

112  
21



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Estudios Superiores  
Cuautitlán

**"ANALISIS DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION  
FOTOVOLTAICO PARA UNA COMPUTADORA  
PERSONAL"**

**T E S I S**  
Que para obtener el Título de:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
**P r e s e n t a:**

**LEONARDO MENDOZA JARDINES**

Asesor: Ime. Ma. de la Luz González Quijano

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx. 1997

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES - CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA F.E.S.-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Análisis de un sistema de alimentación fotovoltaico para  
una computadora personal"

que presenta el pasante: Leonardo Mendoza Jordinea  
con número de cuenta: 9156272-9 para obtener el TÍTULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A J E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlan Izcalli, Edo. de Mex., a 4 de Abril de 1997

PRESIDENTE Ing. Benigno Contreras Sampedro  
VOCAL Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez  
SECRETARIO Ing. M. Lur González Quijano  
PRIMER SUPLENTE Ing. Carlos Rodríguez Arciniegas  
SEGUNDO SUPLENTE Ing. Ubaldino Ramírez Urzua

## **A MIS PAPÁS**

**POR HABERME APOYADO INCONDICIONALMENTE EN LOS MOMENTOS MÁS  
DIFÍCILES DE MI VIDA, ASÍ COMO EN EL DESARROLLO DE MI CARRERA.**

**Y**

**A TODOS LOS QUE ME AYUDARON**

## INDICE

	Pág.
<b>Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>1.-Posibilidades energéticas no contaminantes.</b>	<b>3</b>
1.1.-Energía hidroeléctrica.	4
1.2.-Conversión de energía térmica oceánica (CETO).	7
1.3.-Energía geotérmica.	12
1.4.-Energía por biomasa.	21
1.5.-Energía eólica.	29
1.6.-Energía solar.	38
<b>2.-Energía fotovoltaica .</b>	<b>42</b>
2.1.-Desarrollo histórico.	43
2.2.-El recurso "La luz".	47
2.2.1.-Unidades de medición.	49
2.2.2.-Las horas pico.	50
2.2.3.-Radiación directa difusa y global.	52
2.2.4.-Mapas de insolación.	53
2.2.5.-La trayectoria solar VS la latitud del lugar.	56
2.2.6.-Captadores fijos y captadores con seguimiento solar.	58
2.2.7.-Aplicaciones.	60
<b>3.-Proceso fotovoltaico.</b>	<b>63</b>
3.1.-Elementos que conforman el sistema fotovoltaico.	64
3.1.1.-Las fotocélulas.	67
3.2.-Arreglo fotovoltaico.	73
<b>4.-Los bancos de baterías.</b>	<b>86</b>
4.1.-Los bancos de baterías para sistemas fotovoltaicos	87
4.2.-Eficiencia.	89
4.3.-Capacidad.	90
4.4.-Curvas de estado de carga VS voltaje.	91
4.5.-Curvas de voltaje a la descarga.	93
4.6.-Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de baterías.	96
4.7.-Capacidad de la batería	100
4.8.-Mantenimiento.	101
<b>5.-El sistema solar fotovoltaico a baterías.</b>	<b>103</b>
5.1.-Principio de operación.	104
5.2.-Operación nocturna.	107
5.2.1.-Días nublados.	108

	<b>Pag.</b>
<b>5.3.-Niveles de voltaje de operación.</b>	<b>109</b>
<b>5.3.1.-Balance de energía.</b>	<b>111</b>
<b>6.-Dimensionamiento.</b>	<b>113</b>
<b>6.1.-Dimensionamiento básico de un sistema fotovoltaico.</b>	<b>114</b>
<b>7.-Captación de energía solar.</b>	<b>121</b>
<b>7.1.-Seguimiento solar.</b>	<b>122</b>
<b>8.-Análisis de la implementación</b>	<b>131</b>
<b>8.1.-Material y equipo</b>	<b>132</b>
<b>8.2.-Diagrama esquemático</b>	<b>134</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>136</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>140</b>

## INTRODUCCIÓN

**La enorme demanda de energía para la satisfacción de las necesidades humanas, ha generado un sin número de formas de obtención de la misma, lo cual da como resultado un amplia gama de recursos a nuestra elección.**

**De estos tipos de energía se manifiestan entre las más importantes, los combustibles derivados del petróleo, hidroeléctricos, nucleoelectricos, siendo estas las formas de producción de energía eléctrica en México.**

**El campo en el cuál la tecnología ha evolucionado es en la generación de energía eléctrica, teniendo muy diversas opciones como las antes mencionadas, a las que se suman la energía eléctrica transformada de la energía eólica o la obtenida a través de las fotoceldas.**

**Esta última alternativa se manifiesta como una opción altamente viable para un futuro cercano, ya que en el proceso de transformación no se obtienen grandes desechos y por tanto la contaminación que genera es mínima.**

**El análisis de esta forma de obtención de energía eléctrica con respecto al resto es uno de los objetivos de esta tesis, así como el el mostrar un ejemplo de la utilización de las fotoceldas en el suministro de la energía eléctrica en una computadora personal portátil dando a conocer sus ventajas y desventajas.**

**Así la energía fotovoltaica se muestra como una gran alternativa energética en un ambiente que exige menor contaminación y gran versatilidad en la producción de energía eléctrica**

**Para poder obtener las ventajas de la energía fotovoltaica es necesario conocer a grandes rasgos las diferentes formas de obtención de energía eléctrica, motivo por el cual se dedica el primer capítulo a dar un esbozo de las formas de generación menos contaminantes de la misma.**



# **CAPÍTULO 1**

## **POSIBILIDADES ENERGÉTICAS NO CONTAMINANTES**

## 1.1 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

La fuerza hidroeléctrica es considerada por muchos como una forma de energía solar, porque el sol realmente absorbe el agua de la tierra mediante la evaporación. El agua regresa después a la tierra cuando llueve, llenando los ríos y corrientes que, finalmente, fluyen hacia los océanos. Es esta agua que fluye de los ríos y las corrientes la que utilizada para la generación convencional de fuerza hidroeléctrica.

La idea detrás de la fuerza hidroeléctrica es bastante directa : aprovecha la energía cinética del agua que cae, la cual se almacena en un dique o fluye naturalmente a lo largo de un río, pasa a través de una turbina, la cual enciende un generador y produce electricidad. El agua que cae puede desde luego producir también energía mecánica, como en el caso de los molinos de agua que se usaban (y se sigue haciendo) para moler granos.

La hidroelectricidad es la forma más antigua de generación eléctrica aún utilizada. Generalmente se le considera la más confiable también, aunque las sequías pueden afectar notablemente su suministro.

Los sistemas hidroeléctricos se definen tanto por tamaño como por la forma en que utilizan la energía del agua. Las grandes plantas hidroeléctricas generalmente se consideran las generadoras de más de 30 mega watts.

La mayoría de los sistemas hidroeléctricos usan un dique o alguna otra estructura para capturar y almacenar agua, la cual finalmente será liberada a través de una turbina. Un método menos común es colocar las turbinas en ductos a mitad de la corriente de un río, evitando así la necesidad de bloquear el flujo de agua, dado que estos sistemas

redujeron el impacto ambiental y los costos de construcción, estos aparatos en las corrientes de los ríos están aumentando en popularidad. Las grandes instalaciones hidroeléctricas invariablemente son diques o presas, mientras que los sistemas más pequeños pueden usar un dique o un sistema de flujo. Por último, un tercer tipo de generación de fuerza hidroeléctrica es el método de almacenaje bombeado, en donde el agua se bombea durante las horas que no son críticas hacia una reserva más alta para usarse posteriormente .

Los factores que determinan la cantidad de energía que un sistema hidroeléctrico puede crear son la cabeza y el flujo del agua. La cabeza es la altura del agua que cae desde el punto en el que comienza su descenso hasta el punto más bajo, debajo de la turbina. El flujo es la velocidad a la que el agua pasa a través del sistema.

Con una instalación grande usando un dique u otra estructura, el agua se bloquea y almacena hasta que se necesita. Entonces el agua se libera a través de canales, grandes pipas que dirigen el agua a la turbina en la planta de energía. La turbina se conecta a un generador, que se enciende debido a la energía del agua que fluye y produce electricidad. Las líneas de transmisión envían la energía desde la planta hasta el sistema de distribución eléctrica.

Las instalaciones en las corrientes de los ríos colocan los ductos directamente en el flujo de una corriente con turbinas en los ductos. Esto permite que parte del río siga fluyendo naturalmente mientras la instalación puede capturar energía del agua que pasa a través de las turbinas en las pipas.

El almacenaje bombeado es un método para reutilizar el agua que ha atravesado la turbina y la almacena para un uso posterior, cuando es más conveniente en términos de costo o urgencia. El agua se bombea a través de una turbina reversible desde una reserva baja hacia una alta. Los sistemas de almacenaje bombeado realmente usan más energía de la que producen, pero son útiles en los servicios públicos porque pueden operar en momentos en que es más costoso para producir la electricidad. (El bombeo se hace durante horas que no son críticas, cuando la energía está en su costo más bajo).

Así se describen las formas más tradicionales de la producción de la energía eléctrica hidráulicamente.

A pesar de los altos costos iniciales, la fuerza hidroeléctrica elimina la preocupación por las emisiones contaminantes y los desperdicios nocivos. También los costos de la energía por hora son bastante baratos en comparación con otras fuentes. Otra importante ventaja es que puede echarse a andar pronto y la producción puede ajustarse rápidamente. Para finalizar, la fuerza hidroeléctrica es suministrada por una base de fuente local que permite, al país poseedor, ser autosuficiente de gran parte de su suministro. Cualquier nación que desarrolle sus fuentes hidroeléctricas está explotando una fuente nacional, permitiéndose depender menos de fuentes externas.

## 1.2 CONVERSIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA OCÉANICA (CETO)

La conversión de energía térmica oceánica tiene que ver con la explotación de las diferencias de temperatura entre el agua templada de la superficie y las capas profundas más frías. Particularmente en las latitudes tropicales la diferencia de temperaturas en la superficie y las de las aguas profundas de unos 1000 metros, puede variar en 20 grados centígrados. Esta diferencia de temperatura puede utilizarse para generar electricidad al vaporizar y condensar de manera alternada el flujo de trabajo.

En 1881, el físico francés Arsene d'Arsonval fue el primero en proponer que la electricidad podía generarse explotando las diferencias de temperatura de los océanos. Sin embargo, no fué sino hasta casi cincuenta años después, que uno de los alumnos de d'Arsonval, Georges Claude, realmente intentó poner en práctica el concepto de la conversión de la energía térmica oceánica (CETO), construyendo una pequeña planta cerca de la costa de Cuba.

La fuente de energía potencial representada por la tecnología CETO es importante. La relativa regularidad de las temperaturas oceánicas significa que los sistemas CETO pueden brindar niveles constantes de energía, lo que los hace aptos para un uso de carga fundamental (en nivel mínimo de energía continua) para los servicios públicos. También tienen potencial para lugares lejanos a nivel de la costa que tienen pocas o ninguna opción de energía.

Debido a la necesidad de variación de temperatura, los sistemas CETO sólo se aplican en ciertas partes del mundo. Cuando se toman en cuenta las variaciones anuales de temperatura, el recurso térmico CETO útil está principalmente entre los trópicos de

**Cáncer y Capricornio, con los lugares más atractivos en el Pacífico, en donde una gran área ha mostrado diferencias de temperatura de 24 grados centígrados. La ubicación real de una instalación varía según las características locales. Por ejemplo, el sistema puede estar flotando, con base en la tierra o fijo a una especie de torre.**

Hay dos tipos de sistemas para convertir en energía las diferencias de temperatura de los océanos: el sistema de ciclo cerrado y el abierto. El sistema desarrollado por d'Arsonval se basaba en un concepto de ciclo cerrado, pero el que Claude intentó cincuenta años después tomó esa idea y la desarrolló más, convirtiéndola, finalmente, en un sistema de ciclo abierto.

Los dos sistemas son relativamente similares: CETO funciona como un motor de calor que utiliza el agua templada de mar para vaporizar el flujo de trabajo; el vapor entonces enciende una turbina. El agua de mar fría bombeada desde los niveles más bajos del océano, condensa el vapor al encender la turbina. El proceso de condensación proporciona el impulso necesario para que el flujo corra, el cual puede ser agua de mar templada o cualquier otro líquido como amoníaco.

En el último caso, el vapor condensado se bombea de vuelta al evaporador, formando un ciclo cerrado. En el primer caso, el vapor condensado se descarga.

Cada sistema tiene ventajas y desventajas. Las opiniones se dividen respecto a cuál es el mejor sistema. Mientras que algunos creen que los sistemas de ciclo cerrado ofrecen lo mejor para una aplicación comercial a corto plazo, otros opinan que las plantas de ciclo abierto serán las más eficaces en términos de costo a la larga, en particular si se

consideran los subproductos, como la acuicultura y el agua fresca, relacionados con esta tecnología.

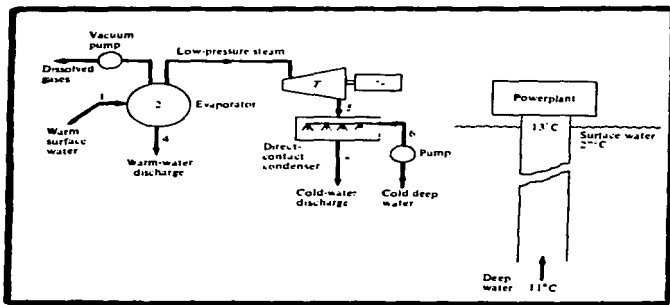


FIGURA 1.2.1 DIAGRAMA DE FLUJO Y ESQUEMÁTICO DE UNA PLANTA CETO DE CICLO ABIERTO.

Las plantas de ciclo cerrado usan turbinas más pequeñas que las grandes de baja presión empleadas en el sistema de ciclo abierto. Problemas tales como el costo, la corrosión, eficiencia y la biodescomposición (cuando la materia marina queda atrapada en el sistema) de los intercambiadores de calor todavía tienen que resolverse.

El sistema de ciclo abierto es más fácil de construir porque no tiene que soportar una presión alta. A su favor también está el potencial de ventajosos subproductos como la

acuicultura y el agua desalada. Las principales desventajas de este sistema, por otra parte, son que sus componentes deben mantenerse bajo un elevado vacío y que requiere de una turbina más grande (porque el vapor es mucho menos denso que el de un fluido de trabajo en un sistema típico de ciclo cerrado.) Además, las plantas de ciclo abierto con mayor capacidad generadora de energía todavía tienen que desarrollarse. Gracias a su sencillez y bajos costos.

Los sistemas híbridos también existen; utilizan un condensador y una turbina más pequeños que en un sistema de ciclo abierto y pueden producir agua desalada como en dicho ciclo.

Existen muchos componentes en un sistema CETO, muchos de los cuales constituyen una tecnología bien desarrollada y algunos otros están en proceso de investigación. Los principales que se están estudiando son las pipas de agua fría y los intercambiadores de calor. Los aspectos que se investigan son la resistencia a la corrosión, a la presión, a la temperatura y a la tensión. La inaccesibilidad de estas pipas también provoca problemas de mantenimiento. Para vencer los problemas estructurales reales relacionados con las pipas se están llevando a cabo experimentos con diversos materiales, como el concreto, acero, aluminio, polietileno y otros plásticos.

Los intercambiadores de calor (el evaporador y el condensador) se consideran los componentes más costosos de un sistema CETO de ciclo cerrado. Los problemas que se están investigando con estos componentes incluyen la biodescomposición, la corrosión y la durabilidad. Al igual que con las pipas de agua fría, se están considerando diversos materiales, incluyendo combinaciones de titanio y aluminio, aleaciones de cobre y níquel así como diversos plásticos.



**Las desventajas ambientales analizadas previamente se consideran relativamente menores y parecen poder controlarse. Más importante es el hecho de que la CETO es una fuente renovable que no contamina ni origina gases de invernadero. Los beneficios adicionales son tanto económicos como políticos. La CETO ofrece el potencial de subproductos económicamente valiosos, así como un cierto grado de autosuficiencia para lo países que desarrollan esta enorme energía. Por último el suministro constante de energía CETO le brinda una ventaja sobre las fuentes de energía renovable que son ligeramente menos regulares en su producción de energía.**

**Al igual que con otras fuentes de energía renovable, la CETO tendrá que vencer obstáculos de financiamiento para poder lograr una aplicación más amplia. La tecnología que está ahí para que esta fuente de energía se desarrolle y se espera que juegue un importante papel en nuestro futuro suministro de energía.**

### 1.3 ENERGÍA GEOTÉRMICA

La energía geotérmica es el calor generado por procesos naturales dentro de la tierra. Puede contenerse en depósitos subterráneos de vapor, agua caliente, fluidos salinos calientes y roca caliente seca. Se calcula que 10% de la masa terrestre mundial contiene recursos hidrogeotérmicos accesibles que, en teoría, podrían proporcionar varios millones de quads de energía cada año. Estrictamente hablando, la energía geotérmica no es renovable dentro de una escala de tiempo humano; pero dado que el recurso es tan grande, se le considera inextinguible.

Hay tres fuentes originales principales de energía geotérmica. la más grande cantidad de calor se libera a partir de la descomposición de elementos naturalmente radiactivos que se han formado a lo largo de la historia de la tierra; se calcula que de un 45% a un 85% de calor que escapa de la tierra se debe a esa descomposición radiactiva en la corteza. Las fuentes de calor intenso restantes, e importantes, son el calor del impacto y la compresión de la formación inicial de la tierra, así como el calor liberado a partir del hundimiento de metales pesados como el acero, níquel y cobre, al descender para formar el núcleo de la tierra.

Si bien es normal el calor geotérmico a grandes profundidades de la tierra, su existencia cerca de o en la superficie misma es menos común. Sin embargo, en estos lugares donde podemos presenciar la tremenda energía que se encuentra atrapada dentro de nuestro planeta. Los volcanes y géiseres son ejemplos de energía geotérmica que ha ascendido de lo más profundo de la tierra hacia la superficie. en estos lugares, también, es donde podemos aprovechar esta energía. Estos recursos geotérmicos tienen tres componentes: una concentración poco común de alguna fuente de calor; un líquido que

transporta el calor desde una roca que está dentro de la tierra hasta la superficie; y la permeabilidad en la roca, suficiente para permitir el desarrollo de un sistema de flujo a través del cual el fluido puede circular.

La concentración anormal de calor, generalmente proviene de la intrusión de roca derretida (magma) de las profundidades de la tierra a niveles más cercanos a la superficie, o bien del ascenso de agua subterránea. La mayor parte de las veces, el líquido que transporta el calor se ha originado a partir del agua que estaba atrapada durante la formación inicial de la roca, o se ha filtrado desde la superficie hacia abajo a través de fallas de diversos huecos por debajo de la superficie terrestre. La permeabilidad o capacidad de la roca para esparcir los fluidos, se hace posible mediante los poros o espacios abiertos creados por fracturas y fallas dentro de la tierra.

Un área particularmente importante de actividad geotérmica y volcánica recibe el nombre de Anillo de Fuego, un cinturón semicircular que rodea al océano pacífico, una de las muchas placas que componen la superficie terrestre. Bordea a las Filipinas, Japón, las islas Aleutianas y los extremos occidentales de Norte, Centro y Sudamérica, y es responsable de gran parte de la actividad geotérmica en esas regiones. Los terremotos, volcanes y géiseres son muy comunes a lo largo del anillo de Fuego.

La energía geotérmica, en teoría, puede capturarse de cuatro formas diferentes. Aunque sólo una de estas formas está comercialmente disponible en la actualidad, las otras están pasando por procesos de investigación y desarrollo como fuentes potenciales de energía.

