

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA**

**ANÁLISIS DE UNA CENTRAL SOLAR DE  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTA**

**LUIS ROGELIO CANELA TORRES**

**ASESOR**

**GILBERTO GONZÁLEZ ÁVALOS**

OCTUBRE 2008

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A DIOS**

Por permitirme haber llegado hasta esta etapa de mí vida, que aunque estuvo llena de más responsabilidades, sin duda alguna, puedo decir que ha sido la más placentera.

También agradezco porque después de haberme ayudado a pasar por presiones, preocupaciones y desvelos me quedo la satisfacción de haber cumplido mis objetivos y metas.

Y sobre todas las cosas, gracias por permitir que mis familiares queridos puedan estar con migo para celebrar.

### **A MIS PADRES**

Les agradezco su apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida, y sobre todo por el gran esfuerzo que hicieron para darnos a mis hermanas y a mí la herencia más grande en este mundo, “El estudio”.

### **A MIS ABUELOS**

Por compartirme un poco de sus grandes experiencias recabadas en el transcurso de sus vidas y guiarme hacia la búsqueda de un mejor futuro.

### **A MIS HERMANAS**

Por el orgullo y alegría que me brinda su compañía y apoyo.

### **A MI ESPOSA**

Gracias por seguir paso a paso esta última etapa de mi carrera.

### **A MIS MAESTROS**

Por su paciencia y empeño para traspasar sus conocimientos y experiencias los cuales ayudan a formar un mejor futuro y a nosotros, nos proporcionan una herramienta para enfrentarnos a la vida de una forma más segura.

## **RESUMEN**

En este trabajo de tesis se dan a conocer las partes constitutivas de una central fotovoltaica, el funcionamiento de este tipo de centrales y saber que función desempeña cada equipo que conforma a la instalación.

Otra parte del trabajo es darnos a conocer que tan viable sería la instalación de una central de generación de energía eléctrica a través de la transformación de energía solar con los costos de este tipo de tecnología que existen en la actualidad.

En la tecnología Termo solar se dará a conocer los distintos tipos de tecnología que existen hoy en día para el aprovechamiento de la radiación solar y conoceremos cuales son los distintos tipos de colectores, sus aplicaciones y los lugares en la republica mexicana viables para la instalación de esta tecnología, además, se verá el funcionamiento de una planta termoeléctrica, conoceremos sus partes constitutivas mas importantes y la eficiencia desarrollada por el ciclo, además de añadir un campo con colectores cilíndrico parabólicos para aumentar su eficiencia y conseguir tener un ahorro en el combustible fósil que se quema para a producción del vapor.

# Lista de Figuras

Figura 2.1	rotación planetaria -----	5
Figura 2.2	estructura del sol -----	7
Figura 2.3	espectro electromagnético-----	8
Figura 2.4	grafica de nubosidad vs energía disponible-----	10
Figura 2.5	sistema pasivo-----	13
Figura 2.6	colector de placa plana-----	15
Figura 2.7	colector cilíndrico parabólicos -----	17
Figura 2.8	helióstatos-----	18
Figura 2.9	mapa con valores de irradiación diaria-----	19
Figura 2.10	la celda-----	22
Figura 2.11	panel fotovoltaico-----	23
Figura 2.14	sistema fotovoltaico-----	25
Figura 2.15	panel fotovoltaico en bancada-----	28
Figura 2.16	panel fotovoltaico en mástil -----	28
Figura 2.17	panel fotovoltaico sobre un tejado-----	29
Figura 2.18	tejado solar -----	29
Figura 3.1	Ubicación de la población a electrificar-----	31
Figura 3.2:	Ejemplo de gráfica del rendimiento del inversor -----	34
Figura 3.3	Influencia de la temperatura en un generador-----	35
Figura 3.4	Definición de las horas de pico solar-----	41
Figura 3.5.	Distancia entre filas para evitar sombras.-----	43
Figura 3.7	Ubicación de la red de baja tensión -----	49
Figura 3.8	Representación de la red-----	51
Figura 4.1	Transformaciones de energía en una central termoeléctrica-----	56
Figura 4.2	Arreglo de una instalación termoeléctrica con condensador-----	60
Figura 4.3	Arreglo de la instalación termoeléctrica con aporte solar-----	63

## Lista de tablas

Tabla 2.1	Valores de radiación solar -----	20
Tabla 3.1	Cuadro de consumo energético-----	32
Tabla 3.2	Características del Modulo Seleccionado-----	36
Tabla 3.3	Características técnica del inversor-----	37
Tabla 3.4	Irradiación solar diaria media, $H$ (kWh/m <sup>2</sup> ·día) -----	40
Tabla 3.5	Horas de pico solar, HPS (h) -----	41
Tabla 3.6	Cálculo de conductores en CD-----	48
Tabla 3.7	Calibre de conductores-----	48
Tabla 3.8	Características eléctricas-----	49
Tabla 3.9	cálculos de % de regulación en CA-----	49
Tabla 3.10	Caída de Tensión en la línea mas larga -----	50
Tabla 3.11	Estructura de postes-----	52
Tabla 3.12	Precio de la instalación fotovoltaica-----	52
Tabla 4.1	Valores de entalpía y entropía a la salida de la caldera-----	60
Tabla 4.2	entalpía y entropía a la salida de la turbina-----	62

# Contenido

Agradecimientos .....	ii
Resumen .....	iii
Lista de Figuras .....	iv
Lista de Tablas .....	v

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
1.1	Antecedentes.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2	Objetivo .....	¡Error! Marcador no definido.
1.3	Justificación.....	¡Error! Marcador no definido.
1.4	Metodología.....	¡Error! Marcador no definido.
1.5	Contenido de la tesis.....	¡Error! Marcador no definido.
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>ANTECEDENTES DE ENERGÍA SOLAR</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
2.1	El Sol .....	¡Error! Marcador no definido.
2.2	Radiación .....	¡Error! Marcador no definido.
2.3	Constante Solar.....	¡Error! Marcador no definido.
2.4	Características de la Radiación Solar .....	¡Error! Marcador no definido.
2.5	Radiación Terrestre.....	¡Error! Marcador no definido.
2.6	Tipos de Radiación. ....	¡Error! Marcador no definido.
2.7	Métodos para Medir la Radiación Solar .....	¡Error! Marcador no definido.
2.7.1	Piranómetro .....	¡Error! Marcador no definido.
2.7.2	Piroheliómetro .....	¡Error! Marcador no definido.
2.8	Aprovechamiento de la Energía Solar .....	¡Error! Marcador no definido.
2.9	Tipos de Sistemas para la Captación de la Energía Solar.....	¡Error! Marcador no definido.
2.9.1	Sistemas Pasivos.....	¡Error! Marcador no definido.
2.9.2	Sistemas Activos .....	¡Error! Marcador no definido.
2.10	Tipos de Colectores .....	¡Error! Marcador no definido.
2.10.1	Colectores de Placa Plana.....	¡Error! Marcador no definido.
2.10.2	Colectores Concentradores.....	¡Error! Marcador no definido.
2.10.2.1	Colectores Concentradores para la Conversión Térmica a Temperaturas Medias. ....	¡Error! Marcador no definido.
2.10.2.2	Colectores Concentradores para la Conversión Térmica a Altas Temperaturas. ....	¡Error! Marcador no definido.
2.11	Emplazamientos Adecuados por su Irradiación Solar a Nivel México. ....	¡Error! Marcador no de
2.12	Conversión Eléctrica: Sistemas Fotovoltaicos. ....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.1	Electrones y Huecos .....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.2	La Región N y la Región P.....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.3	La Celda.....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.4	Paneles Solares Fotovoltaicos (Psfv).....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.5	Parámetros del Panel .....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.6	Formas de Conexión de los Paneles Fotovoltaicos.....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.7	Sistema Solar Fotovoltaico (Ssfv) .....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.8	Baterías .....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.9	Parámetros de la Batería .....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.10	Interconexión de los Elementos de la Batería.....	¡Error! Marcador no definido.

2.12.11	Controlador de Carga.....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.12	Inversor de Tensión .....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.13	Soportes y Protección de Paneles .....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.14	Emplazamientos Adecuados para Aplicación de Tecnología Fotovoltáica en México .....	¡Error! Marcador no definido.
2.12.15	Aplicación de la Celdas Fotovoltáicas .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>CAPÍTULO 3 DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA</b> ¡Error! Marcador no definido.		
3.1	Descripción del Proyecto.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2	Cálculo de la Energía Diaria.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3	Dimensionado del Inversor y del Generador Fotovoltaico.	¡Error! Marcador no definido.
3.4	Cálculo de la Potencia .....	¡Error! Marcador no definido.
3.5	Módulos Seleccionados .....	¡Error! Marcador no definido.
3.6	Inversor .....	¡Error! Marcador no definido.
3.7	Cálculo De Número De Módulos A Utilizar .....	¡Error! Marcador no definido.
3.7.1	Número Máximo de Módulos por Ramal.....	¡Error! Marcador no definido.
3.7.2	Número Mínimo de Módulos por Ramal .....	¡Error! Marcador no definido.
3.7.3	Número de Ramales en Paralelo.....	¡Error! Marcador no definido.
3.8	Campo Solar .....	¡Error! Marcador no definido.
3.9	Separación Entre Filas de los Paneles Fotovoltaicos	¡Error! Marcador no definido.
3.10	Dimensiones del Campo Solar .....	¡Error! Marcador no definido.
3.11	Cálculo del Banco de Baterías.....	¡Error! Marcador no definido.
3.12	Características de Tensión y Corriente del Regulador	¡Error! Marcador no definido.
3.13	Soportes a Utilizar para la Colocación de los Paneles	¡Error! Marcador no definido.
3.14	Selección de Conductores de Sistema Fotovoltaico	¡Error! Marcador no definido.
3.15	Cálculo de Conductores en Corriente Alterna .....	¡Error! Marcador no definido.
3.16	Tipos y Estructura de los Postes a Utilizar .....	¡Error! Marcador no definido.
3.17	Ventajas de la Instalación Solar Fotovoltáica.....	¡Error! Marcador no definido.
3.18	Desventajas de las Instalaciones Solares Fotovoltáicas	¡Error! Marcador no definido.
<b>CAPÍTULO 4 ANALISIS DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR</b> ¡Error! Marcador no definido.		
4.1	Central Termoeléctrica .....	¡Error! Marcador no definido.
4.2	Equipo Principal de una Central termoeléctrica ...	¡Error! Marcador no definido.
4.3	Análisis de una Central Termoeléctrica de Ciclo Rankine con Condensador	¡Error! Marcador no definido.
4.4	Análisis de una Central Termoeléctrica de Ciclo Rankine con Aporte Solar	¡Error! Marcador no definido.
4.5	Calculo de Combustible Quemado Sin Aporte Solar y Sin Ciclo Regenerativo	¡Error! Marcador no definido.
4.6	Calculo de Combustible Quemado Con Aporte Solar y Ciclo Regenerativo	¡Error! Marcador no definido.
4.7	Ventajas de las centrales termosolares .....	¡Error! Marcador no definido.
4.8	Ventajas de las centrales termosolares .....	¡Error! Marcador no definido.
4.9	ANEXO 1 .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES</b> ..... ¡Error! Marcador no definido.		
5.1	CONCLUSIONES.....	¡Error! Marcador no definido.

# Capítulo 1

## Introducción

Para el desarrollo de este trabajo se tratarán temas que nos dan información de cuál es el nivel de aprovechamiento que hoy en día se le da al recurso solar en nuestro país y sus diversas aplicaciones. Esta energía no sólo es utilizada para la conversión a energía eléctrica si no que también puede ser aplicada para procesos de distinta índole como lo son: industrial, comercial, agrícola e incluso en el hogar.

Se realizará un diseño de una instalación fotovoltaica completa para la alimentación eléctrica de una población rural para conocer los costos de la misma y que tan viable resulta este tipo de tecnología en nuestros días.

Además, se analizará una instalación termoeléctrica de ciclo Rankine y se verá cual es la eficiencia de producción de electricidad, posteriormente, se le añadirá un aporte termosolar para conocer el ahorro de combustible que se producirá.

### 1.1 Antecedentes

Cuando en 1973 se produjeron eventos importantes en el mercado del petróleo en el mundo debido a la llamada *crisis del petróleo* que comenzó a partir del 17 de octubre de 1973, a raíz de la decisión de la Organización de los Países Exportadores de Petróleo Árabes (que agrupaba a los países miembros árabes de la OPEP más Egipto y Siria), anunciando que no exportarían más petróleo a los países que habían apoyado a Israel durante la guerra del Yom Kippur, que enfrentaba a Israel con Siria y Egipto. Esta medida incluía a Estados Unidos y a sus aliados de Europa Occidental.

Al mismo tiempo, los miembros de la OPEP acordaron utilizar su influencia sobre el mecanismo que fijaba el precio mundial del petróleo para cuadruplicar su precio.

El aumento del precio unido a la gran dependencia que tenía el mundo industrializado del petróleo, provocó un fuerte efecto inflacionista y una reducción de la actividad económica de los países afectados. Estos efectos se manifestaron en los años posteriores en un encarecimiento notable de esta fuente de energía no renovable, resurgieron las preocupaciones sobre el suministro y precio futuro de la energía. Resultado

de esto, los países consumidores, enfrentados a los altos costos del petróleo y a una dependencia casi total de este energético, tuvieron que modificar costumbres y buscar opciones para reducir su dependencia de fuentes no renovables.

Entre las opciones para reducir la dependencia del petróleo como principal energético, se reconsideró el mejor aprovechamiento de la energía solar y sus diversas manifestaciones secundarias tales como la energía eólica, hidráulica y las diversas formas de biomasa ; es decir, las llamadas energías renovables. Así, hacia mediados de los años setenta, múltiples centros de investigación en el mundo retomaron viejos estudios, organizaron grupos de trabajo e iniciaron la construcción y operación de prototipos de equipos y sistemas operados con energéticos renovables. Así mismo, se establecieron diversas empresas para aprovechar las oportunidades que se ofrecían para el desarrollo de estas tecnologías, dados los altos precios de las energías convencionales.

En la década de los ochenta, aparecen evidencias de un aumento en las concentraciones de gases que provocan el efecto de invernadero en la atmósfera terrestre, las cuales han sido atribuidas, en gran medida, a la quema de combustibles fósiles. Esto originó como resultado una convocatoria mundial para buscar alternativas de reducción de las concentraciones actuales de estos gases, lo que llevó a un replanteamiento de la importancia que pueden tener las energías renovables para crear sistemas sustentables. Como resultado de esta convocatoria, muchos países, particularmente los más desarrollados, establecen compromisos para limitar y reducir emisiones de gases de efecto de invernadero renovando así su interés en aplicar políticas de promoción de las energías renovables.

Hoy en día las tecnologías de aprovechamiento de energías renovables han madurado y evolucionado, aumentando su confiabilidad y mejorando su rentabilidad para muchas aplicaciones. Como resultado, países como Estados Unidos, Alemania, España e Israel presentan un crecimiento muy acelerado en el número de instalaciones que aprovechan la energía solar de manera directa o indirectamente a través de sus manifestaciones secundarias.

Además de la riqueza en energéticos de origen fósil, México cuenta con un potencial muy importante en cuestión de recursos energéticos renovables, cuyo desarrollo permitirá al país contar con una mayor diversificación de fuentes de energía, ampliar la

base industrial en un área que puede tener valor estratégico en el futuro, y atenuar los impactos ambientales ocasionados por la producción, distribución y uso final de las formas de energía convencionales.

## **1.2 Objetivo**

Dar a conocer que tan viable resulta la tecnología solar fotovoltaica para satisfacer las necesidades energéticas de una población pequeña al ser utilizada como una fuente alterna de generación de electricidad. Así mismo, aplicar tecnología termo solar con colectores cilíndrico parabólicos para mejorar la eficiencia de una central termoeléctrica de ciclo Rankine y saber si se produce ahorro en la quema de combustibles fósiles.

## **1.3 Justificación**

El principal motivo de la investigación de la conversión de energía solar a energía eléctrica es que esta forma alternativa de producción de energía eléctrica puede ser en un futuro no muy lejano, una opción importante de satisfacer las necesidades energéticas de una gran parte de la población en nuestro país. Hoy en día estamos viviendo una gran problemática debido a la escasez de recursos no renovables tales como el petróleo, carbón, etc., añadiéndose a esto, los grandes índices de contaminación con los que contamos en nuestro país. Esta fuente de energía puede ayudar a reducir de manera importante esta problemática. Conoceremos cuales son los distintos factores que provocan que este tipo de energía no sea explotada en mayor cantidad.

## **1.4 Metodología**

Para la realización de esta tesis fue necesario hacer una profunda investigación por Internet, libros y revistas para dar a conocer los precios y las características eléctricas de operación de los equipos a utilizar y también para conocer las tecnologías termosolares actuales que se utilizan con fines de producción de energía eléctrica, para posteriormente, hacer una aplicación en una planta termoeléctrica con un sistema híbrido (solar y termoeléctrico) y conocer los beneficios que nos proporciona tanto en ahorro de combustible como en el mejoramiento de la eficiencia.

## **1.5 Contenido de la tesis**

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción que da a conocer de manera concreta de lo que va a tratar la tesis, también presenta cual es el objetivo, la justificación, la metodología a seguir y el contenido de la tesis.

En el capítulo 2 se da a conocer cual es el nivel de aprovechamiento de energía solar con el que cuenta nuestro país y cuales son los distintas aplicaciones en las que se puede aprovechar este tipo de energía, además de cuales son los lugares de la republica Mexicana con más recurso solar.

En el capítulo 3 se dan a conocer cuales son las partes que conforman una central solar fotovoltaica así como cual es el papel que desempeña cada uno de estos componentes. Además de realizar un diseño de una central fotovoltaica para la alimentación de una pequeña población rural y conocer que tan viable es la implementación de este tipo de energía hoy en día.

En el capítulo 4 en este capítulo se analizara una central termoelectrica, se vera cual es la eficiencia de la planta y después se le añadirá una etapa regenerativa con aporte solar para ver en que cantidad aumenta su eficiencia y conocer que cantidad de combustible se ahorra.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de tesis.

## Capítulo 2

# Antecedentes de Energía Solar

### 2.1 El Sol

El Sol es una esfera gaseosa con un diámetro de 1 391 000 km. La Tierra da vueltas alrededor del Sol siguiendo una órbita elíptica de la cual el Sol ocupa un foco, la distancia media de la Tierra al Sol es de 150, 000,000 Km. Es mínima hacia el 15 de Enero y máxima a fines de Junio. Como se muestra en la Figura 2.1

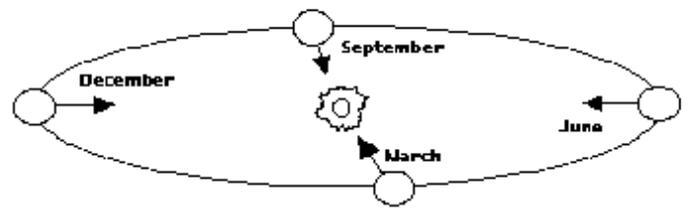


Figura 2.1 Rotación planetaria

El Sol se encuentra formado por seis regiones principales (Figura 2.2), las cuales se describen a continuación:

**a.- El núcleo:** contiene un 40% de la masa del Sol, menos del 2% del volumen total, ocupa un cuarto del radio solar y genera el 90% de su energía, en un proceso de fusión termonuclear en el cual el hidrógeno se transforma en helio. El hidrógeno contenido en el núcleo del Sol se encuentra ionizado como protones, los cuales se fusionan formando núcleos atómicos de helio, liberando energía en el proceso. Su temperatura se estima en 15 millones de grados Kelvin y su densidad de  $150 \text{ gm/cm}^3$ .

**b.- La zona radiactiva:** circunda al núcleo; contiene un gas tan denso, que los fotones de radiación electromagnética provenientes del núcleo duran cientos de miles de años atravesando esta zona para poder llegar a la superficie del Sol. La energía generada en el

núcleo se difunde a través de la zona radiactiva por absorción y emisión atómica. Las temperaturas en esta región alcanzan los 130,000 °K. Esta zona está localizada una distancia entre 160,000 km y 485,000 km del centro solar.

