\_\_

Gracias por su colaboración.



## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENCUESTA

Como ya es bien sabido la mejor manera de diseñar un sistema, es conociendo las necesidades de la población que se considera el mercado meta para el producto, por ello, se llevo a cabo una encuesta en la región Tula – Tepeji, en las colonias donde se construyeron o construyen actualmente las casas habitación de interés social, habitadas por población de clase media y media alta, para poder obtener información sobre el interés de la gente en un sistema híbrido fotovoltaico térmico interconectado a la red, lo que nos dio como resultado lo siguiente:

De las 100 personas que fueron encuestadas, la mayoría cuenta con casa propia, la cual fue adquirida por medio de un crédito hipotecario de INFONAVIT, FOVISSSTE u otro, por lo cual, se considera más factible que inviertan en un sistema como el que está planteado en esta tesis, sobretodo teniendo en cuenta el ahorro económico que significa para las familias. El 63% tiene casa propia, el 34% la renta y el resto la tiene prestada.

Estas casas están habitadas por entre 4 y 6 personas, pues en su mayoría cuentan con 2 o 3 recamaras, sala, comedor, cocina y un baño completo, por lo tanto, tienen en promedio 9 focos y 8 contactos eléctricos por casa. Si calculamos la potencia total requerida con focos incandescentes obtenemos el siguiente resultado:

9 focos de 100 watts	x 100 watts	= 900 watts
8 contactos	x 150 watts	= 1200 watts
POTENCIA TOTAL		= 2100 watts

Debido a que se ha desarrollado por parte del Gobierno de nuestro país el programa "Luz Sustentable", en el cual, los usuarios cuyo consumo no rebase la tarifa de alto consumo (DAC) que es superior a 250 kilowatts por bimestre, podrán intercambiar 4 focos incandescentes viejos por 4 focos ahorradores nuevos de manera gratuita, encontramos en los resultados de la encuesta que en el 58% de las casas cuentan solo con focos ahorradores, en el 32% con 4 ahorradores y los demás incandescentes y solo el 10% tiene solo focos incandescentes, lo que quiere decir, que la mayoría de las personas saben de los beneficios de



usar focos ahorradores, primero porque los focos ahorradores tienen una vida útil de al menos 7 años, por lo cual se ahorra dinero en la compra de focos por varios años y además significa un ahorro en la factura de luz, dado que por ejemplo, una familia que paga un recibo con un total de \$46.00 pesos, podría ahorrar hasta \$17.00 al mes.

Si calculamos la potencia total requerida, pero con el uso de focos ahorradores tenemos el siguiente resultado:

9 focos	x 11 watts	=99 watts
8 contactos	x 150 watts	= 1200 watts
POTENCIA TOTAL		= 1299 watts

En cuanto al consumo de electricidad por el uso de aparatos electrodomésticos, la mayoría de las casas habitación cuenta con:

- |                            |             |
|----------------------------|-------------|
| Televisión                 | Licuada     |
| Minicomponente o grabadora | Computadora |
| Refrigerador               | Plancha     |
| Horno de Microondas        | Celular (2) |

Con respecto a la instalación de gas en las viviendas, todas utilizan gas licuado de petróleo, compuesto por 40% de butano y 60% de propano, es un combustible líquido y se va evaporando en el interior del tanque que puede ser estacionario o cilindros que se intercambian con el camión repartidor. El consumo de este combustible es básicamente en la cocina y en el calentamiento de agua para uso sanitario en el boiler, para que los habitantes de la vivienda puedan bañarse. El precio de un kilogramo de gas LP en el estado de Hidalgo es de \$11.50 hasta el mes de junio de 2012, el aumento será fijo de \$0.10 mensuales adicionales, por lo cual, el precio de un cilindro de 30 Kg es de: \$340.00 y de 20 Kg es de \$229.92. Considerando que cada una de las 4 personas que habitan la vivienda en promedio tarda 15 minutos en bañarse y se bañan a diario el consumo solo por la regadera es de 200 litros de agua al día. Por lo anterior, se requieren tener al menos 300 litros de agua caliente al día, lo cual debe tenerse en cuenta para el diseño del colector solar híbrido térmico fotovoltaico.

## 8. DATOS DE LA REGIÓN

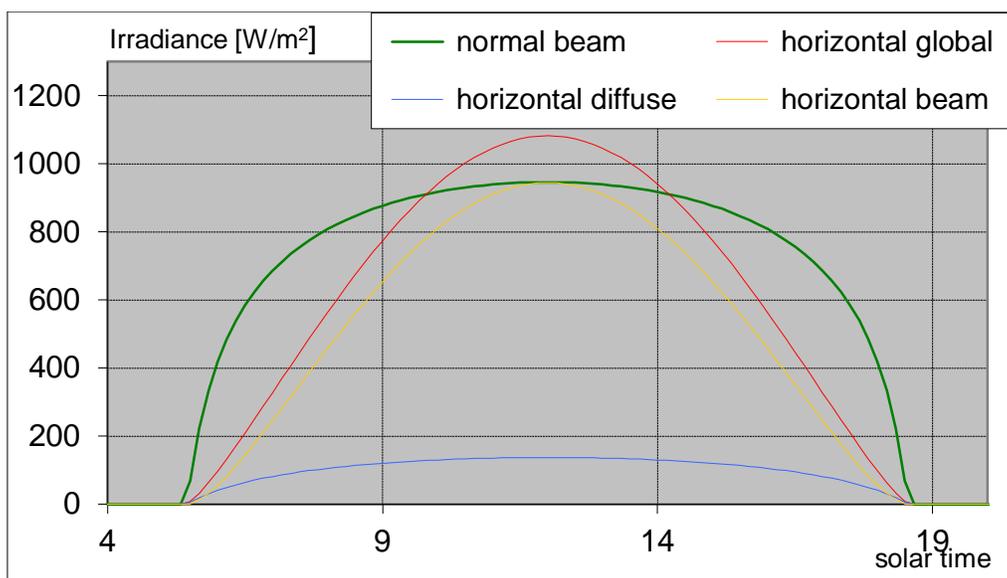
Tula de Allende, se encuentra en el estado de Hidalgo, se localiza en la región del Valle del Mezquital y ocupa un área de 333, 674 km<sup>2</sup>, se localiza en la zona horaria UTC – 5, a una latitud 20°03'00" N, una longitud 099°21'00" W y una altura de 2,066 metros sobre el nivel del mar. Tiene un clima templado frío, registra una temperatura anual de 17.6°C, una precipitación pluvial de 699 mm por año y el periodo de lluvias es de mayo a septiembre.

Como podemos observar, el estado de Hidalgo se encuentra en un área con radiación solar de entre 4.7 y 5.8 Kw/h/m<sup>2</sup> al día.



Mapa 5. Recurso Solar en la Republica Mexicana.