## **Hidrotérmica**

La energía geotérmica usada en nuestros días es energía hidrotérmica, la cual consta de depósitos de agua caliente y vapor que están atrapados en la roca fracturada o en los sedimentos debajo de la corteza terrestre. Esta energía puede utilizarse de dos maneras: a altas temperaturas, se utiliza para generar electricidad; y a temperaturas bajas o moderadas, se emplea para proporcionar calor directo. Si bien la segunda aplicación es la más extendida, ambas pueden utilizarse en todo el mundo (ver figura 1.3.1).

Los pozos hidrotérmicos pueden ser de dos tipos: vapor seco y agua caliente. Aunque los pozos con vapor seco son de mayor calidad que los de agua caliente, la cantidad de sitios potenciales es muy limitada. Las dos principales fuentes de vapor seco localizados hoy están en Larderello, en Italia, y Los Géiseres California. Los pozos de agua caliente pueden encontrarse en mayor cantidad, y cada vez se están usando más y con mayor frecuencia.

Los depósitos hidrotérmicos se encuentran en cualquier parte entre varios cientos y hasta 14000 pies por debajo de la superficie terrestre. La temperatura de los fluidos atrapados dentro varía entre 32 grados centígrados y 360 grados centígrados. Estos depósitos son los únicos disponibles en la actualidad para la energía geotérmica porque son los más accesibles, y por lo tanto los más fáciles de explotar.

Las altas temperaturas, superiores a los 150 grados centígrados se usan comúnmente para generar electricidad. Dependiendo del estado de la fuente geotérmica (vapor o líquido), y de su temperatura, es posible usar una de tres tecnologías diferentes para crear electricidad. Si la fuente contiene vapor seco, el vapor se limpia conforme sale

de la tierra y después se envía directamente a una turbina-generador. Si la fuente contiene líquidos hidrotérmicos, con una temperatura superior a los 200 grados centígrados, se emplea la tecnología de vapor rápido: se deja que el agua se convierta en vapor mientras está en la superficie terrestre y, después, el vapor se conduce a una turbina. Por último, para las fuentes con líquidos a temperaturas moderadas y los que contienen un alto grado de salinidad, se está empleando una tecnología de ciclo binario relativamente nueva. En este proceso, el líquido caliente se mantiene bajo presión mediante una bomba y luego vaporiza un fluido de trabajo secundario como hidrocarburo que a su vez hace funcionar una turbina. Entonces, el fluido se presuriza en un sistema de circuito cerrado.

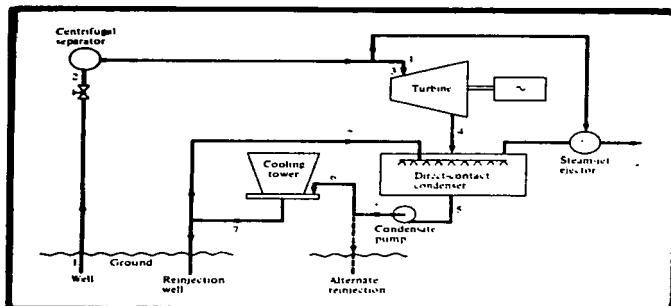


FIGURA 1.3.1 ESQUEMA DE UNA PLANTA DE VAPOR

Las plantas eléctricas también pueden tener diseños híbridos; combinan la energía geotérmica con la energía complementaria proveniente de otra fuente, como la biomasa o los combustibles fósiles. Los sistemas híbridos generalmente son apropiados sólo para depósitos más fríos (de temperatura más baja) que pueden requerir de energía adicional; las fuentes con altas temperaturas no necesitan de energía complementaria.

Las fuentes de temperatura más bajas tienen una variedad de aplicaciones directas de calor, principalmente, el calor geotérmico directo se usa para la calefacción ambiental en edificios individuales o calentamiento de distrito, como se hace en Islandia. (Reykjavik se ha calentado durante 40 años mediante energía geotérmica). Otros usos pueden incluir a las bombas de calor que pueden usarse para la calefacción ambiental o aire acondicionado (enfriamiento ambiental) y son más eficientes que las bombas de calor de aire; procesamiento de alimentos; aplicaciones industriales; invernaderos; y criaderos de peces.

### **Geopresión**

Los sistemas geopresurizados son otra forma de energía geotérmica. Estos depósitos contienen fluidos calientes que está saturados por metano y cerrados con alta presión en capas de arenisca o profundidades de 3000 a 6000 m debajo de la superficie terrestre. La fuente más conocida de energía geopresurizada.

### **Roca seca caliente**

La roca seca caliente es otra fuente potencial de energía geotérmica que todavía tiene que explotarse comercialmente. Esta fuente se encuentra en donde la corteza

terrestre es delgada y el magma está lo suficientemente cercano a la superficie para calentar la roca que contiene muy poca agua. Las regiones con roca seca caliente son las que se encuentran más ampliamente distribuidas en el planeta. Una vez más, sin embargo, los métodos económicos para capturar esta fuente de energía todavía tienen que desarrollarse. Las investigaciones actuales tienen que ver con la perforación de dos pozos: el primero inyectado en agua fría, la cual circula a través de las fracturas de la roca (capturando durante todo el tiempo, el calor proveniente de la roca) y regresa por el segundo; entonces el agua fría se vuelve a inyectar.

Los proyectos de demostración han comprobado la factibilidad de la producción de la energía geotérmica a partir de las fuentes de roca caliente; en la actualidad se realizan pruebas en Nuevo México y Gran Bretaña.

### **Magma**

El magma es la roca derretida debajo de la corteza terrestre. Puede alcanzar temperaturas aproximadas a los 1000 grados centígrados. Teóricamente, el magma puede usarse para la energía geotérmica en lugares en donde se localizan en profundidades accesibles (2000 a 6000 m), debajo de la corteza terrestre. Pruebas recientes en un campo superficial de lava en Hawái han demostrado la factibilidad de la extracción de energía a partir del magma, pero las técnicas para extraer la energía de esta fuente y localizarla, así como usarla comercialmente todavía se encuentran en una etapa experimental. Se cree que la energía del magma será la más difícil de desarrollar de todos los tipos de energía geotérmica.

Como ya se observó, las fuentes geotérmicas con altas temperaturas se usan para la generación de electricidad. Una central de energía se establece en el lugar y después la energía se transmite hasta la red del sistema.

Las aplicaciones directas de calor pueden usar temperaturas significativamente más bajas que otras aplicaciones de energía geotérmica. Las fuentes con temperaturas más bajas están mejor distribuidas y pueden ubicarse en muchas partes del mundo.

Cuando se trata del desarrollo de la energía geotérmica, los ambientalistas y los seguidores de la energía alternativa -personas que por lo general forman comités- se colocan en lugares opuestos. Hay quienes están en ambos lados del asunto y que pueden citar razones a favor y en contra del desarrollo geotérmico.

Los argumentos del lado positivo incluyen las bajas emisiones y el escaso uso de la tierra; del lado negativo, la contaminación del agua, la contaminación térmica el hundimiento de la tierra, sumideros y otras causas ambientales.

Las emisiones de energía geotérmica contribuyen menos a los gases invernadero que las de los combustibles fósiles. La tabla que se presenta más adelante, muestra como se comparan las emisiones geotérmicas con las del gas natural, el aceite combustible número seis (combustóleo), y carbón bituminoso. (también puede hacerse notar que existe la tecnología que puede eliminar todas esas emisiones provenientes de las plantas de energía geotérmica.)



<b>Fuente de energía</b>	<b>Emisiones</b>
Geotérmica <sup>b</sup>	0.3
Gas natural	282.0
Aceite combustible número seis	418.0
Cobre bituminoso	497.0

**a. Emisiones medidas en libras de carbón por megawatt/hora de electricidad generada.**

**b. La más nueva generación de plantas de energía geotérmica.**

Otro beneficio ambiental de esta fuente de energía es que las plantas de energía geotérmica requieren de muy poco espacio. En comparación con el carbón y otras fuentes de energía alternativa, la geotérmica emplea notablemente menos espacio.

Como ya se observó, los problemas citados en contra del desarrollo de la energía geotérmica incluyen la contaminación del agua, la contaminación térmica, el hundimiento de la tierra y los sumideros; la mayoría de los cuales se consideran relativamente menores en comparación con el desarrollo de energía alternativa, sin embargo, la mayoría pueden mitigarse con cuidado y la tecnología apropiada.

La contaminación el agua puede evitarse recogiendo todo líquido que se descargue de la planta geotérmica. Se puede disponer de estos líquidos mediante la reinyección dentro de la tierra o enviándolos a estanque de evaporación especialmente diseñados no obstante, hay que tener mucho cuidado si los líquidos que se descargan son altamente salinos o tóxicos. La reinyección a la tierra ofrece la ventaja de recargar el sistema y prevenir en hundimiento de la tierra. Si los líquidos van a descargarse en estanques, pueden requerir tratamiento para evitar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

La contaminación térmica que proviene de una planta de este tipo es de dos a tres veces peor que la que proviene de una planta nuclear. Sin embargo, se ha señalado que esta desventaja inicial se compensa por la contaminación térmica creada a partir de la minería, procesamiento, fabricación, transporte y reprocesamiento de combustible nuclear.

El problema del hundimiento de la tierra y los sumideros se ha visto en la planta de energía de Wirekei, Nueva Zelandia, donde se ha desarrollado una depresión que cubre 24 millas cuadradas. Si bien la reinyección de fluidos geotérmicos se está llevando a cabo para reducir al mínimo el hundimiento, sus efectos todavía están en observación. Debe hacerse notar que la mayor parte de las tecnologías geotérmicas integran el sistema de reinyección en su sistema.

Considerando todas las cosas, parece que la energía geotérmica se desarrollará en el futuro ya que, de manera generalizada, se cree que los beneficios ambientales superan sus desventajas. La única excepción será en los casos donde el desarrollo geotérmico entra en conflicto con otros intereses ambientales.

#### 1.4 ENERGÍA POR BIOMASA

La biomasa incluye cualquier materia orgánica, planta o animal. La energía biomasa, o bioenergía, es un término general que comprende al energía almacenada en estos desperdicios orgánicos, su transformación en energía útil, y el uso final que se da a esta energía. La transformación de estos materiales en energía puede ser tan simple como cortar árboles o quemarlos, o tan compleja como tomar caña de azúcar u otros cultivos y convertir sus azúcares en combustibles líquidos. La belleza de la producción de energía biomasa es que las tecnologías de conversión pueden reemplazar una amplia variedad de fuentes de energía tradicionales. La energía biomasa puede sustituir los combustibles fósiles en forma sólida o líquida, y puede generar tanto electricidad como calor directo.

Las fuentes más comunes de energía biomasa son la madera y sus desechos, pero existen muchas otras fuentes adicionales, entre las que se incluyen residuos agrícolas, desechos animales desechos sólidos municipales (DSM) y las micro algas así como otras plantas acuáticas. También se pueden hacer cultivos con el fin expreso de cosechar su contenido energético.

Un importante punto que se debe señalar respecto a la tecnología de biomasa es que el carbón inherente en la materia orgánica se recicla. a diferencia de quemar los combustibles fósiles, la combustión de la biomasa simplemente recicla el carbón fijo mediante la fotosíntesis en su fase de crecimiento. Esto tiene que ver con la relativa falta de contaminación de aire inherente en la producción de energía biomasa. Expresado de una manera sencilla , la combustión de la materia vegetal no libera más bióxido de carbono que el que absorbe en su crecimiento, por lo que la contribución neta a los gases de invernadero es cero.

La madera y sus desechos comprenden una gran variedad de componentes, incluyendo residuos de los bosques y los molinos. Por ejemplo, árboles invendibles y los restos de los mismos (ramas y copas de árboles) pueden usarse como combustible potencial; respecto a los molinos, cortezas, aserrín y otros desechos sirven como combustible potencial. los residuos agrícolas pueden incluir mazorca de maíz, el bagazo de caña de azúcar (el tallo que queda después de que se le ha extraído el jugo), hojas y cáscaras de arroz. Los DSM también proporciona un gran abastecimiento de energía biomasa potencial. Papel, telas, basura de patios, diversos escombros de la construcción y material de empaque son sólo algunos de los materiales con energía potencial que se concentran en nuestros desperdicios sólidos. El gas BTU-medio ya está siendo capturado en más de 100 rellenos de tierra de los Estados Unidos. Finalmente, los cultivos energéticos incluyen granos, algas y otras plantas acuáticas, hierbas y plantas petrolíferas.

Desde luego que los materiales biomasa usados en un país o región en particular varían de acuerdo con los recursos locales. En el Caribe y otros climas tropicales, por ejemplo, la caña de azúcar se cultiva ampliamente, por lo que su bagazo es un tipo común de energía biomasa. Los países en donde se cultiva el arroz emplean la cáscara de éste grano; por ejemplo en el oeste de los Estados Unidos se utiliza la mazorca de maíz y las zonas con densos bosques emplean los residuos de la materia.

La energía de biomasa puede generarse de dos maneras: usando los desperdicios agrícolas, industriales y municipales, o cultivando plantas específicamente para la producción de energía. El primer método incrementa la eficiencia de las actividades existentes, mientras que el último requiere de la infraestructura de todo un sistema agrícola. En el último caso, el uso de lo que se ha conocido como "granjas energéticas"

provoca cierta preocupación por competir con la tierra agrícola por los alimentos y el mayor uso de los plaguicidas. Sin embargo, las granjas energéticas tienen el potencial de proporcionar una importante fuente de energía.

Es importante hacer notar que la biomasa no es un recurso renovable a menos que la creación de la fuente exceda su uso. Esto se aplica tanto a las granjas energéticas como a las cosechas estándar, particularmente los bosques. Por ejemplo, algunos países están empleando árboles de rotación rápida para energía. Esta política no puede considerarse energía renovable a menos que se vuelva a plantar el mismo número de árboles que se han utilizado para la producción de energía. La sustentabilidad es esencial si esta fuente de energía se va a usar de manera responsable.

Las plantas crean energía a través de la fotosíntesis, reteniendo la radiación solar y convirtiendo el bióxido de carbono y el agua en productos energéticos. Entonces podemos tomar la energía y transformarla a través de una variedad de procesos para adaptarla a nuestros usos. Existen tres tipos básicos de conversión de la bioenergía en la actualidad: combustión directa, conversión termoquímica y conversión bioquímica.

### **Combustión directa**

La combustión directa de la madera y otras plantas siempre ha sido una fuente primaria de energía para los seres humanos. Este tipo particular de conversión de energía biomasa es el más antiguo y el más usado en la actualidad, principalmente porque casi cualquier tipo de biomasa puede quemarse para producir calor, vapor o electricidad.

Hoy la tecnología para las plantas de energía que utilizan la combustión directa de la madera, los desechos de la madera o el DSM está bien desarrollada. Los sistemas de combustión directa varían considerablemente en tamaño. Las grandes plantas de energía pueden producir hasta 400 megawatts de energía, mientras que los sistemas pequeños incluyen los usados para la calefacción y las estufas domésticas de leña. La mayor parte de los sistemas de combustión directa pueden tomar cualquier tipo de biomasa siempre y cuando su contenido de humedad sea de menos del 60%.

Mientras que la madera y sus residuos es lo que más comúnmente se usa, una gran variedad de otros residuos agrícolas también puede usarse como alimento para ganado.

### **Conversión termoquímica**

Los procesos de conversión termoquímica utilizan el calor en un ambiente libre o deficiente en oxígeno para producir los cambios químicos en la biomasa. El proceso puede producir electricidad, gas, combustible carbón de leña, calor, metanol, y otros productos. La gasificación, pirólisis, y la licuefacción son todos métodos termoquímicos de transformación de la biomasa en energía. Puede usarse cualquiera de estos procesos, dependiendo de los fines deseados.

### **Gasificación**

La gasificación es un proceso de combustión parcial usado para transformar la biomasa en una mezcla de gases. Los procesos de gasificación pueden ser directos o indirectos. El primero utiliza aire o calor para producir una combustión parcial en un

reactor; el segundo transfiere el calor al reactor desde afuera a través de sus paredes usando intercambiadores de calor o arena caliente.

Este proceso produce gases BTU bajos -o medios- a partir de la madera o desechos de la misma, residuos agrícolas, y DSM que pueden usarse por sí solos o para elaborar otros productos. Por ejemplo, el procesamiento de estos gases sintéticos con agua puede producir amoníaco, metanol o hidrógeno. Los gases resultantes pueden quemarse en un horno (gasificación directa de calor) o en un motor de combustión interna.

Los sistemas comerciales de gasificación existen y muestran un buen potencial para el uso futuro. Su uso extendido ha estado limitado hasta la fecha por las grandes distancias en la transformación.

### **Pirólisis**

La pirólisis, un tipo de gasificación, descompone la biomasa, nuevamente en ambientes deficientes en oxígeno, a temperaturas hasta de 200 grados centígrados. Este proceso se ha usado tradicionalmente para producir carbón de leña.

Dado que las temperaturas usadas en este proceso son más bajas que las de otros métodos de gasificación, los productos finales son diferentes. El calentamiento lento produce proporciones iguales de gas, líquido y carbón, pero la producción puede variar cambiando los componentes, la temperatura y el tiempo en el reactor. Los gases producidos constan de monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono y pequeñas cantidades de metano, etano, y otros hidrocarburos, los sólidos son carbón y cenizas. los

líquidos que resultan son similares al petróleo crudo y generalmente deben ser tratados antes que se puedan usar como combustibles líquidos.

### **Licuefacción**

En los sistemas de licuefacción, principalmente se usa madera y sus desechos, los cuales reaccionan con vapor o hidrógeno y monóxido de carbono para producir líquidos y químicos. Las reacciones químicas que tienen lugar en este proceso son básicamente las mismas que para la gasificación, pero a menores temperaturas y a una presión más alta. Los procesos de licuefacción pueden ser directos o indirectos.

El producto final de la licuefacción es el aceite pirolítico, un aceite con un alto contenido de oxígeno, que requiere de una extensa refinación a fin de que se pueda usar para otras cosas además de la combustión. Dependiendo del proceso usado, puede convertirse en combustible diesel, gasolina o metanol.

### **Conversión bioquímica**

La conversión bioquímica, o bioconversión, es una reacción química causada tratando una biomasa particularmente húmeda con microorganismos como enzimas u hongos. Los productos finales pueden ser combustibles líquidos o gaseosos. La digestión anaeróbica y la fermentación son los dos procesos usados para transformar bioquímicamente en energía a la biomasa.



### **Digestión anaeróbica**

Como su nombre sugiere, este proceso de conversión tienen lugar sin aire. El forraje, la biomasa húmeda como cieno de aguas residuales, DSM, desechos animales, algas, algas marinas o desperdicios agrícolas, se colocan en un recipiente de reacción con bacterias. Las bacterias descomponen la biomasa y crean un gas que es de 50% a 60% metano. Este gas puede usarse de varias formas; para producir calefacción, procesa calor o vapor; en un motor para producir energía eléctrica o mecánica ( el uso más común en Estados Unidos ); o purificado para operar a través de un sistema de gas natural.

El uso de los sistemas de digestión anaeróbica está muy extendido. Los digestores se han usado en las granjas de Asia y Europa durante varios siglos; en las plantas de tratamiento de aguas residuales han usado este proceso durante años para generar metano; y las comunidades de Estados Unidos utilizan digestores para convertir en abono el desperdicio orgánico municipal, formando un valioso estiércol como producto final. Los sistemas anaeróbicos pueden variar notablemente en tamaño, desde grandes sistemas industriales que manejan 400,000 pies cúbicos de material y producir 1.5 millones de pies cúbicos de biogas por día, hasta pequeños sistemas agrícolas que manejan 400 pies cúbicos de material y producen 6,000 pies cúbicos de biogas al día.

### **Fermentación**

Durante siglos hemos sabido que fermentar granos con levadura produce alcohol de grano. El proceso también funciona con otros materiales biomasa.

En la fermentación, la levadura descompone carbohidratos (almidones en el caso de los granos, o azúcar del jugo de la caña de azúcar) en alcohol etyl (etanol) y bióxido de carbono (un valioso subproducto). El proceso descompone sustancias complejas en sustancias simples. La fermentación con bacterias da origen a productos farmacéuticos; los azúcares fermentables pueden obtenerse directamente de ciertas plantas, como la caña de azúcar o la remolacha o mediante el procesamiento de materiales de celulosa como la madera, paja, o desperdicios agrícolas pretratados.