**c.- Zona convectiva:** es una región con mucha agitación donde circula el plasma y los gases ascienden muy calientes, se enfrían y descienden. Esta circulación es el principal mecanismo de transferencia de energía a la superficie solar. Estos procesos convectivos son observados en la superficie del Sol como pequeños gránulos y supergránulos en forma de celdas de 3,000 km de radio.

**d.- La Fotosfera:** es la superficie visible del Sol; rodea la zona convectiva; posee un espesor de aproximadamente 300 Km, es gaseosa y de baja densidad ( $10^{-8}$  g/cm<sup>3</sup>). Sus gases están fuertemente ionizados y con la capacidad de absorber y emitir radiación. La mayor parte de la radiación solar que nos llega proviene de esta capa, su temperatura es cercana a los 5,800 °K. En esta zona se observan áreas oscuras llamadas manchas solares las cuales son las partes más frías de la superficie con temperaturas de 3.800 °K. Su tamaño es similar al de un planeta; allí se presentan intensos rizados magnéticos.

**e.- La Cromosfera:** que está justo sobre la fotosfera, es una fina región de gas que se observa con un color rojizo-anaranjado, de unos 10,000 Km de espesor. Es esencialmente transparente a la radiación emitida desde la fotosfera.

**f.- La Corona:** es la tenue atmósfera exterior compuesta de un halo, el cual, sólo se ve durante los eclipses totales de sol.

El sol es muy estable, gracias a ello la temperatura en la Tierra es relativamente constante, condición que permanecerá inalterable por mucho tiempo respecto a la escala de la vida humana. Ha cambiado muy poco en los últimos tres mil millones de años y se estima no cambiará mucho en los próximos tres mil millones. Por esta razón se considera que su radiación es una fuente inagotable de energía.

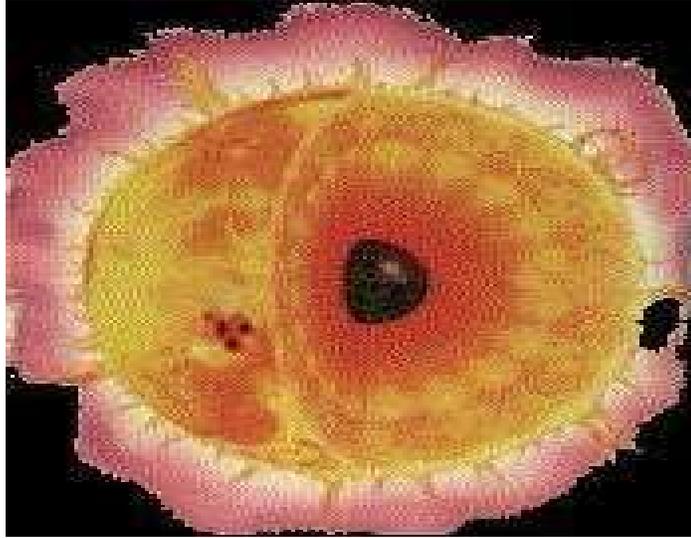


Figura 2.2 Estructura del sol

## 2.2 Radiación

La radiación es la transferencia de energía por *ondas electromagnéticas*, se produce directamente desde la fuente (el sol) hacia afuera en todas las direcciones. La radiación es un proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio o de algún medio. Todas las formas de radiación son producidas por cargas aceleradas. Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas.

La tasa a la cual la radiación es recibida por una superficie por unidad de área se denomina irradiancia, la misma que se expresa en unidades de potencia por unidad de área,  $W/m^2$ .

La cantidad de radiación recibida por una superficie por unidad de área durante un determinado período se denomina irradiación. Se expresa en unidades de energía por unidad de área,  $Wh/m^2$ .

## 2.3 Constante Solar

Se define la constante Solar como la energía en unidad de área que llega desde nuestra estrella. Las mediciones más recientes apuntan que el valor de esta constante solar

antes de sufrir la atenuación al atravesar la atmósfera es de  $1367 \text{ W/m}^2$ . La variación de distancia entre la Tierra y el Sol provoca que este valor no sea sostenido a lo largo de todo el año sino que cae hasta  $1320 \text{ W/m}^2$  en Junio/Julio y sube hasta  $1400$  en Enero y Diciembre.

## 2.4 Características de la Radiación Solar

Por otro lado, la energía no se encuentra uniformemente distribuida en todo el espectro electromagnético Figura 2.3, este se puede agrupar en las siguientes regiones:

a.- La región llamada visible ( $0.35 \mu\text{m} < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$ ) porque es el rango que puede detectar el ojo humano y dentro del cual están los colores violeta ( $0.4 \mu\text{m}$ ), azul ( $0.45 \mu\text{m}$ ), verde ( $0.5 \mu\text{m}$ ), amarillo ( $0.55 \mu\text{m}$ ), anaranjado ( $0.6 \mu\text{m}$ ) y rojo ( $0.70 \mu\text{m}$ ).

b.- La región invisible más allá del rojo ( $\lambda > 0.75 \mu\text{m}$ ), conocida como infrarrojo lejano o región de las ondas de calor.

c.- La región invisible antes del violeta ( $\lambda < 0.35 \mu\text{m}$ ), denominada ultravioleta.

De acuerdo con lo anterior, a cada región corresponde una fracción de la constante solar, distribuida así: 7 % al ultravioleta ( $95.7 \text{ W/m}^2$ ), 47.3 % al visible ( $646.6 \text{ W/m}^2$ ) y 45.7 % al infrarrojo ( $624.7 \text{ W/m}^2$ ).

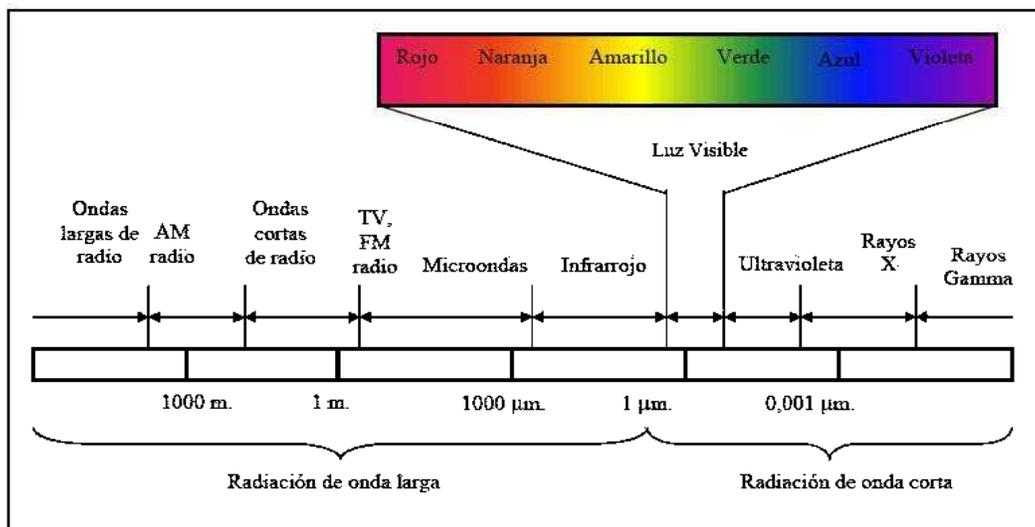


Figura 2.3 Espectro Electromagnético

## 2.5 Radiación Terrestre

La atmósfera en su mayoría es transparente a la radiación solar entrante. Considerando, que al tope de la atmósfera llega un 100 % de radiación solar, sólo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa hacia la superficie (esto hace que un 51 % de radiación llegue a la superficie terrestre). Un 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30 % se pierde hacia el espacio, de este valor, la atmósfera dispersa un 6 %, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4%.

## 2.6 Tipos de Radiación.

En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir estos tipos de radiación:

*a.- Radiación directa:* la que se recibe directamente del Sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica. La radiación extraterrestre es, por tanto, radiación directa.

*b.- La radiación difusa:* es la que se recibe del Sol, después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro, aun de día, como sucede por ejemplo en la Luna.

*c.- Radiación terrestre:* la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, etc.

*d.- Radiación total:* la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie.

Por ejemplo, sobre una pared o una ventana, incide la radiación directa del Sol, la difundida por las nubes y por el cielo y, además, puede entrar la luz reflejada por algún otro objeto frente a la pared o ventana. Un caso particular, pero de mucho interés práctico en el estudio de la energía solar, es el medir la radiación total sobre una superficie horizontal "viendo" hacia arriba. En este caso puede considerarse que no existe radiación terrestre y se conoce también como radiación global. Por tanto, la radiación global es la suma de la directa más la difusa.

La atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación que recibe del Sol. Por ejemplo, en un día muy despejado, una parte relativamente pequeña se convierte en

radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa. La radiación difusa, es la que proviene del cielo azul. En cambio, en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable. Las nubes densas tienen un albedo (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, una gran parte de la radiación solar se refleje al espacio exterior. Además, la energía que logra pasar a través de las nubes, es únicamente radiación difusa. En la grafica de la Figura 2.4 podemos ver el % de energía disponible en la superficie de la tierra dependiendo del grado de nubosidad.

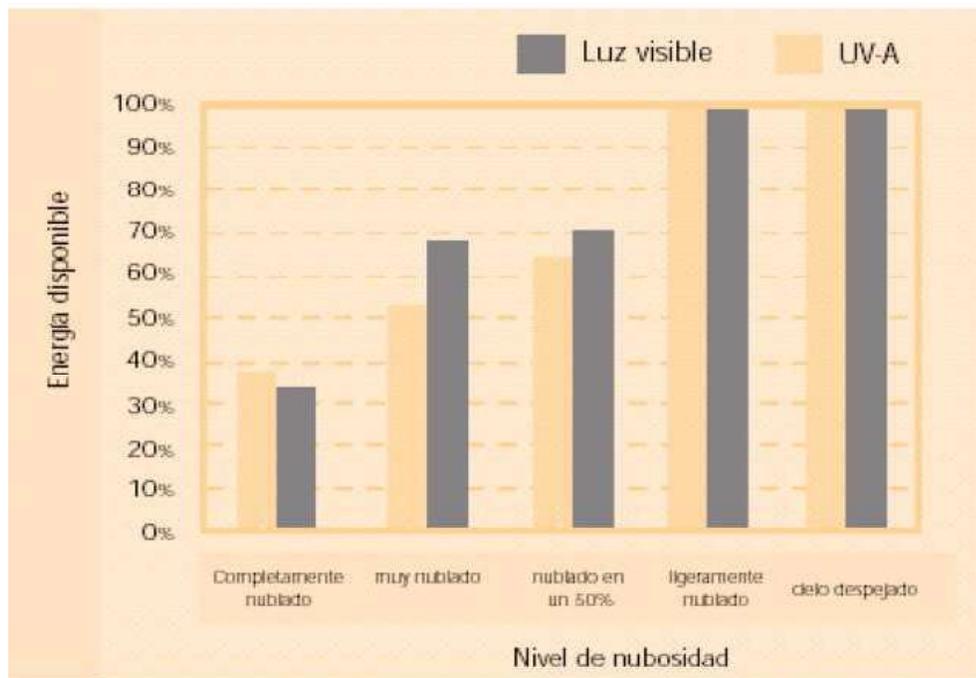


Figura 2.4 Grafica de nubosidad vs energía disponible

## 2.7 Métodos para Medir la Radiación Solar

Medir la radiación solar es importante para un amplio rango de aplicaciones como: en el sector de la agricultura, ingeniería, entre otros, destacándose el monitoreo del crecimiento de plantas, análisis de la evaporación e irrigación, arquitectura y diseño de edificios, generación de electricidad, diseño y uso de sistemas de calentamiento solar, implicaciones en la salud (ej. cáncer de piel), modelos de predicción del tiempo y el clima, y muchas otras aplicaciones más. Por lo tanto, a continuación se muestran los métodos más utilizados para la medir la radiación solar.

### **2.7.1 Piranómetro**

Existen varios métodos para medir la radiación solar, el método más aceptado comúnmente, es el uso de un piranómetro.

Un piranómetro, es un instrumento para medir la irradiancia global (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal. El tipo más común de piranómetros, consiste en dos sensores de temperatura, uno de ellos expuesto a la radiación solar y ennegrecida y el otro, protegido de la radiación. Si los dos sensores se encuentran en condiciones similares en todo, menos en el hecho de estar expuestos a la radiación, habrá una diferencia de temperatura entre ellos. La hipótesis de trabajo de un piranómetro, es que la irradiancia es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos sensores. Para evitar ruido en las lecturas, causado por el viento y otros factores meteorológicos, el sensor expuesto a la radiación (y a veces también el otro) suelen estar protegidos por un hemisferio de vidrio. Este hemisferio, de características ópticas adecuadas, permite el paso de la radiación, pero evita el enfriamiento por viento, lo cual alteraría la lectura.

### **2.7.2 Piroheliómetro**

Otro instrumento para medir radiación solar es el piroheliómetro. El piroheliómetro es un instrumento que se enfoca directamente al Sol para medir exclusivamente la radiación que proviene de él y de sus alrededores cercanos. Es decir, es un instrumento que mide radiación directa. A diferencia del piranómetro, que suele instalarse fijo, el piroheliómetro debe contar con un sistema de movimiento de relojería para seguir el Sol con gran precisión.

La información generada por estos aparatos debe ser registrada, ya sea por un método gráfico o electrónico. Es necesario hacer las mediciones, para tener los valores efectivos de energía disponible o incidente sobre un colector.

## **2.8 Aprovechamiento de la Energía Solar**

La radiación solar se puede aprovechar de tres distintas maneras:

**a.- Directa.** Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.

**b.- Térmica.** Se denomina "térmica" la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas.

**c.- Fotovoltáica.** Se llama "fotovoltáica" la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico.

## **2.9 Tipos de Sistemas para la Captación de la Energía Solar**

Para el aprovechamiento de la energía solar, lo primero es su captación, aspecto dentro del que se pueden distinguir dos tipos de sistemas: Sistemas activos y sistemas pasivos.

### **2.9.1 Sistemas Pasivos.**

La energía solar térmica pasiva nos permite producir energía sin necesidad de utilizar ningún medio mecánico. El proceso térmico pasivo es un proceso totalmente natural en el que el sol se emplea para el calentamiento del agua circulante por conductos o placas que posteriormente es utilizada para la climatización de ambientes o el agua caliente sanitaria, tanto a nivel doméstico como industrial. El agua caliente se aprovecha directamente o se almacena en un depósito para su posterior uso. En la Figura 2.5 se presenta un ejemplo de implementación de un sistema pasivo.

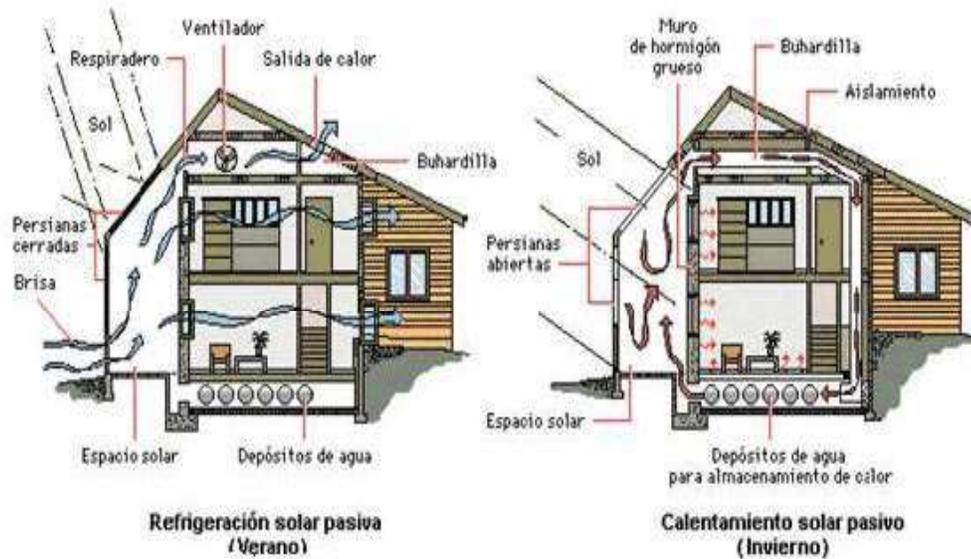


Figura 2.5 Sistema Pasivo

## 2.9.2 Sistemas Activos

La energía solar térmica activa obtiene electricidad a partir de una serie de tecnologías que permiten la transformación del calor obtenido por la radiación solar. La radiación solar directa se concentra por diversos métodos en las centrales solares obteniéndose calor a media o alta temperatura.

El funcionamiento consiste en concentrar la luz solar mediante espejos (helióstatos), cilindros o discos parabólicos para alcanzar altas temperaturas que se utilizan para generar vapor y activar una turbina que produce electricidad por medio de un generador. En este proceso no se producen las emisiones contaminantes de las centrales térmicas convencionales.

## 2.10 Tipos de Colectores

A continuación se presentan los tipos de colectores existentes para la captación de energía solar.

Los colectores solares pueden ser de dos tipos principales: los de placa plana y los de concentración.

### **2.10.1 Colectores de Placa Plana.**

Dentro de los diversos tipos de colectores solares, los colectores solares planos, Figura 2.6, son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores, difícilmente pasa los 100 °C.

Las ventajas que podemos obtener de este tipo de colectores con respecto a los colectores de enfoque, que concentran la radiación solar; es que éstos utilizan la energía solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son mecánicamente de construcción más simple que los colectores concentradores. Las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de fruta y granos.

Los colectores planos están compuestos generalmente por los siguientes elementos:

- Superficie captadora de la radiación solar
- Circuito por donde circula el fluido que transfiere el calor captado
- Cubierta transparente
- Aislamiento térmico
- Caja protectora que acopla el conjunto al resto de la instalación

La placa captadora es el elemento principal que recoge la radiación solar y transmite el calor que ésta transporta. Está construida de material metálico negro, o plástico cuando la temperatura es inferior a 50 °C. Se orienta hacia el Sur con una inclinación igual a la latitud geográfica del lugar.

Esta placa debe absorber la máxima radiación posible para convertirla en energía térmica con el mayor rendimiento y transferir la mayor cantidad posible de calor al fluido portador. Para mejorar estas placas se emplean los llamados "recubrimientos selectivos", productos de máxima absorción de radiación y mínima emisión.

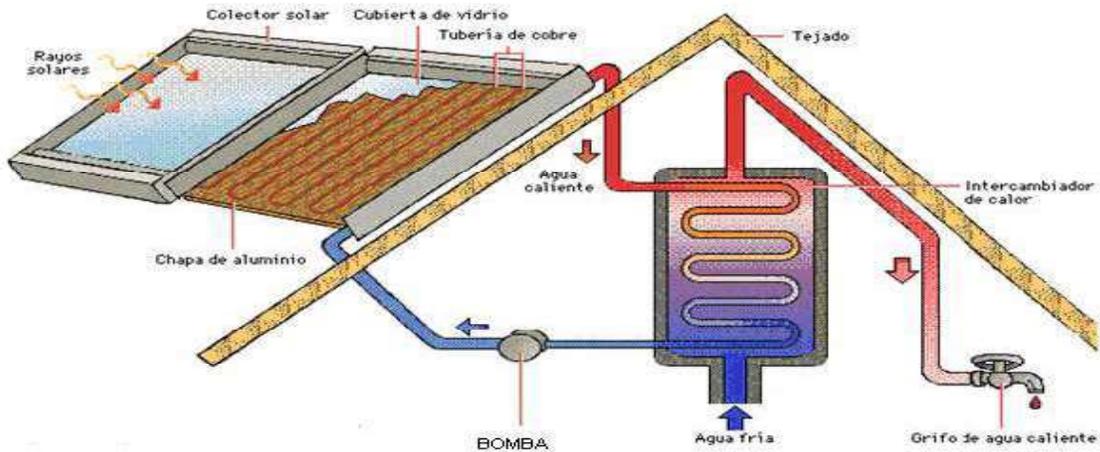


Figura 2.6 Colector de placa plana

### 2.10.2 Colectores Concentradores.

Existen muchas aplicaciones, sobre todo a nivel industrial, donde se necesita que la energía sea liberada a altas temperaturas. Como se mencionó antes, esto no se puede lograr con los colectores solares planos debido a las características propias de este tipo de colectores ya que la radiación solar es una energía de baja intensidad. En consecuencia, para obtener temperaturas altas (arriba de los 100 °C), se hace necesario incrementar la intensidad de la energía solar. Esto se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (sol) y la superficie absorbente, que debe ser pequeña comparada con la del dispositivo óptico. Esta es precisamente la función que desempeñan los colectores concentradores. De esta manera, en el absorbente, podemos tener densidades de energía que van desde 1.5 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico.