Haciendo uso de los datos anteriores y del software podemos obtener las horas disponibles del recurso solar, de lo cual, tenemos como resultado la siguiente tabla:

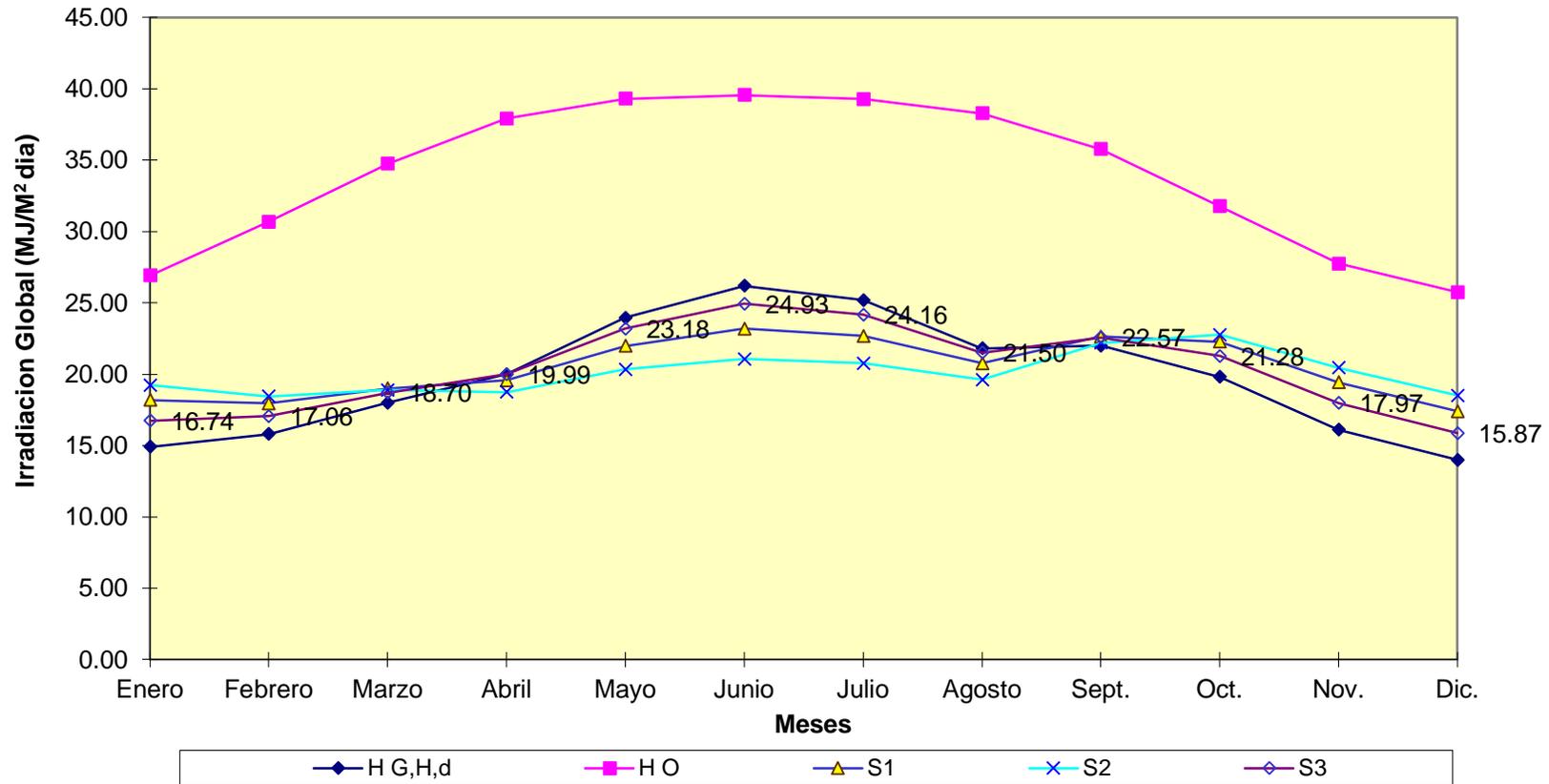


Grafica 1. Datos Solares.

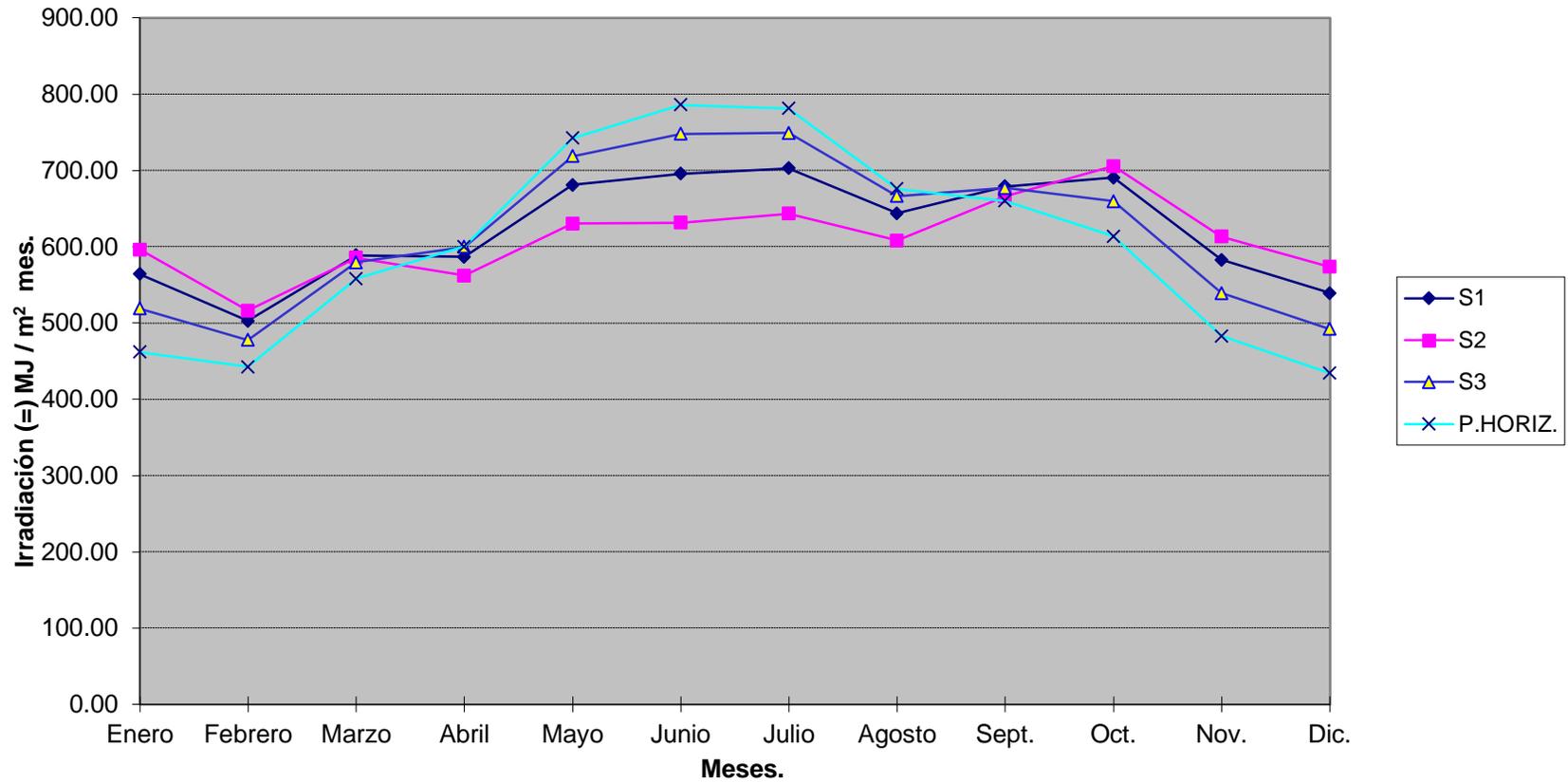
La tabla nos muestra que las horas de recurso solar disponibles para esta región del estado de Hidalgo es de aproximadamente 8 horas diarias y de irradiancia un valor aproximado de 950 W/m<sup>2</sup>.

En cuanto a los resultados obtenidos del estudio de disponibilidad de energía solar tenemos los siguientes resultados: Altura solar máxima anual: 93.07°, Altura solar mínima anual: 46.87°, Reflectividad del suelo: 0.26, albedo y la Constante solar: 4.9212 MJ/M<sup>2</sup>-HR.