El combustible etanol es una industria creciente en todo el mundo y que ofrece una alternativa a la gasolina tradicional como combustible para automóviles. Brasil tiene la mayor industria de etanol, produciendo casi tres millones de galones anuales a partir de la caña de azúcar.

## 1.5 ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica ha sido aprovechada como fuerza motriz en la navegación y para generar energía mecánica en molinos de grano y bombas de agua desde tiempos muy remotos. Sólo desde fines del siglo pasado se ha empleado para generar energía eléctrica.

La energía cinética del viento puede convertirse en energía mecánica rotacional en forma directa, cuando se extrae por medio de superficies que están en contacto directo con el viento y acopladas a motores mecánicos, o en forma indirecta, cuando interviene un elemento intermedio para su conversión. La energía mecánica rotacional puede ser a su vez convertida en energía eléctrica o térmica. Las aplicaciones de interés corresponden todas a aprovechamientos directos.

La turbina eólica (aeroturbina) constituye el principal elemento de los sistemas de aprovechamiento de energía, constituida por un arreglo de aspas, soportadas por una torre, que giran al ser atravesadas por una masa de aire.

Existe una gran variedad de diseños de aeroturbinas, en la figura 1.5.1 se esquematizan los más conocidos. Las aeroturbinas pueden agruparse en dos grandes conjuntos, de eje horizontal o de eje vertical, de acuerdo a la posición del eje con respecto a la superficie terrestre.

Las aeroturbinas de eje horizontal pueden tener una, dos, tres o más aspas. A mayor número de aspas corresponde una mayor superficie de contacto con el viento y el área barrida por las aspas de una aeroturbina se denomina "solidez". Cuanto mayor es la

solidez, la aeroturbina tiene una mayor velocidad de giro y un par de arranque mayor, obteniéndose una mayor velocidad de giro y un par de arranque mayor, obteniéndose un

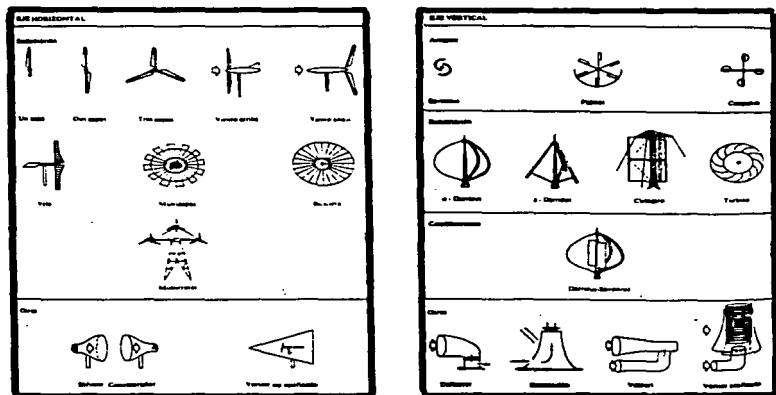


FIGURA 1.5.1 DIFERENTES DISEÑOS DE TURBINAS

mayor par a bajas velocidades del viento. Por otra parte, las aeroturbinas con menos solidez capturan un mayor cantidad de energía por unidad de costo con vientos de alta velocidad.

En las aeroturbinas de eje horizontal (de dos o tres aspas) las aspas pueden estar colocadas viento arriba o viento abajo de la torre que las soporta. Las aeroturbinas de baja potencia suelen emplear una configuración de viento arriba, principalmente porque permite que con una simple veleta colocada en la parte posterior de la aeroturbina ésta se reorienta sola al cambiar la dirección del viento, manteniéndose así el área de barrido de las aspas siempre perpendicular a la dirección del viento, maximizando la energía captada. La configuración de viento abajo es utilizada habitualmente por los aerogeneradores de gran tamaño, en los que la veleta no resulta práctica, requiriéndose normalmente de otros mecanismos para reorientar la turbina. La configuración de viento abajo puede emplearse también para aeroturbinas de pequeña potencia, pero entonces se presentan problemas de oscilaciones constantes sobre el eje vertical, además de otras dificultades ocasionadas por la "sombra" de la torre (que actúa como barrera contra el viento y en consecuencia las aspas no están sometidas a esfuerzos constantes, causándose fatiga y disminución de resistencia en sus materiales).

Las aeroturbinas de eje horizontal de dos o tres aspas utilizan mecanismos automáticos de control que permiten girar todo el dispositivo dejando ocasiones maderas y para algunos prototipos se ha utilizado tela, fibra de vidrio o plástico. Los perfiles aerodinámicos tienen como objetivo que la relación aerodinámica sustentante-arrastrante sea relativamente alta para pequeños ángulos de ataque de las aspas.

## **Torres de soporte**

Desde el punto de vista estructural, los elementos más críticos en los sistemas de conversión eólica son la aeroturbina y la torre de soporte. Las torres deben soportar principalmente dos tipos de fuerzas. Una de levantamiento, producida al operar la aeroturbina, que tiende a levantar la torre junto con la aeroturbina, y otra que corresponde al peso de todo el sistema conversor de energía eólica.

Las torres suelen ser estructuras de concreto o metal. Existen básicamente dos tipos de amarre para las torres: a) contraventeadas, aseguradas por tirantes de acero, o b) empotradas, ancladas en bases de concreto. La altura apropiada para una torre es de por lo menos 15 metros mayor que los obstáculos que pueden encontrarse a menos de 15 metros de ella. Las torres más usadas son de metal, normalmente estructuras de tubo o perfiles de acero.

## **Conversión de energía eólica en energía eléctrica (aerogeneradores)**

Los siguientes conversores de energía eólica en eléctrica suelen subdividirse en dos grupos: a) a pequeña escala, que proporcionan parte de la energía eléctrica utilizada en una casa o en determinado tipo de equipo, y b) de gran escala, en que la energía extraída del viento es alimentada a una red eléctrica convencional, por lo que el sistema debe ser capaz de producir potencial compatible con la fase y frecuencia de la red.

Los componentes básicos de un sistema de conversión viento-electricidad se indican en la figura 1.5.2.

Los sistemas de conversión viento electricidad puede ser clasificados con base en tres factores básicos:

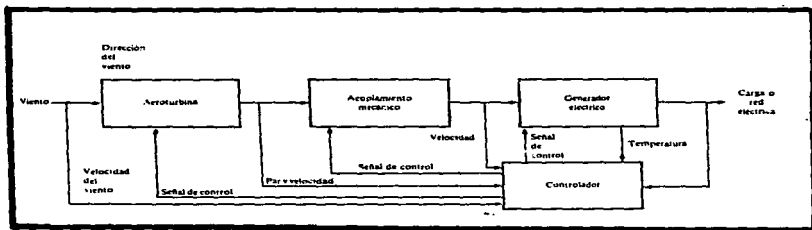


FIGURA 1.5.2 SISTEMA DE CONVERSIÓN VIENTO-ELECTRICIDAD

**A) Tipo de salida :**

<b>Corriente directa</b>	<b>voltaje constante</b>
<b>frecuencia variable</b>	<b>voltaje variable</b>

<b>Corriente alterna</b>	<b>voltaje constante</b>
<b>frecuencia constante</b>	<b>voltaje variable</b>

**B) Velocidad de rotación de la turbina**

**Velocidad constante**

**Velocidad variable**

**C) Utilización de la energía eléctrica obtenida**

**Almacenamiento en baterías**

**Otras formas de almacenamiento**

**Interconexión con redes convencionales**

El esquema apropiado para generación de energía eléctrica depende del tipo de salida requerida y del modo de operación de la aeroturbina. Uno de los esquemas más simples consiste en utilizar un alternador de imán permanente; la salida de estator del alternador puede ser bifásica o trifásica. La frecuencia de salida es igual a la velocidad angular multiplicada por la mitad de número de polos. En condiciones de circuito abierto (sin carga) el voltaje de salida es también proporcional a la velocidad angular. Si la



aeroturbina es operada a velocidad constante, la salida bajo condiciones de carga es de frecuencia constante pero el voltaje variable. Si la aeroturbina es operada a velocidad variable, la salida será de voltaje y frecuencia variables. Ambas salidas pueden ser convertidas en señales de frecuencia y voltajes constantes con una combinación inversor-rectificador de estado sólido.

La generación de CA a frecuencia y velocidad constantes se puede hacer con un generador sincrónico que debe girar a velocidad constante (velocidad sincrónica). Cuando este tipo de configuración se opera en paralelo con las redes de potencia el requerimiento de la velocidad constantes es muy estricto; sólo pueden aceptarse fluctuaciones de alrededor del 1 o 2% durante periodos de fracciones de segundo. Satisfacer este requerimiento es complicado debido a: i) las constantes fluctuaciones en la velocidad del viento; ii) la sensibilidad de la salida eléctrica a los cambios de velocidad, y iii) la capacidad del generador para trabajar como motor. Este tipo de problemas puede ser disminuido con acoplamientos mecánicos apropiados entre la flecha de la turbina y la del generador.

Para evitar los problemas de sincronía puede utilizarse un generador de inducción, con lo que el mantenimiento, el control y la operación del sistema se vuelven mucho más simples. Un generador de inducción gira a una velocidad cercana a la sincrónica (entre 1 y 5% por arriba, variaciones muy pequeñas en comparación con las de la velocidad del viento). Una vez que la aeroturbina excede la velocidad de operación, un mecanismo de control regula el ángulo de ataque de las aspas con respecto al viento (en el caso de aeroturbinas de eje horizontal) para controlar la velocidad. Si la aeroturbina no es autoarrancable (eje vertical de tipo Darrieus) se puede utilizar el generador de inducción como motor de arranque y una vez alcanzada la velocidad necesaria, como generador.

**Para obtener frecuencia constante a partir de una aeroturbina de velocidad variable se han desarrollado diferentes esquemas que utilizan conmutadores mecánicos y electrónicos a base de tiristores y diodos. Los siguientes esquemas han sido propuestos en este caso:**

- generador de campo modulado**
- ac - dc - ac**
- generador de inducción de doble salida**
- generador conmutador de ac**

Los sistemas conversores viento-electricidad empiezan a generar potencia a partir de una velocidad de viento mínima (llamada de corte de entrada) y dejan de operar cuando la velocidad del viento alcanza un umbral de velocidad máxima (llamada de corte de salida), por arriba del cual la aeroturbina ya no opera en forma segura. Para valores de velocidad del viento intermedios la potencia de salida está determinada por el coeficiente de potencia de la aeroturbina y las eficiencias del acoplamiento mecánico y el generador eléctrico.

A bajas velocidades de viento los sistemas de velocidad constante operan a mayor relación de velocidad de punta; debido al mecanismo que controla el ángulo de ataque de las aspas, dando como resultado valores del coeficiente de potencia menores que el óptimo. Los sistemas de velocidad variable operan a relaciones de velocidad de punta constante y consecuentemente pueden mantener coeficientes de potencia más altos, aun a bajas velocidades de viento.

Los sistemas de velocidad constante, una vez que la salida del generador está en su valor nominal, la velocidad se mantiene aun para altas velocidades de viento (a no ser que se alcance el valor de salida). este esquema de operación desperdiciaparte de la energía disponible en el viento a altas velocidades, pero impide sobre cargas en el generador eléctrico.

La elección entre sistemas de velocidad constante y velocidad variable no puede hacerse pensando únicamente en la eficiencia de conversión. Dependiendo del tamaño de la aeroturbina, otro tipo de factores, tales como su estabilidad mecánica, pueden ser más importantes.

## 1.6 ENERGÍA SOLAR

México está en una zona geográfica que resulta atractiva desde el punto de vista de disponibilidad del recurso solar. Algunos estudios han cuantificado con mayor detalle los niveles de insolación para la República Mexicana. En la actualidad se realizan algunos estudios para mejorar la información sobre la radiación solar incidente en la República Mexicana y, además, se han instalado recientemente algunas estaciones solarimétricas en zonas céntricas del país, con la expectativa de que permitan mejorar la calidad y la cantidad de la información disponible (incluyendo datos de radiación solar directa y difusa en promedios horarios).

Estas estaciones solarimétricas del país son aún insuficientes en número y operan con algunas deficiencias, que están en proceso de corrección.

Dos características básicas de la energía solar son fuente de la mayor parte de las dificultades tecnológicas para su aprovechamiento:

a) Su baja densidad por unidad de área, lo que hace necesarios dispositivos con gran extensión para captar cantidades importantes de energía, y

b) Su intermitencia, lo que implica que para muchas de sus aplicaciones potenciales se requieren dispositivos de almacenamiento energético que encarecen las tecnologías.

Estas dos características hacen suponer que los esfuerzos de investigación y desarrollo podrían dirigirse fundamentalmente hacia dos puntos : la tecnología de materiales en su más amplio sentido, y el almacenamiento de energía.

El almacenamiento temporal de energía, a bajo costo, es una condición indispensable para que la utilización de la energía solar se lleve a cabo e escalas importantes.

### **Tecnología para el aprovechamiento de la energía solar**

Las tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar son muchas y muy variadas; sus ventajas y desventajas dependen en buena medida de la aplicación a uso final de ella. Se pueden considerar cuatro grandes grupos de tecnologías, según el proceso de conversión de energía solar en energía útil que empleen. Ellos son : proceso termodinámicos (por calentamiento o enfriamiento; sistemas fotovoltaicos; procesos fotoquímicos; procesos termoiónicos.

Las tecnologías termodinámicas tienen como propósito capturar la energía solar y convertirla en calor útil, el que posteriormente puede ser transformado en energía mecánica o eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos convierten directamente la energía solar captada en energía eléctrica, al generarse portadores móviles de carga eléctrica, como resultado de la absorción de la energía de los fotones que inciden sobre materiales semiconductores. La conversión fotoquímica se refiere a tecnologías que producen energía química libre a partir de la radiación solar. Los procesos termoiónicos aprovechan la emisión de electrones desde un cátodo caliente, convirtiendo así la energía calorífica

**directamente en electricidad. Los dos primeros grupos de tecnologías han sido los más estudiados y en los que se ha logrado un mayor desarrollo.**

**Para cada uno de los cuatro procesos se tienen diferentes tecnologías clasificadas de la siguiente manera:**

**a) Procesos termodinámicos**

**a.1 Sistemas térmicos pasivos**

- a.1.1 De ganancia directa**
- a.1.2 Con paredes de almacenamiento térmico**
- a.1.3 Con espacio solar agregado**
- a.1.4 Con techos de almacenamiento térmico**

**a.2 Sistemas térmicos estacionarios**

- a.2.1 Colectores planos**
- a.2.2 Colectores tubulares**
- a.2.3 Colectores con concentración**
- a.2.4 Estanques solares**

**a.3 Sistemas térmicos con seguimiento**

- a.3.1 Distribuidos**
- a.3.2 Torre central**

**b) Sistemas fotovoltaicos**

- b.1 Homounión**
- b.2 Heterounión**
- b.3 Schotkky**
- b.4 MIS**
- b.5 SIS**
- b.6 Electroquímicos**

**c)Procesos fotoquímicos**

**d)Sistemas termoiónicos**

Algunos autores consideran que la mayor parte de las tecnologías solares no son todavía alternativas realmente viables, aun frente a los actuales precios en el mercado mundial de los combustibles convencionales. La mayoría señala como excepción a algunas de ellas, entre las que se encuentran; los colectores planos para calentamiento de agua (de tipo termisifónico, sin bombas, controladores o mantenimiento); los sistemas térmicos pasivos (generalmente vinculados con la helioarquitectura); los colectores planos (para aire) asociados con sistemas para secar diferentes materiales orgánicos; las celdas fotovoltaicas para ser aplicadas en lugares muy alejados de las redes de distribución de energía eléctrica y que requieren de pequeña capacidad en potencia instalada, y otros sistemas como lagos solares o sistemas de concentración para proporcionar calor industrial, aunque sólo viables en situaciones específicas.

**CAPÍTULO 2**

**ENERGÍA**  
**FOTOVOLTAICA**



## 2.1 DESARROLLO HISTÓRICO

El efecto fotovoltaico fué descubierto en 1839 por el físico francés A. Edward Becquerel en sus estudios sobre celdas electrolíticas. Varios años después, en 1873, W. Smith descubrió la fotoconductividad en el selenio. Tres años más tarde, en 1876, el efecto fotovoltaico fué observado por G.W. Adams y R.E. Day, en una estructura semiconductor de selenio fué descrita en 1883 por C.D. Fritts. En 1884 Hallwach, observó la fotorresistividad de estructuras de cobre ( $Cu/Cu_2O$ ), y E.H. Kennard y E.O. Dietrich, ligaron el efecto fotovoltaico con la existencia de una barrera.

Entre la primera y la segunda guerra mundial los esfuerzos por entender y desarrollar dispositivos fotovoltaicos se incrementaron. En 1930 E. Schottki formuló las primeras teorías para explicar la ocurrencia del efecto fotovoltaico (en cobre/óxido de cobre) y desarrolló el circuito eléctrico equivalente aun en uso. En el mismo año Lange fue el primero en sugerir el empleo de fotoceldas para la conversión directa de la luz en electricidad. En 1932 Audubert y Stora observaron por vez primera el efecto fotovoltaico en sulfuro de cadmio. En esta época no se disponía aún del silicio en monocristales de alta pureza. Fué hasta 1941 que Ohl, en los Bell Telephone Labs., descubrió el efecto fotovoltaico en este material. Si bien a las estructuras fotovoltaicas de cobre/óxido de cobre les siguieron versiones mejoradas de selenio y sulfuro de cadmio, sólo hasta 1949 Billing y Plesner realizaron las primeras mediciones sobre eficiencia de conversión de energía de tales dispositivos (del orden de 1%).

En 1954 Pearson, Fuller y Chapin de Bell Telephone Labs., habiendo desarrollado el método de difusión de impurezas para la formación de uniones p-n un año antes, obtuvieron el primer dispositivo fotovoltaico práctico de silicio monocristalino. Durante

**ese mismo año Welker descubrió el efecto fotovoltaico en el arsenuro de galio y Reynolds y otros desarrollaron dispositivos con sulfuro de cadmio(CdS). La eficiencia de conversión de energía solar a electricidad de estas primeras celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino y sulfuro de cadmio era de 3 a 6%.**

**En 1956 J. Lofreski publicó un estudio sobre el rendimiento óptimo de diferentes materiales semiconductores. Las primeras aplicaciones terrestres de las celdas fotovoltaicas se dieron en ese mismo año, en luces intermitentes para la navegación y en estaciones remotas de comunicaciones . Bell Telephone Labs. acopló celdas solares a un repartidor amplificador que operó durante un año libre de problemas. Entre 1956 y 1957 se establecieron las primeras compañías privadas norteamericanas fabricantes de fotoceldas de silicio monocristalino. Para 1958, las diferentes mejoras introducidas en los dispositivos posibilitaron el logro de eficiencias de conversión en laboratorio, del orden del 14% para celdas de silicio. Con relación a los dispositivos comerciales se obtenían eficiencias del 10 al 11% sólo hacia finales de los sesentas y principios de los setentas.**

**En 1958 la Unión Soviética y los Estados Unidos lanzaron sus primeros satélites equipados con arreglos de celdas fotovoltaicas de silicio. Un año después se produjeron las primeras celdas de silicio policristalino, con eficiencias en laboratorio de un 5%. En 1960 se utilizaron por primera vez las rejillas de recolección de corriente en celdas de silicio y se produjeron las primeras celdas dendríticas de este material. Durante 1961 se llevaron a cabo los primeros intentos de celdas de sulfuro de cobre-sulfuro de cadmio. Al año siguiente Lamorte consiguió obtener eficiencias de laboratorio del 13% en celdas de arsenuro de galio, Chamberlin obtuvo la primera celda de sulfuro de cadmio depositado por rocío a bajo costo, y se desarrollaron los contactos evaporados de Ti-Ga.**

En el transcurso de los años sesentas las actividades de investigación y desarrollo se centraron en: a) las celdas de silicio, cuya eficiencia permaneció entre el 11 y 13% durante la década; b) las de telurio de cadmio con eficiencias del 6%, que fueron descartadas hacia finales del decenio por sus sistemas de estabilidad, y c) las de arsenuro de galio, en las que se abandonaron los trabajos temporalmente a mediados de la década por falta de resultados satisfactorios .