Con los colectores concentradores de energía solar, se pueden obtener temperaturas entre 100 y 500 °C si se usan colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500 °C si el sistema óptico de los colectores tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500 °C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

Aunque con este tipo de colectores se pueden obtener altas temperaturas de operación, estos presentan varios problemas técnicos desde el punto de vista Ingenieril comparados con los colectores solares planos. Deben orientarse continuamente al sol de manera precisa mediante un mecanismo apropiado debido a que este tipo de colectores utilizan únicamente la energía solar directa.

### **2.10.2.1 Colectores Concentradores para la Conversión Térmica a Temperaturas Medias.**

Para obtener temperaturas superiores a los 100 °C se debe concentrar la radiación solar, para lo que se pueden utilizar lentes o espejos. Canalizando la radiación hacia un punto o una superficie llamado "foco", éste eleva su temperatura muy por encima de la alcanzada en los colectores planos.

Aunque la superficie que recibe los rayos concentrados puede tener cualquier forma dependiendo de la técnica usada, en la actualidad la solución más favorable para una concentración de tipo medio (temperaturas menores de 400°C) es el "colector cilindro-parabólico", consiste en un espejo cilindro-parabólico, Figura 2.7, que refleja la radiación recibida sobre un tubo de vidrio dispuesto en la línea focal. Dentro del tubo se vidrio están el absorbedor y el fluido portador del calor.

Para que se puedan concentrar los rayos solares, estos colectores se montan igual que los planos, es decir, mirando al Sur y con una inclinación igual a la latitud del lugar. Además necesitan un dispositivo que vaya haciendo girar los espejos a lo largo del día, sincronizado con el movimiento aparente del Sol.

Los colectores cilindro-parabólicos, aparte de poder operar a temperaturas superiores a las de los planos, tienen la ventaja de requerir depósitos de acumulación más pequeños y de tener menores superficies de absorción y menores pérdidas de calor. No obstante, son más caros.

Aunque los colectores cilindro-parabólicos son aplicables en la misma gama de necesidades que los paneles planos, al poder desarrollar temperaturas considerablemente superiores tienen interesantes posibilidades de utilización industrial. Así, se están usando asociaciones de un cierto número de estos colectores en las llamadas "granjas solares", pudiendo ser utilizados para la producción de calor o electricidad. La energía así obtenida

se aplica a procesos térmicos industriales, desalinización de agua de mar, refrigeración y climatización.

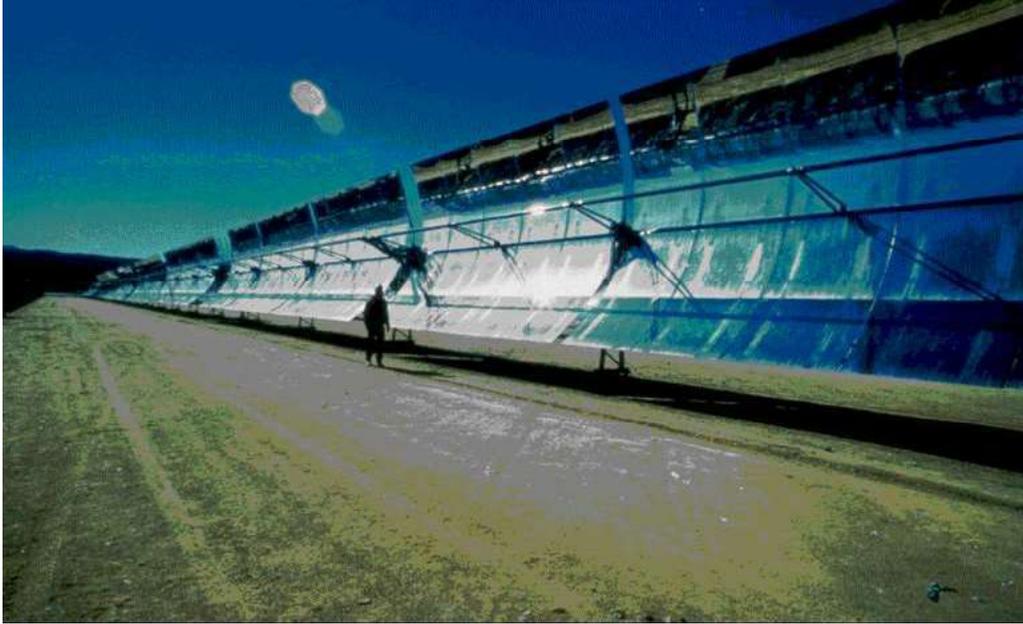


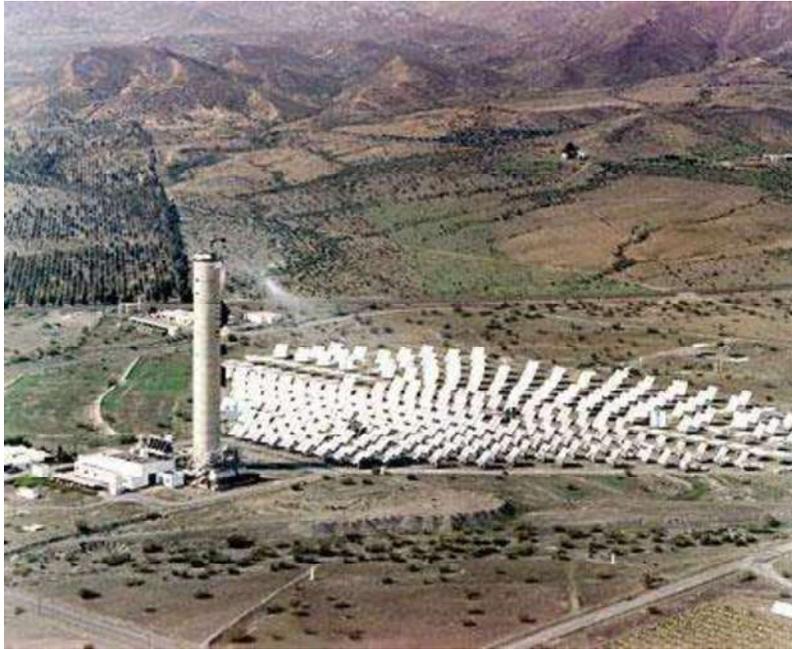
Figura 2.7 Colector cilíndrico parabólicos

### **2.10.2.2 Colectores Concentradores para la Conversión Térmica a Altas Temperaturas.**

Para conversiones térmicas superiores a los 400 °C, encaminadas a la producción de energía eléctrica a gran escala, es necesario concentrar la radiación solar mediante grandes paraboloides o un gran número de espejos enfocados hacia un mismo punto. El sistema más extendido es de receptor central, formado por un campo de espejos orientables, llamados "heliostatos", Figura 2.8, que concentran la radiación solar sobre una caldera situada en lo alto de una torre.

El calor captado en el absorbedor es cedido a un fluido portador circulando en circuito cerrado y que, debido a las altas temperaturas que ha de soportar (superiores a 500 °C) suele ser sodio fundido o vapor de agua a presión. Este fluido primario caliente se hace pasar a un sistema de almacenamiento, para luego ser utilizado en un sistema de generación de vapor, que se alimenta a una turbina. Esta actúa sobre un alternador, que permite obtener energía eléctrica.

La tecnología de las centrales solares se encuentra actualmente en fase de pleno desarrollo. Las instalaciones existentes se pueden considerar sólo como plantas de experimentación que permiten obtener, de momento, una rentabilidad en forma de innovación tecnológica. Por lo tanto, estas centrales están aún muy lejos de resolver el problema energético, aunque se pueden considerar válidas como un modesto complemento de las centrales térmicas convencionales.



2.8 Helióstatos

### **2.11 Emplazamientos Adecuados por su Irradiación Solar a Nivel México.**

Una vez descrita esta tecnología y visto como se puede aprovechar de ella, es momento ahora de analizar los lugares geográficos donde esta tecnología pueda ser viable.

La intensidad de la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre puede variar dependiendo de la localización geográfica.

A diferentes latitudes dicha radiación varía, en la zona Norte y Sur (cerca de los polos) del planeta la intensidad de la luz solar es baja, mientras que en la zona del Ecuador la intensidad es alta y llega a su máximo nivel en zonas de poca nubosidad y precipitación,

las cuales son características climáticas que aumentan o disminuyen su facilidad de impacto sobre la superficie terrestre.

Los espejos concentradores parabólicos, así como los heliostatos y el receptor de torre en la tecnología de torre solar sólo pueden concentrar la radiación directa, no concentran la difusa.

Por lo tanto estas centrales termo solares sólo tendrán sentido y podrán ser viables en localizaciones muy soleadas, especialmente en regiones áridas y semiáridas del mundo, donde la poca nubosidad de estas regiones no interfiere en los valores de radiación directa. En la Figura 2.9 se muestran los lugares situados en la república mexicana con mayor incidencia solar y más propicios para la instalación de centrales termo solares.



Figura 2.9 Mapa con valores de irradiación Diaria

Los lugares aptos para la instalación de este tipo de tecnología se seleccionan tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Que tengan una cuota de irradiación solar anual de al menos 1700 KWh/m<sup>2</sup>.
- Los sitios óptimos para la instalación son aquellos que tienen valores de irradiación solar anual mayores de 2700 KWh/m<sup>2</sup>.

Ejemplo: Tomaremos una zona del mapa con mayor irradiación y veremos los resultados (Tabla 2.1).

. México, gran desierto, situación geográfica 31° Latitud Norte y 113°

Longitud Este:

Tabla 2.1 Valores de radiación solar ( KWh/m<sup>2</sup>)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
5.07	5.96	6.11	7.62	8.10	8.27	6.65	5.78	6.69	5.69	5.46	4.31	6.31

El resultado medio anual es de 6.31 KWh/m<sup>2</sup> día, para poder compararlo con los requisitos impuestos no hay más que multiplicar por 365 días obteniéndose una irradiación solar anual de 2303 KWh/m<sup>2</sup>, mayor que los 1700 KWh/m<sup>2</sup> requeridos, lo que hace de esta zona una zona idónea para la instalación.

## 2.12 Conversión Eléctrica: Sistemas Fotovoltaicos.

La celda solar es un dispositivo semiconductor capaz de convertir los fotones procedentes del Sol (luz solar), en electricidad de una forma directa e inmediata. Esta conversión se conoce con el nombre de efecto fotovoltaico. Una forma más general de celda solar, afectada tanto por los fotones del Sol como los de otras fuentes artificiales, como una bombilla, se denomina celda fotovoltaica.

### 2.12.1 Electrones y Huecos

Como sabemos, la materia está compuesta por átomos, los cuales a su vez están formados por dos partes bien diferenciadas: el núcleo, dotado de carga eléctrica positiva y los electrones, que giran alrededor del núcleo en diferentes bandas de energía, con carga negativa que compensa a la del núcleo. Este conjunto, en condiciones normales, se mantiene estable y es eléctricamente neutro. A los electrones de la última capa se les ha dado el nombre de **electrones de valencia** y tienen la característica de poder relacionarse con otros similares, formando una red cristalina. En base al comportamiento de los electrones de esta última capa, se puede hacer una división de los materiales eléctricos en: conductores, semiconductores y aislantes.

Cuando un fotón choca contra un trozo de silicio pueden pasar tres cosas:

*a.*-El fotón atraviesa el silicio y sigue su camino. Esto ocurre cuando la energía del fotón es menor que la energía que liga a los electrones de la última capa con su núcleo.

*b.*- El fotón es reflejado por la superficie de silicio. En este caso, la energía del fotón es mayor que la del enlace.

c.-El fotón es absorbido por el silicio. Esto ocurre cuando la energía del fotón es similar a la energía que liga a los electrones de valencia con el núcleo.

En este último caso, el fotón cede su energía al electrón y puede romper el enlace que le vincula al núcleo, quedando libre para circular por el semiconductor. El lugar dejado por el electrón se llama hueco y tiene carga positiva (igual a la del electrón pero de distinto signo). Estos huecos también se desplazan, ya que el electrón liberado es susceptible de caer en un hueco próximo. Este fenómeno de que un electrón ocupe la posición dejada por otro, se conoce con el nombre de recombinación.

Cuando la luz solar bombardea con fotones la superficie de un semiconductor, los pares de electrones-huecos creados se desplazan hacia zonas no iluminadas donde se recombinan y estabilizan al perder actividad. Sin embargo al moverse ambos en la misma dirección, no se produce corriente eléctrica. Para que se produzca una corriente eléctrica es necesario que los electrones-huecos se muevan en direcciones opuestas. Esto se puede conseguir creando un campo eléctrico en el interior del semiconductor.

### **2.12.2 La Región N y la Región P**

Existen varias formas de crear un campo eléctrico en el interior de un semiconductor, casi todas ellas se basan en el *potencial de contacto* y la afinidad que ciertos materiales tienen por los electrones. En las celdas solares, lo que se suele hacer es unir dos regiones del silicio que han sido tratadas químicamente de forma diferente.

Una de las regiones, la denominada **n** ha sido *dopada*, impurificada con fósforo. El fósforo tiene 5 electrones de valencia, uno más que el silicio, de modo que esta región muestra una afinidad por los electrones menor que el silicio.

La otra región, denominada **p**, ha sido dopada con boro. El boro tiene sólo tres electrones de valencia, por lo que su afinidad para captar electrones es mayor que la del silicio puro.

Si unimos estas dos regiones por medio de materiales conductores, la *unión p-n* así formada presenta una diferencia de potencial que hace que los electrones liberados vayan hacia la zona *n* y los huecos hacia la zona *p*, produciéndose una corriente eléctrica.

### 2.12.3 La Celda

Está compuesta por silicio (arena refinada), y con el agregado de otros elementos, Figura 2.10, obtiene propiedades Fotovoltaicas, teniendo un razonable rendimiento energético. Son de 3 tipos: silicio amorfo, multicristalino y monocristalino, siendo su Rendimiento variable entre el 8, 12, 15 % de la luminosidad recibida. Su durabilidad está entre los 20 y 30 años. Hay celdas con otros compuestos y con mayor rendimiento en potencia con costos aún altos. Una celda tiene un tamaño aproximado de 10 cm.x 10cm. 100 cm<sup>2</sup> y genera una potencia de entre 1.5 a 2 W.



Figura 2.10 La Celda

### 2.12.4 Paneles Solares Fotovoltaicos (Psfv)

Para producir mayor cantidad de energía, las celdas se agrupan e interconecta configurando así los Paneles Fotovoltaicos Figura 2.11. Constructivamente constan de un marco perimetral, un vidrio resistente que deja pasar los rayos protegiendo las celdas. La Potencia generada por un panel esta en relación directa a su superficie. Generalmente se les construye de acuerdo a su potencia: 5 a 220 W. Tensión operativa; 12 V, 24 V, 36 V y 48 V pudiendo ser conectados en serie ó paralelo.

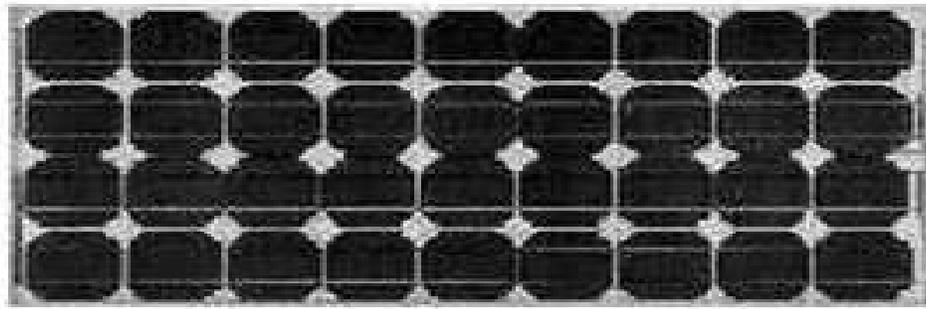


Figura 2.11 Panel Fotovoltaico

### 2.12.5 Parámetros del Panel

Los principales parámetros que caracterizan un panel fotovoltaico son:

*a.- Corriente De Cortocircuito  $I_{sc}$* : Es la máxima intensidad de corriente que proporciona el panel, y corresponde a la corriente que entrega cuando se conectan directamente los dos bornes.

*b.- Tensión De Circuito Abierto  $V_{oc}$* : Es el máximo voltaje que proporciona el panel, correspondiente al caso en que los bornes están “al aire”.

*c.- Punto De Máxima Potencia*: Existe un punto de funcionamiento ( $I_{Pmax}$ ,  $V_{Pmax}$ ) para el cual la potencia entregada es máxima ( $PM=I_{Pmax} * V_{Pmax}$ ). Ése es el punto de máxima potencia del panel, y su valor se da en Watts (W). Cuando trabaja en este punto, se obtiene el mayor rendimiento posible del panel.

*d.- Factor De Forma  $F_f$* : El factor de forma es la relación entre la potencia máxima que el panel puede entregar y el producto  $I_{sc} \cdot V_{oc}$ . Da una idea de la calidad del panel porque es una medida de lo escarpada que es su curva característica, de forma que cuanto más se aproxima a la unidad, mayor potencia puede proporcionar.

*e.- Eficiencia O Rendimiento*: Es el cociente entre la máxima potencia eléctrica que el panel puede entregar a la carga y la potencia de la radiación solar  $PL$  incidente sobre el panel, habitualmente en torno al 10%.

Teniendo en cuenta las definiciones de factor de forma y del punto de máxima potencia, se llega a la siguiente igualdad:

$$\eta = \frac{PM}{PL} = \frac{F_f * I_{sc} * V_{oc}}{PL} \quad (2.1)$$

Los valores de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{Pmax}$  y  $V_{Pmax}$  los suministra el fabricante, refiriéndolos a unas Condiciones Estándar (CE) de medida, de uso generalizado, definidas como sigue:

- Irradiancia  $G(CE) = 1000 \text{ W/m}^2$ .
- A nivel del mar.
- Para una temperatura de las celdas  $T_c(CE)=25^\circ\text{C}$ .

Para otras condiciones de Irradiancia  $G$  y de temperatura  $T$  dichos valores cambian. A veces, el fabricante incluye gráficas o tablas con valores para condiciones distintas de las estándar.

El valor de la potencia máxima en las condiciones estándar se indica normalmente en Wattspico (Wp). Simplemente se recalca con ello que es la potencia máxima (Watts) que puede entregar el módulo si las condiciones de medida son las arriba indicadas.

## **2.12.6 Formas de Conexión de los Paneles Fotovoltaicos**

**2.12.6.1 Conexión en paralelo:** si se conectan diversas placas entre si uniendo todos los polos positivos por una banda y todos los polos negativos por la otra. En los extremos tendremos igualmente 12V y una intensidad (Amperios) equivalente a multiplicar la intensidad unitaria de las placas por el número de placas.

**2.12.6.2 Conexión en serie:** si se conectan diferentes placas uniendo un polo de la primera con el contrario de la segunda y así sucesivamente. Observamos por un lado, que la tensión (voltios) que tenemos entre los polos libres de la primera y la última placa es igual a 12 multiplicado por el número de placas unidas de esta manera. Por otro lado, la intensidad total (Amperios) será la misma que la de una placa.

**2.12.6.3 Conexión mixta:** Con la combinación de las dos anteriores se pueden obtener resultados más precisos.

## **2.12.7 Sistema Solar Fotovoltaico (Ssfv)**

Está compuesto por: Paneles, Controlador de Carga, Inversor y Baterías de almacenado (como se muestra en la Figura 2.14 ).