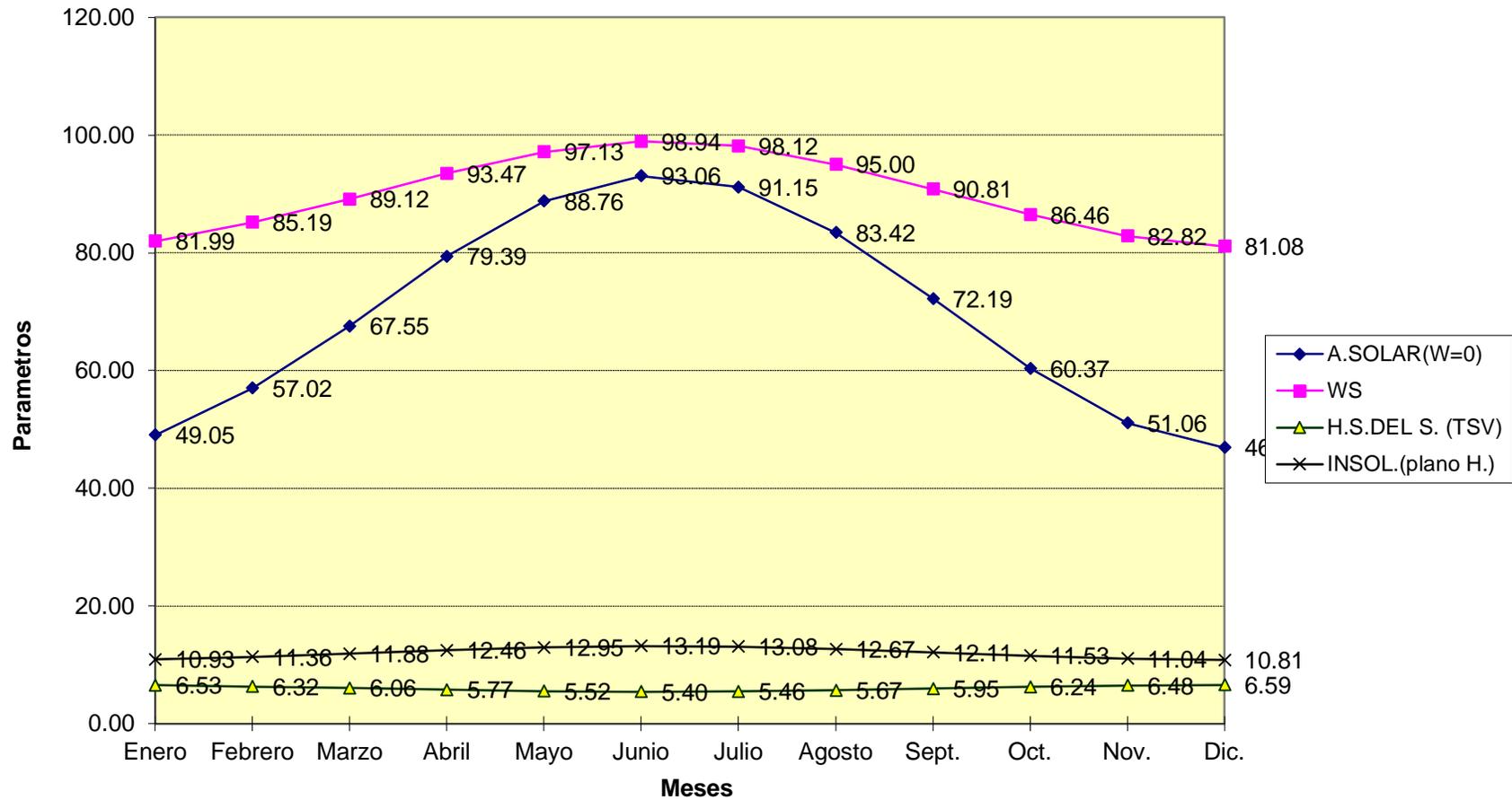
La altura solar máxima anual es de 93.07 grados, la altura solar mínima anual es de 46.87 grados, la preferencia anual (S1) 20.03 grados, preferencia de invierno (S2) de 30.045 grados y la preferencia de verano (S3) 10.015 grados, que es la época de mayor calor.



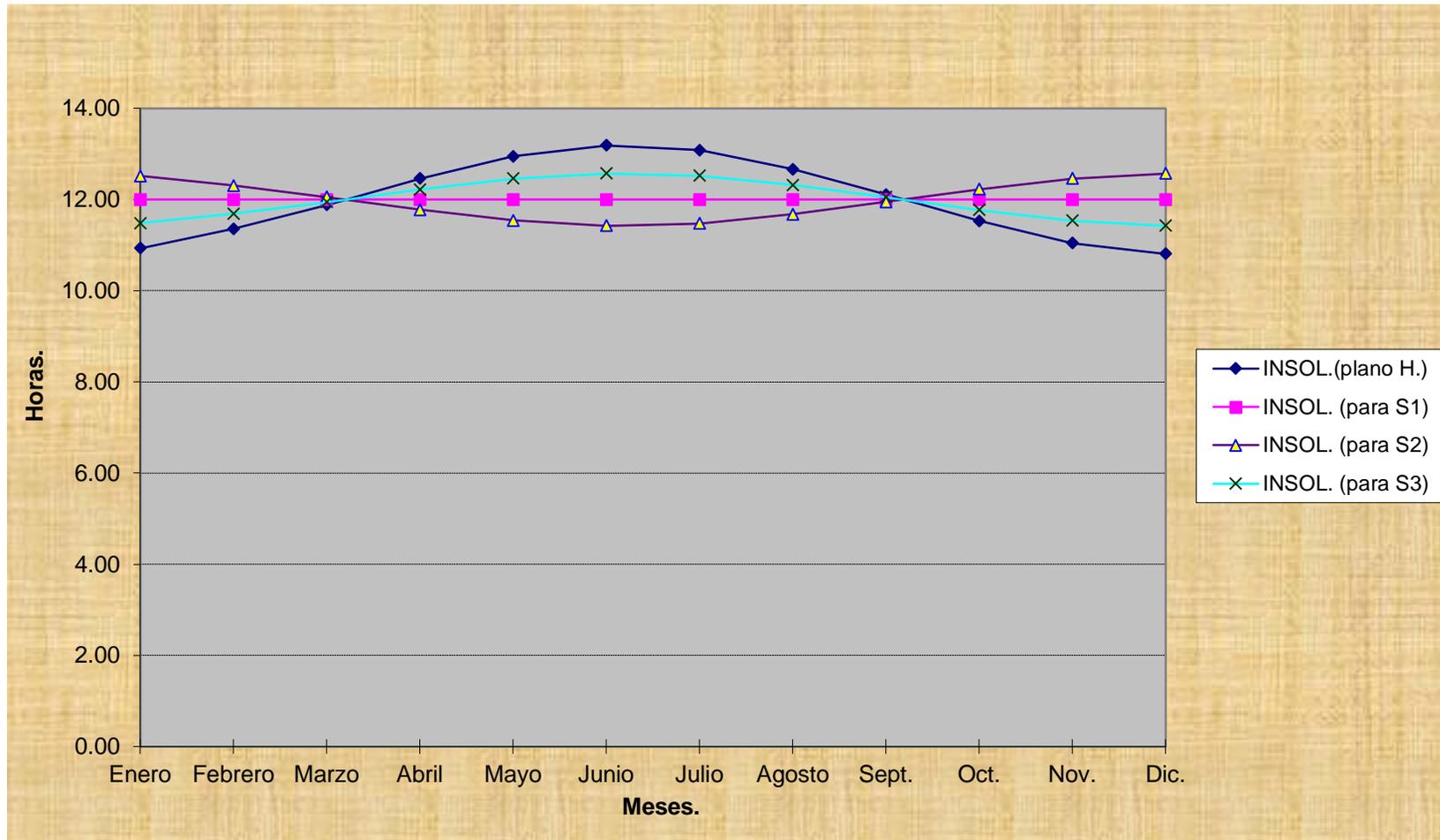
Gráfica 2. Irradiación Global Diaria.