Durante los sesentas y la primera mitad de los setentas las aplicaciones especiales dominaron el uso de las celdas fotovoltaicas. Los más de 600 vehículos espaciales de Estados Unidos y los más de 400 de la Unión Soviética puestos en órbita hasta 1973 fueron alimentados de energía por sistemas fotovoltaicos . El Skylab lanzado en 1973 llevaba alrededor de 250 metros cuadrados de área de fotoceldas; unos 20 kW. Entre 1966 y 1973 la NASA invirtió alrededor de 41 millones de dólares en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos (cerca de 5 millones de dólares/año, en promedio).

En 1968 P.Glaser sugirió la idea de una planta solar espacial, que consistiría en un arreglo de celdas fotovoltaicas de silicio, con una capacidad de salida de unos 10,000 MW, puesta en órbita geostacionaria a unos 37,000 km de altura. La energía obtenida de las celdas sería transmitida después desde el satélite hacia una estación terrena através de microondas. Para 1971 cuatro compañías privadas norteamericanas habían invertido ya un millón de dólares en estudios exploratorios sobre la factibilidad técnica y económica de tal concepto.

En 1972 Lindmayer de COMSAT Corp. produjo su "celda violeta" empleando técnicas especiales de recubrimiento, depositando capas de vapor de silicio en un tanque al vacío, y un nuevo diseño de enrejado para la celda. Las uniones p-n de las celdas violeta

eran poco profundas (4 millonésimas de pulgada o 1,000 angstroms) comparadas con las de las primeras celdas de silicio (4,000 millonésimas de pulgada o 10E6 angstroms); la eficiencia de éstas aumentó a un 15 o 16%, reduciendo además la cantidad de silicio requerida por celda.

Hacia 1973 seguían existiendo en el mercado estadounidense sólo dos fabricantes de fotoceldas (Spectro Lab. Div. de Textron Inc. y Control Lab. Div. de Globe-Union Inc.), ambos manufacturando celdas de silicio monocristalino y repartiéndose entre ellos un mercado de sólo algunos millones de dólares.

Durante la década de los sesenta aumentó también el interés por otros materiales semiconductores, tales como los de las columnas III a V de la tabla periódica de los elementos. Particularmente renació el interés por el arsenuro de galio, obteniéndose en el laboratorio a mediados de ese decenio celdas monocristalinas con una eficiencia de un 20%, y se iniciaron a la par estudios sobre celdas de fosfuro de indio, fosfuro de galio y arsenuro de aluminio-galio. Hacia 1974 IBM obtuvo celdas de arsenuro de galio con eficiencias de conversión algo mayores de un 15%. Entre 1970 y 1975 la NASA patrocinó el desarrollo de fotoceldas con nuevos materiales destinado cerca de 20 millones de dólares (unos 4 millones de dólares/año promedio), a la búsqueda de celdas con una alta relación potencia/unidad de peso, uno de los factores de mayor importancia en aplicaciones aeroespaciales. Este esfuerzo se realizó a sabiendas de que estas celdas serían más costosas que las de silicio, con ventajas muy limitadas sobre ellas, y que aun resultando exitosas las investigaciones, sería difícil satisfacer una demanda masiva, dadas las previsibles dificultades para la obtención de los materiales empleados en su producción (por contraste, el silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre).

## 2.2 EL RECURSO "LA LUZ"

La luz es una forma de energía radiante ; es decir, energía que se propaga a través del espacio o de la materia como ondas electromagnéticas. La luz difiere de las otras clases de radiación (electromagnética tales como las ondas de radio, calor y rayos X) sólo en la longitud de onda, o frecuencia. el espectro de la luz se extiende desde longitudes de onda de 0.0000001 cm a 0.1 cm que es lo mismo que de 10 a 10.000.000 angstrom. (Un angstrom=  $1 \cdot 10^{-8}$  cm =  $3,937 \cdot 10^{-9}$  pulgadas.)Este margen corresponde a frecuencias de 3000,000,000 GHz a 300 GHz, respectivamente. Inmediatamente debajo del extremo inferior del espectro de la luz están las ondas de radio de ultra alta frecuencia e inmediatamente encima está el extremo superior de los rayos .

En una pequeña porción (aproximadamente 0.1%) del espectro de la luz de casi 300,000,000 GHz de anchura, la energía radiante produce la sensación visual. La luz visible cubre el margen de frecuencia de 428,6000,000 GHz a 750,000,00GHz (longitudes de onda de 0.00004 cm a 0.00007 cm, o 4000 angstroms a 7000 angstroms). Si se incluye la luz visible (es decir, rayos infrarrojos inferiores al espectro visible y rayos ultravioletas superiores al espectro visible), se obtiene como resultado el margen completo de la luz, que se extiende desde 0.0000001 cm hasta 0.1 cm (300 GHz hasta 300,000,000 GHz).

Aunque los científicos se dieron cuenta del efecto fotoeléctrico, tardaron mucho tiempo en explicar satisfactoriamente cómo la luz, como ondas, desalojaban de sus átomos a los electrones en un material sensible a la luz. La teoría newtoniana de la luz hacia 1675 definió la luz como constituida de corpúsculos materiales, minúsculas partículas proyectadas en línea recta desde un cuerpo luminoso, que incidían en nuestros ojos y producían la sensación de la vista. Pero esta teoría fué abandonada más tarde en favor de

la teoría ondulatoria. Fue Albert Einstein quien surgió que la luz está compuesta por ondas y también por partículas (llamadas fotones). Posteriormente la teoría cuántica estableció el mismo concepto de la naturaleza dual de la luz (es decir, ondas y partículas), y describió los fotones como cuantos de energía luminosa. Por este trabajo recibió Einstein el Premio Nobel en 1905.

La luz se desplaza a velocidad alta, siendo en el vacío aproximadamente 300,000 kilómetros por segundo (186,000 millas por segundo) y algo menor en el aire. En otros medios la luz se desplaza algo más lentamente. por ejemplo, la luz que atraviesa un vidrio común se desplaza a 19,999 km/s aproximadamente, y a través del agua a 225,000 km/s aproximadamente.

Es importante observar que el sol no emite calor sino radiación. El efecto de esta radiación es el calentamiento de los cuerpos donde la misma incide.

## 2.2.1 UNIDADES DE MEDICIÓN

Dado que la radiación solar es una forma de energía se mide en unidades de energía.

El valor instantáneo se mide en  $\text{Kw/m}^2$

El valor acumulado se mide en  $\text{Kw-H/m}^2$

Generalmente se reporta el valor acumulado durante un día dado ( $\text{Kw-H/m}^2$ ).

Otra forma de expresar el valor acumulado es en ( $\text{cal/cm}^2\text{-día}$ ), que se denomina Langleys:

$$1 \text{ Langley} = 1 \text{ cal/cm}^2\text{-día} = 0,01166 \text{ Kw-h/m}^2$$

En un día despejado con el sol en incidencia perpendicular (mediodía) la potencia solar es  $1 \text{ Kw/m}^2$  aproximadamente.

## 2.2.2 LAS HORAS-PICO

En un día despejado de Verano, la energía acumulada durante todo el día es hasta  $7.5 \text{ Kw-H/m}^2$ .

Observar que la energía acumulada durante todo un día equivale a tener 7.5 horas sol al máximo. Estas horas se denominan horas-pico.

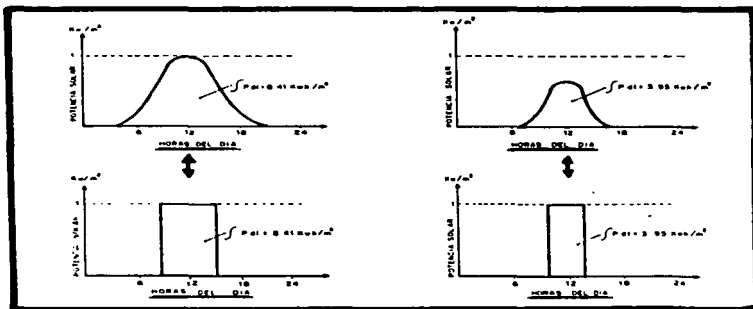


FIGURA 2.2.1.1 CONCEPTO DE HORAS PICO

Las horas-pico corresponden al periodo en que el sol debería haber estado al máximo para acumular la energía de un día dado.



**Las horas-pico son un concepto de equivalencia, no significa que el sol vaya a salir tal número de horas. En un día nublado la radiación puede ser tan baja como 1.6 Kw-H/m cuadrado, es decir, equivale a 1.6 horas-pico, aún cuando en realidad el sol nunca haya estado en el máximo.**

### **2.2.3 RADIACIÓN DIRECTA, DIFUSA Y GLOBAL.**

**Radiación directa.** Es aquella que recibe una superficie directamente del sol, sin desviarse de su trayectoria.

**Radiación difusa.** es aquella que recibe una superficie por refracción y reflexión de la luz del sol en su paso por la atmósfera. En un día nublado, la radiación solar captada por un módulo es difusa únicamente, ya que la radiación directa está obstruida por las nubes.

**Radiación global.** Es la energía solar total recibida por una superficie dada por la suma de la radiación directa y radiación difusa.

Como referencia se dan dos datos:

Radiación día despejado :  $1 \text{ Kw/m}^2$ .

Radiación día nublado :  $0.10 \text{ Kw/m}^2$  típica .

Lo anterior resulta en que mientras en un día despejado se obtienen hasta 7.5 horas-pico, es un día nublado total es difícil tener más de 8.1 horas-pico.

## 2.2.4 MAPAS DE INSOLACIÓN

La insolación en los mapas se expresa usualmente como el valor promedio diario para el periodo considerado. Se muestran los mapas de insolación promedio diario para cada estación del año en México por medio de la figuras 2.2.4.1 y 2.2.4.2.

Los mapas muestran la insolación global (difusa+directa) para el plano horizontal.

Los valores de insolación expresados en cal-cm cuadrado/día pueden convertirse a horas-pico multiplicando por el factor 0.0116.

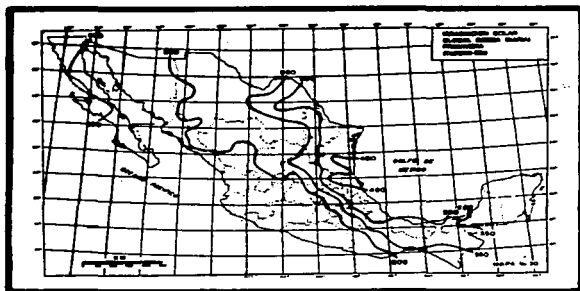


FIGURA 2.2.4.1 MAPAS DE INSOLACIÓN

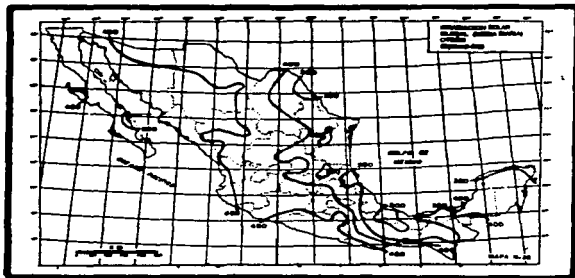
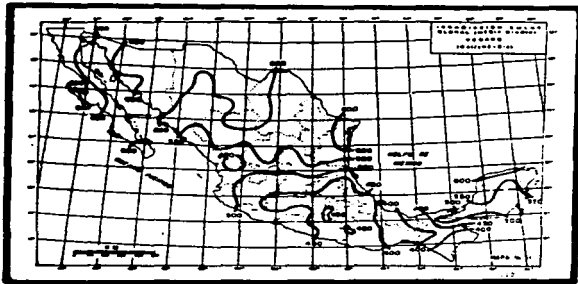


FIGURA 2.2.4.2 MAPAS DE INSOLACIÓN

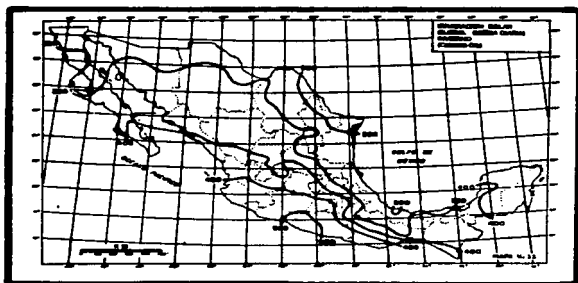


FIGURA 2 2.4.2 MAPAS DE INSOLACIÓN

## 2.2.5 LA TRAYECTORIA SOLAR VS LA LATITUD DEL LUGAR

La figura muestra como varia la trayectoria del sol a lo largo del año para una localidad en el hemisferio norte.

Estas variaciones son debidas al cambio de inclinación del eje de rotación de la tierra respecto al plano de la orbita de la tierra alrededor del sol, que además dan lugar a las estaciones del año.

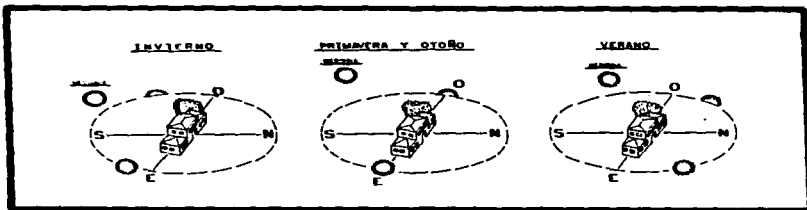


FIGURA 2.2.5.1 POSICIÓN DEL SOL AL AMANECER, MEDIODÍA Y ATARDECER EN LATITUDES DEL MERIDIANO NORTE AL PRINCIPIO DE CADA ESTACIÓN.

En el invierno el sol sale por el sureste (E-23-S) toma una trayectoria inclinada respecto a la horizontal ( $23^\circ +$  latitud del lugar) y se oculta por el suroeste (W-23°-S). Conforme avanza el año la trayectoria del sol se levanta y la salida se mueve hacia el este y el ocaso hacia el oeste. En el equinoccio de primavera la salida es por el este y el ocaso por el oeste exactamente. Hacia el verano el sol sale hacia el noreste, se oculta por el noroeste y su trayectoria es perpendicular a la superficie de la tierra.

En la mitad del verano, el sol se declina ligeramente hacia el norte ( $23^\circ$ -latitud) para las localidades entre el trópico y el ecuador. En un sitio dado se puede trazar imaginariamente las diferentes trayectorias del sol a lo largo del año para determinar si existen obstrucciones que produzcan sombreados.

En especial, recordar que el sol puede declinarse hacia el norte y producir sombras por objetos localizados atrás de los módulos.

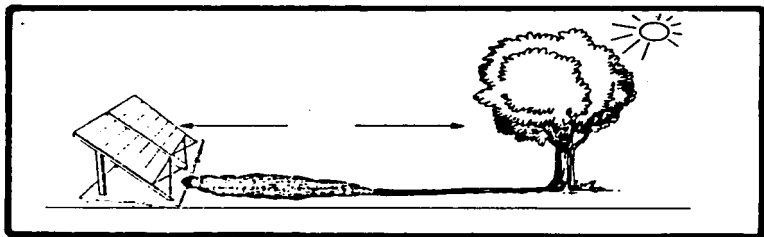


FIGURA 2.2.5.2 CONOCER LA TRAYECTORIA SOLAR PARA PREVEER SOMBREADOS

## 2.2.6 CAPTADORES FIJOS Y CAPTADORES CON SEGUIMIENTO SOLAR

Un captador fijo tiene la ventaja de la simplicidad y por tanto, de la confiabilidad. Por ello ha sido la regla usar los módulos solares como captadores fijos. Usualmente los captadores fijos se colocan inclinados respecto a la horizontal y viendo al sur, ya que es la posición promedio del sol a lo largo del día.

La inclinación es tal que favorezca recibir la radiación en invierno a costa de desfavorecer la captación en verano. En los sistemas fotovoltaicos la inclinación se selecciona para que aumente la captación del mes menos insolado y disminuya la del mes mas favorecido. El ángulo es tal que el mínimo anual una vez inclinado sea el máximo respecto a las otras inclinaciones.

Existe pues un compromiso entre mejorar la captación en una época y desfavorecerla en otra. Es usual que la inclinación óptima equivalga a un ángulo respecto a la horizontal dado por:

$$\text{Inclinación} = \text{Latitud} + 5^\circ \text{ a } 10^\circ$$

Los captadores con seguimiento solar pueden ser de varios tipos:

Ángulo variable a lo largo del año: Esta es una variante del captador fijo donde el ángulo de inclinación se ajusta manualmente a cada estación del año para obtener una mejor contribución anual. la ventaja es su sencillez y bajo costo. La desventaja es requerir un operario (el cambio puede ser complicado si son muchos módulos solares).



**Ángulo polar variable a lo largo del día:** El captador sigue al sol diariamente girando a su eje Norte-Sur. La ventaja es su simplicidad (relativa) y su ganancia que puede ser hasta 45% más energía captada que un arreglo fijo. La desventaja es el costo y que no dan ganancia apreciable en un lugar con nublados importantes.

Existen comercialmente seguidores solares polares de tipo pasivo, es decir, no consumen energía sino que son movidos por contrapeso de un líquido que gasifica con el calentamiento del propio sol.

**Ángulo polar y azimutal variable:** Los captadores se mueven en dos ejes, de tal manera que están perpendicularmente al sol en cualquier momento del día y en cualquier época del año, en forma similar a como lo hace una flor de girasol.

La ganancia de captación es grande (mayor a 60%) por el costo y complejidad del sistema aumentan y el mantenimiento puede ser más frecuente. Se emplean ocasionalmente en arreglos solares muy grandes.

## **2.2.7 APLICACIONES**

**Una vez que se tienen los conceptos básicos de la energía fotovoltaica es necesario especificar su uso**

**Las aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos, justificadas técnica y económicamente dentro del marco descrito son variadas y cada día más abundantes**

### **Aplicaciones profesionales**

**Repetidores de radio comunicación en sitios remotos, en VHF, UHF y microondas, para usuarios tales como compañías telefónicas, servicios de radiocomunicación interna en organismos como compañías eléctricas, Seguro Social, compañías petroleras, telefonía celular, etc.**

**Equipos de telemetría y telemando en aplicaciones tales como estaciones meteorológicas, supervisión y seccionalización de líneas eléctricas de transmisión, gasoductos y oleoductos, plataformas marinas petroleras, etc.**

**Señalización en cruces de ferrocarriles con carreteras, para aviso de desviación o cortes de las mismas.**

**Señalización marítima de boyas y balizas de canales de navegación muelles, etc.**

**Luces de obstrucción para torres o estructuras metálicas tales como las usadas en la líneas de transmisión, edificios, etc.**

### **Aplicaciones sociales y comunitarias**

Centros de salud en comunidades rurales, con servicios de iluminación, radiocomunicación, equipos médicos eléctricos para auscultación y tratamiento, refrigeración de medicamentos y vacunas.

Plantas potabilizadoras de agua para comunidades pequeñas y medianas.

Bombeo de agua para consumo humano.

Radiotelefonía rural enlazada al sistema telefónico nacional.

Centros comunitarios de actividad social: iluminación, equipos de altavoz, televisión (cintas de video, recepción vía satélite, etc).

Iluminación y entretenimiento de uso doméstico individual.

Máquinas de coser eléctricas.

Iluminación de áreas públicas: parques, jardines, etc.

### **INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y PESQUERA**

Bombeo de agua para abreviar ganado.