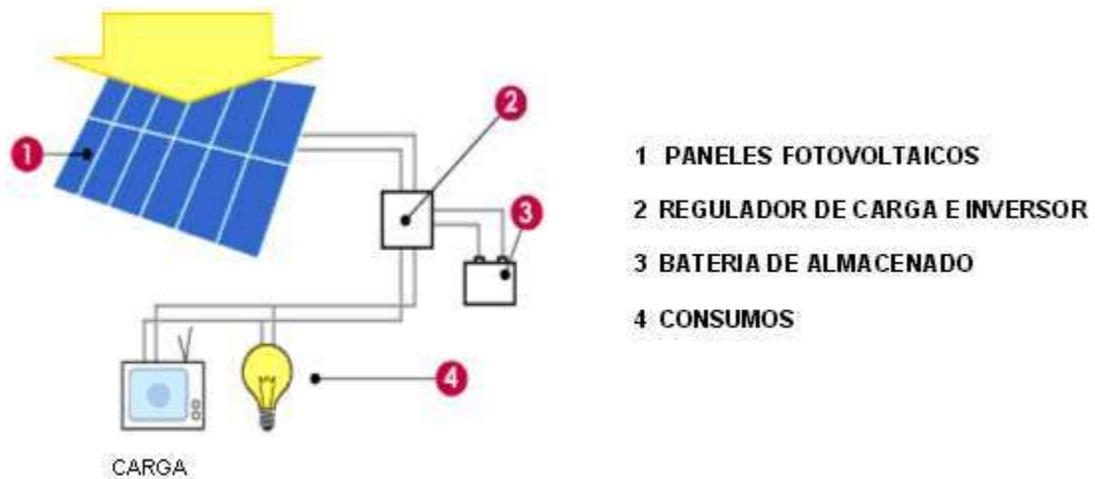


Figura 2.14 Sistema Fotovoltaico

### 2.12.8 Baterías

Sirven para acumular la energía que los paneles generan diariamente. El Banco de Baterías es para almacenar Energía Eléctrica y debe ser dimensionado en función a la cantidad de energía que se quiera disponer por días de baja luminosidad (nublados). Existen diferentes tipos de baterías, pero las más usuales son las de plomo ácido y de ciclo profundo. Son similares las vehiculares pero, sus placas son más gruesas ya que no tienen una exigencia como la de un motor de arranque. La vida útil está en función al porcentaje de descarga y a los ciclos que se descarga y carga). Cada batería tiene sus especificaciones. Conviene no descargar más del 30% de su capacidad máxima. Ej. Una de 200 A en 10 hrs. al 70% y 1200 ciclos es aquella que se descargará toda en 10 hrs. pero sólo podrá extraerle el 30% de su carga (60 A) y recargarse 1200 veces siempre que no haya sido descargada más del 30% de su capacidad total. Si la descarga supera ese porcentaje, la cantidad de ciclos se limitará, perdiendo vida útil. Para el cálculo del Banco de Baterías es importante conocer los consumos.

### 2.12.9 Parámetros de la Batería

Los principales parámetros que caracterizan un acumulador son:

a.- **TENSIÓN NOMINAL  $V_{NBat}$** : es la tensión de funcionamiento del acumulador en condiciones estables

**b.- CAPACIDAD NOMINAL, CN<sub>Bat</sub>:** Cantidad máxima de energía que se puede extraer del acumulador. Se expresa en Amperioshora (Ah) o Wattshora( Wh). Como la cantidad de energía que se puede extraer depende también del tiempo en que se efectúe el proceso de extracción (cuanto más dure el proceso, más cantidad de energía podremos obtener), la capacidad suele venir referida a varios tiempos de descarga.

Para aplicaciones fotovoltaicas, este tiempo debe ser de 100 horas o más.

**c.- PROFUNDIDAD MÁXIMA DE DESCARGA, PD<sub>max</sub>:** La profundidad de descarga es el valor, en tanto por ciento, extraída de un acumulador plenamente cargado en una descarga. Los reguladores limitan esta profundidad, y se calibran habitualmente para permitir profundidades de descarga de la batería en torno al 70%. Dependiendo de la máxima profundidad de descarga permitida, el número de ciclos de carga y descarga durante toda la vida útil de la batería será mayor o menor.

**d.- CAPACIDAD ÚTIL o DISPONIBLE, CUB<sub>Bat</sub>:** Es la capacidad de la que realmente se puede disponer. Es igual al producto de la capacidad nominal por la profundidad máxima de descarga (expresada en tanto por uno).

### **2.12.10 Interconexión de los Elementos de la Batería**

Con el conexionado de baterías, establecemos la tensión del acumulador y la capacidad del mismo. Tendremos en cuenta que no debemos interconectar baterías de distintas características. Mediante el conexionado en serie la tensión del conjunto es la tensión de la batería por el número de elementos. En el conexionado en paralelo la tensión se mantiene pero la capacidad se multiplica por el número de baterías en paralelo.

La energía acumulada en un conjunto viene dada por la expresión:

$$E = CB * VB \quad (2.2)$$

Donde la Tensión de la Batería VB es:

$$VB = N_{elem\_serie} * V_{elem} \quad (2.3)$$

Y su capacidad CB es:

$$CB = B_{elem\_paralelo} * C_{elem}. \quad (2.4)$$

Donde:

E = Energía en Wh.

CB = Capacidad en Ah del conjunto.

VB = Tensión en volts del conjunto.

N = Número de baterías en serie o paralelo, según el caso.

Velem. = Tensión del elemento individual en voltios.

Celem = Capacidad del elemento en amperes por hora, Ah.

### **2.12.11 Controlador de Carga**

Protege la vida útil de las Batería de descargas profundas y sobrecargas, desconectando automáticamente el sistema y a su vez indican el estado de carga regulando su voltaje.

### **2.12.12 Inversor de Tensión**

Se lo utiliza para convertir la Corriente Continua (CC) en Alterna (AC) y a su vez elevando la Tensión de 12, 24 , 48 voltios a 110 o 220, pudiendo así utilizar los artefactos domiciliarios. Su dimensionado, debe estar relacionado a la potencia máxima de los artefactos a utilizar simultáneamente. Se encuentran disponibles en distintos modelos de voltaje y potencias. Se fabrican de acuerdo a su Potencia Voltaje y tipo de Onda de acuerdo a su uso específico (Iluminación, Motores, Electrodomésticos).

### **2.12.13 Soportes y Protección de Paneles**

La estructura soporte tiene suma importancia. a través de ella se puede modificar la orientación e inclinación Deben tener la robustez y durabilidad necesaria para afrontar las inclemencias climáticas Existen diferentes modelos de acuerdo a la ubicación de los paneles como se muestran a continuación:

#### **a.- En bancada:**

Es decir, sobre una plataforma generalmente compuesta de materiales preparados contra la corrosión y daños por agentes externos (FIGURA 2.15).



Figura 2.15 Panel Fotovoltáico en Bancada

**b.- En mástil:**

Instalado sobre un mástil similar al de las antenas y también preparado con materiales contra la corrosión y agentes externos, Figura 2.16.



Figura 2.16 Panel fotovoltaico en mástil.

**c.- Sobre el suelo o techo:**

En este caso, va fijado directamente sobre la superficie del suelo o el techo del edificio.



Figura 2.17 Panel fotovoltaico sobre un tejado

**d.- Integración arquitectónica:**

Aquí lo que se trata, es que los paneles formen parte integrada en la obra, es decir formen parte de los materiales de esta, tales como: paredes, ventanas, etc... para colaborar con la integración de esta energía sin apenas producir impacto visual, Figura 2.18.



Figura 2.18 Tejado solar.

**2.12.14 Emplazamientos Adecuados para Aplicación de Tecnología Fotovoltaica en México**

Una vez descrita la energía solar y visto como se puede sacar provecho de ella, es momento ahora de analizar los lugares geográficos donde esta tecnología pueda ser viable.

Debido a que los concentradores planos y las celdas solares fotovoltaicas trabajan con radiación directa y difusa, su instalación puede ser prácticamente en cualquier lugar de la república, aunque no trabajaran con la misma eficiencia que si se colocaran en lugares con mayor radiación solar.

### **2.12.15 Aplicación de la Celdas Fotovoltaicas**

Actualmente existen dos formas de utilización de la energía fotovoltaica:

**a.- Autoconsumo** - La instalación es un elemento no conectado a la red pública y sirve para abastecer a una vivienda aislada utilizándose la producción eléctrica para el autoconsumo. El usuario accede a su propia energía de manera independiente con sus propias baterías acumuladoras para períodos de no radiación. Se pueden contemplar también en estos casos el uso de energías complementarias para garantizar el suministro energético.

**b.- Integración en la red eléctrica** - La instalación solar se conecta a la red eléctrica pública permitiendo esta conexión el intercambio de energía con la red eléctrica con la aportación de excesos a la misma y su utilización en períodos de menor producción.

## Capítulo 3

# Diseño de una Instalación Fotovoltaica

### 3.1 Descripción del Proyecto

El proyecto trata sobre el abastecimiento eléctrico de una Población Rural, por medio de una instalación solar fotovoltaica aislada.

La cual está situada en el Estado de Michoacán de Ocampo, Municipio de Villamar y lleva por nombre “La Estación”. Su altitud topográfica es de 1900 m.s.n.m y presenta una buena insolación solar, sin sombras de importancia, y con frecuentes días soleados continuos.

La población es pequeña, contando con una cantidad de habitantes de 54 personas y un número de 11 casas (Figura 3.1)

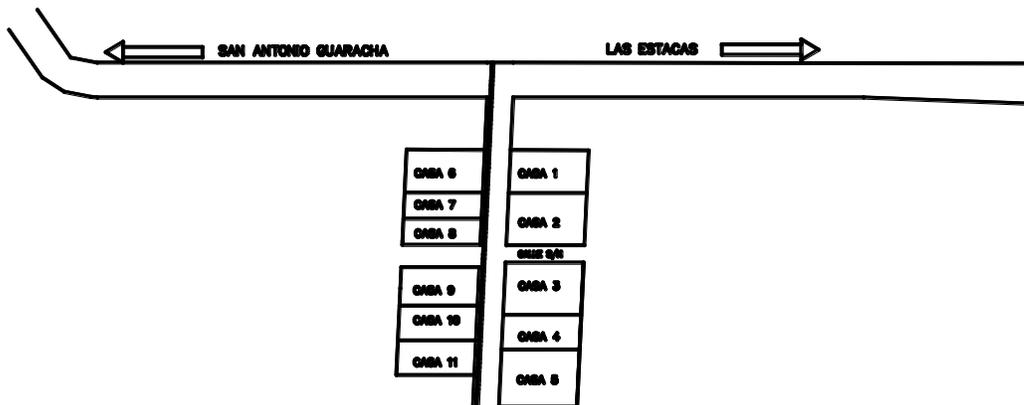


Figura 3.1  
Ubicación de la Población a Electrificar

### 3.2 Cálculo de la Energía Diaria

Para poder dar dimensiones a la instalación fotovoltaica tenemos que conocer cuanta energía consumirá cada casa habitación. Para ello nos basaremos en el consumo energético de una casa habitación de estilo de vida medio.

La tabla 3.1 la cual nos presenta el consumo energético durante 1 día y con este valor comenzaremos a realizar los cálculos necesarios para dar dimensiones a la instalación fotovoltaica.

Tabla 3.1 Cuadro de consumo energético

EQUIPO	UNIDADES	POTENCIA(W)	HORAS(hrs.)	ENERGÍA(W.h)
<b>Iluminación de la sala</b>	2	15	6	180
<b>Iluminación del baño</b>	1	15	2	30
<b>Iluminación de cuartos</b>	6	15	7	630
<b>Iluminación de la cocina</b>	1	15	3	45
<b>Refrigerador</b>	1	-----	24	300
<b>Televisión</b>	1	150	6	900
<b>Ventilador</b>	1	150	4	600
Consumo energético teórico: Et (W.h) =				2685
Total				2685

Ahora solamente tendremos que multiplicar la energía consumida por un hogar por el número de casas a electrificar y tendremos la cantidad de energía total (como lo muestra la ecuación 3.1).

$$E T = E c * C \quad (3.1)$$

Donde:

ET = Consumo energético teórico.

Ec = Energía consumida por una casa habitación.

C = Cantidad de casas a electrificar.

Por lo tanto conforme a la ecuación 3.1 el resultado es el siguiente:

$$ET = 2.685 \text{ KW.h} * 11 = 29.535 \text{ KW.h}$$

A partir del consumo energético teórico **ET** (W·h), deberemos calcular el consumo energético real **E** (W·h), necesario para hacer frente a los múltiples factores de pérdidas que van a existir en la instalación fotovoltaica, para ello aumentaremos un 10 % a la energía calculada como se presenta en la ecuación 3.2.

$$E = ET * 1.1 \tag{3.2}$$

El resultado se presenta a continuación:

$$E = 22.3 \text{ KWh} * 1.1 = 32.4885 \text{ KWh.}$$

### **3.3 Dimensionado del Inversor y del Generador Fotovoltaico.**

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en el diseño de una instalación fotovoltaica es realizar una configuración adecuada para mejorar lo máximo posible su rendimiento y eficiencia.

En la actualidad, existen una amplia variedad de inversores por lo que podemos encontrar desde pequeñas potencias 2.5 KW hasta los 100 KW en un único inversor.

En las especificaciones técnicas del inversor se recogen importantes advertencias que hay que considerar durante el diseño y montaje de la instalación.

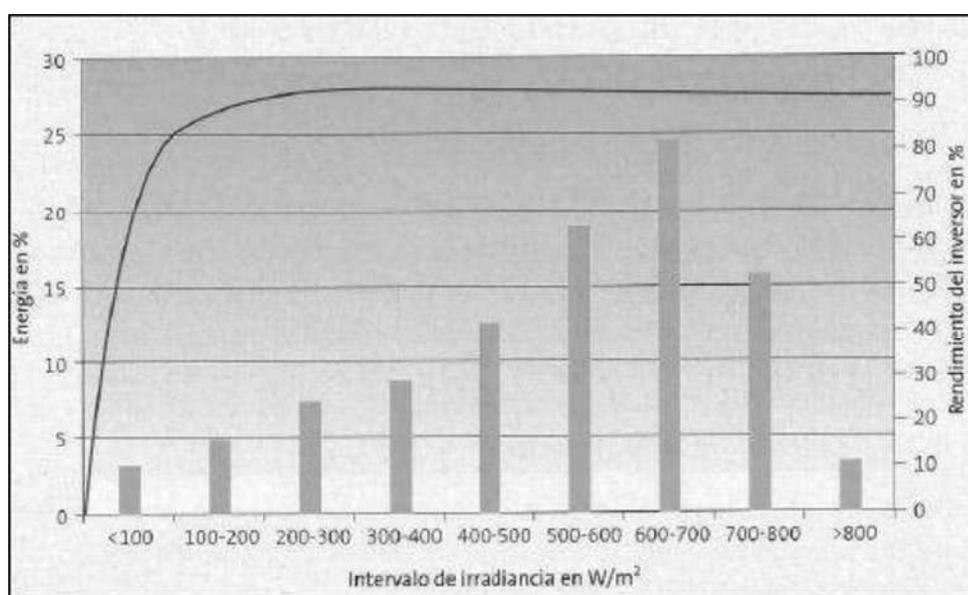
El tipo de configuración de la instalación y su interconexión determina el número, rango de tensiones y potencia del inversor/es.

### **3.4 Cálculo de la Potencia**

En general, la potencia nominal del inversor no debe ser superior a la potencia pico del generador fotovoltaico, ya que el inversor no funcionará a su potencia nominal. Esto es debido a que, en condiciones climáticas reales, un generador fotovoltaico casi nunca produce la potencia pico ya que la temperatura normal de funcionamiento del módulo es mayor de 25°C cuando la irradiancia es de 1000 W/m<sup>2</sup>.

Existen otras razones por las cuales la potencia nominal del inversor no debe superar a la potencia pico del generador fotovoltaico, por ejemplo, la instalación, normalmente, no tiene la orientación ni la inclinación óptima o está parcialmente cubierta por sombras. También existen pérdidas dentro del generador fotovoltaico debido a la dispersión de los parámetros eléctricos de cada uno de los módulos, así como al cableado y a las conexiones entre ellos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el rango de potencias nominales del inversor puede oscilar entre 0.7 y 1.2 veces la potencia pico del generador fotovoltaico.



**Figura 3.2:** Ejemplo de gráfica del rendimiento del inversor

Cuando se seleccione el inversor debemos asegurarnos que funcione correctamente para cualquier condición de temperatura e irradiación climática y que la eficiencia máxima del inversor corresponda con el rango de irradiación más frecuente del lugar. Por ejemplo en la Figura 3.1, sería 600-700  $W/m^2$ .

Hay que garantizar que para cualquier condición climática, el rango de tensiones a la salida del generador fotovoltaico debe estar dentro del rango de tensiones admisibles a la entrada del inversor. En este sentido hay que tener en cuenta que la tensión (y en menor medida la corriente) a la salida del generador fotovoltaico varía con la temperatura como se muestra en la Figura 3.3.

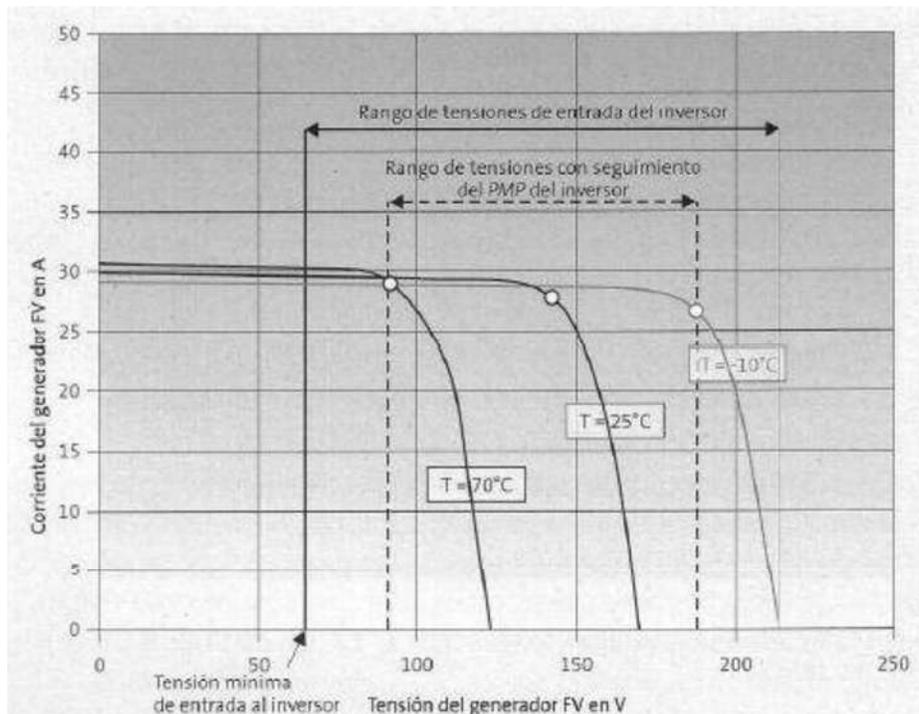


Figura 3.3: Influencia de la temperatura en un generador.

### 3.5 Módulos Seleccionados

El módulo solar seleccionado para la instalación cuenta con las siguientes características que se presentan en la tabla 3.2:

Marca: MSK CORPORATION/24v

Modelo: TP156-190

Inom=7.91A

Características más representativas:

Módulo de Silicio policristalino, con un rendimiento de las celdas del 14.6% de eficiencia.

Tabla 3.2 – Características del Modulo Seleccionado

Características Eléctricas:		
	Valor	Tolerancia
<b>Salida</b>		
Potencia	190 W	95% or over
V <sub>PMP</sub>	26.5 V	
I <sub>PMP</sub>	7.18 A	
V <sub>O</sub>	33 V	±10 %
I <sub>cc</sub>	8.08 A	95% or over
	Valor	Tolerancia
<b>Coef. Temperatura</b>		
V <sub>O</sub>	-2.12 mV/°C	
I <sub>cc</sub>	+2.4mA/K	
Máxima salida	-0.43 %/K	



Modulo FV Policristalino

**Tabla 2:** Características Técnicas del módulo

### 3.6 Inversor

Ahora se seleccionara el inversor necesario. Para ello debemos estimar la potencia instantánea máxima que la instalación pudiera demandar, la cual se puede obtener de la tabla 3.1 y el valor se presenta a continuación:

$$P_{max} = 5.115 \text{ KW.}$$

El inversor seleccionado en nuestro caso, conforme a los requisitos de nuestra instalación, es 1 inversor trifásico Ingecon sun con una potencia nominal de salida de 5 Kw. ya que nos ofrece una potencia máxima de salida de 5400W y una eficiencia máxima del > 94%, además el fabricante ofrece un acuerdo de servicio que garantiza más de 20 años sin problemas operacionales.

catalogo : <http://www.energuia.com/DirFichContenidos/Tienda/ESP16172.PDF>.