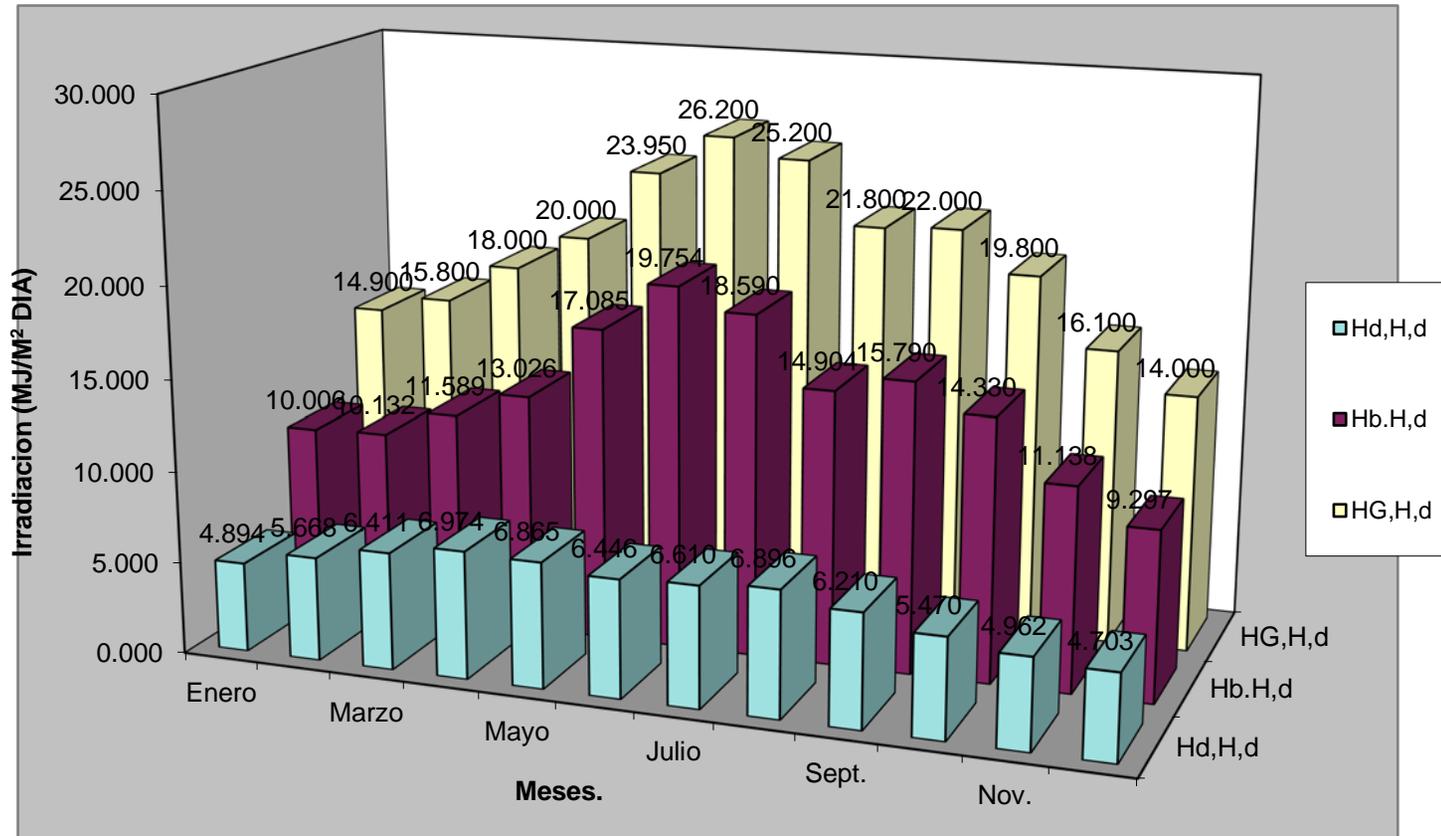
Grafica 3. Irradiación Global Mensual para los diferentes planos.



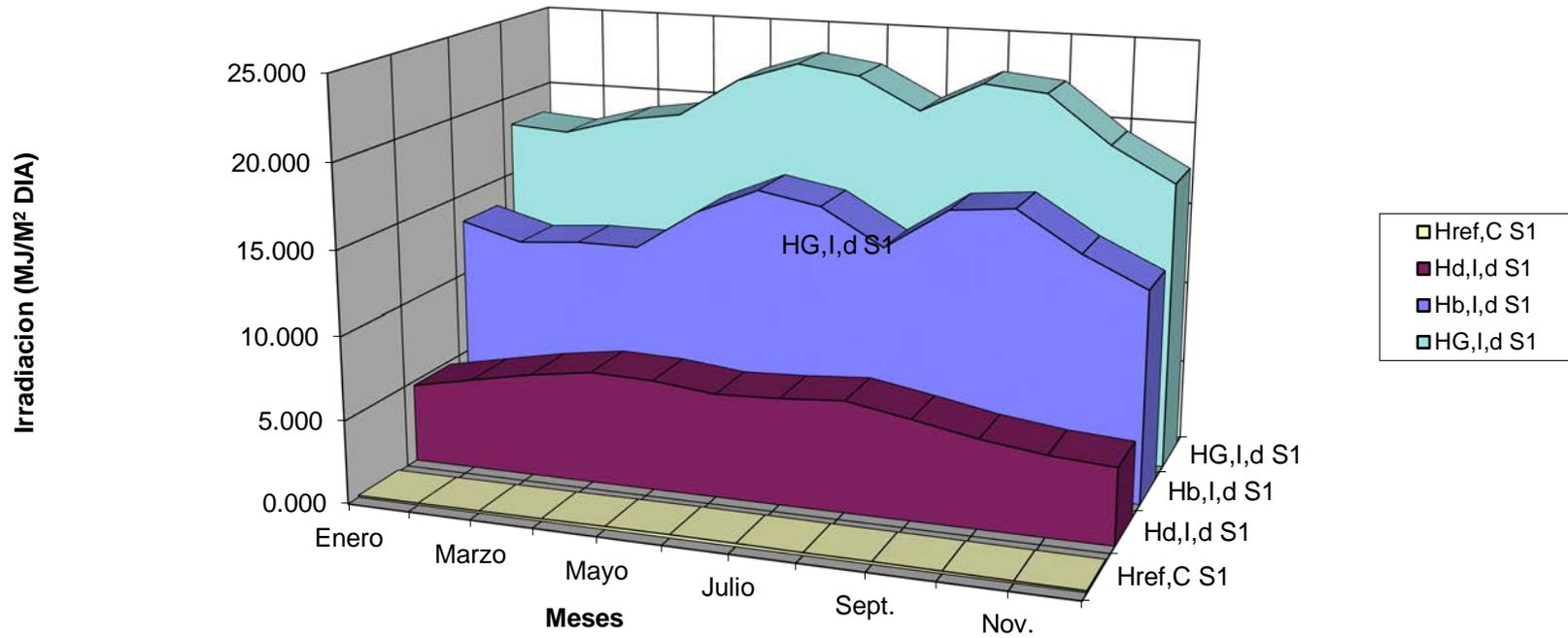
Grafica 4. Parámetros Solares.