**Refrigeración de productos pesqueros y producción de hielo.**

**Iluminación y ordeñado en establos lecheros.**

**Iluminación y bombeo de agua en granjas avícolas.**

**Riego por goteo o aspersión en invernaderos.**

**Recirculación de agua en criaderos de camarón, trucha, etc.**

#### **USO DOMÉSTICO**

**Suministro de electricidad para casas-habitación : iluminación, televisión, equipos de audio, bombeo de agua, lavadoras.**

**En general, todas las necesidades pueden cubiertas pero es preferible (por costo) que la refrigeración sea suministrada por otros medios.**

**CAPÍTULO 3**

**PROCESO  
FOTOVOLTAICO**

### 3.1 ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL PROCESO FOTOVOLTAICO

Para tener una idea preliminar del principio de operación de un sistema solar fotovoltaico típico, antes de entrar en detalle de sus componentes, a continuación se presenta un diagrama a bloques simplificado que explica la función de cada uno de ellos (ver figura 3.1.1).

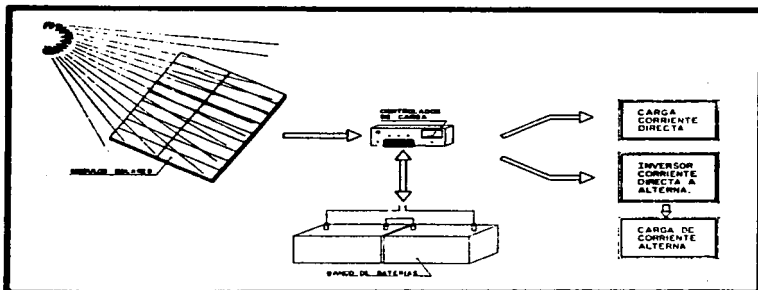


FIGURA 3.1.1 CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO A BATERIAS

**El arreglo fotovoltaico es el conjunto de módulos solares que generan corriente eléctrica a un voltaje dado cuando son expuestos a la luz del sol. El arreglo fotovoltaico es pues el generador eléctrico en sí mismo cuya energía variará de acuerdo a como lo haga la insolación.**

**El banco de baterías recibe la corriente fotovoltaica a través del control de carga y es recargado tanto tiempo y en la magnitud en que esté disponible la radiación solar.**

**El banco de baterías fija el voltaje de operación de los módulos solares, ya que aunque estos últimos pueden variar, el voltaje de las baterías es relativamente estable sin importar el nivel de insolación. Por lo anterior, el voltaje de un sistema fotovoltaico está dado por el banco de baterías.**

**El banco de baterías permite disponer de electricidad al consumo a través del control de carga, en cualquier momento, a pesar de las variaciones de insolación, en especial en las noches y en los periodos nublados.**

**El control de carga se requiere para asegurar que la batería y los equipos alimentados operen dentro de su rango de voltaje permitido.**

**El control de carga evita que las baterías se sobrecarguen, limitando o interrumpiendo la corriente solar cuando las baterías ya están bien cargadas. Además, asegura que el voltaje de las baterías no exceda el permitido a los equipos conectados.**

**Por otro lado, el control de carga limita el voltaje mínimo al que las baterías se descargan, interrumpiendo el suministro a las cargas alimentadas parcial o totalmente.**

Para esta función, debe decidir el usuario que es más importante: proteger las baterías o dar suministro a los equipos alimentados aún a costa de la vida de las mismas.

El control de carga centraliza el cableado de los componentes del sistema e incluye sus protecciones, señalización y medición, por lo que se convierte en el cerebro del mismo.

Los equipos alimentados en corriente directa se conectan al control de carga, mientras los equipos que emplean corriente alterna requieren un componente adicional: el inversor CD/CA.

El inversor CD/CA es en esencia un dispositivo electrónico que convierte el voltaje de corriente directa a las baterías en un voltaje de corriente alterna usualmente de mayor valor.

El criterio fundamental en el diseño y selección de los componentes de un sistema fotovoltaico es obtener la confiabilidad deseada al costo mínimo. Generalmente, esto significa tener componentes confiables, eficientes y de larga vida útil.

El caso de las baterías es un ejemplo importante: se pueden emplear baterías de bajo costo inicial, pero a la larga puede ser conveniente pues deberán reemplazarse frecuentemente y las pérdidas internas de energía en la misma deberán compensarse con más módulos solares.

Cada sistema fotovoltaico es como un traje cortado a la medida de la aplicación. En él intervienen las especificaciones del usuario y el criterio y experiencia del diseñador.



### 3.1.1 LAS FOTOCÉLULAS

Antes de entrar de en materia de arreglo fotovoltaico es necesario conocer la diferencia que existe en cada una de las células.

Una fotocélula, también llamada célula fotoeléctrica, es un dispositivo de estado sólido (usualmente de dos terminales) que se utiliza para convertir la energía luminosa en energía eléctrica o para emplear la energía luminosa en el control de una corriente eléctrica. Una célula fotovoltaica (también llamada fotocélula autogeneradora) produce directamente una tensión de c.c. que es proporcional a la luz incidente. Una célula fotoconductora (llamada también célula fotoresistiva) varía su propia resistencia interna de modo inversamente proporcional a la intensidad de la luz incidente y, por consiguiente, puede variar la intensidad de la corriente eléctrica. En esta célula la relación entre la resistencia eléctrica que presenta en la oscuridad y la que presenta estando iluminada puede ser extremadamente elevada.

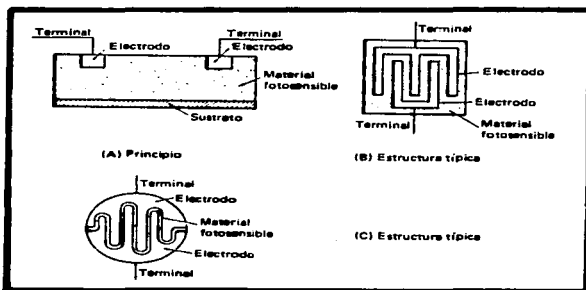
Las fotocélulas que emplean selenio o silicio como material sensible a la luz pueden funcionar ya sea como dispositivos fotovoltaicos o como dispositivos fotoconductores; sin embargo, en el modo fotovoltaico se utiliza casi exclusivamente el tipo de silicio, debido a que su tensión de salida es más alta para una iluminación dada. Históricamente, una primitiva célula fotovoltaica en que se utilizaba una película de óxido de cobre sobre una placa de cobre fué suplantada por la célula de selenio que ahora conocemos. Los materiales sensibles a la luz empleados en la mayoría de células fotoconductoras incluyen seleniuro de cadmio, sulfuro de cadmio, antimoniuro de indio y sulfuro de plomo. Las células fotovoltaicas se fabrican en una amplia variedad de tamaños y formas, de acuerdo con un amplio margen de especificaciones eléctricas.

### **Célula fotoconductoras**

En la célula fotoconductoras (llamada también célula fotorresistiva) el material sensible a la luz hace que disminuya su resistencia eléctrica (aumento de conductancia) proporcionalmente al aumento de la luz incidente. Cuando se hace funcionar tal célula en serie con una carga y una fuente de tensión (tal como una batería de pilas o una fuente de alimentación), actúa como un resistor cuya resistencia varía con la luz de tal manera que la intensidad de la corriente que circula en el circuito aumenta con la iluminación y viceversa. Existen muchas variantes de este circuito básico sencillo.

Las células fotoconductoras comerciales utilizan ya sea selenio de cadmio, sulfuro de cadmio o sulfuro de plomo como material sensible a la luz, siendo el sulfuro de cadmio el más utilizado. Las fotocélulas de selenio y las fotocélulas de silicio se pueden utilizar como dispositivos fotoconductores, pero en la práctica se utilizan pocas veces así porque se les estima más por sus propiedades fotovoltaicas.

En las células fotoconductoras no se emplean uniones; lo que en ellas se utiliza son los efectos de resistencia masiva o volumétrica del material sensible a la luz. Con este fin se fijan a ellas o se embeben dentro del material de electrodos. No obstante, en la mayoría de tales células se emplean electrodos más complicados para proveer mayor longitud de la superficie de contacto sin perjuicio de dejar suficiente espacio para que pueda entrar ampliamente la luz hasta el material sensible entre los electrodos (ver figura 3.1.1.1)



**FIGURA 3.1.1.1 ESTRUCTURA DE LA CÉLULA FOTOCONDUCTORA**

### **Célula fotovoltaica**

La célula fotovoltaica (denominada también célula autogeneradora) genera una tensión de salida proporcional a la intensidad de la luz incidente. Por consiguiente este dispositivo es un convertidor directo de energía luminosa de energía eléctrica. Las modernas células fotovoltaicas comerciales son del tipo de selenio o del tipo de silicio.

**Célula de selenio.** En esta célula fotovoltaica el material sensible a la luz es especialmente selenio procesado. La sección transversal de una célula de selenio se asemeja a la de una placa de rectificador de selenio, pero la construcción real varía algo según los diferentes fabricantes. En general el selenio es aplicado a una placa de metal base que constituye el terminal positivo del dispositivo; la propia película de selenio es el electrodo negativo, y se establece usualmente un contacto óhmico por medio de una tira de metal rociado cerca del extremo de la película. La figura 3.1.1.2.a es una representación simplificada de esta disposición. Obsérvese que en esta construcción la célula de selenio comprende una unión entre dos materiales diferentes la placa de selenio y la placa metálica de fondo. Cuando se usa la célula, la luz incide en la capa de selenio expuesta. A 2000 footcandles (21528 lux) la tensión media de salida en circuito abierto de una célula de selenio es aproximadamente 0.45 volt.

**Célula de silicio.** En esta célula fotovoltaica hay aplicada una capa de silicio de tipo n a una placa metálica de forro que constituye el electrodo negativo de salida (en algunos modelos, esta placa consiste en una capa de soldadura aplicada de silicio). luego se forma una capa delgada de tipo p en la cara expuesta, o se funde en ella, la capa de tipo n. Finalmente, para formar el contacto óhmico se aplica por rociado una tira o anillo a la capa de tipo p. Esta tira o anillo rociado constituye el electrodo positivo de salida. La figura 3.1.1.2.a da una representación simplificada de esta disposición. En algunos

modelos de célula de silicio la capa de tipo n es la superior, la capa de tipo p la inferior, y la polaridad de la tensión de salida es opuesta a la que arriba se describe.

Las capas de tipos p y n forman un área relativamente grande de unión p-n a través de las cuales existe un campo eléctrico natural. La energía luminosa que incide en la capa exterior expuesta ( de tipo p en este caso) genera pares de electrón hueco y portadores minoritarios (electrones en la capa de tipo p y huecos en la capa de tipo n) y los electrones son barridos desde la capa p hasta la n, y los huecos desde la capa tipo n hasta la p. Esta acción produce la tensión de salida de la célula, siendo positiva la capa de tipo p y negativa la capa de tipo n. Con una iluminación de 2000 footcandles (21528 lux) la tensión media de salida en circuito abierto de una célula típica de silicio es aproximadamente 3.0 a 0.6 volts.

La figura 3.1.1.2.b muestra células típicas fotovoltaicas no montadas que pueden ser de los tipos de selenio o de silicio.

### **Célula solar**

En general una célula solar es una célula fotovoltaica para servicio pesado; es decir, cualquier célula autogeneradora que pueda producir útilmente alta tensión y corriente intensa cuando está expuesta a la luz natural. Sin embargo, una célula solar típica es de silicio; este tipo de células fotovoltaicas entrega salida más alta para una intensidad luminosa dada.

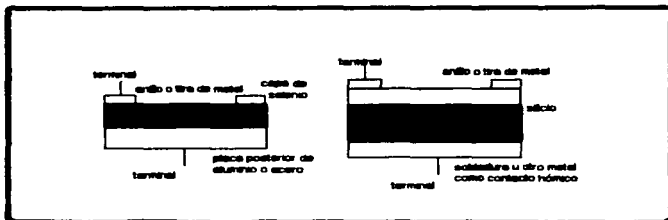


FIGURA 3.1.1.2.a ESTRUCTURA BÁSICA DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

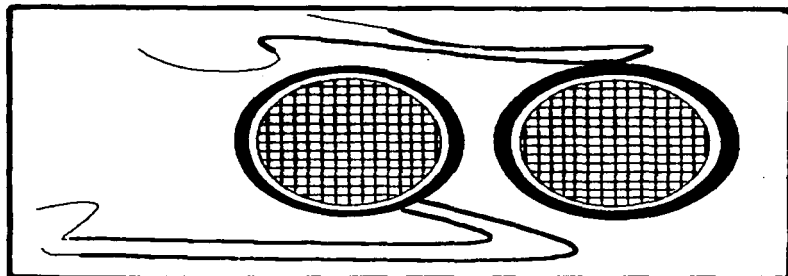


FIGURA 3.1.1.2.b CÉLULAS FOTOVOLTAICAS TÍPICAS (NO MONTADAS)

### 3.2 ARREGLO FOTOVOLTAICO

La celda solar más comúnmente empleada consiste en una oblea de silicio cristalino de menos de medio milímetro de espesor y con dimensiones hasta de 15 por 15 centímetros cuadrados, obtenida a partir de un lingote de silicio ultrapuro (ver figura 3.2.1).

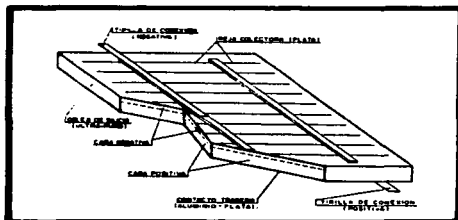


FIGURA 3.2.1 ESTRUCTURA DE UNA CELDA SOLAR

La oblea de silicio es "contaminada" con pequeñas cantidades de fósforo y boro para crear cerca de su superficie frontal un campo eléctrico interno (voltaje interconstruido).

Posteriormente se deposita por impresión en ambas caras un enrejado o entramado muy fino de plata y/o aluminio que servirán de electrodos para extraer la corriente eléctrica generada en el interior de la celda.

Por último, la celda es recubierta con un película antirreflejante para hacerla más oscura y que atrape más luz.

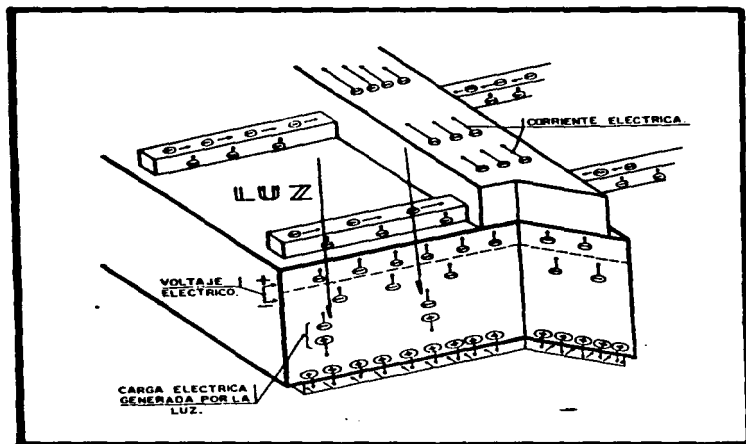
Cada celda solar es probada en su voltaje y corriente de salida, exponiéndola a una lámpara que simula la luz del sol, para luego ser agrupadas en un módulo solar.

La celda solar opera de la siguiente manera:

La luz del sol incide sobre la superficie de la celda. La mayor parte de la luz es absorbida al interior de la oblea (una parte pequeña es reflejada y otra más pequeña parte traspasa la oblea). La luz absorbida en su mayoría (80%) se convierte en calor y simplemente contribuye a calentar la celda. Sin embargo, el 20% restante transfiere la energía de sus paquetes luminicos o cuantos, a electrones periféricos de los átomos de silicio en forma análoga a una bola de billar cuando choca con otra. Los electrones quedan "liberados" del átomo y pueden moverse en la oblea.

Estos electrones que contribuirán a generar una corriente eléctrica, pero antes deben alcanzar la superficie de la celda, donde se encuentra el campo eléctrico interno mencionado anteriormente. El campo eléctrico atrae los electrones a la superficie de la celda y se acumularán ahí dando por resultado un voltaje medible anteriormente. Este es el efecto fotovoltaico. Los electrones no pueden regresar a la oblea por el mismo camino gracias al campo eléctrico (ver figura 3.2.2)





**FIGURA 3.2.2 OPERACIÓN DE UNA CELDA SOLAR**

Quando se establece un circuito entre la cara superior e inferior de la celda , los electrones acumulados pueden fluir por el mismo y regresar a su posición original dentro de la oblea de silicio. Este movimiento ordenado por el circuito exterior es precisamente la corriente fotovoltaica o corriente solar.

El término sirve para identificar su origen pero no se distingue de la corriente eléctrica generada por otras formas, por ejemplo por una batería.

Observar lo siguiente :

La corriente fotovoltaica es proporcional al área iluminada de la celda solar (1kilowatt por metro cuadrado) se tienen 3 amperes de corriente por cada 100 centímetros cuadrados.

El voltaje que se mide es máximo cuando no hay un circuito eléctrico externo conectado a la celda solar. Se le denomina voltaje de circuito abierto. Este voltaje no es útil pues la corriente extraída de la celda solar es cero y por tanto la potencia es cero.

Existe un valor de voltaje al cual se extrae una corriente tal que el producto de ambos (potencia) es el máximo de cualquier otro par de valores de corriente-voltaje. Este es el punto de potencia máxima.

Observar que el punto de potencia máximo no significa que la corriente o el voltaje sea el mayor, sino que el producto de ambos es el que tiene mayor valor respecto a los demás.

**El siguiente es un ejemplo de los parámetros eléctricos de una celda solar convencional:**

**Condiciones : máxima insolación 1 kw por metro cuadrado y 25 grados centígrados de temperatura por celda.**

**Área de la celda :  $10 * 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm cuadrados.}$**

**Voltaje de circuito abierto = 0.59 volts.**

**Corriente de corto circuito = 3.2 amp.**

**Voltaje a máxima potencia = 0.49 volts a 25 grados centígrados  
0. 44 volts a 50 grados centígrados**

**Corriente a máxima potencia = 2.94 amp.**

**Potencia máxima : 1.44 watts a 25 grados centígrados  
1.32 watts a 50 grados centígrados**

**Notar que el voltaje, tanto en circuito abierto como a máxima potencia disminuyen con la temperatura. Esto es importante porque la celda solar bajo insolación se calienta como ya se mencionó anteriormente.**

**El módulo solar es la unidad de generación fotovoltaica más pequeña que se dispone comercialmente. Consiste en un agrupamiento de celdas solares, interconectadas**

entre sí y laminadas entre hojas de plástico y vidrio para protegerlas del medio ambiente, con terminales para conectar al cableado exterior.

Las celdas solares en el módulo, se interconectan usualmente en serie para elevar su voltaje, ya que por sí mismas entregan un voltaje demasiado pequeño (0.5 volts en el punto de potencia máximo para cualquier aplicación práctica) ver la figura 3.2.4.

Ha sido costumbre agrupar entre 30 y 36 celdas solares para dar el voltaje de carga de una batería convencional de 12 volts más las pérdidas de voltaje en el circuito que va desde los módulos solares a baterías, pasando por el control de carga (ver figura 3.2.3).

Cada módulo solar tiene sus características propias de corriente y el voltaje en función del nivel de insolación y de la temperatura de operación.