Las características técnicas de nuestro equipo a utilizar se muestran en la tabla 3.3:

Tabla 3.3- Características técnica del inversor

<b>Características Técnicas</b>	
Rango de tensión de entrada (V)	<b>125 - 450</b>
Intensidad máxima (A)	<b>33 A</b>
Tensión de salida (Vac)	<b>220/230 Vac</b>
Consumo en operación (A)	<b>&lt; 10 w</b>
Rendimiento óptimo (%)	<b>94%</b>
Pot nominal a 25° C	<b>5000 w</b>
Pot máxima	<b>5400 w</b>
Interface usuario	<b>LEDS indicadores de estado</b>
Temperatura ambiente	<b>-10°C a +50°C</b>
Humedad ambiente	<b>De 0 a 95%</b>

### 3.7 Cálculo de Número de Módulos a Utilizar

#### 3.7.1 Número Máximo de Módulos por Ramal

El valor máximo de la tensión de entrada al inversor corresponde a la tensión de circuito abierto del generador fotovoltaico cuando la temperatura del módulo es mínima. Esta corresponde con una temperatura ambiente mínima, que es de -5 °C y una irradiancia mínima de 100W/m<sup>2</sup>.

La temperatura del módulo en estas condiciones se determina con la ecuación 3.3:

$$T_p = T_a + \left[ \frac{T_{onc} - 20}{800} \right] * I \quad (3.3)$$

Donde:

T<sub>p</sub> = Temperatura del módulo [°C]

T<sub>a</sub> = Temperatura ambiente [-5 °C]

T<sub>onc</sub> = Temperatura nominal de funcionamiento de la celda [45 °C]

$I =$  Irradiancia [ $100 \text{ W/m}^2$ ]

En un día de invierno soleado puede ocurrir que el inversor se pare, por ejemplo debido a un fallo en la red y que al volverse a encender puede darse una tensión en circuito abierto alta en el generador y por ello el inversor no arranque. Por éste motivo la tensión en circuito abierto del generador fotovoltaico debe ser siempre inferior a la tensión máxima de entrada en el inversor. De lo contrario el inversor además de no funcionar se podría averiar. Debido a esto el número máximo de módulos por ramal conectados en serie se determina como el cociente entre la tensión máxima de entrada del inversor y la tensión en circuito abierto del módulo a su temperatura mínima, aplicando la fórmula anterior obtenemos el valor de temperatura de  $-1.8^\circ\text{C}$ .

Según los datos de características de las placas solares, el coeficiente de variación de la tensión con la temperatura es  $-2.12\text{mV}/^\circ\text{C}$ . Por lo que el valor de tensión en circuito abierto a una temperatura mínima se calcula con la ecuación 3.4 que se presenta continuación

$$U_{ca}(T_{\min}) = U_{ca}(T_c) - [25^\circ\text{C} + T_p] * V \quad (3.4)$$

Donde:

$U_{ca}$  = Tensión en circuito abierto del módulo [V]

$V$  = Variación de la tensión [ $\text{mV}/^\circ\text{C}$ ]

$$U_{ca}(-1.8^\circ\text{C}) = 33.06\text{V}$$

El número máximo de módulos por ramal se calcula con la ecuación 3.5 y corresponde a:

$$N_{\max} = \frac{U_{\max}(\text{inv})}{U_{ca}(T_{\min})} \quad (3.5)$$

$$N_{\max} = 450\text{v}/33.06\text{v} = 13.61 \text{ paneles.}$$

Donde:

$U_{\max}$  = Valor de tensión máxima de entrada en el inversor. [V]

$U_{ca}$  = Valor de la tensión en circuito abierto a la temperatura mínima. [V]

El valor obtenido al aplicar la fórmula corresponde a 13.61 módulos, que ajustamos a 12 módulos, para asegurarnos que no sobrepasamos la tensión máxima de entrada al inversor.

### 3.7.2 Número Mínimo de Módulos por Ramal

El número mínimo de módulos por ramal viene limitado por la tensión mínima de entrada al inversor y la tensión en el punto de máxima potencia del módulo a una temperatura aproximada de 70°C.

El valor mínimo de la tensión de entrada al inversor debe ser menor o igual que la tensión de máxima potencia del generador fotovoltaico que corresponde cuando la temperatura del módulo es máxima.

Cuando la tensión en el punto de máxima potencia del generador está por debajo de la tensión de entrada mínima del inversor, el inversor no será capaz de seguir el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico o incluso, en el peor de los casos que se apague.

Por eso es necesario conocer el valor de tensión de máxima potencia a la temperatura máxima del módulo la cual se conoce con la ecuación 3.6

$$U_{pmp}(T_{max}) = U_{pmp}(stc) + (T_{max} - 25^{\circ}C) \cdot V \quad (3.6)$$

Donde:

$U_{pmp}(STC)$  = Tensión de máxima potencia del módulo [V]

$V$  = Variación de la tensión [mV/ °C]

Obtenemos como resultado  $U_{pmp}(70^{\circ}C) = 26.4V$

El número mínimo de módulos por ramal se conoce a través de la ecuación 3.7 y corresponde a:

$$N_{min} = \frac{U_{pmp}(inv)}{U_{pmp}(T_{max})} \quad (3.7)$$

Donde:

$U_{pmp}(inv)$  = Tensión mínima de seguimiento del punto de máxima potencia [V]

$U_{pmp}(70^{\circ}C)$  = Valor de la tensión de máxima potencia a la temperatura máxima del módulo [V]

$$N_{min} = \frac{125}{26.4} = 4.73$$

El valor obtenido al aplicar la fórmula corresponde a 4.73 módulos, que ajustamos a 5 módulos, para asegurarnos que no trabajamos con tensiones dentro de los rangos de máxima potencia.

### 3.7.3 Número de Ramales en Paralelo

El número de ramales en paralelo debe cumplir con lo siguiente: que la corriente de cortocircuito máxima de un ramal por el número de ramales conectados en paralelo, sea menor que la corriente máxima admisible de entrada al inversor, esto se presenta en la ecuación 3.8:

$$N_{ramales} = \frac{I_{max(inv)}}{I_{cc(ramal)}} \quad (3.8)$$

$$N_{ramales} = \frac{35}{8.08} = 4.33 \text{ ramales}$$

Donde:

$I_{max} (inv)$  = Intensidad máxima de entrada al inversor [A]

$I_{cc} (ramal)$  = Intensidad de cortocircuito de cada ramal [A]

El valor obtenido es de 4.33 ramales conectados en paralelo y para no hacer trabajar al inversor al límite de la corriente máxima de trabajo ajustamos el valor a 4 ramales.

Ya que se obtuvo el número máximo de ramales a conectar en paralelo ahora pasaremos a verificar si con esta cantidad logramos cumplir con las necesidades energéticas diarias de la población de acuerdo a los valores de radiación solar en la población, para ello deberemos conocer, a partir de valores estadísticos históricos de la zona, el valor de irradiación solar diaria media en superficie inclinada  $H$  (KWh/m<sup>2</sup> .día) del lugar. Para ello se hará uso de base de datos de irradiación solar del Servicio Meteorológico Nacional Los resultados mensuales medios se recogen en la tabla 3.4, donde se ha considerado que los paneles se disponen en orientación Sur con una inclinación de 40°.

Tabla 3.4 – Irradiación solar diaria media,  $H$  (KWh/m<sup>2</sup>·día)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
<b>H</b>	2.71	3.57	4.99	5.02	5.53	5.90	6.12	5.96	5.56	4.32	2.98	2.25	4.58

Ahora es necesario introducir un concepto muy importante, las horas de pico solar **HPS** (h), estos se definen como las horas de luz solar por día equivalentes, pero definidas en base a una irradiancia **I** (KW/m<sup>2</sup>) constante de 1 KW/m<sup>2</sup>, a la cual está siempre medida la potencia de los paneles solares. Es un modo de estandarizar la curva diaria de irradiancia solar:

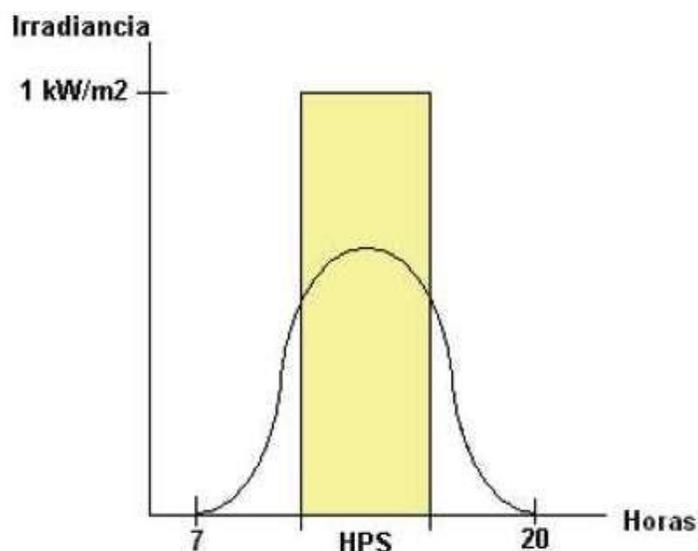


Figura 3.4 – Definición de las horas de pico solar

Como puede verse en la Figura 3.4, el área definida por el rectángulo (irradiación en base a las horas de pico solar) es igual al área definida por la curva horaria de irradiancia real.

La irradiación **H** (KWh/m<sup>2</sup>) es igual al producto de la irradiancia de referencia **I** (1KW/m<sup>2</sup>) por las horas de pico solar **HPS** (h). Luego entonces los valores numéricos de la irradiación y horas de pico solar son iguales.  $H(\text{KWh/m}^2) = I (1\text{KW/m}^2) \cdot \text{HPS}(h)$  Entonces, según la ecuación anteriormente mostrada, los valores numéricos de la tabla 3.4 son igualmente válidos para las horas de pico solar.

Tabla 3.5 – Horas de pico solar, HPS (h)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
<b>HPS</b>	2.71	3.57	4.99	5.02	5.53	5.90	6.12	5.96	5.56	4.32	2.98	2.25	4.58

Los paneles solares producen una energía eléctrica durante todo el día equivalente a sólo las horas de pico solar operando a su máxima potencia.

Cálculo de los Amperes Necesarios

$$\text{Amperes necesarios diarios} = \frac{Kwdia}{Vp}. \quad (3.9)$$

Donde:

$Kwdia$  = es la energía diaria consumida por la población.

$Vp$  = Tensión a la salida de los paneles

$$\frac{32.4885Kwdiarios}{240} = 135.36 \frac{A}{día}$$

El panel MSK Corporation *modelo*: tp156-190 genera una corriente de 7.91 A x 4.5 hrs/día = 35.6 A/día.

Al dividir  $135.36 A / 35.6 A = 3.80$  por lo tanto, la cantidad de paneles que se cálculo cumple con lo pedido y el número de paneles a utilizar será de 4.

### 3.8 Campo Solar

Número de módulos por ramal: Rango (5 - 12) módulos. Se seleccionara un número de 10 Módulos en serie por ramal.

Número de ramales conectados en paralelo: 4 ramales

Con un total de  $10 \times 4 = 40$  módulos fotovoltaicos.

De ésta manera los inversor trabaja dentro de los rangos nominales y aprovechando al máximo su rendimiento.

Rango de trabajo:

- Tensión PMP por ramal =  $(26.5 \times 10) = 265 V$
- Tensión en circuito abierto por ramal =  $(33 \times 10) = 330V$
- Tensión nominal =  $(Vnom \times 10) = 240V$
- Intensidad de cortocircuito por ramal = 8.08A
- Intensidad máxima de entrada al inversor =  $(Icc \times 4) = 32.3A$
- Intensidad nominal de entrada al inversor =  $(7.91 \times 4) = 31.6 A$

### 3.9 Separación Entre Filas de los Paneles Fotovoltaicos

Para entender mejor los cálculos que determinan la separación adecuada que debe existir entre filas para evitar que se generen sombras, la Figura 3.5 nos muestra lo fácil que es de entender.

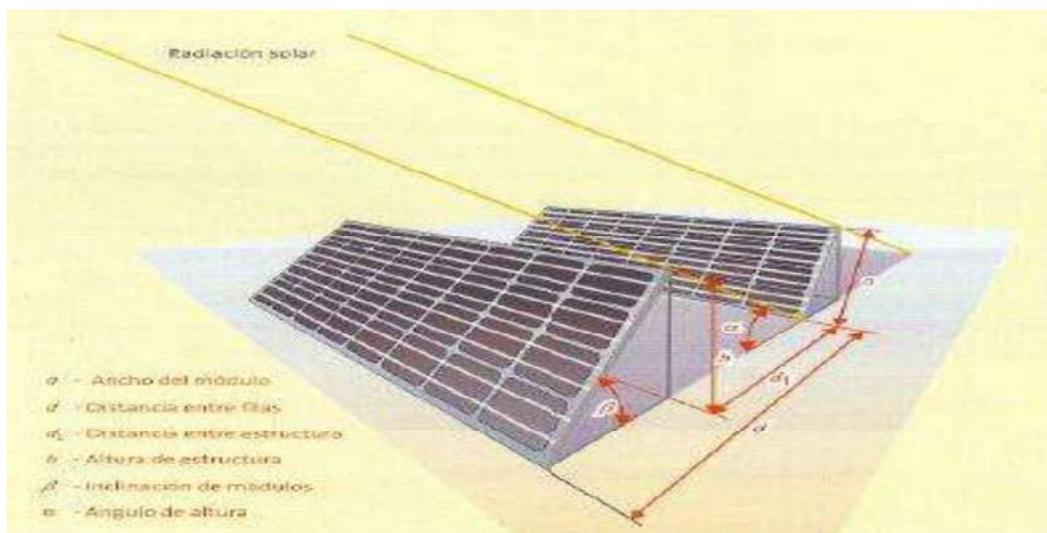


Figura 3.5. Distancia entre filas para evitar sombras.

$$h = a * \text{sen } \beta \tag{3.10}$$

$$d1 = \frac{\cos \theta * h}{\sin \theta} \tag{3.11}$$

$$d = a * \cos \beta + d1 \tag{3.12}$$

Donde:

h = altura del panel inclinado

$\beta = 35^\circ$

a = altura del panel = 1.5m

$\theta = 35^\circ$

Los resultados obtenidos son:

$d1 = 1.2\text{m}$

$d = 2.42\text{m}$  Valor que redondeamos a 3m de separación entre filas.

### 3.10 Dimensiones del Campo Solar

Área del módulo solar: largo=2m, ancho = 1.5m, Área = 3m<sup>2</sup>.

Número de módulos = 40

El arreglo de la instalación fotovoltaica consistirá de 4 filas de 10 paneles cada una por lo que tendremos una longitud de 20 metros, ahora para poder conocer el ancho de la instalación se tiene primero que conocer cual es la distancia que debe haber entre filas para evitar que la sombra de la fila de adelante afecte la de atrás, este resultado se pudo obtener anteriormente por lo que nos da un resultado de 8.5 metros de ancho, ahora para conocer el área a utilizar por los paneles se utilizara la ecuación 3.13 que se presenta a continuación:

$$A. \text{ necesaria} = \text{longitud} * \text{ancho} \quad (3.13)$$

Donde:

A. necesaria = Área necesaria para la instalación de los módulos fotovoltaicos

A (mod) = Es el área del modulo

N = Número de módulos a utilizar

$$A. \text{ necesaria} = 20\text{m} * 8.5\text{m} = 170 \text{ m}^2$$

### 3.11 Cálculo del Banco de Baterías

La capacidad del banco de baterías se obtiene utilizando la ecuación 3.14:

$$Cap = 1.66 * Dto * Aut \quad (3.14)$$

Donde:

1.66: factor de corrección de batería que tiene en cuenta la profundidad de descarga admitida, el envejecimiento y un factor de temperatura.

Dtot: Demanda total de energía de la instalación en Ah/día. Esto se obtiene dividiendo los Wh/día totales que surgen de la planilla de dimensionamiento por la tensión del sistema (En este caso se harán los cálculos con el valor de tensión nominal de los paneles solares para asegurarnos de estar en un límite medio de tensión que llegará a la entrada de los inversor).

.Aut: Días de autonomía o autonomía prevista:

$$Cap. \text{ Bat.} = 1.66 * \left( \frac{32.4885 \text{ KWh}}{12V} \right) * 0.416 \text{ dia} = 1,869.11 \text{ Ah}$$

Se tomara el valor normalizado inmediatamente superior al que resulte de este cálculo y se armaran las combinaciones serie-paralelo que resulten adecuadas para el caso.

A partir de la capacidad calculada, seleccionaremos el equipo comercial más próximo en prestaciones, dentro de la categoría de baterías plomo-ácido. En nuestro caso la batería seleccionada será el Isofotón 2.AT.900 (900 A·h - C100, 1,85 V / 12 V).

Catálogo: <http://www.isofoton.es/html/zip/at.zip>.

Numero de elementos en paralelo a utilizar:

$$NBP = \frac{CapBat}{Bateria\_seleccionada} = 2.07 \text{ baterías} \quad (3.15)$$

La batería seleccionada, como podemos ver, satisface plenamente con los requerimientos conforme a la carga pero ahora es necesario saber cuantos elementos en serie debemos instalar para llegar al nivel máximo de tensión que se podría presentar a la salida de los paneles ( $V_o \times N$  elementos). Para ello se utilizara la formula 2.2 la cual se presenta a continuación:

$$V_{requerido} = N_{elem\_serie} * V_{elem}$$

Donde:

$$V_{requerido} = 240 \text{ V}$$

$$V_{elem} = 12 \text{ V}$$

De donde se despeja  $V_{elem\_serie}$  y queda de la siguiente manera:

$$V_{elem\_serie} = \frac{V_{requerido}}{V_{elemento}} \quad (3.16)$$

por lo tanto:

$$V_{elem\_serie} = \frac{240v}{12v} = 20 \text{ baterías}$$

El total de baterías a seleccionar será el número de baterías en serie por el número en paralelo por lo que nos da un total de:

$$TotalBat = V_{elem\_serie} * NBP$$

Quedando un total de 40 baterías a utilizar

### 3.12 Características de Tensión y Corriente del Regulador

Calculado el número de módulos y el tamaño de la batería, pasaremos a determinar las características eléctricas básicas del regulador de carga que necesitamos.

La tensión de trabajo del regulador será la tensión de trabajo del generador fotovoltaico y del conjunto de baterías de acumulación. El relé que interrumpe o permite el paso de corriente de los módulos a la batería debe aguantar una intensidad de cortocircuito de un panel por el número de paneles conectados en paralelo.

$$I_r = N_{\text{paralelo}} \times I_{\text{nom}} \quad (3.17)$$

$$I_r = 4 \times 8.08 \text{ A} = 32.32 \text{ A}$$

$$V_{\text{regulador}} = 240 \text{ v.}$$

Con estos datos buscamos en el mercado el tipo de regulador que satisfaga con lo pedido y encontramos el siguiente:



CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS		
	C 40	C 60
Configuraciones de voltaje (Vcc)	12, 24 ó 48	12 ó 24
Tensión máxima del campo solar en circuito abierto (Vcc)	125	55
Carga / Corriente de carga, a 25°C (A)	40	60
Corriente pico máxima (A)	85	85
Caída de tensión máxima a través del controlador (V)	0,3	0,3
Consumo normal en funcionamiento (mA)	15	15
Consumo normal en estado inactivo (mA)	3	3
Tamaño de cableado recomendado (mm <sup>2</sup> )	16	16
Instalación con baterías de plomo-ácido	Ajustable	Ajustable
Instalación con baterías de NiCad	Ajustable	Ajustable
Modo de control de carga	Reconexión de baja tensión: ajustable en todos los modelos Desconexión de baja tensión: reconexión automática o manual.	

Con las siguientes características se seleccionara en equipo SumSol/C40 a 48 V y se utilizaran 5 reguladores conectados en serie para llegar a la tensión de operación de los generadores fotovoltaicos

### 3.13 Soportes a Utilizar para la Colocación de los Paneles

La estructura de soporte seleccionada para la colocación de los paneles será la de tipo bancada para poder darle a los módulos una inclinación de 35 a 40°.