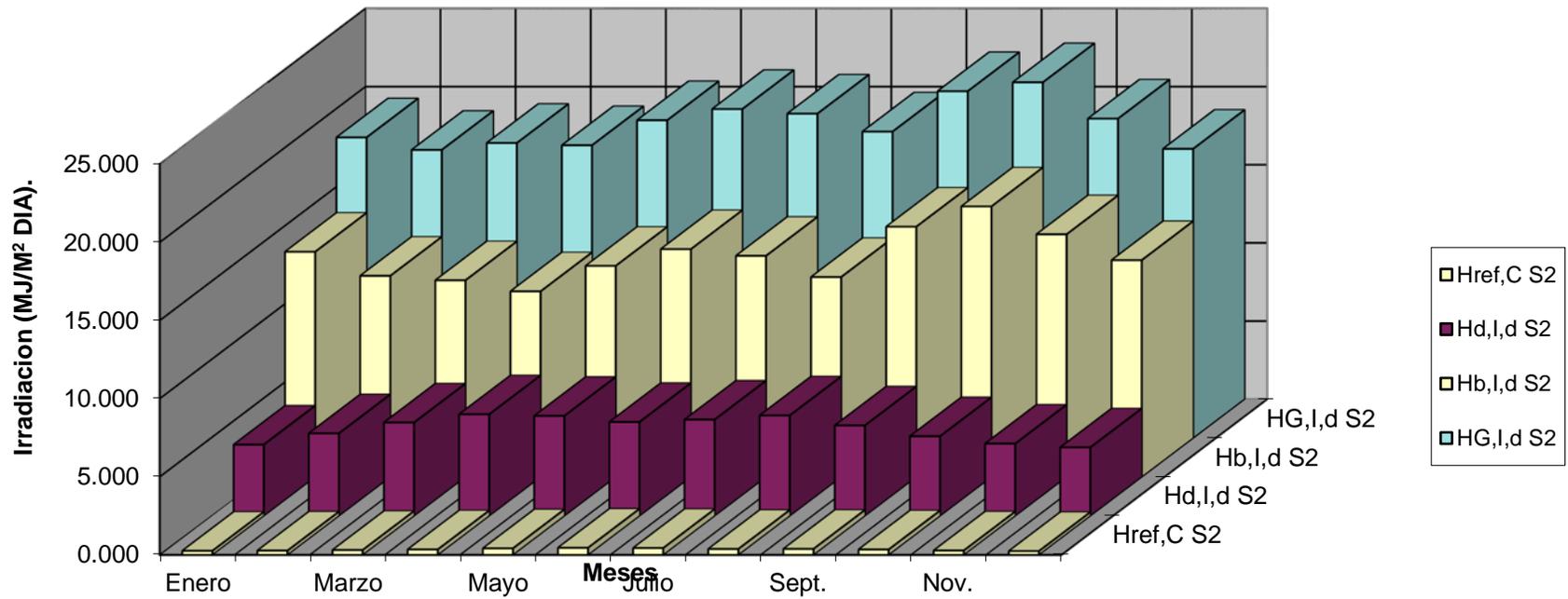
Grafica 5. Datos Solares.



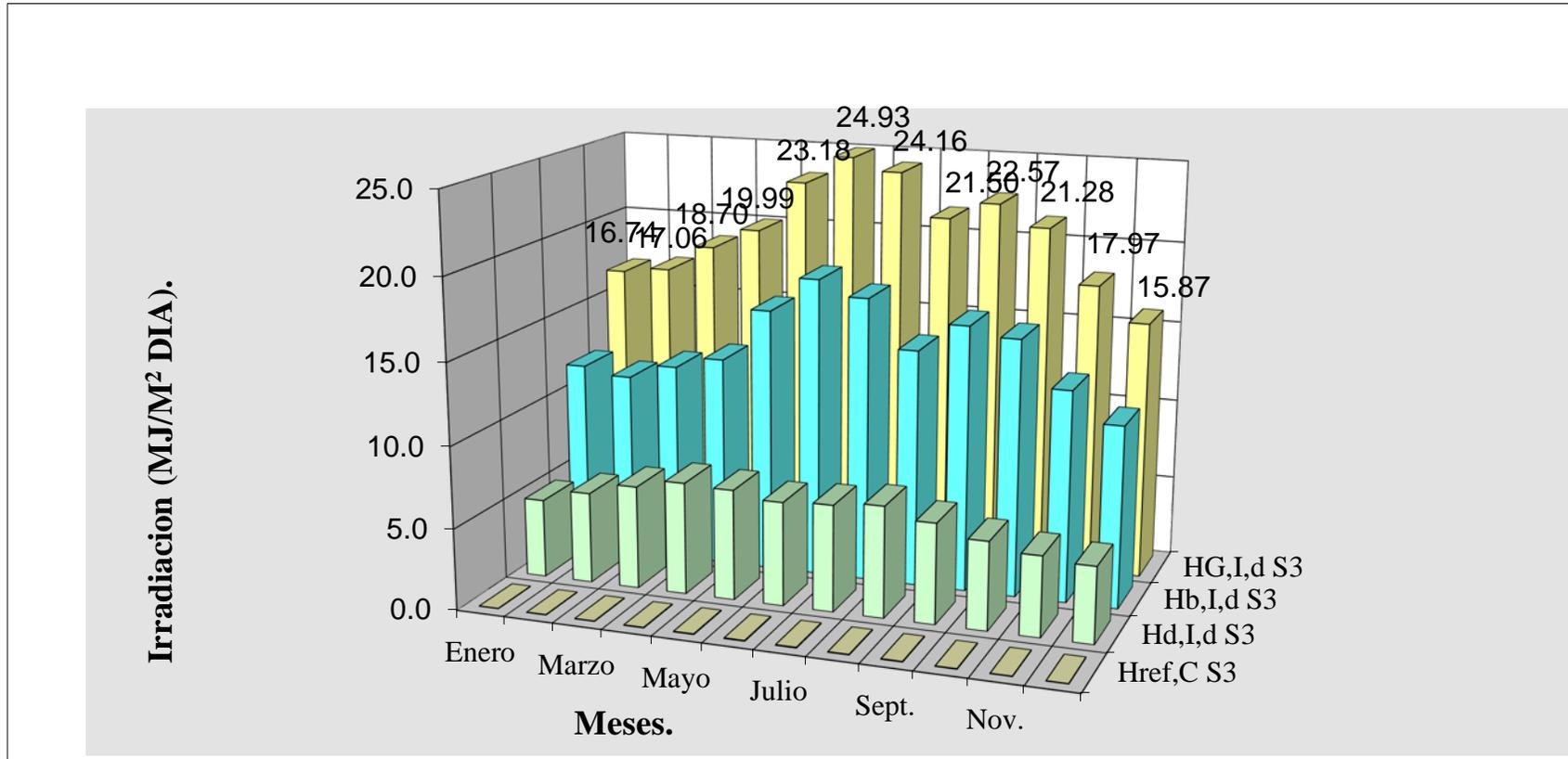
Grafica 6. Componentes de la Irradiación Solar en el plano horizontal.



Grafica 7. Componentes de la irradiación Solar en el Plano Inclinado. (S1)



Grafica 8. Componentes de la Irradiación Solar en el plano inclinado. (S2)



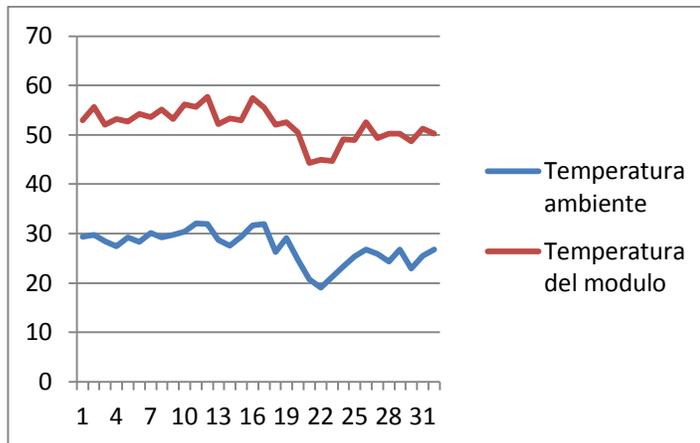
Grafica 9. Componentes de la Irradiación solar en el plano inclinado de máxima captación en verano.