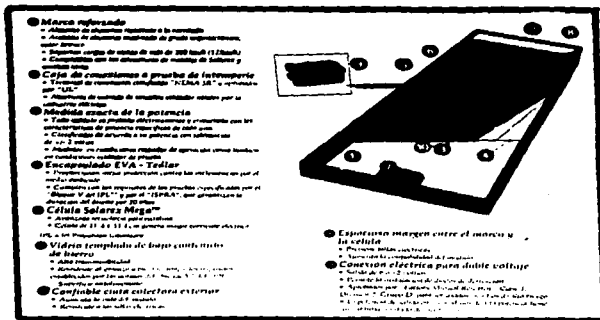
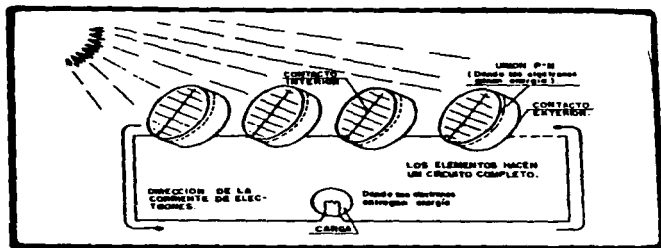
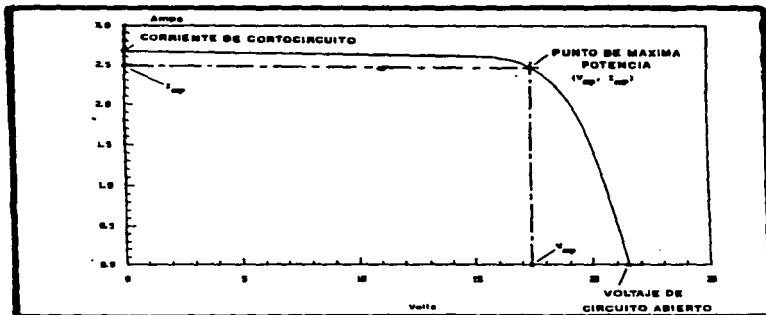


FIGURA 3.2.3 CONSTRUCCIÓN TÍPICA DE UN MÓDULO SOLAR



**FIGURA 3.2.4 CONEXIÓN SERIE DE CELDAS SOLARES EN UN MÓDULO FOTOVOLTAICO**

A continuación, las curvas de corriente voltaje muestran todas las características como generador eléctrico de un módulo solar de las que he hablado hasta aquí (ver figura 3.2.5).



**FIGURA 3.2.5 CURVA CORRIENTE-VOLTAJE DE UN MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO**

De lo anterior se pueden hacer las siguientes observaciones:

#### Efecto de la insulación :

Si el voltaje al que se opera el módulo solar es el de potencia máxima o inferior, la corriente solar es casi proporcional al nivel de insulación, es decir, si la insulación baja a la mitad, así también lo hace la corriente (ver figura 3.2.6).

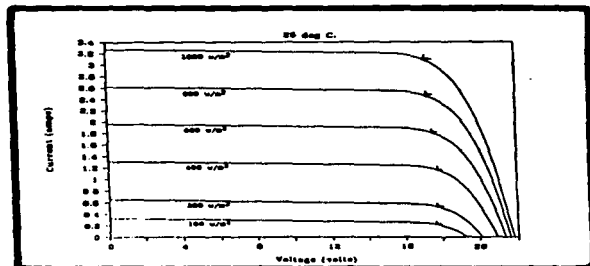


FIGURA 3.2.6 CURVAS CORRIENTE-VOLTAJE A DIFERENTES INSOLACIONES

#### Efecto de la temperatura:

El voltaje del punto de máxima potencia disminuye al aumentar la temperatura. Se debe seleccionar el módulo cuyo voltaje de máxima potencia coincida con el voltaje de la batería, considerando la temperatura de las celdas solares.

La temperatura de las celdas solares es de 20 a 25 grados centigrados o más alta que la temperatura ambiente (ver figura 3.2.7).

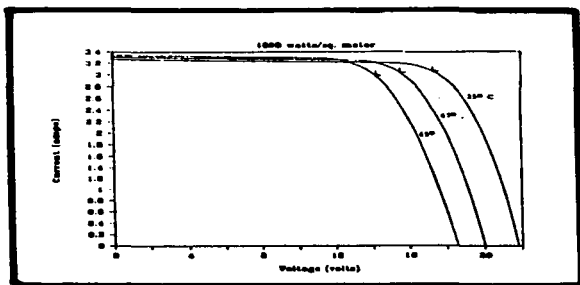


FIGURA 3.2.7 CURVAS CORRIENTE VOLTAJE A DIFERENTES TEMPERATURAS DE CELDA SOLAR

Si el voltaje del módulo está justo a máxima potencia, entonces cuando el voltaje de la batería o las caídas del mismo entre módulo y batería aumenten o la temperatura suba más allá de lo esperado, la corriente solar disminuirá a pesar de que haya buena insolación.

Es importante entonces asegurar que el módulo solar opere en el punto de máxima potencia con el voltaje de batería que se necesita y a la temperatura de la celda que se tenga en el lugar.

#### **Parámetros importantes**

Resumiendo lo antes expuesto, se definen los siguientes parámetros que caracterizan al módulo solar:

**Corriente de corto circuito:** La corriente que circula cuando se unen las terminales positiva (+) y negativa (-) del módulo solar. El voltaje es cero por lo cual, la potencia extraída es nula.

**Voltaje de circuito abierto:** Voltaje medido en las terminales (+) y (-) del módulo solar cuando no hay circulación de corriente. La potencia extraída es cero, aún cuando el voltaje que se mide en el módulo es mayor.

**Corriente-voltaje en un punto de operación:** Dada una carga eléctrica conectada al módulo, se tiene entonces un voltaje de operación y una corriente que se extrae del módulo a ese voltaje.

El producto de ambos es la potencia generada por el módulo solar bajo esa carga eléctrica alimentada.



**Corriente-voltaje de máxima potencia:** Es el voltaje al que el módulo entrega una corriente tal que el producto de ambos es la potencia máxima que se puede extraer del módulo.

El punto de potencia máxima se ubica en la "flexión" de la curva corriente-voltaje.

En un sistema fotovoltaico dimensionado adecuadamente, el voltaje del módulo corresponde o está cercano al voltaje del punto de máxima potencia.

#### *Módulos solares fotovoltaicos*

<i>Características Eléctricas Típicas</i>	<i>(Insolación Pico)</i>
<i>Corriente de corto circuito (I<sub>cc</sub>)</i>	<i>3.2 amp.</i>
<i>Voltaje de circito abierto (V<sub>oc</sub>)</i>	<i>19.4 volts.</i>
<i>Corriente a la carga (I<sub>op</sub>)</i>	<i>2.9 amp.</i>
<i>Voltaje a la carga (V<sub>op</sub>)</i>	<i>16.3 volts a 25 °C</i>
	<i>14.4 volts a 47 °C</i>

#### *Características mecánicas*

*Dimensiones : 33\*130 cm.*

*Espesor : 3.5 cm.*

*Peso : 4.5 kg.*

*Construcción:*

*Frente : vidrio templado antirreflejante*

*Marco : aluminio anodizado reforzado*

*Posterior : película tedlar/poliéster/tedlar (impermeable)*

*Cajas de conexión herméticas con sello de goma para pasar cable*

## **ESPECIFICACIONES DE UN MÓDULO SOLAR DE 48 WATTS**

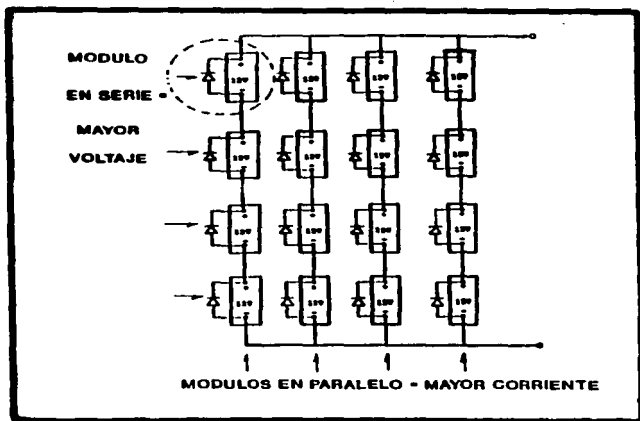
### **ARREGLOS DE MÓDULOS SOLARES**

Para obtener voltajes de salida más altos, los módulos solares se interconectan en serie. El conjunto de módulos solares en serie se denomina panel. La corriente de un panel es la misma que la de un módulo pues al estar en serie, el flujo que sale de un módulo tiene que pasar necesariamente por todos ellos.

Como lo usual es tener módulos para cargar baterías de 12 volts, al ponerlos en serie se tendrá el voltaje para cargar baterías de 24, 36, 48 volts, etc.

Las curvas corriente-voltaje de un panel serán similares en forma a las de un módulo solar, excepto que escaladas proporcionalmente en el voltaje (eje horizontal).

Para obtener corrientes de salida más altas los módulos o los paneles se conectan en paralelo entre sí. El voltaje del conjunto es el mismo que el de un solo componente, pero la corriente de cada uno de ellos se suma. La figura 3.2.8 muestra un ejemplo de un arreglo de 16 módulos solares conectando en paralelo cuatro paneles, cada uno de ellos formado por 4 módulos en serie.



**FIGURA 3.2.8 EJEMPLO DE CONEXIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EN UN ARREGLO SOLAR**

Si cada módulo entrega 3 amperes a un voltaje nominal de 12 volts, entonces este arreglo entregaría 48 volts ( $4 \times 12$  volts) a 12 amp ( $4 \times 3$  amperes).

De la manera descrita se pueden hacer arreglos solares hasta de cientos de módulos fotovoltaicos.

**CAPÍTULO 4**

**LOS BANCOS DE  
BATERÍAS**

#### **4.1 LOS BANCOS DE BATERÍAS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Los bancos de baterías, del tipo empleado en los sistemas fotovoltaicos, es un conjunto de celdas electroquímicas, conectadas generalmente en serie para obtener el voltaje deseado y que son susceptibles de almacenar energía eléctrica en forma química (carga), cederla a un equipo en forma de electricidad descargada y volverla a recuperar.

En la práctica existen dos tipos de celdas electroquímicas empleadas: plomo-ácido y níquel-cadmio.

Las baterías de níquel-cadmio presentan características de construcción y operación ventajosas respecto a las celdas de plomo-ácido: más larga vida, menor mantenimiento, mejor resistencia a temperaturas extremas, menor corrosión, etc., pero su costo es tan alto que son poco usadas en sistemas fotovoltaicos, excepto en aquellos lugares inaccesibles y de clima extremo (las regiones polares por ejemplo).

Por lo anterior, se detalla en este capítulo únicamente la celda plomo-ácido.

La celda electroquímica plomo-ácido consta de 4 partes principales: un medio electrolítico (ácido sulfúrico diluido o en suspensión), los electrodos positivos (rejillas de plomo recubiertas de peróxido de plomo), los electrodos negativos (rejillas de plomo esponjoso Pb) y la jarra o vaso que contiene la celda.

El plomo de las rejillas usualmente se mezcla con otros metales para darles rigidez. Se utiliza antimonio o calcio y pequeñas cantidades de cadmio adicionales.

La aleación de la placa tiene un efecto importante en el compartimiento y la vida de las celdas. El antimonio produce una celda más resistente a las temperaturas altas y muy tolerante a las descargas profundas, pero la autodescarga (pérdida de energía dentro de la misma celda) aumenta y la pérdida de agua por electrólisis se incrementa, por lo que las celdas no pueden ser selladas.

La aleación de calcio en las rejillas de plomo disminuye la pérdida de agua permitiendo baterías libres de mantenimiento, además de disminuir la autodescarga. Sin embargo la celda es poco resistente a las descargas profundas y su vida disminuye notablemente con la temperatura:

Por cada 10°C de incremento de temperatura respecto a 25°C, la celda de plomo-antimonio reduce su vida 20% y la celda plomo calcio la reduce en 50 %.

Cada celda tiene un voltaje nominal de 2.1 volts a corto circuito abierto.

## 4.2 EFICIENCIA

Una celda electroquímica tiene pérdidas inherentes a su operación, es decir, no toda la energía eléctrica que recibe durante la carga la puede entregar durante la descarga.

El primer factor de pérdida es que una pequeña parte de los electrones que se inyectan durante la carga no contribuyen a las reacciones químicas antes descritas, sino que se desperdician en reacciones químicas parásitas. El porcentaje de electrones útiles varía entre el 92% y el 98%. Este porcentaje se le denomina eficiencia Coulombica.

El segundo factor de pérdida es que se requiere un voltaje que se obtendrá a la descarga, simplemente porque se tiene que "forzar" a que los electrones entren a la celda durante la carga.

El voltaje de carga promedio de la batería en un sistema fotovoltaico es 2.33 volts por celda, mientras que el voltaje promedio a la descarga es 2.05 volts, es decir se tiene una eficiencia por voltajes de 88%.

Si se considera ambos factores combinados (corriente por voltaje), la eficiencia global de la batería como unidad de almacenamiento de energía es de 84% aproximadamente.

### 4.3 CAPACIDAD

La capacidad de una batería es la cantidad de energía que puede almacenar. Siendo así debería quedar expresada en unidades de (watts-hora). Sin embargo, ha sido más usual expresar la capacidad en (amper-hora).

Si recordamos que el amper es electrones por segundo que fluyen en un circuito, entonces el amper-hora es el conteo total de electrones que han fluido en determinado tiempo. Por tanto, el número de amper-horas de una batería nos dice cuantos electrones puede contener.

La multiplicación de los amper-hora por el voltaje promedio de la batería resulta en la energía almacenada.

$$E_s = (\text{amper-hora}) * (\text{volts}) = \text{watts hora}$$

Se pueden calcular fácilmente los (ampers-hora) extraídos o inyectados simplemente multiplicando la corriente de descarga o de carga por el tiempo en que ha ocurrido el proceso:

$$\text{Amper-horas} = I (\text{amp}) * t (\text{horas})$$



#### 4.4 CURVA DE ESTADO DE CARGA VS VOLTAJE

Es importante conocer el voltaje para un estado de carga dado, ya que los controles de carga en un sistema solar se basan en lecturas de voltaje para decidir si una batería está cargada totalmente y también para protegerla cuando está muy descargada.

Curva de voltajes a la carga:

La figura 4.4.1 muestra el voltaje en función del estado de carga para una batería estacionaria plomo ácido con aleación de antimonio, que está siendo cargada. Este es el tipo de batería más usado en la actualidad en los sistemas solares.

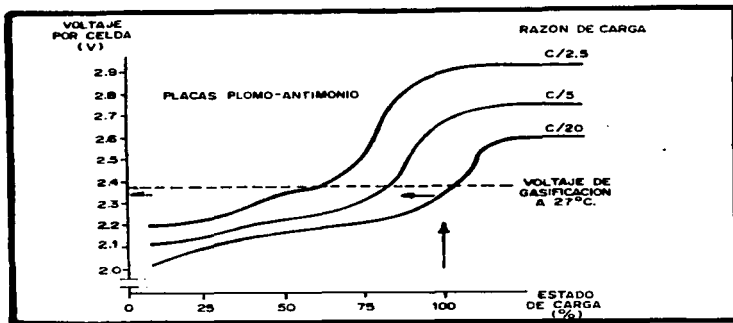


FIGURA 4.4.1 VOLTAJES DE CARGA DE UNA CELDA PLOMO-ÁCIDO EN FUNCIÓN DE SU ESTADO DE CARGA, A DIFERENTES RAZONES DE CARGA

Observar que se muestran varias curvas, correspondiente a diferentes velocidades o razones de carga. La velocidad está expresada en el número de horas ( $C/20$ ,  $C/8$ , etc.) que tomaría recargar la batería con la corriente dada, donde el cociente es precisamente el número de horas.

Para obtener la razón de carga a la que se está recargando una batería, simplemente divide su capacidad nominal (amper -horas) entre la corriente inyectada (amperes).

Las razones de carga típicas para baterías en sistemas fotovoltaicos, cuando se tiene la insolación máxima, se sitúa entre  $C/10$  hasta  $C/30$ , siendo éstas últimas las más usuales. Estas razones de carga resultan de la relación que guarda el número de módulos solares con el tamaño del banco de baterías.

Observar que una batería de este tipo (plomo/antimonio-ácido) está 100% cargada a  $25^{\circ} C$ , para una razón de carga de  $C/20$ , cuando se alcanza un voltaje de 2.35 volts por celda. Para una batería tipo plomo/calcio ácido el voltaje debe incrementarse a 2.55 volts.

Siempre es conveniente exceder ligeramente este voltaje, para tener gasificación en el electrolito y evitar que éste se "estratifique", es decir, que el ácido más denso se vaya al fondo y el agua con menos ácido quede arriba permanentemente.

#### 4.5 CURVAS DE VOLTAJE A LA DESCARGA

La figura muestra el voltaje en función del estado de carga para una batería que está siendo descargada a diferentes velocidades o razones de carga. Se muestran varias curvas desde 10 horas hasta 10 minutos (0.17 horas). Observar que para la descarga más lenta, el voltaje se mantiene relativamente constante por un largo periodo.

En un sistema fotovoltaico es usual que las baterías tengan varios días de "autonomía", es decir, pueden respaldar el suministro al consumo en ausencia total del sol durante este periodo.

Esto significa que las razones de descarga son muy lentas, mayores a 24 horas (1 día). Por tanto, el voltaje es relativamente constante (ver figura 4.5.1).

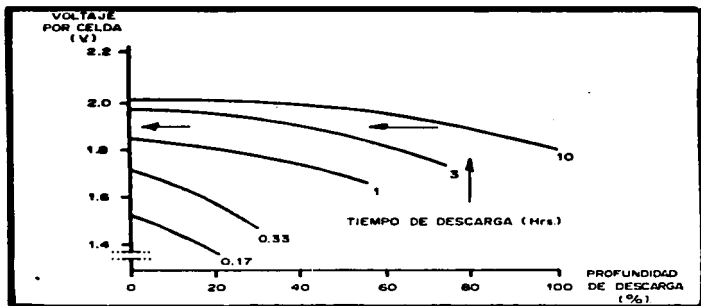


FIGURA 4.5.1 VOLTAJES A LA DESCARGA DE UNA CELDA PLOMO-ÁCIDO EN FUNCIÓN DEL ESTADO DE CARGA A DIFERENTES RAZONES DE DESCARGA

Por ejemplo, una celda que está iniciando su descarga a 10 horas (C/10), tiene un voltaje de 2.03 volts y cuando alcanza el 80% de descarga su voltaje baja únicamente a 1.9 volts.

En un sistema fotovoltaico, identificar la curva de descarga de las baterías es importante, pues de ella se deriva el voltaje al cual se debe desconectar el suministro cuando la descarga ha alcanzado una cierta profundidad, para proteger a la batería de sulfatación irreversible.

Como comentario, los fabricantes generalmente suministran curvas de descarga de sus baterías, pero es poco frecuente que den las curvas de carga que son indispensables en determinar la operación correcta de un sistema fotovoltaico.

En la práctica se ha encontrado que los voltajes de carga completa de una batería plomo-ácido se deben incrementar conforme envejecen pues su resistencia interna aumenta y debe compensarse con mayor voltaje.

Por otro lado, las baterías requieren menor voltaje de carga completa cuando la temperatura se incrementa, pues las reacciones químicas se aceleran. En especial la gasificación debida a la electrólisis del agua se incrementa con la temperatura y la pérdida de agua se acelera.

Por ello, se recomienda disminuir los voltajes de carga completa como se indica:

Celdas inundadas plomo-antimonio: 5 mV/°C/celda

**Celdas inundadas plomo-calcio : 3 mV/°C/celda**

#### 4.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BATERIAS

Existen diversas tecnologías de fabricación de la celda plomo-ácido, para diferentes aplicaciones, con diferentes compromisos entre su costo, su operación y vida útil. Las baterías en sistemas fotovoltaicos están sujetas a ciertas condiciones de operación que deben revisarse para determinar lo que se espera de un modelo o tipo específico de batería.

Cualquier batería plomo-ácido puede servir pero se requiere saber lo que se puede esperar de ella. Por ejemplo, una batería de bajo costo como la automotriz puede tener una vida muy corta en un sistema fotovoltaico cuando la batería se descargue profundamente aún cuando solo se haga esto algunas veces.