Irán colocados cuatro líneas una tras otra, esto quiere decir que el número de soportes a utilizar será de 4 por lo tanto el área de cada soporte se calcula de la siguiente manera:

### 3.14 Selección de Conductores de Sistema Fotovoltaico

Para obtener la sección de conductores con línea de cobre podemos aplicar la ecuación 3.18:

$$S = 2 \cdot I \cdot l / (56 \cdot CV) \quad (3.18)$$

Donde:

$l$  = Longitud del conductor.

$CV$  = Caída de tensión admisible.

$I$  = Intensidad máxima que puede pasar por el conductor, en el caso de la línea módulo/regulador y módulos / inversor, será la intensidad de cortocircuito del módulo por el número de módulos en paralelo.

En el caso de la línea batería/ inversor;

$$I = \frac{P_{salida}}{V_{entrada} \cdot n} \quad (3.19)$$

Donde:

$P_{salida}$  = Max\_pot\_sal\_invers(obtenida de los datos del equipo).

$V_{entrada}$  = minimo\_mod.

Eficiencia del inversor =  $\eta = 0.94$

Los resultados se presentan en las tablas 3.6 y 3.7

Tabla 3.6 Cálculo de conductores en CD

LÍNEA	TENSIÓN DE TRABAJO MINIMA	% CAIDA DE TENSIÓN ADMISIBLE	VALOR EN VOLTS DE LA CAIDA DE TENSIÓN	VALOR DE CORRIEN T	DISTANCIA
MÓDULOS REGULADOR	240V	1	2.4	31.64	30
RAMAL	240	1	2.4	8.08	10
REGULADOR-BATERÍA	240	1	2.4	31.64	5
BATERÍA INVERSOR	240	1	2.4	54.8	10
MODULOS INVERSOR	240	1	2.4	45.9	32

Tabla 3.7 Calibre de conductores

SECCIÓN DEL CONDUCTOR EN mm <sup>2</sup>	CALIBRE DEL DUCTOR ADOPTADO	LINEA
16	10	MÓDULOS REGULADOR
1.5	10	RAMAL
2.5	10	REGULADOR-BATERÍA
10	6	BATERÍA INVERSOR
25		MODULOS INVERSOR

### 3.15 Cálculo de Conductores en Corriente Alterna

La red de baja tensión que alimentara a la población quedara de la siguiente manera, Figura 3.7:

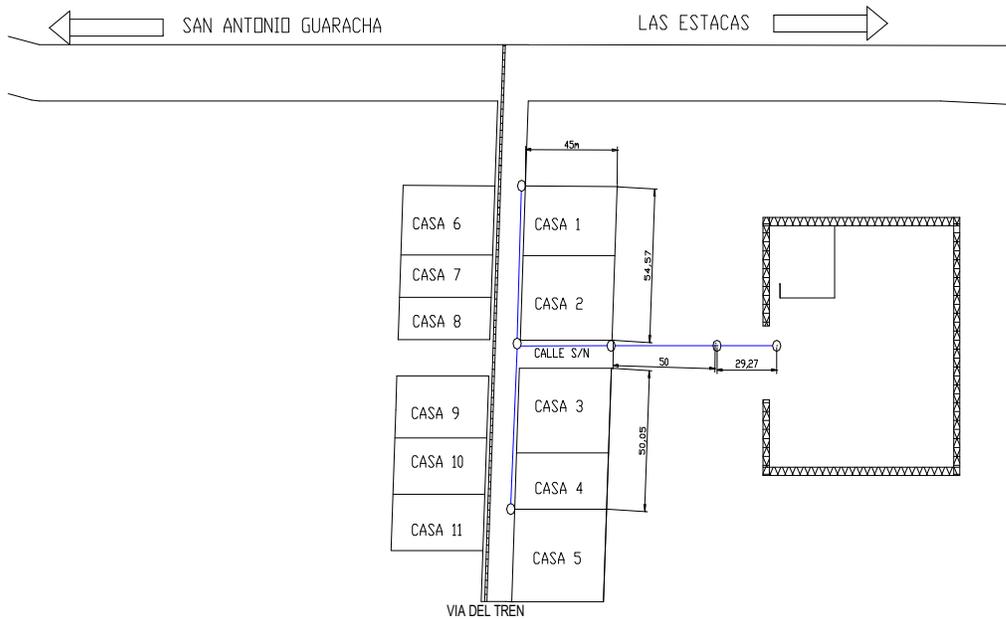


Figura 3.7 Ubicación de la Red de Baja Tensión

Las características eléctricas se dan en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Características eléctricas

USUARIOS	11.00
carga en VA por usuario	490.00
factor de potencia de carga	0.95
magnitud de la corriente	4.08
resistencia del conductor 1/0 $\Omega/\text{km}$	0.60
x del conductor 1/0 $\Omega/\text{km}$	0.36
z conductor 1/0	0.70
ángulo del factor de potencia	0.3176
áng. De z para 1/0	0.5404
Carga de la instalación	5120.5000

Los cálculos de caída de tensión para la línea más larga se presentan en la tabla 3.9:

Tabla 3.9 cálculos de % de regulación en CA

Rama No.	distancia intepostal metros	usuarios LÍNEA	I por rama (mag) Amp.	Angl. De I radianes	Mag Z/rama $\Omega(1/0)$	ang de Z radianes
1 a 5	178.34	4.00	16.33	0.3176	0.124787	0.699714

Tabla 3.9 cálculos de % de regulación en CA

mag ZI volts	angulo de ZI radianes	angulo de ZI angulo	comp. ZI eje x	comp. ZI eje y	Resistencia $\Omega$ /rama	pérdidas/rama Watts/cond.
2.03818824	0.382154	21.8957312	1.891	0.76008	0.057069	15.22469

La caída de tensión en corriente alterna que se da en la rama mas larga de la instalación se presenta en la tabla 3.10

Tabla 3.10 Caída de Tensión en la línea mas larga

numero de poste	rectangular		polar	
	comp. V eje x	comp. V eje y	mag. V Volts	Áng. De V Grados
1	120.000000	0.0000000	120	0
5	118.108839	-0.7600807	118.111285	-0.3687165

### Regulación de voltaje:

Regulación	1.5990978
------------	-----------

Después de realizar los cálculos necesarios llegamos al resultado que nos dice que el calibre de los conductores a utilizar para la red de baja tensión será 1/0 ya que como podemos ver el por ciento de regulación de voltaje es menor al 2%.

### 3.16 Tipos y Estructura de los Postes a Utilizar

La red de baja tensión y el enumerado de postes se presentan a continuación en la Figura(3.8):

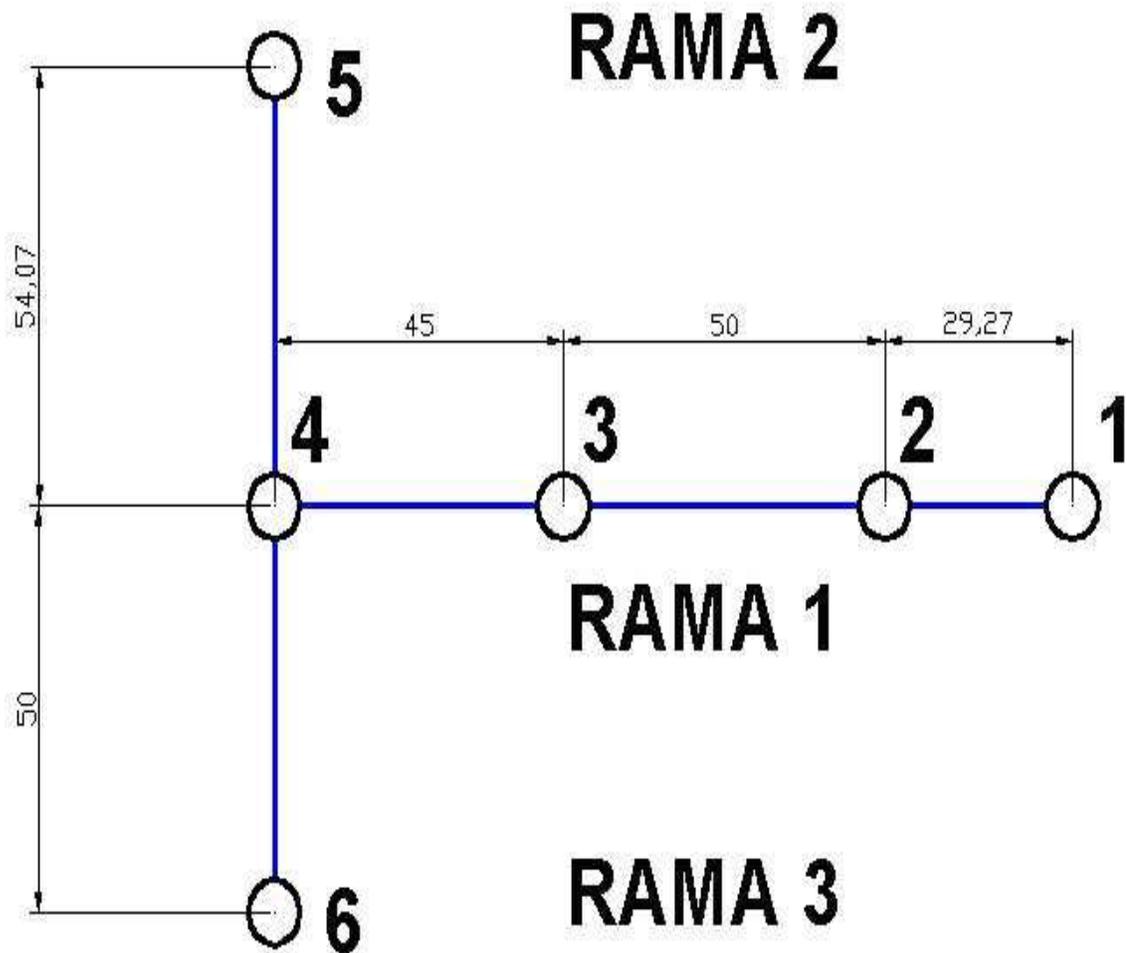
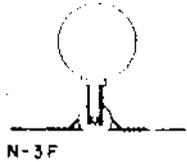
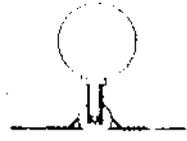
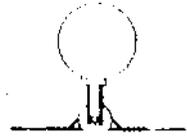
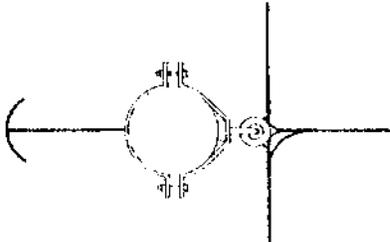


Figura 3.8 Representación de la Red

La estructura dispuesta para cada poste es la que se presenta en la tabla 3.11:

Tabla 3.11. Estructura de postes

NUMERO DE POSTE	DISPOSICIÓN DE CONDUCTORES	DECODIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	 <p>N-3F</p>	1P4	Estructura de paso con 4 conductores
2	 <p>N-3F</p>	1P4	Estructura de paso con 4 conductores
3	 <p>N-3F</p>	1P4	Estructura de paso con 4 conductores
4		P-R	Estructura de remate y paso
5	 <p>N-3F</p>	1R4	Estructura de remate con 4 conductores.
6	 <p>N-3F</p>	1R4	Estructura de remate con 4 conductores.

Costo Estimado de la Instalación Fotovoltaica

El precio de la instalación fotovoltaica se presenta a continuación en la tabla 3.12

Tabla 3.12 Precio de la instalación fotovoltaica

<b><i>NOMBRE DEL EQUIPO</i></b>	<b><i>CANTIDAD</i></b>	<b><i>PRECIO UNITARIO (\$)</i></b>	<b><i>COSTO TOTAL</i></b>
<b>PANELES FOTOVOLTAICOS</b>	<b>40</b>	<b>15,750</b>	<b>630,000</b>
<b>INVERSOR 3 FASES</b>	<b>1</b>	<b>50,700</b>	<b>50,700</b>
<b>CARGADOR DE BATERIAS</b>	<b>5</b>	<b>4,350</b>	<b>21,750</b>
<b>BATERIAS</b>	<b>40</b>	<b>2,700</b>	<b>108,000</b>
<b>CONDUCTORES EN CD</b>		<b>950</b>	<b>950</b>
<b>POSTES</b>	<b>6</b>	<b>1,058</b>	<b>6,348</b>
<b>ESTRUCTURAS PARA POSTES</b>	<b>6</b>	<b>350</b>	<b>2,100</b>
<b>CONDUCTORES EN CA (1/0)</b>	<b>914 m</b>	<b>3,600</b>	<b>3,600</b>
<b>Costo total</b>			<b>\$ 821,873.00</b>

### **3.17 Ventajas de la Instalación Solar Fotovoltaica**

Es previsible un aumento a nivel mundial de este tipo de energía por sus demostradas ventajas a todos los niveles. Pasamos a enumerar algunas de ellas:

- No contamina: No produce emisiones de CO<sub>2</sub> ni de otros gases contaminantes a la atmósfera.
- No consume combustibles.
- No genera residuos.
- Es inagotable.
- Su instalación es simple.
- Requiere poco mantenimiento.
- Resiste condiciones climáticas extremas: granizo, viento, temperatura, humedad.
- No existe una dependencia de los países productores de combustibles.
- Instalación en zonas rurales → desarrollo tecnologías propias.
- Se utiliza en lugar de bajo consumo y en casas ubicadas en parajes rurales donde no llega la red eléctrica general
- Venta de excedentes de electricidad a una compañía eléctrica.
- Tolera aumentar la potencia mediante la incorporación de nuevos módulos fotovoltaicos
- No requieren mantenimiento.
- No consumen combustible, se alimentan del sol. Funcionan con luz directa y difusa, por lo que siguen funcionando aunque exista nubosidad.
- Sus costes tienden a disminuir y lo harán más si su producción se incrementa.

### **3.18 Desventajas de las Instalaciones Solares Fotovoltaicas**

- Su elevado costo.
- El nivel de radiación fluctúa de una zona a otra y de una estación del año a otra
- Para recolectar energía solar a gran escala se requieren grandes extensiones de terreno.
- Requiere gran inversión inicial.

- Se debe complementar este método de convertir energía con otros como lo es la eólica para aumentar la eficiencia de generación.
- Los lugares donde hay mayor radiación, son lugares desérticos y alejados, (energía que no se aprovechara para desarrollar actividad agrícola o industrial, etc.).

# Capítulo 4

## Análisis de una Central Termosolar

### 4.1 Central Termoeléctrica

La energía eléctrica se produce como resultado de una serie de transformaciones de energía, los cuales se realizan dentro de la central, a partir de una energía disponible, que para el caso de las termoeléctricas, es la energía química almacenada en un combustible, Figura 4.1

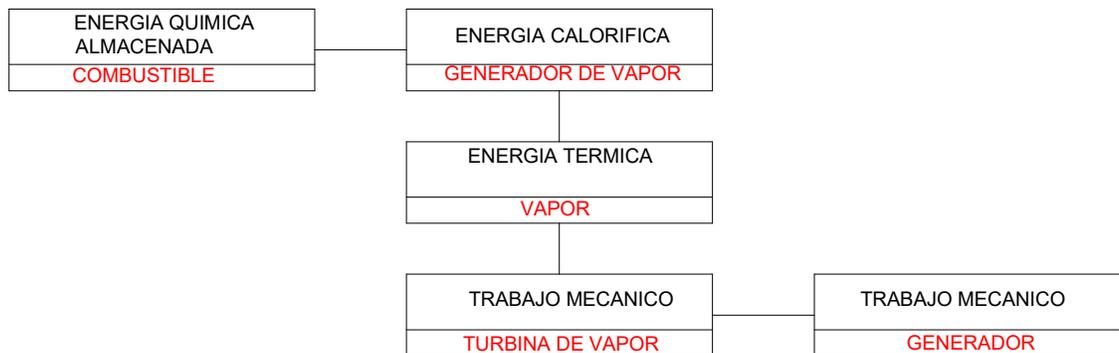


Figura 4.1 Transformaciones de Energía en una Central Termoeléctrica

La fuente de energía disponible es un combustible (gas, carbón etc.). La energía se encuentra almacenada en el combustible según su composición química y se libera haciendo que se produzca una reacción química que en este caso es la combustión.

Al producirse la combustión, ya se tiene la primera transformación de energía, es decir, que la energía química del combustible se transforma en calor (energía calorífica) en la flama y en los gases calientes producto de la combustión. La combustión se realiza en el

hogar de un generador de vapor. Si la energía calorífica de los gases se emplea para calentar agua y producir vapor, ya se tiene otra transformación de energía, tendremos así vapor con energía que se llamara térmica.

La energía del vapor se transforma en trabajo mecánico en una turbina de vapor con lo que se tiene otra transformación de energía.

Finalmente, si la turbina está acoplada a un generador eléctrico, se tiene la última transformación de energía y se llega al objetivo: la producción de energía eléctrica.

Todas las transformaciones de energía citadas se efectúan dentro de la central termoeléctrica, que cuenta con el equipo para realizarlas.

## **4.2 Equipo Principal de una Central termoeléctrica**

Todo equipo de una central termoeléctrica es importante, pero de acuerdo en su participación en la obtención del objetivo, así como por su tamaño y costo, se clasifica a los siguientes equipos principales:

### **a.- Caldera o Generador de Vapor:**

Lugar donde se provoca la combustión. Esta última genera el vapor a partir del agua que circula por una extensa red de tubos que tapizan las paredes de la caldera.

### **b.- Turbina:**

Una turbina de vapor es una turbomáquina motora, que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (entiéndase el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético.

### **c.- Generador Eléctrico:**

Equipo que se encarga de la transformación de fase del líquido de trabajo a vapor por medio de la quema de combustibles fósiles.

### **d.- Condensador**

Es un elemento intercambiador térmico, en cual se pretende que cierto fluido que lo recorre, cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor (cesión de calor al exterior, que se pierde sin posibilidad de aprovechamiento) con otro medio. La condensación se puede producir bien utilizando aire mediante el uso de un ventilador o con agua (esta última suele ser en circuito cerrado con torre de refrigeración,

en un río o la mar). La condensación sirve para condensar el vapor, después de realizar un trabajo termodinámico.

### 4.3 Análisis de una Central Termoeléctrica de Ciclo Rankine con Condensador

#### Modo de Funcionamiento:

El vapor saturado descargado por la caldera a una presión P1 es suministrado a la turbina, en donde se expande isoentrópicamente hasta la presión P2. En el condensador se transforma el vapor húmedo isobárica e isotérmicamente, en el líquido saturado mediante la remoción de calor. Puesto que la presión P2 = P3 es mucho menor que la presión del vapor en la caldera P4 = P1, el líquido saturado mediante la remoción de calor. Se bombea isoentrópicamente hasta alcanzar la presión P4.

El líquido comprimido es suministrado a la caldera, en donde se calienta primero hasta su temperatura de saturación correspondiente a la presión P1, y luego se evapora hasta transformarse finalmente en vapor saturado seco para terminar el ciclo.

La eficiencia del ciclo Rankine ideal, puede obtenerse de la definición original de la eficiencia:

$$e = \frac{\text{Trabajo}_{\text{neto}}}{\text{Energia}_{\text{entregada al sistema}}}$$

El trabajo neto considerando que el trabajo de la bomba es cero debido a que este es muy pequeño comparado con el trabajo que realiza la turbina es:

$$WN = Wt = h1 - h2 \quad (4.1)$$

Donde:

h1 = Entalpía en el punto 1

h2 = Entalpía en el punto 2

Por lo tanto la eficiencia queda de la siguiente manera:

$$e = \frac{h1 - h2}{h4 - h1} \quad (4.2)$$

Donde:

$h_4$  = Entalpía en el punto 4

La potencia eléctrica generada a la salida de la turbina se calcula de la siguiente manera:

$$W = (h_1 - h_2) * m * \text{eficiencia del la turbina} \quad (4.3)$$

Donde:

$m$  = flujo másico a la entrada de la turbina

Ahora se hará un análisis del ciclo termodinámico que se presenta en la Figura anterior para conocer la eficiencia del mismo.

Los datos técnicos de los equipos a utilizar se presentan a continuación:

Datos técnicos:

- **Caldera:**

Producción de vapor 12.000 Kg/h

Presión 17 bar

Temperatura 320 °C

- **Grupo turbogenerador:**

Potencia 1.778 MW.