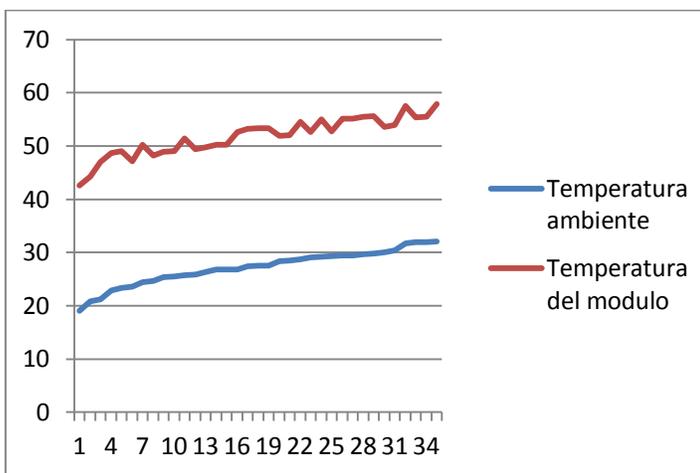
### 9. MEDICIONES INICIALES

Para comenzar con el trabajo, se realizaron mediciones de la temperatura ambiente en la zona donde se pretende hacer la instalación de este tipo de dispositivos híbridos, se obtuvieron los siguientes resultados, checando los dispositivos alrededor de las 12:00 y las 15:00 horas:

Temperatura ambiente	Temperatura del modulo
29,4	52,9
29,8	55,6
28,5	52
27,4	53,2
29,2	52,7
28,4	54,2
30,1	53,6
29,3	55,1
29,7	53,2
30,4	56,2
32,1	55,6
31,9	57,7
28,7	52,2
27,5	53,3
29,4	52,9
31,7	57,5
32	55,5
26,3	52,1
29,1	52,6
24,7	50,5
20,8	44,3
19,1	44,9
21,2	44,7
23,3	49,1
25,4	48,9
26,8	52,6
25,9	49,4
24,4	50,2
26,8	50,3
22,9	48,7
23,6	47,1
27,5	53,3
25,7	49,2
25,5	51,3
26,8	50,3



Grafica 10. Efecto de la temperatura sobre el modulo.



Grafica 11. Aumento gradual de la temperatura del modulo.

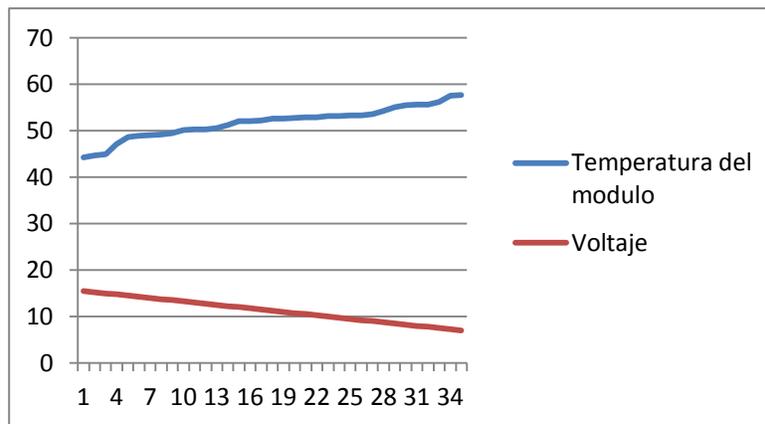
Nota: Se tienen más registros, si embargo solo se tomo una muestra de los mismos.



Con esto podemos comprobar que al estar expuestos al sol, los módulos fotovoltaicos tienden a aumentar su temperatura, conforme las horas van pasando a lo largo del día.

Después de estas observaciones y mediciones, podemos asegurar que la temperatura que los módulos pueden alcanzar es en promedio  $24.65^{\circ}\text{C}$  mayor a la temperatura del medio ambiente, aunque depende de factores como la temperatura ambiental, el viento y la radiación solar.

Considerando los resultados anteriores, se realiza la medición del voltaje del modulo FV, con el fin de analizar los cambios que hay respecto a su eficiencia, pues estamos conscientes que a mayor temperatura el modulo FV, tiende a tener perdidas en la producción de energía eléctrica.



Grafica 12. A mayor temperatura, menor voltaje.

## 10. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

### 10.1. CARACTERÍSTICAS DEL PANEL FOTOVOLTAICO

Los paneles que se utilizan para el prototipo y las mediciones cuentan con las siguientes características:

	<b>Modulo Tipo:</b>	QP6-125/12
<b>Potencia máxima:</b>	<b>Pmax:</b>	125 Watts
<b>Corriente a potencia máxima:</b>	<b>Imp:</b>	7.37 Amps
<b>Voltaje a potencia máxima:</b>	<b>Vmp:</b>	17.20 Volts
<b>Voltaje a circuito abierto:</b>	<b>Voc:</b>	21.72 Volts
<b>Corriente de corto circuito:</b>	<b>Isc:</b>	7.76 Amps
	<b>Temperatura:</b>	25 °C
	<b>Max. System Volt.:</b>	1000 Volts
	<b>Max. Fuse Rating:</b>	13 Amp
	<b>Cell Technology:</b>	Multi – Si Q - Cells

El proveedor es Energía Solar del Pacífico, S.A. de C.V., empresa con domicilio en Pico de Orizaba No. 11 – A, Colonia Lomas de Occipaco en Naucalpan, Estado de México.



Fig. 18. Conexión y Panel Fotovoltaico seleccionado.



Fig. 19. Caja de conexión de un módulo.

El módulo viene provisto de una caja de conexión rápida en la parte posterior del panel, la cual se encuentra sellada de manera hermética, de donde parten los cables de conexión para enlazar los paneles en strings. Recordemos que un string o

cadena es un conjunto de módulos fotovoltaicos conectados eléctricamente en serie.

La figura 20, nos muestra el esquema de conexión en serie de varios módulos fotovoltaicos que emplean cajas con conectores MC, mostrando como debe conectarse la salida del string.

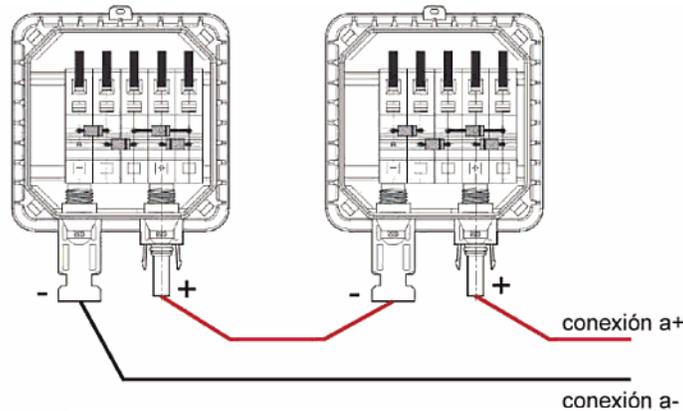


Fig. 20. Conexión en serie de módulos fotovoltaicos.

## 10.2. CALCULO DEL NUMERO DE PANELES REQUERIDOS

La energía que requiere al día el sistema es de 1299 W, considerando el uso de focos ahorradores y el uso de 8 contactos dentro de la vivienda. Si usamos la formula tenemos que el número de paneles se calcula de la siguiente manera:

$$N_p = \frac{E_c \cdot F_s}{H_p \cdot I_m \cdot \eta_w \cdot \eta_c \cdot \eta_l \cdot \eta_{cB}}$$

$$N_p = \frac{1299 \cdot 8\%}{8 \cdot 7.37 \cdot 97\% \cdot 97\% \cdot 95\% \cdot 95\%} = \frac{103.92}{50.13} = 2.07 \text{ paneles}$$

Según el resultado se requiere de 2.07, es decir, 2 paneles solares de este tipo para la instalación del sistema.