A continuación se resumen brevemente las características de los diferentes tipos de batería cuando son empleados en un sistema fotovoltaico:

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Automotriz abierta.	Bajo costo. Buena tolerancia a altas temperaturas. Disponible localmente.	Vida corta (menos 2 años). Poca tolerancia a descargas profundas. Requiere añadir agua. Auto descarga impor-

<b>Automotriz libre mantenimiento.</b>	<b>Bajo costo No requiere añadir agua</b>	<p>tante conforme envejece.</p> <p>Vida corta (menos 2 años).</p> <p>Nula tolerancia a descargas profundas.</p> <p>Poca tolerancia a las altas temperaturas.</p> <p>Disponibilidad limitada.</p>
<b>Industrial de tracción (Montacargas).</b>	<p>Costo medio.</p> <p>Buena tolerancia a descargas profundas.</p> <p>Buena tolerancia a temperaturas altas.</p>	<p>Disponible solo bajo pedido.</p> <p>Requiere añadir agua (cada 3-6 meses).</p>
<b>Estacionaria Abierta.</b>	<p>Vida media (5-8 años).</p> <p>Buena tolerancia a descargas profundas.</p> <p>Vida media-alta (6-10 años).</p> <p>Vaso transparente permite conocer su estado interno.</p> <p>Buena tolerancia a temperaturas altas.</p>	<p>Costo alto.</p> <p>Disponible solo bajo pedido.</p> <p>Requiere añadir agua (3-6 meses).</p>
<b>Estacionaria sellada, electro-lito inmovilizado.</b>	<p>Transporte y manejo simplificado (vía aérea inclusive).</p> <p>Pueden apilarse verticalmente:</p>	<p>Costo muy alto.</p> <p>Disponible solo bajo pedido.</p>

menos espacio de instalación  
No requieren mantenimiento ni  
adición de agua.

Baja tolerancia a descargas profundas, excepto en algunos modelos.  
Baja tolerancia a altas temperaturas excepto en algunos modelos.

#### Niquel-Cadmio

Tolera descargas profundas, altas y bajas temperaturas, vida útil hasta 20 años, casi no requiere mantenimiento pedido. Costo demasiado alto Disponible sólo bajo

En resumen cada tipo de batería tiene sus oportunidades y sus limitaciones. Lo importante es conocer lo que se puede esperar en la vida real. Actualmente, se tiene una mejor idea de lo que puede resultar de un tipo de batería en un sistema fotovoltaico pero todavía se desconoce con precisión muchos detalles. Por ello, la experiencia práctica es importante.

-Como ejemplo, daremos algunos parámetros de operación típicos a los que se sujetan los bancos de baterías en un sistema fotovoltaico:

-Diariamente experimentan ciclos de descarga (noche) -carga (día) equivalentes al 10-20% de la capacidad nominal.

-Con la frecuencia que ocurran nublados prolongados pueden descargarse profundamente y tardar hasta semanas en recuperar 100% la carga nuevamente.

-Operan a temperaturas tan bajas como 0°C (invierno) y tan altas como 45° (verano)



**-Los usuarios se olvidan de ellas hasta que el agua se ha agotado debajo del nivel de las rejillas.**

**-La corrosión en las terminales de conexión no es eliminada hasta que falla el sistema completo.**

**-El voltaje de carga es insuficiente y la batería nunca alcanza su carga total.**

**-El voltaje de carga es excesivo y la batería pierde agua excesivamente.**

**-El usuario descarga la batería totalmente a pesar de que el tipo utilizado no sea apropiado para ello.**

#### 4.7 CAPACIDAD DE LA BATERÍA

La única forma práctica de determinar la capacidad que tiene una batería es cargarla totalmente y luego sujetarla a una descarga completa a una corriente dada. La capacidad será el producto de la corriente (amperes) por el periodo que se descargó (horas).

En general se considera que una batería está descargada cuando llega a 1.75 volts por cada celda.

Si una batería entrega menos del 80% de su capacidad original, es conveniente reemplazarla a menos que en su dimensionamiento se haya considerado una pérdida de capacidad mayor con el envejecimiento. Si una batería no alcanza la densidad nominal de electrolito después de una recarga prolongada, esta "sulfatada" en forma irreversible. Reemplazarla.

#### 4.8 MANTENIMIENTO

El mantenimiento es sencillo y tiene efectividad si se sigue con cuidado, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante para el tipo de batería empleado.

En general el mantenimiento consiste en:

-Limpieza de las terminales de la celda para eliminar depósitos (usualmente sulfatos) y aplicación de grasa anticorrosiva.

Existen compuestos en el mercado específicamente para ello que permiten extender los periodos entre cada limpieza.

-Adición de agua en el caso de celdas "inundadas". Nunca se debe añadir ácido porque éste no se pierde en los procesos de carga y descarga de la batería. El agua debe estar libre de minerales (destilada o desmineralizada). Si se añade agua común, las pérdidas por electrólisis y la autodescarga se incrementa.

Nunca debe permitirse que el nivel de electrolito baje tanto que deje al descubierto las placas.

-Medición de densidad, en el caso de celdas "inundadas".

Debe asegurarse que la densidad máxima nominal se alcance cuando el control de carga fotovoltaica haya llegado a su voltaje de carga completa (desconexión de módulos solares)

**La densidad máxima está entre 1.220 y 1.275 (consultar al fabricante). Si la densidad máxima no se alcanza y el control de carga ya limitó la corriente solar, entonces deben reajustarse los niveles de operación.**

**-Prueba de capacidad. Esta prueba es indispensable si se quiere saber el estado real de la batería, especialmente en los tipos de celda "sellados" donde la densidad de electrolito no se puede medir.**

**CAPÍTULO 5**

**EL SISTEMA SOLAR  
FOTOVOLTAICO A  
BATERÍAS**

## 5.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El diagrama de bloques muestra los componentes principales y el principio de operación del sistema solar fotovoltaico a baterías (ver figura 5.1.1).

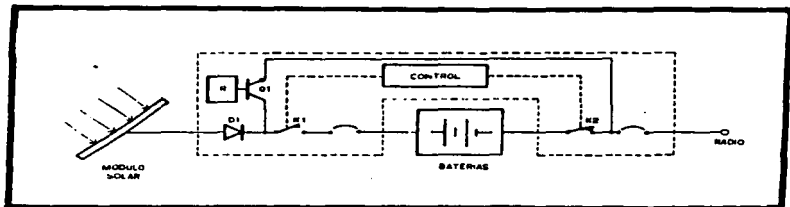


FIGURA 5.1.1. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO A BATERÍAS.

Los equipos se alimentan siempre del banco de baterías que es a su vez cargado por el arreglo de módulos solares.

### **Operación diurna**

Al amanecer el voltaje de los módulos solares se incrementa rápidamente hasta exceder al voltaje del banco de baterías, polarizando en directa el diodo D1 e iniciando poco a poco la inyección de corriente al sistema.

El arreglo de módulos solares genera durante el periodo diurno de un día típico, suficiente corriente tanto para alimentar los equipos como para recuperar el banco de baterías de la descarga de la noche anterior. En general, la corriente del arreglo solar durante el día, a carga plena, es mucho mayor que el consumo de los equipos alimentados, teniéndose entonces una entrada neta de corriente a las baterías.

Cuando se llega a un voltaje de batería de 2.46 volts/celda de la batería, los módulos solares se desconectan (se abre K1 del control de carga), pues se espera que la batería ya esté totalmente cargada (ver curvas del fabricante).

En ese momento, la corriente solar fluye únicamente por el circuito de flotación (formado por el regulador R y el transistor Q1), que mantiene una corriente limitada a un voltaje constante de 2.33 volts/celda. Bajo esta condición el arreglo de módulos solares proporciona sólo la corriente necesaria para mantener el suministro a los equipos y la corriente de mantenimiento del banco de baterías.

El modo de operación a flotación se mantendrá el resto del día mientras haya suficiente insolación para que los módulos solares generen la corriente antes mencionada.

**Al atardecer o cuando ocurre un nublado, el circuito de flotación no puede sostener un voltaje constante y el voltaje de la batería empieza a descender. Al llegar a 2.15 volts/celda, el relevador K1 se cierra y fluye libremente la corriente que puedan generar los módulos en ese momento.**



## 5.2 OPERACIÓN NOCTURNA

Al oscurecer el banco de baterías alimenta por sí solo las cargas y estará descargándose ya que deja de recibir corriente de los módulos solares.

Al amanecer los módulos solares reinician el ciclo de carga y suministran la corriente a los radios en su totalidad, además de recargar a las baterías, repitiéndose el ciclo descrito anteriormente.

### **5.2.1 DÍAS NUBLADOS**

**Quando hay nublados la corriente solar disminuye bastante y es insuficiente para alimentar a las cargas conectadas , por lo que la corriente es tomada de las baterias.**

**Mientras persista la condición de nublados el banco de baterias estará descargándose. Los sistemas solares son diseñados para soportar desde 2 días hasta 10 días esta condición, dependiendo de las condiciones de la localidad. Este periodo de respaldo es denominado autonomía del banco de baterias. Si la condición de nublados persistiera más allá de estos periodos, el control de carga automáticamente desconecta la alimentación a los radios, abriendo el relevador K2 a 1.92 volts/celda para proteger a las baterias de un daño irreversible. La alimentación es restablecida automáticamente cuando las baterias recuperan carga, a 2.23 volts/celda.**

**Los voltajes indicados son por cada celda que tiene el banco de baterias en serie. Por ejemplo, en un sistema a 12 volts el voltaje corresponde a multiplicar por 6 los valores indicados, en un sistema a 24 volts, el voltaje corresponde a multiplicarlos por 12.**

**Estos voltajes son adecuados para baterias plomo-ácido, aleación antimonio (baterias abiertas). Se debe consultar al fabricante para los valores recomendados para el tipo de batería empleado.**

### 5.3 NIVELES DE VOLTAJE DE OPERACIÓN

Los valores típicos de operación del sistema fotovoltaico serán entonces:

Parámetros	Sistema	Sistema	Sistema
Desconexión de módulos solares.	14.0 a 15.5v	28.0 a 31.0v	56.0 a 62.0v
Voltaje de flotación	13.5 a 14.0v	27.0 a 28.0v	54.0 a 56.0v
Reconexión de módulos	12.8 a 13.4v	25.6 a 26.8v	51.2 a 53.6v
Desconexión de bajo voltaje de batería	11.4 a 11.8v	22.8 a 23.6	45.6 a 47.2v
Reconexión al recuperarse la batería.	13.2 a 13.8v	26.4 a 27.6v	52.8 a 55.2v

No existen valores establecidos para estos parámetros, ya que dependen de los componentes del sistema y del criterio de diseño pero se escogen al responder las preguntas:

¿A que voltaje de carga la batería está bien cargada?

¿Que voltaje soportan máximo los equipos alimentados?

¿Que voltaje de carga soportan máximo las baterías empleadas?

**¿Que profundidad de descarga máxima soportan las baterías sin dañarse?**

**¿Que tan frecuentemente te espera descargar las baterías profundamente? (la descarga diaria es usualmente muy ligera).**

### **5.3.1 BALANCE DE ENERGÍA.**

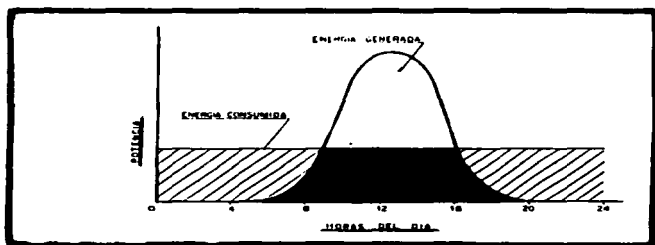
**El sistema solar debe dimensionarse de tal manera que, al menos a lo largo de un ciclo anual se asegure que la energía generada por los módulos solares sea mayor que la energía consumida por los equipos alimentados.**

**En la práctica esto resultaría en tener bancos de baterías demasiado grandes para poder almacenar la energía extra de los meses con buena insolación para usarla en los meses con insolación menor. Para ello, casi todos los sistemas solares fotovoltaicos a baterías se diseñan para operar con la insolación del mes más desfavorable del año.**

**El resto del año el sistema está sobrado, por lo que los módulos solares son desconectados o su corriente limitada, antes que termine el ciclo diurno para evitar que las baterías se sobrecarguen.**

**Durante el mes más desfavorable habrá días con mejor insolación respecto al valor promedio en que las baterías se recuperarán de los días con insolación menor respecto al valor promedio (nublados). Lo importante es asegurar que en promedio el balance de energía se mantenga. Se requiere que el banco de baterías tenga la capacidad suficiente para respaldar los días "malos" del mes hasta que lleguen los días "buenos".**

**Por ello la autonomía del banco de baterías es un parámetro relacionado estrechamente con la confiabilidad del sistema (con la premisa fundamental que además se haya diseñado el arreglo solar con la insolación del mes más desfavorable).(ver figura 5.3.1.1).**



**FIGURA 5.3.1.1 BALANCE DE ENERGÍA A LO LARGO DE UN DÍA EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO A BATERÍAS.**

# **CAPÍTULO 6**

## **DIMENSIONAMIENTO**

## 6.1 DIMENSIONAMIENTO BÁSICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Se describe a continuación un procedimiento para dimensionar un sistema fotovoltaico a baterías en forma sencilla y rápida. El procedimiento no es exacto existe una tolerancia de +/- 15% pero permite una estimación preliminar que sirva de base para avanzar en la factibilidad de la opción solar fotovoltaica si el sistema solar es grande y puede ser un cálculo suficiente si el sistema incluye sólo algunos módulos solares. Para un cálculo detallado se emplean programas por computadora, de los cuales existen varias versiones en el mercado.

### Balace de energía

El sistema se diseña para que la energía generada en promedio diariamente por los módulos solares, en el mes más desfavorable sea igual a la energía diaria consumida por los equipos a alimentar:

$$\begin{aligned} E_g &= E_c \\ M g_m * N_{sist} &= E_c \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

M=Número de módulos solares.

$E_g$ =Energía generada diariamente por cada módulo solar.

$N_{sist}$ =Eficiencia combinada de cada componente del sistema entre los módulos y los equipos alimentados.

$E_c$ =Energía consumida por todas las cargas alimentadas.

Entonces:



$$M = E_c / (E_{gM} \cdot N_{sist})$$

(2)

La eficiencia del sistema ( $N_{sist}$ ) es el resultado de multiplicar la eficiencia de cada uno de los componentes del mismo: baterías, control de carga, inversores y las pérdidas en el cableado.

#### El cálculo del arreglo solar

Al desarrollar los términos de la ecuación (2) se obtiene que el número de módulos está dado por:

$$M = E_c \cdot F_s / (I_m \cdot V_m \cdot H_p \cdot N_{BAT} \cdot N_{inv})$$

Donde:

$M$  = Número de módulos solares que se requieren.

$E_c$  = Energía consumida diariamente por las cargas (watts-hora/día).

$F_s$  = Factor de sobredimensionamiento del sistema. Típicamente se sobredimensiona 10 a 20% (e.d.  $F_s = 1.1$  a  $1.2$ ).

$I_m$  = Corriente de módulo solar a máxima insolación (1 Kw/m cuadrado) al voltaje de carga de batería incluyendo caídas en el cable, y a la temperatura de operación de las celdas (50°C típicamente)

**V<sub>m</sub>**=Voltaje promedio de operación del módulo solar una vez conectado al banco de baterías. Típicamente V<sub>m</sub>=14.3 volts. No confundirlo con el voltaje de baterías que puede ser múltiplo (24, 48 volts, etc.).

**H<sub>p</sub>**=Insolación de la localidad en el mes de menor insolación, expresada como el equivalente de horas diarias de máxima insolación (horas-pico). Ver mapa anexo (figura 6.1) para determinar este valor en la localidad considerada. (el mapa también incluye la inclinación del arreglo solar respecto a la horizontal).

**N<sub>inv</sub>**=eficiencia del inversor CD/CA en caso de que el equipo opere en C.A. Valores típicos: 0.8 a 0.9. Si el equipo opera en C.D. el valor es 1.

**N<sub>BAT</sub>**=Eficiencia de carga de la batería. Típicamente 0.87 a 0.9.

Observar que la fórmula indica el número de módulos necesarios pero no cómo deben conectarse. La conexión depende del voltaje de batería seleccionado: a 12 volts se conectan en paralelo, a 24 volts se hacen pares en serie y luego se interconectan en paralelo y así sucesivamente.

#### **Cálculo de energía consumida**

Es la suma de la energía consumida a lo largo de un día por cada una de las cargas conectadas al sistema.

$$E_c = P_1 * t_1 + P_2 * t_2 + \dots \text{ (watts.hora)}$$

**Donde:**

**Pi=Potencia de la carga expresada en watts.**

**ti=Tiempo de operación diaria de la carga expresando en horas.**

### **Cálculo del banco de baterías**

El banco de baterías se determina indicando el número de días que operaría el equipo a cero insolación, es decir, directamente del banco. Este valor se reconoce como autonomía (Au).

$$C_b = (A_u \cdot E_c) / (V_b \cdot f_u \cdot F_i \cdot N_{inv}) \quad (\text{amper-horas})$$

**Donde:**

**C<sub>b</sub>=Capacidad del banco de baterías (amper-horas).**

**E<sub>c</sub>=Energía consumida diariamente por los equipos alimentados (watts-hora).**

**A<sub>u</sub>=Autonomía deseada en el banco de baterías (días). Varía entre 4 días para lugares con buena insolación hasta 6 días para lugares con nublados prolongados.**

**La gráfica anexa muestra la probabilidad de descargar la batería totalmente (LOLP) en función de la autonomía (ver figura 6.2).**

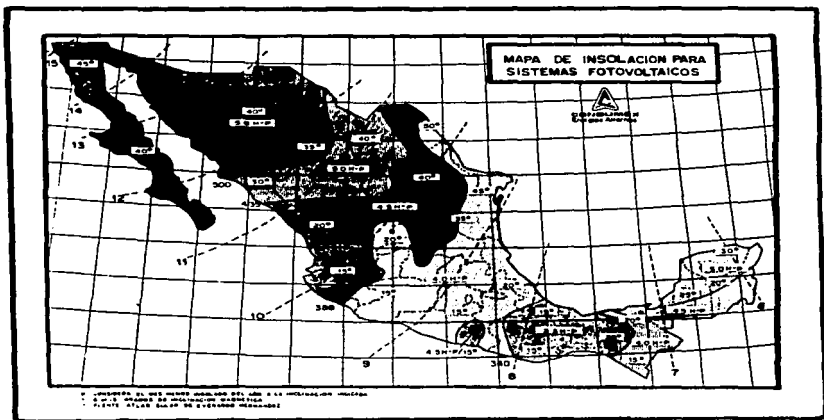
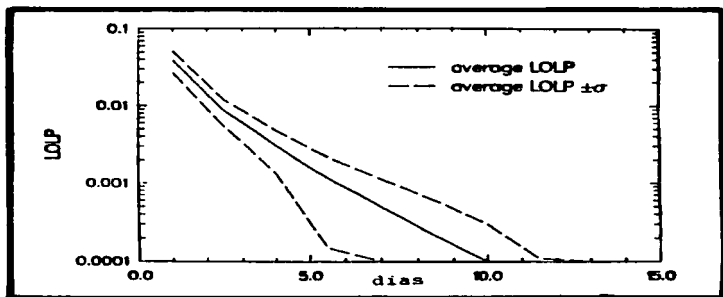


FIGURA 6.1 MAPA DE INSOLACIÓN PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS



**FIGURA 6.2 PROBABILIDAD DE PÉRDIDA DE CARGA VS AUTONOMÍA**

$V_s$  = Voltaje nominal al cual trabajará el banco de baterías.

$f_u$  = Fracción de la capacidad total de la batería que se usa para dar la autonomía de diseño del sistema, evitando que las baterías se descarguen totalmente. Este factor toma también en cuenta la capacidad útil del banco al finalizar su vida útil.

$f_u = 0.5$  para baterías de placa delgada.

$f_u = 0.8$  para baterías de placa gruesa.