Caudal de vapor 3.05 kg/s

Velocidad 6.500/1.500 rpm

Presión de entrada 16 bar

Presión de salida = 0.111 bar

T del vapor de entrada 300 °C

Consumo específico de vapor 6,19 Kg/KWh

Ahora ya con los datos técnicos podemos comenzar a realizar los cálculos necesarios

El arreglo de la instalación se muestra en la Figura 4.2

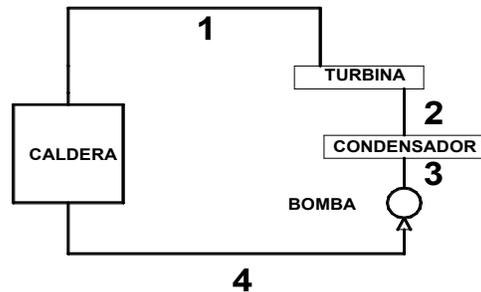


Figura 4.2 Arreglo de una instalación termoeléctrica con condensador

Primero comenzaremos a calcular los valores de entalpía a la salida de la caldera (punto 1) de la siguiente manera:

Para encontrar los valores, se utilizarán las tablas de vapor anexas al final del capítulo 5, en estas tablas con los valores de presión y temperatura calcularemos la entalpía y entropía a la salida de la caldera de la siguiente manera:

En la tabla, el valor de la presión que necesitamos no se encuentra por lo que tendremos que hacer una interpolación entre los valores de presión de 15 y 20 bar y los resultados se muestran a continuación en la tabla 4.1:

Tabla 4.1 Valores de entalpía y entropía a la salida de la caldera

<b>320 C</b>	<b>H</b>	<b>S</b>
<b>15 bars</b>	3081.9	6.9938
<b>20 bars</b>	3069.5	6.8452
20-15=5	=12.4	=0.1480
20-17=3	<u>3074.46</u>	<u>6.905</u>

Datos a la salida de la caldera:

Producción de vapor 12.000 Kg/h

Presión 17 bar

Temperatura 320 °C

$h_1 = 3074.46 \text{ (kJ/kg)}$

$S_1 = 6.905 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$

Ahora pasaremos a calcular las características del fluido a la salida de la turbina (punto 2), en los datos técnicos podemos encontrar la presión a la salida que es:

$P = 0.111 \text{ bar}$

Utilizando la siguiente ecuación para obtener la entalpía 2:

$$h_2 = h_f + X \cdot h_{fg} \quad (4.4)$$

Además conocemos que la entropía en el transcurso de la turbina es constante  $S_1 = S_2$  y con esto podemos calcular:

$$S = S_f + X \cdot S_{fg} \quad (4.5)$$

Sabiendo que  $S_{fg} = S_g - S_f$ , despejando  $X_2$  tenemos:

$$X_2 = \frac{S - S_f}{S_{fg}} \quad (4.6)$$

Donde:  $S$  = entropía.

$S_f$  = entropía de líquido saturado.

$S_{fg}$  = entropía de evaporado.

$X_2$  = calidad del agua.

Ahora solamente se hace una interpolación entre 0.1 bars y 0.2 bars para obtener las entalpías y entropías de 0.111 bars, la interpolación realizada se muestra en la tabla 4.2:

Tabla 4.2 entalpía y entropía a la salida de la turbina

	<b>hf (kJ/kg)</b>	<b>hfg</b>	<b>Sf (kJ/kg*K)</b>	<b>Sg</b>
<b>0.1 bars</b>	191.83	2392.8	0.6493	8.1502
<b>0.2 bars</b>	251.46	2358.3	0.8320	7.9085
	=59.63	=-34.5	=-0.1827	=-0.2417
0.2-0.111= 0.089	<u>198.38</u>	<u>2389.005</u>	<u>0.6694</u>	<u>8.1236</u>

Ya que se tiene los datos que se ocupan sólo se sustituye:

$$X2 = \frac{6.905 - 0.6694}{7.4542} = 0.8365$$

$$h2 = 198.38 + (0.8365)(2389.005) = 2196.78 \text{ (kJ/kg)}$$

Ahora se obtendrá la eficiencia de la planta con la expresión 4.2:

Datos:

$$h1 = 3074.46 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h2 = 2196.78 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h4 = h3 = hf2 = 198.38 \text{ (kJ/kg)}$$

$$e = \frac{h1 - h2}{h4 - h1} = \frac{3074.46 - 2196.78}{3074.46 - 198.38} = 0.3049$$

Ahora calcularemos la potencia eléctrica a la salida de la turbina con la expresión 4.3:

$$W = (3074.46 \text{ (kJ/kg)} - 2196.78 \text{ (kJ/kg)}) * 3.05 \text{ kg/s} * 0.75 = 2,007.69 \text{ KW}$$

#### 4.4 Análisis de una Central Termoeléctrica de Ciclo Rankine con Aporte Solar

El aporte solar será proporcionado antes del Generador de Vapor, de esta manera, el vapor al momento de entrar a la caldera ya no llevara una temperatura tan baja por lo que

no se tendrá que quemar tanto combustible. El arreglo de la instalación termo solar se presenta en la Figura 4.3:

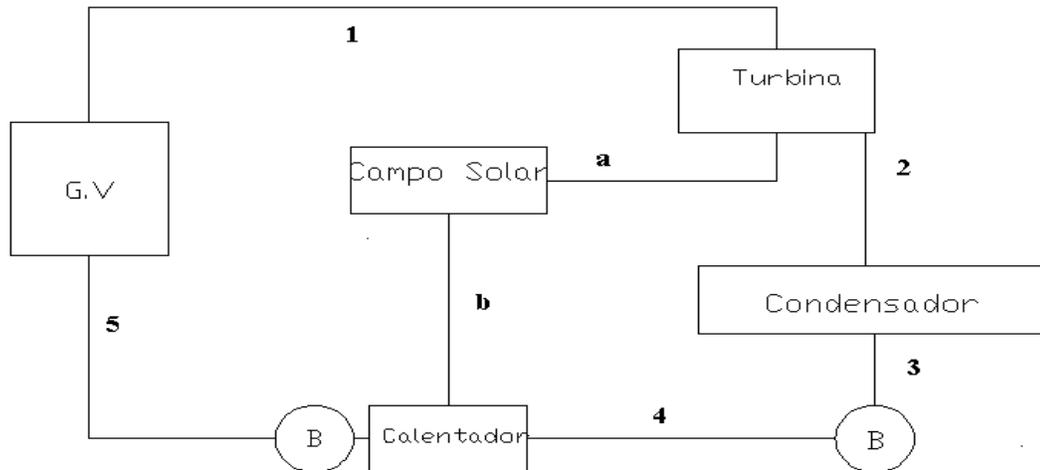


Figura 4.3 Arreglo de la instalación Termoelectrica con Aporte Solar

Datos del fluido de trabajo:

<b>Para el punto 1</b>	<b>Para el punto 2</b>
$P = 17 \text{ bar}$	$P_2 = 0.111 \text{ bar}$
$T = 320 \text{ }^\circ\text{C}$	$h_2 = 2196.78 \text{ (kJ/kg)}$
$h_1 = 3074.46 \text{ (kJ/kg)}$	$S_2 = S_1 = 6.905 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$
$S_1 = 6.905 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$	
<b>Para el punto a</b>	<b>Para el punto b</b>
$S_a = S_1 = 6.905 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$	$T = 360 \text{ C}$
$P_a = 3 \text{ bar}$	$P = 3 \text{ bar}$
$h_{fa} = 561.47 \text{ (kJ/kg)}$	$h_b = 3192.2 \text{ (kJ/kg)}$
$h_{fga} = 2163.8 \text{ (kJ/kg)}$	
$S_{fa} = 1.6072 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$	
$S_{ga} = 7.052 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$	
$S_a = 6.905 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$	

Buscando el valor de entalpía en el punto a:

$$X_a = \frac{S_a - S_{fa}}{S_{fga}} = 0.97$$

Donde:

$$S_{fga} = S_{ga} - S_{fa}$$

$$h_a = h_{fa} + X_a \overline{h_{fga}} = 2660.35 \text{ (kJ/kg)}$$

Para conocer el valor de entalpía en el punto 5 se realizara un balance de masa en ese punto, el cual se muestra en las ecuaciones 4.7, 4.8, 4.9 y se muestran a continuación:

$$m_b + m_4 = m_5 \quad (4.7)$$

$$m_b \cdot h_b + m_4 \cdot h_4 = m_5 \cdot h_5 \quad (4.8)$$

Despejando  $h_5$  nos queda

$$h_5 = \frac{m_b \cdot h_b + m_4 \cdot h_4}{m_5} \quad (4.9)$$

Tenemos por dato el valor del flujo que entra a la turbina, este valor se obtiene de los datos del fabricante, ahora conoceremos el porcentaje de flujo que se extrae hacia el punto a con la ecuación 4.10 la cual se muestra a continuación:

$$\frac{m_a}{m_1} = \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}} \quad (4.10)$$

Esto nos da un valor de:

$$\frac{m_a}{m_1} = 0.1474$$

Esto quiere decir que se extrae el 14.74 % del flujo en el punto a y el resto hacia el punto 2

$$m_a = 0.1474 \cdot 3.05 = 0.45 \text{ kg/s}$$

$$m_2 = 3.05 \cdot (-0.1474) = 2.6 \text{ kg/s}$$

Sustituyendo estos valores en la formula nos da un resultado de entalpía en el punto 5 de:

$$h5 = 640 \frac{kJ}{kg}$$

Ahora, con la ecuación. 4.11 calcularemos el valor de la eficiencia del ciclo para ver las mejoras obtenidas:

$$e = \frac{\eta_1(h_1 - h_a) + \left(1 - \frac{m_a}{m_1}\right) \eta_2(h_a - h_2)}{h_1 - h_5} \quad (4.11)$$

Con lo cual obtenemos un valor de eficiencia de:

$$e = 33.24\%$$

Para conocer el valor de la eficiencia de ciclo pero sin aporte solar lo único que cambiaría es el valor de la entalpía  $h_5$  ya que este valor será de  $h_5 = h_{fa} = 561.47(kJ/kg)$  por lo que la eficiencia del ciclo sin aporte solar es de:

$$e = 32\%$$

Ahora se calculará la potencia térmica que se desarrolla en la turbina y veremos de igual manera las mejoras obtenidas:

$$W_t = \eta_1(h_1 - h_a) - \eta_2(h_a - h_2) \quad (4.12)$$

Con lo cual obtenemos un valor de:

$$W_t = 2,468.3175 \text{ KW}$$

Por lo que se tiene un aumento de 460.617 KW

#### **4.5 Calculo de Combustible Quemado Sin Aporte Solar y Sin Ciclo Regenerativo**

Nuestro generador de vapor cuenta con las siguientes características:

$$\text{Superficie} = 400 \text{ m}^2$$

$$\text{Potencialidad específica} = 45 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$$

$$\text{Temperatura del vapor} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura del agua de alimentación} = 46 \text{ }^\circ\text{C}$$

Rendimiento = 80%

Poder calorífico del carbón = 32,238.4 KJ/Kg = 7700cal/Kg

El contenido térmico del vapor (a 17 bar y 320 °C) de acuerdo a las tablas de características de vapor sobrecalentado anexas al capítulo se tiene una entalpía de:

$$h_1 = 3074.46(\text{kJ/kg}) = 734.18\text{cal/Kg}$$

Las calorías absorbidas en una hora del vapor se calculan con la ecuación 4.13 y se presenta a continuación:

$$Q = S * pvs(h - T_i) \quad (4.13)$$

Donde:

S = Superficie del generador de vapor en m<sup>2</sup>

pvs = Potencialidad específica en Kg/m<sup>2</sup>

h = contenido térmico el vapor (entalpía)

T<sub>i</sub> = Temperatura del agua de entrada.

Sustituyendo valores:

$$Q = 400 * 45 * (34.18 - 46) = 12,387,240.000\text{cal/h}$$

Para conocer el consumo de carbón utilizaremos la ecuación 4.14 que se presenta a continuación:

$$P_c = \frac{Q}{\eta * P_{ci}} \quad (4.14)$$

Donde:

Q=Calorías absorbidas

η=Eficiencia del generador de vapor

P<sub>ci</sub>=Poder calorífico del carbón

Por lo cuál nos da un consumo de carbón de:

$$P_c = \frac{12,387,240.000}{0.8 * 7700} = 2.0 \frac{To}{h}$$

Teniendo el conocimiento de que la tonelada de carbón tiene un precio de 120 dólares y suponiendo que nuestra planta trabaja las 24 horas del día, para conocer la cantidad de carbón y el costo diario que consume la central se realizaran los siguientes cálculos con las ecuaciones 4.13 y 4.14:

$$\text{Carbón diario} = Pc * \text{Horas}_{\text{ día}} \quad (4.15)$$

Lo cual nos da un consumo diario de carbón de:

$$\text{Carb} = 2 * 24 = 48.00 \text{To}$$

Por lo que el costo se presenta a continuación:

$$\text{Costo} = \text{Carb} * \text{Precio} \quad (4.16)$$

$$\text{Costo} = 48 * 120 = 5,760.00 \text{Dólares}$$

#### **4.6 Calculo de Combustible Quemado Con Aporte Solar y Ciclo Regenerativo**

Para la colocación del aporte solar, se estudiaron varias posibilidades, pero la utilizada me pareció de mayor provecho ya que tendremos un aumento de eficiencia aún si no tuviéramos aporte solar (noches y días nublados), debido a que el vapor saliente de la turbina tiene una temperatura mayor a la que sale del condensador por lo que al mezclarse en el calentador tendremos de cualquier manera un aumento en la temperatura en el vapor que entra a la caldera.

Debemos tener en cuenta que el aporte solar solo durara 8 horas al día ya que son las horas en las que los valores de insolación son máximos, por lo que los cálculos que se presentan a continuación serán *con aporte solar y ciclo regenerativo y sin aporte solar y ciclo regenerativo*.

Utilizando la ecuación 4.13 para calcular las calorías absorbidas en una hora por el vapor sabiendo ahora que la temperatura a la entrada de la caldera será mayor ya que fue precalentada por los colectores cilíndricos parabólicos y el ciclo regenerativo.

Temperatura del vapor a la entrada de la turbina con aporte solar y ciclo regenerativo:

$$T_i = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura del vapor a la entrada de la turbina sin aporte solar pero con ciclo regenerativo:

$$T_i = 133 \text{ }^\circ\text{C}$$

Las calorías absorbidas en una hora del vapor con aporte solar y ciclo regenerativo son:

$$Q = S * P_{vs}(h - T_i)$$

$$Q = 400 * 45 * (34.18 - 150) = 10,515,240.00 \text{ cal/h}$$

Calorías absorbidas sin aporte solar y ciclo regenerativo:

$$Q = 10,821,240.00 \text{ cal/h}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 4.14 para saber el consumo de carbón por hora producido:

$$P_c = \frac{Q}{n * P_{ci}}$$

Con aporte solar:

$$P_c = 1.7 \text{ To/h}$$

Sin aporte solar y ciclo regenerativo:

$$P_c = 1.756 \text{ To/h}$$

Ahora conoceremos la cantidad de carbón que se quema por día, tomando en cuenta que el aporte solar solamente durara aproximadamente 8 horas (Horas Con insolación máxima):

Cantidad y precio de carbón quemado diario con aporte solar y ciclo regenerativo y el costo:

$$\text{Carb} = 1.7 * 8 = 13.6 \text{ To}$$

$$\text{CarbSA} = 1.756 * 16 = 28 \text{ To}$$

$$\text{Carbón diario} = 41.6 \text{ To}$$

$$\text{Costo} = 41.6 * 120 = 4,992.00 \text{ Dólares}$$

Donde:

CarbSA=Carbón quemado por día sin aporte solar

El ahorro en cantidad de carbón y el económico que se produce por día se calcula de la siguiente manera:

Calculo del ahorro económico:

$$AE = 5,760.00 - 4,992.00 = 768.0 \text{ dólares por día.}$$

Donde:

AE=Ahorro economico.

Calculo del ahorro en cantidad de carbón por día:

Por lo que nos da una cantidad de:

$$AC = (48-41.6) \text{To/h} = 6.4 \text{ To/h}$$

#### **4.7 Ventajas de las centrales termosolares**

Las centrales termosolares son capaces de producir electricidad a partir de un recurso inagotable como es el Sol sin emitir emisiones contaminantes. Las principales ventajas de este tipo de central frente a las convencionales se indican a continuación:

A lo largo de la vida útil de una central termoeléctrica se producen emisiones de gases contaminantes asociados a las diferentes actividades relacionadas con la misma, siendo la más evidente las emisiones derivadas de su propio funcionamiento. En este sentido las centrales termosolares (sin hibridación) al emplear como fuente de energía primaria la radiación solar carecen de emisiones y liberan de emisiones contaminantes a la atmósfera. Este panorama es muy distinto al que presentan las centrales termoeléctricas que emplean combustibles fósiles de carbón o derivados del petróleo.

#### **4.8 Desventajas de las centrales termosolares**

La principal desventaja de esta tecnología, es que como ya se vio en capítulos anteriores trabaja con radiación solar directa solamente, por la que en días nublados tendríamos muy bajo desempeño de la planta si no es que nulo.

La otra desventaja que presenta, es que para la implementación de una planta termosolar de grandes dimensiones, se ocupan grandes áreas de terreno para la instalación de los colectores.

## Capítulo 5

### Conclusiones

La generación de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos es hoy en día a una alternativa muy prometedora debido a varias razones como lo son:

- La industria fotovoltaica en el mundo es una industria en crecimiento.
- Los costos de producción de energía eléctrica continuarán disminuyendo y la harán una tecnología altamente competitiva.
- Las ER son un recurso muy abundante en el país que pueden contribuir a satisfacer la demanda energética de manera sustentable tanto de las ciudades como del campo.
- El país cuenta con los recursos humanos capaces de generar investigación y desarrollo para apropiarse las tecnologías de energías renovables y promover una industria nacional.

Aunque la tecnología solar hoy en día están muy al límite de la rentabilidad debido al elevado precio del Wp instalado. Poco a poco la tendencia a la implantación de instalaciones fotovoltaicas va aumentando lentamente, el elevado precio de la inversión produce un impedimento a muchos usuarios

Hoy en día, la mayor parte de instalaciones fotovoltaicas de venta a red de potencia superior a 25 KW que se instalan, son para Ayuntamientos, con el único objetivo de dar una imagen de apoyo a las energías renovables.

Es de igual manera tener en cuenta la tecnología termosolar ya que con ella podemos mejorar en eficiencia y ahorro de combustible las formas de producción de energía con las que contamos hoy en día como lo es la termosolar

Además pudimos aclarar las diferentes maneras que tiene la energía solar para ser aprovechada, es decir, no sólo se puede usar para generar energía eléctrica sino también para el calentamiento de algún medio como es el agua y de esta manera en los hogares poder reducir la dependencia hacia combustibles con la que contamos hoy en día ya que podemos remplazar el boiler por tecnología termosolar y es seguro que con este cambio ayudaríamos un poco a reducir la problemática del calentamiento global con la que vivimos hoy en día.

La tecnología solar, puede ser en un futuro no muy lejano una forma de satisfacer las necesidades energéticas de una gran mayoría de la población ya que el recurso solar en nuestro país es abundante además se reduciría la problemática con la que cargamos hoy en día debido a los grandes índices de contaminación con los que lidiamos, ya que esto esta provocando grandes cambios en el clima del planeta y pienso que la tecnología solar puede ser una de las alternativas más fuertes para evitar la gran quema de combustible que se produce en la centrales termoeléctrica ya que este es cada ves más escaso y se produce grandes índices de contaminación al realizar su quema.