### 10.3. INCLINACIÓN DE LOS PANELES

Hay que tomar en cuenta que el modulo con los paneles deberá estar orientado hacia el sur y que la inclinación depende de lo que es la latitud del lugar en este caso de:  $20.03^\circ$ .

$$\text{Inclinación} = \text{Latitud} = 20.03^\circ$$

Por lo anterior, el modulo de 4 paneles deberá estar instalado con un ángulo de inclinación de  $36.03^\circ$  para lograr la mayor captación de energía solar.

### 10.4. CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA REFRIGERANTE

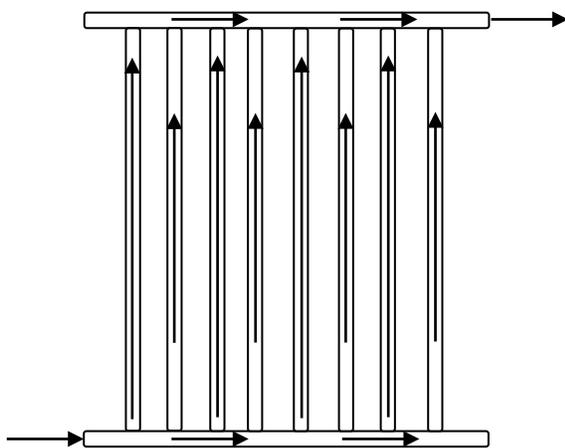


Fig. 21. Tipo de tubería seleccionada.

El serpentín que servirá como refrigerante de la celda fotovoltaica, usando tubería de cobre rígida, el fluido ingresa al colector y fluye por el cabezal inferior que reparte el flujo entre los tubos elevadores, que descargan sus flujos hacia el cabezal superior que conduce el fluido rumbo a la salida del colector.

Tanto el cabezal inferior como el superior se construyeron con tubería de cobre de 1 pulgada de diámetro.

Mientras que todos los tubos elevadores tienen una medida de  $\frac{1}{2}$  pulgada.

El sistema va a trabajar bajo el método de termosifón, lo cual, permite un gran ahorro en la construcción del sistema híbrido, ya que el sistema hidráulico estará conectado al tinaco de la casa habitación, sin usar un termo tanque. Para lograr una temperatura adecuada, en las épocas de poca radiación solar, el sistema hidráulico estará dotado de un calentador de paso, el cual, le dara en caso necesario una mayor temperatura al agua.



### **10.5. CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE ABSORBEDORA**

Para la superficie reflectante se utiliza lámina de aluminio, el cual se considera un material idóneo, por su buena conductividad térmica y su bajo costo.

Es una lamina de aluminio lisa, con un espesor de 0.5 mm.

### **10.6. CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE AISLANTE**

Es el punto básico para disminuir las pérdidas de calor por conducción en la parte inferior y lateral del colector. Las características que debe poseer el material utilizado para ser un buen aislante son: No debe deteriorarse, gasificarse o vaporizarse a temperaturas alrededor de los 200°C, resistencia a la repetición de los ciclos térmicos entre 35°C y 120°C, baja conductividad térmica, no debe desplomarse, compactarse o adherirse cuando se repiten los ciclos térmicos y de humedad y no debe absorber o retener agua.

Por lo anterior, y por la conductividad térmica de 0.026 W/(K x m), se eligió espuma de poliuretano, que es un material fácil de conseguir y de bajo costo, además de que tiene un manejo sencillo, hay tres tipos de presentaciones, laminas preformadas con dimensiones específicas, spray expandible y la mezcla de dos químicos, que es la que usamos para el prototipo por cuestiones de tiempo, dado que el molde preformado tarda alrededor de tres meses en ser entregado, sin embargo, dado que se pretende continuar con las investigaciones y mejorar el prototipo en este momento se espera tener para enero el molde de espuma de poliuretano.

### **10.7. CARACTERÍSTICAS DEL INVERSOR**

Con el fin de que se pueda convertir la corriente directa de las baterías en corriente alterna que se utiliza en los electrodomésticos de nuestros hogares, se conecta al sistema un inversor, la marca que se elige es SOLENER, que prometen la optimización del rendimiento del sistema hasta de 95%, generando una onda senoidal pura. Los modelos que la marca trabaja son:



Modelo	Potencia de salida	Tensión
Inversor - Arranque automático	250 W (continuos)	12 ó 24 Vcc
Inversor - Arranque automático	600 W (continuos)	12 ó 24 Vcc
Inversor - Arranque automático	1 500 W (continuos)	12 ó 24 Vcc
Inversor - Arranque automático	2 000 W (continuos)	12 Vcc
Inversor - Arranque automático	3 000 W (continuos)	24 ó 48 Vcc
Inversor - Trifásico 220 V / 380 + N	5 000 W	300 Vcc
Inversor - Trifásico 220 V / 380 + N	5 000 W (con cargador)	300 Vcc
Inversor - Trifásico 220 V / 380 + N	7 500 W	300 Vcc
Inversor - Trifásico 220 V / 380 + N	7 500 W (con cargador)	300 Vcc
Inversor - Trifásico 220 V / 380 + N	15 000 W	300 Vcc
Inversor - Trifásico 220 V / 380 + N	15 000 W (con cargador)	300 Vcc

Fig. 22. Tipo de inversor seleccionado.

Se selecciona el inversor de arranque automático de potencia de salida 1500 W continuos, con tensión de 12 o 24 V.

### 10.8. SISTEMA DE SUJECIÓN

Nuestro sistema se instalara en la azotea de la casa habitación, será un sistema fijo por lo cual, lo más adecuado es que el sistema cuente con una estructura de sujeción de suelo /tejado, que se instalará con una inclinación de 20.03°, que coincide con la latitud y obvio será dirigida al sur.

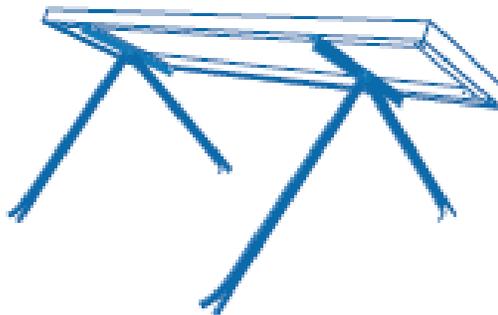


Fig. 23. Tipo de sujeción suelo al tejado.