$F_i$  = Factor de incremento de la capacidad de la batería respecto a su valor nominal comercial como resultado de una razón (tiempo) de descarga más lento que el especificado comercialmente. Este valor varía desde 1.05 en baterías de placa delgada hasta 1.35 en baterías de placa gruesa tipo tubular.

### **Especificación de control de carga**

Se especifica por tres datos básicos:

- 1.-El voltaje nominal de banco de baterías.
- 2.-El tipo de baterías a utilizar con lo que se definen los niveles de voltaje de operación de control.
- 3.-La corriente máxima que generarán los módulos y la corriente máxima que demandarán los equipos alimentados.

### **Especificaciones del inversor CD/CA**

Si el sistema incluye un inversor para alimentar los equipos en C.A., entonces la potencia del mismo será la suma de la potencia demandada por todas las cargas que puedan estar operando simultáneamente.

Debe además, cuidarse que el inversor sea capaz de suministrar la corriente de arranque de cualquiera de ellas. En especial los motores de inducción pueden consumir en el arranque varias veces la potencia nominal.

**CAPÍTULO 7**

**CAPTACIÓN DE  
ENERGÍA SOLAR**

## 7.1 SEGUIMIENTO SOLAR

Son dos los movimientos principales de la tierra: la traslación de la tierra al rededor del sol y el de rotación sobre su eje. Ambos movimientos son importantes en aplicaciones en energía solar.

**Movimiento orbital de la tierra .-** La tierra gira en una órbita elíptica con el sol en un foco de la elipse. La forma elíptica de la orbita terrestre de hecho es casi un círculo, teniendo ejes semimayor y semimenor de  $1.4968 \cdot 10^8$  Km y  $1.4966 \cdot 10^8$  Km, con una excentricidad  $e=0.0167$  .

El periodo de traslación se define como un año. El perihelio es el punto en el cual la tierra está más cerca del sol ( $1.47 \cdot 10^8$  Km) ocurre aproximadamente el 2 de enero. El afelio ocurre el 2 de julio (aproximadamene  $1.522 \cdot 10^8$  Km.) y es el punto en el cual la tierra está más lejos del sol.

El movimíneto orbital del tierra y su rotación, son contrarios al sentido de las manecillas del reloj visto desde el polo norte.

El plano que contiene a la órbita elíptica . El plano ecuatorial, es el plano que contiene al ecuador. El ángulo entre estos planos es de  $23.45^\circ$ .

Sabemos que el año tiene una duración de 365.242 días que equivalen a  $360^\circ$  de movimiento.

21 de marzo (número de días transcurrios 80)

$$360^\circ/365.242 = \alpha / 1 \text{ día}$$

$$\alpha=0.985648^\circ/1 \text{ día.}$$



$$\delta = 23.45^\circ \sin((N-80) 0.985648^\circ)$$

$$\delta = 23.45 \cos(.985648^\circ(N-173))$$

(ver figura 7.1.1)

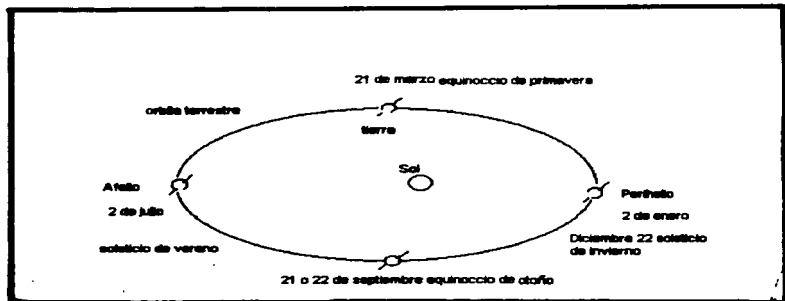


FIGURA 7.1.1 MOVIMIENTO ORBITAL DE LA TIERRA

Las estaciones se deben al hecho de que el eje terrestre está inclinado con respecto al plano de la elíptica. La radiación solar llega al hemisferio norte directamente en el afelio, causando el verano en este hemisferio, durante esa parte del año. Al mismo tiempo la radiación solar llega al hemisferio sur oblicuamente, causando su invierno. Los equinoccios son fechas en las cuales el vector tierra-sol se halla en el plano ecuatorial.

## Declinación solar

La declinación solar es el ángulo formado entre el vector tierra-sol (rayo incidente) y la proyección de éste en dirección meridional sobre el plano ecuatorial ( $\delta$ ).

Por convención  $\delta$  es considerada positiva cuando el vector tierra-sol se encuentra hacia el norte del plano ecuatorial negativo hacia el sur.

A causa de su eje inclinado, la superficie de la tierra se ha dividido en 5 zonas:

- Zona tórrida.**- incluye todos los lugares donde el sol está en el cenit (perpendicular a la superficie horizontal de la tierra) al menos una vez al año.
- Zona templada.**- Incluye todos los lugares donde el sol aparece todos los días sobre el horizonte, pero nunca en el cenit.
- Zonas frías.**- Incluye todos los lugares donde el sol permanece por debajo del horizonte o sobre él, al menos un día completo cada año (ver figura 7.1.2).

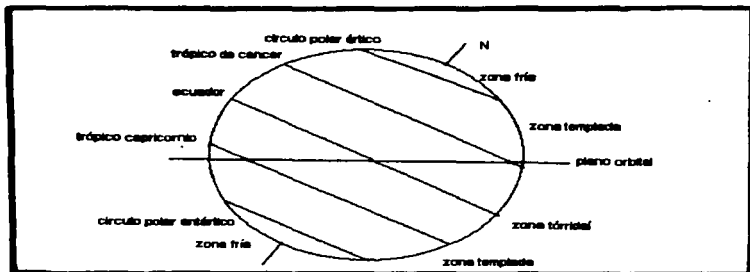


FIGURA 7.1.2 ZONAS TERRESTRES

## **Ecuación del tiempo**

**Análisis para convertir tiempo civil en tiempo solar.**

$$TS = T_o - ET + 4(l_o - l_o')$$

donde:

TS=Tiempo solar

T<sub>o</sub>=Tiempo oficial

ET=Ecuación del tiempo

l<sub>o</sub>'=longitud oeste (de referencia del tiempo oficial) o este.

l<sub>o</sub>=longitud este u oeste (referido al observador).

$$ET = 0.1236 \operatorname{sen} x - 0.0043 \operatorname{cos} x + 0.1538 \operatorname{sen} 2x + 0.0608 \operatorname{cos} 2x \text{ (hrs.)}$$

donde x es una función del día del año:

$$x = (360/365.242) (N-1)$$

Corrige por rotación y traslación de la tierra.

La rotación de la tierra sobre su eje ocasiona el ciclo día y noche y da la impresión de que el sol viaja a través del cielo cada día de este a oeste. Este ciclo es la base para el tiempo solar, un "día solar" se define como el intervalo de tiempo desde el momento en que el sol atraviesa el meridiano local hasta el próximo tiempo que cruza el mismo meridiano. Como la tierra sigue su camino en su órbita durante este intervalo, el tiempo para una rotación completa de la tierra es menor que un día solar al alrededor de 3.95 min.

$$360^\circ = 365.242 \text{ días} \quad , \quad 0.985648^\circ = 1 \text{ día} .$$

### Ángulos solares

La posición de un punto  $P$  sobre la tierra se conoce en cualquier instante con respecto a los rayos del sol si se conoce la latitud ( $l$ ), y el ángulo horario ( $h$ ) del punto y la declinación solar ( $\delta$ ) (ver figura 7.1.3).

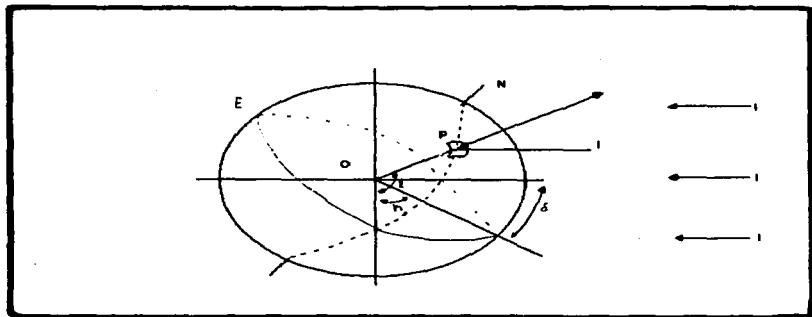


FIGURA 7.1.3 PLANO DEL MEDIO DÍA SOLAR

La latitud es la distancia angular del punto P (norte o sur) con respecto al ecuador en dirección meridional. Es el ángulo entre el vector OP y la proyección de OP e dirección meridional sobre el plano ecuatorial. El punto O nos representa el centro de la tierra.

Ángulo horario (h) ( $\omega$ ). Es el ángulo medido sobre el plano ecuatorial de la tierra entre la proyección de OP y la proyección de la línea que une el centro de la tierra con el centro del sol. ( $0^\circ$  h  $180^\circ$ ). En el medio día solar, el ángulo horario es  $0^\circ$ . El ángulo horario expresa el tiempo del día con respecto al medio día solar. Una hora de tiempo está expresado en  $15^\circ$  de ángulo horario.

Declinación solar ( $\delta$ ). Es la distancia angular de los rayos del sol con respecto al ecuador. Ángulo entre una línea trazada desde el centro del sol hasta el centro de la tierra y la proyección de esta línea en dirección meridional sobre el plano ecuatorial de la tierra.

Cuando el rayo incide hacia el norte del plano ecuatorial  $\delta$  es positiva y cuando es hacia el sur  $\delta$  es negativa (por convención).

La siguiente figura 7.1.4 ilustra esquemáticamente una esfera celeste, donde la tierra se ha tomado como "el centro del universo".

En la época del solsticio de invierno los rayos solares están a  $23.45^\circ$  al sur del ecuador ( $\delta = -25.43^\circ$ ). En la época del solsticio de verano los rayos del sol están a  $23.45^\circ$  al norte del ecuador terrestre ( $\delta = 23.45^\circ$ ). En los equinoccios, la declinación será cero. A causa de que el período de una revolución completa de la tierra al rededor del sol no coincide exactamente con el año calendario, la declinación del mismo varía ligeramente de un año a otro.

Para una superficie de orientación particular se puede definir el ángulo de incidencia ( $\theta$ ) y el ángulo de azimuth sol-pared ( $\alpha$ ) que pueden ser expresados y evaluados en función del ángulo del cenit, el de altitud y el de azimuth.

**Ángulo del cenit ( $\psi$ )** .- ángulo formado en un plano vertical entre el rayo incidente y la vertical del plano horizontal.

**Ángulo de altitud solar ( $\beta$ )** .- ángulo formado en un plano vertical entre el rayo incidente y la proyección de éste sobre la superficie horizontal.

**Ángulo del azimuth ( $\gamma$ )** .- Está formado en la superficie horizontal entre el vector N-S y la proyección horizontal de los rayos solares.

$$\beta + \psi = 90^\circ$$

(ver figura 7.1.5)

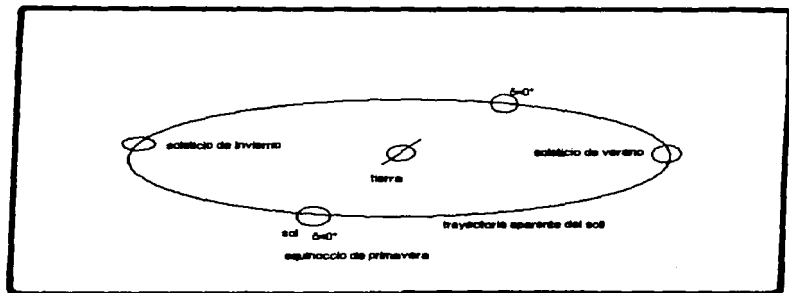


FIGURA 7.1.4 TRAYECTORIA APARENTE DEL SOL

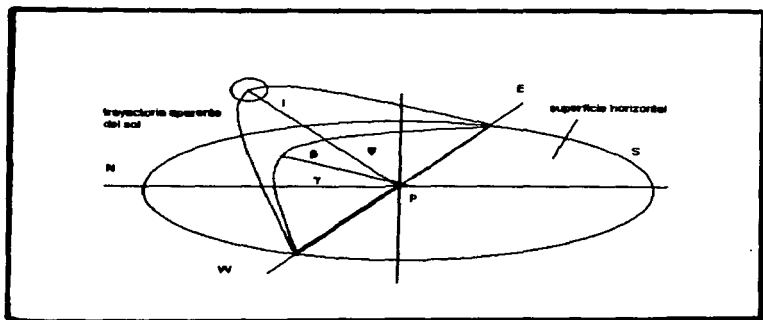


FIGURA 7.1.5 ÁNGULOS SOLARES DERIVADOS



## **CAPÍTULO 8**

# **ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN**

## 8.1 MATERIAL Y EQUIPO

Para la implementación de un sistema de alimentación fotovoltaico para una computadora personal es necesario contar con los elementos que permiten el desarrollo seguro y eficaz del mismo.

### Material:

#### -Panel fotovoltaico

Potencia típica :35 w

Corriente a la carga : 2.33 amp.

Voltaje a la carga : 15 v

Corriente corto circuito : 2.5 amp.

Voltaje de circuito abierto : 18.8 v

#### -Soporte mecánico

Tripie

#### -Batería

Voltaje nominal : 12 v

Capacidad nominal : 2.3 Ah

#### -2 Diodos

Rectificador 1 amp. , .400 v

#### -Resistencia

7 ohms

25 watts

-Fusible

2 amperes

-Carga

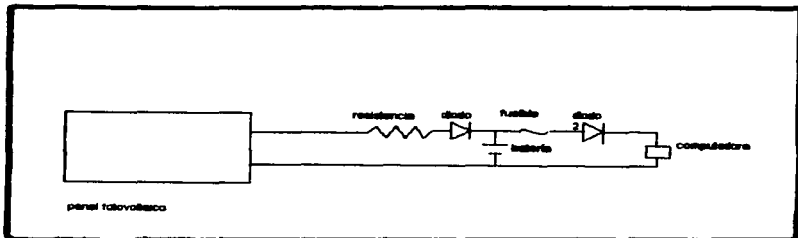
Computadora personal portátil

Consumo máximo 17.5 volts

1.5 Amp

19 w

## 8.2 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO



**FIGURA 8.2.1 DIAGRAMA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN FOTOVOLTAICA PARA UNA COMPUTADORA PERSONAL.**

El módulo solar es capaz de suministrar la energía necesaria para recargar la batería a largo plazo con lo cual se garantiza que la misma no se deteriore al suministrarle más corriente de la nominal para la recarga.

La batería es recargada por el panel fotovoltaico a sus características nominales, para poder llegar a estos es necesario ajustar el voltaje, por medio de un divisor de tensión lo cual nos dá una reducción tanto en el voltaje como en la corriente, llegando a los límites establecidos por el fabricante de la batería.

La resistencia reduce tanto el voltaje como la corriente tomando en cuenta el voltaje del módulo y las características de la batería.

**El diodo permite recargar con seguridad la batería sin el riesgo de que al disminuir el voltaje generado por el módulo, la batería "alimente" al módulo.**

**Con la batería recargada se suministra la corriente necesaria que utiliza la computadora junto con el voltaje.**

**La batería actúa como regulador de voltaje al ser alimentada por el panel, en el cual el valor de voltaje y corriente varía directamente con la luz recibida en el panel.**

**El fusible nos garantiza que la corriente no exceda el valor necesario.**

**El diodo 2 evita que una corriente de la carga regrese a la batería.**

**El objetivo final de este arreglo es que la carga tenga sus condiciones nominales de voltaje y corriente sin presentar las variaciones de generación del módulo.**

**Cuando se descarga de la batería el panel fotovoltaico se encarga de recargar la misma. Esto es muy útil sobre todo cuando se necesita utilizar el equipo en la noche y en condiciones no óptimas de generación de energía fotovoltaica.**

**El costo de la implementación del equipo desarrollado en esta tesis resulta mucho menor que un equipo equivalente con otro tipo de energía.**

# CONCLUSIONES

**Las conclusiones se pueden dividir en:**

**Ventajas**

**-No requiere combustible, utiliza la luz del sol como fuente de energía. El sol es una fuente de energía confiable y generalmente de distribución homogénea en todos sitios.**

**-No contamina pues no produce emisiones al medio ambiente, ni siquiera ruido.**

**-Bajo o nulo mantenimiento ya que no tiene partes en movimiento sujetas a desgaste o calentamiento. Todos los componentes del sistema (baterías, controles, inversores) pueden diseñarse o seleccionarse para ser compatibles con este criterio.**

**-Vida útil mayor a 20 años ya que los elementos y materiales de que están fabricados los módulos solares prácticamente no sufren procesos internos de desgaste: una celda solar es esencialmente una rebanada de roca.**

**-La vida útil larga permite amortizar la inversión a largo plazo.**

**-Los sistemas fotovoltaicos pueden crecer de acuerdo a las necesidades del usuario, simplemente añadiendo más módulos solares, sin necesidad de desechar los anteriores. El sistema es modular en incrementos de potencia pequeños (usualmente de 50 watts).**

**El sistema es relativamente fácil de transportar, ya que se ensambla en el sitio.**

**La instalación es rápida debido al concepto de diseño modular.**

**El sistema fotovoltaico puede combinarse con otras formas de generación eléctrica, donde el análisis tecno-económico de la aplicación específica lo justifique. Ejemplo de ello son los sistemas híbridos con plantas diesel o generadores eólicos.**

**Desventajas:**

**El principal inconveniente de los sistemas fotovoltaicos es el costo inicial relativamente alto que conduce a costos de generación de electricidad a lo largo de la vida útil del sistema de \$0.30 a \$0.50 por kilowatt-hora.**

**Estos costos dependen en gran parte del costo del módulo solar, así que en la medida que baje los precios de los módulos, bajará también el costo de la energía.**

**Evaluación**

**Los sistemas fotovoltaicos son rentables en múltiples aplicaciones (a pesar de su relativamente alto costo inicial), donde extender la red eléctrica sea más costoso y donde además llevar combustibles convencionales es difícil o impráctico.**

Validación de los contenidos de los libros de texto de Física y Matemáticas para el nivel de secundaria



## **Evaluación del implemento**

La energía solar nos brinda una alternativa portátil de alimentación de equipo eléctrico.

El desarrollo de este proyecto surge de la necesidad de tener las ventajas que ofrece una computadora aún en los lugares más inhóspitos, sin la posibilidad de tener alimentación convencional en un tiempo prolongado.

La principal utilización de este equipo se encuentra en el ámbito militar siendo de suma importancia en el desarrollo de las actividades propias del ejército.

En este proyecto no se utiliza el seguimiento solar automático porque no es indispensable ya que sin tener los ángulos exactos de orientación óptima, el sistema funciona correctamente. Sin embargo queda abierta la posibilidad de adoptar dicho sistema a fin de lograr una mejor eficiencia en la captación de energía.

El objetivo de esta tesis se cumple al demostrar con la implementación de este sistema de alimentación, que es muy fácil el manejo de la energía fotovoltaica así como la versatilidad para su utilización.

## **BIBLIOGRAFIA**

### **1.- ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS**

**Antonio Alonso Concheiro**

**Luis Rodriguez Viqueira**

**1995**

### **2.-CÉLULAS SOLARES Y FOTOCÉLULAS**

**Turner Rufus P.**

**1892**

### **3.-ENERGÍA RENOVABLE**

**Carless Jennifer**

**1995**

### **4.-LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS**

**División de energías alternas**

**CONDUMEX**

### **5.-APUNTES DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR**

**Ing. Sánchez G. José Antonio**

### **6.-GUÍA DE REFERENCIA**

**COMPAQ**

**1996**

**7.-ENERGÍA SOLAR**

**Ewers L. William**

**1993**

**8.-POWER PLANT TECHNOLOGY**

**EI Wakil**

**1984**

**9.-MODERN POWER STATION PRACTICE**

**Electrical generator and electrical plant**

**1971**

**10.-POWER SYSTEM OPERATION**

**Robert H. Miller**

**1983**