# ANEXO 1

## TABLAS DE VAPOR

### Líquido subenfriado

$T$ °C	$v \times 10^3$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v \times 10^3$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 25 \text{ bar} = 2.5 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 223.99^\circ\text{C}$ )					$p = 50 \text{ bar} = 5.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 263.99^\circ\text{C}$ )			
20	1.0006	83.80	86.30	.2961	.9995	83.65	88.65	.2956
40	1.0067	167.25	169.77	.5715	1.0056	166.95	171.97	.5705
80	1.0280	334.29	336.86	1.0737	1.0268	333.72	338.85	1.0720
100	1.0423	418.24	420.85	1.3050	1.0410	417.52	422.72	1.3030
140	1.0784	587.82	590.52	1.7369	1.0768	586.76	592.15	1.7343
180	1.1261	761.16	763.97	2.1375	1.1240	759.63	765.25	2.1341
200	1.1555	849.9	852.8	2.3294	1.1530	848.1	853.9	2.3255
220	1.1898	940.7	943.7	2.5174	1.1866	938.4	944.4	2.5128
Sat.	1.1973	959.1	962.1	2.5546	1.2859	1147.8	1154.2	2.9202
$p = 75 \text{ bar} = 7.5 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 290.59^\circ\text{C}$ )					$p = 100 \text{ bar} = 10.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C}$ )			
20	.9984	83.50	90.99	.2950	.9972	83.36	93.33	.2945
40	1.0045	166.64	174.18	.5696	1.0034	166.35	176.38	.5686
80	1.0256	333.15	340.84	1.0704	1.0245	332.59	342.83	1.0688
100	1.0397	416.81	424.62	1.3031	1.0385	416.12	426.50	1.2992
140	1.0752	585.72	593.78	1.7317	1.0737	584.68	595.42	1.7292
180	1.1219	758.13	766.55	2.1308	1.1199	756.65	767.84	2.1275
220	1.1835	936.2	945.1	2.5083	1.1805	934.1	945.9	2.5039
260	1.2696	1124.4	1134.0	2.8763	1.2645	1121.1	1133.7	2.8699
Sat.	1.3677	1282.0	1292.2	3.1649	1.4524	1393.0	1407.6	3.3596
$p = 150 \text{ bar} = 15.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 342.24^\circ\text{C}$ )					$p = 200 \text{ bar} = 20.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 365.81^\circ\text{C}$ )			
20	.9950	83.06	97.99	.2934	.9928	82.77	102.62	.2923
40	1.0013	165.76	180.78	.5666	.9992	165.17	185.16	.5646
80	1.0222	331.48	346.81	1.0656	1.0199	330.40	350.80	1.0624
100	1.0361	414.74	430.28	1.2955	1.0337	413.39	434.06	1.2917
140	1.0707	582.66	598.72	1.7242	1.0678	580.69	602.04	1.7193
180	1.1159	753.76	770.50	2.1210	1.1120	750.95	773.20	2.1147
220	1.1748	929.9	947.5	2.4953	1.1693	925.9	949.3	2.4870
260	1.2550	1114.6	1133.4	2.8576	1.2462	1108.6	1133.5	2.8459
300	1.3770	1316.6	1337.3	3.2260	1.3596	1306.1	1333.3	3.2071
Sat.	1.6581	1585.6	1610.5	3.6848	2.036	1785.6	1826.3	4.0139
$p = 250 \text{ bar} = 25 \text{ MPa}$					$p = 300 \text{ bar} = 30 \text{ MPa}$			
20	.9907	82.47	107.24	.2911	.9886	82.17	111.84	.2899
40	.9971	164.60	189.52	.5626	.9951	164.04	193.89	.5607
100	1.0313	412.08	437.85	1.2881	1.0290	410.78	441.66	1.2844
200	1.1344	834.5	862.8	2.2961	1.1302	831.4	865.3	2.2893
300	1.3442	1296.6	1330.2	3.1900	1.3304	1287.9	1327.8	3.1741

Vapor sobrecalentado

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
<b><math>p = 0.06 \text{ bar} = 0.006 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 36.16^\circ\text{C})</math></b>				<b><math>p = 0.35 \text{ bar} = 0.035 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 72.69^\circ\text{C})</math></b>				
Sat.	23.739	2425.0	2567.4	8.3304	4.526	2473.0	2631.4	7.7158
80	27.132	2487.3	2650.1	8.5804	4.625	2483.7	2645.6	7.7564
120	30.219	2544.7	2726.0	8.7840	5.163	2542.4	2723.1	7.9644
160	33.302	2602.7	2802.5	8.9693	5.696	2601.2	2800.6	8.1519
200	36.383	2661.4	2879.7	9.1398	6.228	2660.4	2878.4	8.3237
240	39.462	2721.0	2957.8	9.2982	6.758	2720.3	2956.8	8.4828
280	42.540	2781.5	3036.8	9.4464	7.287	2780.9	3036.0	8.6314
320	45.618	2843.0	3116.7	9.5859	7.815	2842.5	3116.1	8.7712
360	48.696	2905.5	3197.7	9.7180	8.344	2905.1	3197.1	8.9034
400	51.774	2969.0	3279.6	9.8435	8.872	2968.6	3279.2	9.0291
440	54.851	3033.5	3362.6	9.9633	9.400	3033.2	3362.2	9.1490
500	59.467	3132.3	3489.1	10.1336	10.192	3132.1	3488.8	9.3194

<b><math>p = 0.70 \text{ bar} = 0.07 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 89.95^\circ\text{C})</math></b>				<b><math>p = 1.0 \text{ bar} = 0.10 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 99.63^\circ\text{C})</math></b>				
Sat.	2.365	2494.5	2660.0	7.4797	1.694	2506.1	2675.5	7.3594
100	2.434	2509.7	2680.0	7.5341	1.696	2506.7	2676.2	7.3614
120	2.571	2539.7	2719.6	7.6375	1.793	2537.3	2716.6	7.4668
160	2.841	2599.4	2798.2	7.8279	1.984	2597.8	2796.2	7.6597
200	3.108	2659.1	2876.7	8.0012	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
240	3.374	2719.3	2955.5	8.1611	2.359	2718.5	2954.5	7.9949
280	3.640	2780.2	3035.0	8.3162	2.546	2779.6	3034.2	8.1445
320	3.905	2842.0	3115.3	8.4504	2.732	2841.5	3114.6	8.2849
360	4.170	2904.6	3196.5	8.5828	2.917	2904.2	3195.9	8.4175
400	4.434	2968.2	3278.6	8.7086	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
440	4.698	3032.9	3361.8	8.8286	3.288	3032.6	3361.4	8.6636
500	5.095	3131.8	3488.5	8.9991	3.565	3131.6	3488.1	8.8342

<b><math>p = 1.5 \text{ bar} = 0.15 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 111.37^\circ\text{C})</math></b>				<b><math>p = 3.0 \text{ bar} = 0.30 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 133.55^\circ\text{C})</math></b>				
Sat.	1.159	2519.7	2693.6	7.2233	0.606	2543.6	2725.3	6.9919
120	1.188	2533.3	2711.4	7.2693	0.651	2587.1	2782.3	7.1276
160	1.317	2595.2	2792.8	7.4665	0.716	2650.7	2865.5	7.3115
200	1.444	2656.2	2872.9	7.6433	0.781	2713.1	2947.3	7.4774
240	1.570	2717.2	2952.7	7.8052	0.844	2775.4	3028.6	7.6299
280	1.695	2778.6	3032.8	7.9555	0.907	2838.1	3110.1	7.7722
320	1.819	2840.6	3113.5	8.0964	0.969	2901.4	3192.2	7.9061
360	1.943	2903.5	3195.0	8.2293	1.032	2965.6	3275.0	8.0330
400	2.067	2967.3	3277.4	8.3555	1.094	3030.6	3358.7	8.1538
440	2.191	3032.1	3360.7	8.4757	1.187	3100.0	3486.0	8.3251
500	2.376	3131.2	3487.6	8.6466	1.341	3300.8	3703.2	8.5892
600	2.685	3301.7	3704.3	8.9101				

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
<b>p = 5.0 bar = 0.50 MPa</b> ( <b>T<sub>sat</sub> = 151.86°C</b> )				<b>p = 7.0 bar = 0.70 MPa</b> ( <b>T<sub>sat</sub> = 164.97°C</b> )				
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.2729	2572.5	2763.5	6.7080
180	0.4045	2609.7	2812.0	6.9656	0.2847	2599.8	2799.1	6.7880
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.2999	2634.8	2844.8	6.8865
240	0.4646	2707.6	2939.9	7.2307	0.3292	2701.8	2932.2	7.0641
280	0.5034	2771.2	3022.9	7.3865	0.3574	2766.9	3017.1	7.2233
320	0.5416	2834.7	3105.6	7.5308	0.3852	2831.3	3100.9	7.3697
360	0.5796	2898.7	3188.4	7.6660	0.4126	2895.8	3184.7	7.5063
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.4397	2960.9	3268.7	7.6350
440	0.6548	3028.6	3356.0	7.9152	0.4667	3026.6	3353.3	7.7571
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873	0.5070	3126.8	3481.7	7.9299
600	0.8041	3299.6	3701.7	8.3522	0.5738	3298.5	3700.2	8.1956
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.6403	3476.6	3924.8	8.4391
<b>p = 10.0 bar = 1.0 MPa</b> ( <b>T<sub>sat</sub> = 179.91°C</b> )				<b>p = 15.0 bar = 1.5 MPa</b> ( <b>T<sub>sat</sub> = 198.32°C</b> )				
Sat.	0.1944	2583.6	2778.1	6.5865	0.1318	2594.5	2792.2	6.4448
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.1325	2598.1	2796.8	6.4546
240	0.2275	2692.9	2920.4	6.8817	0.1483	2676.9	2899.3	6.6628
280	0.2480	2760.2	3008.2	7.0465	0.1627	2748.6	2992.7	6.8381
320	0.2678	2826.1	3093.9	7.1962	0.1765	2817.1	3081.9	6.9938
360	0.2873	2891.6	3178.9	7.3349	0.1899	2884.4	3169.2	7.1363
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2030	2951.3	3255.8	7.2690
440	0.3257	3023.6	3349.3	7.5883	0.2160	3018.5	3342.5	7.3940
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2352	3120.3	3473.1	7.5698
540	0.3729	3192.6	3565.6	7.8720	0.2478	3189.1	3560.9	7.6805
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.2668	3293.9	3694.0	7.8385
640	0.4198	3367.4	3787.2	8.1290	0.2793	3364.8	3783.8	7.9391
<b>p = 20.0 bar = 2.0 MPa</b> ( <b>T<sub>sat</sub> = 212.42°C</b> )				<b>p = 30.0 bar = 3.0 MPa</b> ( <b>T<sub>sat</sub> = 233.90°C</b> )				
Sat.	0.0996	2600.3	2799.5	6.3409	0.0667	2604.1	2804.2	6.1869
240	0.1085	2659.6	2876.5	6.4952	0.0682	2619.7	2824.3	6.2265
280	0.1200	2736.4	2976.4	6.6828	0.0771	2709.9	2941.3	6.4462
320	0.1308	2807.9	3069.5	6.8452	0.0830	2788.4	3043.4	6.6245
360	0.1411	2877.0	3159.3	6.9917	0.0923	2861.7	3138.7	6.7801
400	0.1512	2945.2	3247.6	7.1271	0.0994	2932.8	3230.9	6.9212
440	0.1611	3013.4	3335.5	7.2540	0.1062	3002.9	3321.5	7.0520
500	0.1757	3116.2	3467.6	7.4317	0.1162	3108.0	3456.5	7.2338
540	0.1853	3185.6	3556.1	7.5434	0.1227	3178.4	3546.6	7.3474
600	0.1996	3290.9	3690.1	7.7024	0.1324	3285.0	3682.3	7.5085
640	0.2091	3362.2	3780.4	7.8035	0.1388	3357.0	3773.5	7.6106
700	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487	0.1484	3466.5	3911.7	7.7571

Vapor sobrecalentado

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
<b><math>p = 40 \text{ bar} = 4.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 250.4^\circ\text{C})</math></b>					<b><math>p = 60 \text{ bar} = 6.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 275.64^\circ\text{C})</math></b>			
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892
280	0.05546	2680.0	2901.8	6.2568	0.03317	2605.2	2804.2	5.9252
320	0.06199	2767.4	3015.4	6.4553	0.03876	2720.0	2952.6	6.1846
360	0.06788	2845.7	3117.2	6.6215	0.04331	2811.2	3071.1	6.3782
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408
440	0.07872	2992.2	3307.1	6.9041	0.05122	2970.0	3277.3	6.6853
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803
540	0.09145	3171.1	3536.9	7.2056	0.06015	3156.1	3517.0	6.9999
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677
640	0.1037	3351.8	3766.6	7.4720	0.06859	3341.0	3752.6	7.2731
700	0.1110	3462.1	3905.9	7.6198	0.07352	3453.1	3894.1	7.4234
740	0.1157	3536.6	3999.6	7.7141	0.07677	3528.3	3989.2	7.5190
<b><math>p = 80 \text{ bar} = 8.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 295.06^\circ\text{C})</math></b>					<b><math>p = 100 \text{ bar} = 10.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C})</math></b>			
Sat.	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432	0.01803	2544.4	2724.7	5.6141
320	0.02682	2662.7	2877.2	5.9489	0.01925	2588.8	2781.3	5.7103
360	0.03089	2772.7	3019.8	6.1819	0.02331	2729.1	2962.1	6.0060
400	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120
440	0.03742	2946.7	3246.1	6.5190	0.02911	2922.1	3213.2	6.3805
480	0.04034	3025.7	3348.4	6.6586	0.03160	3005.4	3321.4	6.5282
520	0.04313	3102.7	3447.7	6.7871	0.03394	3085.6	3425.1	6.6622
560	0.04582	3178.7	3545.3	6.9072	0.03619	3164.1	3526.0	6.7864
600	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029
640	0.05102	3330.1	3738.3	7.1283	0.04048	3318.9	3723.7	7.0131
700	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687
740	0.05729	3520.4	3978.7	7.3782	0.04560	3512.1	3968.1	7.2670
<b><math>p = 120 \text{ bar} = 12.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 324.75^\circ\text{C})</math></b>					<b><math>p = 140 \text{ bar} = 14.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 336.75^\circ\text{C})</math></b>			
Sat.	0.01426	2513.7	2684.9	5.4924	0.01149	2476.8	2637.6	5.3717
360	0.01811	2678.4	2895.7	5.8361	0.01422	2617.4	2816.5	5.6602
400	0.02108	2798.3	3051.3	6.0747	0.01722	2760.9	3001.9	5.9448
440	0.02355	2896.1	3178.7	6.2586	0.01954	2868.6	3142.2	6.1474
480	0.02576	2984.4	3293.5	6.4154	0.02157	2962.5	3264.5	6.3143
520	0.02781	3068.0	3401.8	6.5555	0.02343	3049.8	3377.8	6.4610
560	0.02977	3149.0	3506.2	6.6840	0.02517	3133.6	3486.0	6.5941
600	0.03164	3228.7	3608.3	6.8037	0.02683	3215.4	3591.1	6.7172
640	0.03345	3307.5	3709.0	6.9164	0.02843	3296.0	3694.1	6.8326
700	0.03610	3425.2	3858.4	7.0749	0.03075	3415.7	3846.2	6.9939
740	0.03781	3503.7	3957.4	7.1746	0.03225	3495.2	3946.7	7.0952

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
<b><math>p = 160 \text{ bar} = 16.0 \text{ MPa}</math></b> ( $T_{\text{sat}} = 347.44^\circ\text{C}$ )					<b><math>p = 180 \text{ bar} = 18.0 \text{ MPa}</math></b> ( $T_{\text{sat}} = 357.06^\circ\text{C}$ )			
Sat.	0.00931	2431.7	2580.6	5.2455	0.00749	2374.3	2509.1	5.1044
360	0.01105	2539.0	2715.8	5.4614	0.00809	2418.9	2564.5	5.1922
400	0.01426	2719.4	2947.6	5.8175	0.01190	2672.8	2887.0	5.6887
440	0.01652	2839.4	3103.7	6.0429	0.01414	2808.2	3062.8	5.9428
480	0.01842	2939.7	3234.4	6.2215	0.01596	2915.9	3203.2	6.1345
520	0.02013	3031.1	3353.3	6.3752	0.01757	3011.8	3378.0	6.2960
560	0.02172	3117.8	3465.4	6.5132	0.01904	3101.7	3444.4	6.4392
600	0.02323	3201.8	3573.5	6.6399	0.02042	3188.0	3555.6	6.5696
640	0.02467	3284.2	3678.9	6.7580	0.02174	3272.3	3663.6	6.6905
700	0.02674	3406.0	3833.9	6.9224	0.02362	3396.3	3821.5	6.8580
740	0.02808	3486.7	3935.9	7.0251	0.02483	3478.0	3925.0	6.9623

<b><math>p = 200 \text{ bar} = 20.0 \text{ MPa}</math></b> ( $T_{\text{sat}} = 365.81^\circ\text{C}$ )				
Sat.	0.00583	2293.0	2409.7	4.9269
400	0.00994	2619.3	2818.1	5.5540
440	0.01222	2774.9	3019.4	5.8450
480	0.01399	2891.2	3170.8	6.0518
520	0.01551	2992.0	3302.2	6.2218
560	0.01689	3085.2	3423.0	6.3705
600	0.01818	3174.0	3537.6	6.5048
640	0.01940	3260.2	3648.1	6.6286
700	0.02113	3386.4	3809.0	6.7993
740	0.02224	3469.3	3914.1	6.9052
800	0.02385	3592.7	4069.7	7.0544

<b><math>p = 240 \text{ bar} = 24.0 \text{ MPa}</math></b>			
0.00673	2477.8	2639.4	5.2393
0.00929	2700.6	2923.4	5.6506
0.01100	2838.3	3102.3	5.8950
0.01241	2950.5	3248.5	6.0842
0.01366	3051.1	3379.0	6.2448
0.01481	3145.2	3500.7	6.3875
0.01588	3235.5	3616.7	6.5174
0.01739	3366.4	3783.8	6.6947
0.01835	3451.7	3892.1	6.8038
0.01974	3578.0	4051.6	6.9567

<b><math>p = 280 \text{ bar} = 28.0 \text{ MPa}</math></b>				
400	0.00383	2223.5	2330.7	4.7494
440	0.00712	2613.2	2812.6	5.4494
480	0.00885	2780.8	3028.5	5.7446
520	0.01020	2906.8	3192.3	5.9566
560	0.01136	3015.7	3333.7	6.1307
600	0.01241	3115.6	3463.0	6.2823
640	0.01338	3210.3	3584.8	6.4187
700	0.01473	3346.1	3758.4	6.6029
740	0.01558	3433.9	3870.0	6.7153
800	0.01680	3563.1	4033.4	6.8720
900	0.01873	3774.3	4298.8	7.1084

<b><math>p = 320 \text{ bar} = 32.0 \text{ MPa}</math></b>			
0.00236	1980.4	2055.9	4.3239
0.00544	2509.0	2683.0	5.2327
0.00722	2718.1	2949.2	5.5968
0.00853	2860.7	3133.7	5.8357
0.00963	2979.0	3287.2	6.0246
0.01061	3085.3	3424.6	6.1858
0.01150	3184.5	3552.5	6.3290
0.01273	3325.4	3732.8	6.5203
0.01350	3415.9	3847.8	6.6361
0.01460	3548.0	4015.1	6.7966
0.01633	3762.7	4285.1	7.0372

# Referencias

## Revista:

[Ochoa y Ortega 2007]

R. Ochoa Bautista y C. Ortega Rivas, “Claridades Agropecuarias”, Aprovechamiento de la Energía Solar Térmica, vol. 6, no. 170, págs. 60, Octubre 2007.

## Libro:

[Montgomery 1986]

Richard H. Montgomery, Energía solar, : Limusa, 1986.

[Ortega 2001]

Mario Ortega Rodríguez, Energías Renovables, Limusa, 2001.

[HARPER 1982]

Gilberto Enríquez Harper, centrales eléctricas 1, Limusa, 1982.

[Domínguez 2001 ]

Muñoz Domínguez Marta, Ing. Térmica, Prentice All, 2001.

## Internet:

[http://www.ine.gob.mx/cclimatico/descargas/taller\\_ener\\_ren\\_08.pdf](http://www.ine.gob.mx/cclimatico/descargas/taller_ener_ren_08.pdf)

[http://pdf.rincondelvago.com/energia-solar\\_2.html](http://pdf.rincondelvago.com/energia-solar_2.html)

<http://saecsaenergiasolar.com/gratuito/iie.pdf>

[http://www.astro.inin.mx/jaime/Papers\\_Memorias06/Presentaciones/Panel3\\_Antonio.pdf](http://www.astro.inin.mx/jaime/Papers_Memorias06/Presentaciones/Panel3_Antonio.pdf)