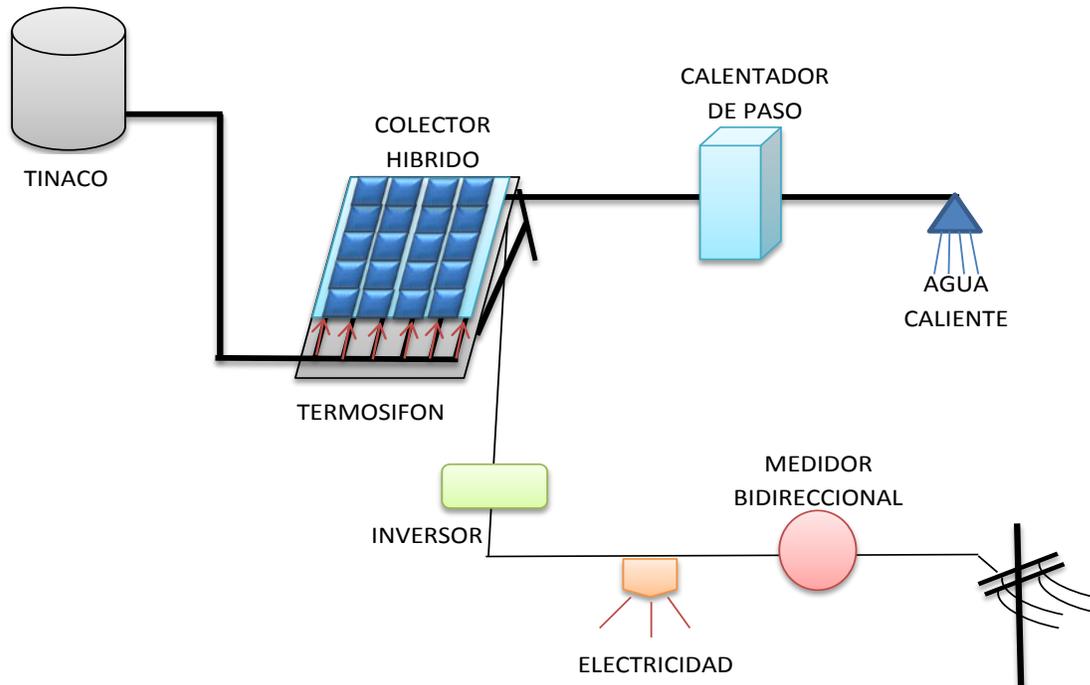
### **10.9. CABLEADO**

Teniendo en cuenta que los paneles tienen una corriente de corto circuito de 8.25 A, se determina el cálculo del calibre del conductor bajo la siguiente fórmula:

$$I = I_{sc} * 1.56 = 7.76 \text{ A} * 1.56 = 12.10 \text{ A}$$

Checando las tablas del fabricante se determina el calibre del conductor: es de 12 awg.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



El prototipo del colector solar híbrido térmico fotovoltaico que se construyó, cuenta con un serpentín de tubería de cobre, en el cual, tanto el cabezal inferior como el superior se construyeron con tubería de cobre de 1 pulgada de diámetro. Mientras que todos los tubos elevadores tienen una medida de  $\frac{1}{2}$  pulgada.



La tubería está adherida a una placa absorbente de aluminio y están aislados con espuma de poliuretano, el serpentín sirve como sistema de refrigeración para el módulo fotovoltaico, el cual, con el aumento de temperatura ve afectada su producción de electricidad y gracias al serpentín mejora considerablemente su eficiencia.





Se le incorporo una base par la sujeción del prototipo, la cual tiene la inclinación de 20.03°, acorde a la ubicación geográfica de la región Tula – Tepeji.

Esta base, permitirá la instalación más rápida y fácil del colector en las azoteas de las casas habitación, buscando solo el poder dirigirlos hacia el sur, para asegurar la mejor captación de energía solar.

Al estar expuesto al sol el panel fotovoltaico alcanzo las siguientes temperaturas:

<b>Temperatura ambiente</b>	31.9° C
<b>Temperatura del modulo</b>	57.7° C

<b>Voltaje a circuito abierto:</b>	<b>Voc:</b>	15.67 Volts
------------------------------------	-------------	-------------

Pero al comenzar a circular el agua por la tubería refrigerante, el voltaje a circuito abierto aumento, pues la temperatura disminuyo dentro del panel, y ese calor fue absorbido por el fluido obteniendo los siguientes valores:

<b>Temperatura del agua</b>	63.4° C
-----------------------------	---------

<b>Voltaje a circuito abierto:</b>	<b>Voc:</b>	19.54 Volts
------------------------------------	-------------	-------------



En total el costo del colector solar hibrido térmico fotovoltaico es aproximadamente de \$18,600.00, considerando precios de mayoreo de parte de los proveedores y ciertos convenios para la compra del material, desglosado de la siguiente manera:

Material	Costo
Paneles fotovoltaicos (2)	\$ 4,870.00
Lamina lisa de aluminio calibre 24	\$ 168.10
Tubo de cobre ½"	\$ 558.62
Tubo de cobre 1"	\$ 395.70
Espuma de Poliuretano	\$ 250.00
Soldadura y otros materiales	\$ 800.00
Inversor	\$ 4,508.00
Boiler de paso	\$ 1,650.00
<b>TOTAL material</b>	<b>\$ 12,400.42</b>
Mano de Obra e instalación	\$ 6,200.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 18,600.42</b>

## VI. CONCLUSIONES



- Fabricación del molde para la superficie aislante con espuma de poliuretano, para no aplicarla en espray, enero 2013.
- Investigaciones posteriores enfocadas a otros modelos de tuberías y al uso de materiales que sean más económicos, para hacerlo mas accesible sin sacrificar la eficiencia en su funcionamiento. Ya inicie las pruebas con polipropileno copolímero random (Tuboplus).
- Planes de negocio, en cuanto a la venta del dispositivo enfocado a las viviendas de interés social, en convenio con empresas constructoras de la región y con empresas proveedoras de materiales (Solartec y Enesol). Además de empleo para alumnos de TSU en Energías Renovables de la UTTT.
- Trabajo con alumnos de TSU en Mecatrónica para el diseño de un seguidor solar.
- Presentación del proyecto en el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), en el programa de Bioenergías y Fuentes Alternativas, para aplicación en el sector agropecuario.

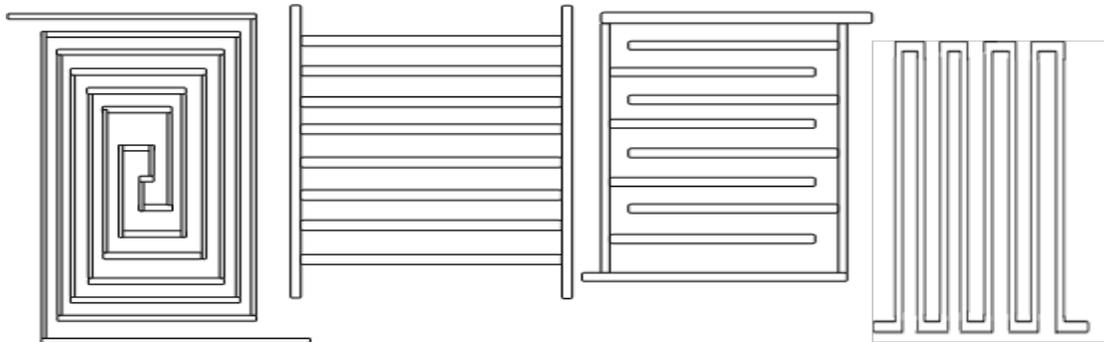


Fig. 17. Otros tipos de distribución para tuberías.



## VII. ANEXOS

### VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P. (2002) Hybrid Photovoltaic/Thermal solar systems. *Solar Energy* Vol 72, 3, pp 217-234.
- Zondag, H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C. and Van Steenhoven A.A. (2002) The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector. *Solar Energy* 72, pp 113-128.
- Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th. and Souliotis M. (2000) Low cost improvements to building integrated air cooled hybrid PV–Thermal systems. In *Proc. 16th European PV Solar Energy Conf.* Glasgow, UK. Vol. II, 1874–1877.
- Tripanagnostopoulos Y., Yianoulis P. and Patrikios D. (1996b) Hybrid PV–TC solar systems. In *Proc. of Int. Conf. WREC IV*, Denver, USA, 505–508.
- Chow TT, Ji J, He W. Photovoltaic-thermal collector system for domestic application. *J Sol Energy Eng* 2007; 129(2): 205–9.
- Tripanagnostopoulos Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Sol Energy* 2007; 81(9): 1117–31.
- Chow TT, He W, Ji J. Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. *Sol Energy* 2006; 80(3): 298–306.