



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE SISTEMA DE
SEGUIMIENTO SOLAR PARA APLICACIONES
FOTOTERMICAS Y FOTOVOLTAICAS"**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
MIGUEL ANGEL NAVARRO DE LA SANCHA**

**ASESORES: ING. JOSE ANTONIO SANCHEZ GUTIERREZ
ING. FILIBERTO LEYVA PIRA**

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLÁN
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:

"Diseño y construcción de sistema de seguimiento solar para aplicaciones foto-térmicas y fotovoltaicas".

que presenta el pasante: Miguel Angel Navarro De la Sancha
con número de cuentas: 8610985-3 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 T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 10 de diciembre de 1996

PRESIDENTE	<u>Ing. Filiberto Leyva Piña</u>	
VOCAL	<u>Ing. Benjamín Contreras Santacruz</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Jorge Buensía Gómez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Juan González Vega</u>	

Dedico esta Tesis:

A TI SEÑOR, por brindarme la alegría de la vida, y con ella la capacidad de amar y luchar, sin tu voluntad nada fuera posible.

A MIS PADRES, Efría y Leopoldo: Les dedico este trabajo como una pequeña muestra de gratitud, primero, por darme la vida en la que me han llenado con su amor. Les agradezco la educación y los principios que me han inculcado, así como la confianza y el apoyo que me han brindado siempre.

A MIS HERMANOS: Polo, Ernesto y Nayeli, con los que he crecido y vivido felizmente a los que quiero y admiro infinitamente

A JOSEFINA: Por caminar a mi lado en todo momento; por tu apoyo, tu comprensión, tu cariño y por compartir tantas cosas...gracias.

A MIS TIJAS: Emma y Violeta, que con su cariño y valioso ejemplo, me han guiado por el buen camino: el de la superación.

A MIS AMIGOS, con los que he compartido gratos momentos inolvidables.

A MI PAIS: MEXICO, con quien tengo un compromiso.

Con agradecimiento para:

Mi asesor: Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez

Mi coasesor: Ing. Filiberto Leyva Pina.

Los integrantes del Jurado:

Ing. Jorge Buendía

Ing. Benjamín Contreras Santacruz,

Ing. Juan González Vega

La UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, a la FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN y a todos sus PROFESORES, con reconocimiento a su labor académica.

A todas las personas que de alguna u otra manera contribuyeron a la realización de este trabajo, mi agradecimiento.

ÍNDICE

	<i>pag.</i>
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	7
I. CONCEPTOS BÁSICOS	
1.1 La Radiación Solar	8
1.2 La Constante Solar	13
1.3 Unidades de Medición	15
1.4 Las horas pico	16
1.5 Radiación Directa, Difusa y Global	16
1.6 Mapas de insolación	17
1.7 Sistemas de Medición de la Radiación	18
II. TRAYECTORIAS SOLARES	
2.1 La trayectoria solar vs. la latitud del lugar	22
2.2 Ángulos solares básicos y derivados	31
III. CONVERSION FOTOVOLTAICA	
3.1 El efecto fotovoltaico	39
3.2 Concentración fotovoltaica	43
3.3 Captadores solares con seguimiento	43
IV. CONCENTRADORES TERMICOS	
4.1 La conversión térmica	47
4.2 Concentradores de enfoque	48
4.3 Orientación en aparatos de concentración térmica	52

V. EL SEGUIMIENTO SOLAR	
5.1 El reloj como control del seguimiento solar	56
5.2 Importancia de los sistemas de seguimiento del sol	59
5.3 Cinemática del seguimiento del sol	61
5.4 Arrastre y control del colector	64
VI. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MECANISMO DE SEGUIMIENTO	
6.1 Consideraciones en el diseño	70
VII. CONSTRUCCIÓN DEL COMPARADOR ÓPTICO.	
7.1 Fotosensor de la orientación de los rayos solares	78
7.2 Funcionamiento del circuito comparador	78
7.3 Utilización	82
7.4 Características y componentes	84
VIII. INSTALACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS.	
8.1 Instalación	87
8.2 Pruebas	89
8.3 Resultados	92
IX. CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFIA	95

INTRODUCCIÓN

Continuamente nos olvidamos de la increíble complejidad del mundo de la energía, con todas sus implicaciones políticas, económicas, sociales y medioambientales. ¿Dónde reside su grandeza? La física nos dice que la energía es la capacidad mayor o menor, de realizar un trabajo o producir un efecto. Sin embargo, en el planeta vivimos mucha gente, y el uso a gran escala de la energía conlleva problemas.

Cuando quemamos en pocos minutos un kilo de carbón o de petróleo, estamos liberando elementos químicos y una energía que tardaron siglos en acumularse y millones de años en transformarse. La inyección masiva, concentrada y repentina de estos elementos químicos en la biosfera -como el azufre, los óxidos de nitrógeno o el bióxido de carbono- sobrepasa la capacidad de la naturaleza para volverlos a asimilar. Lo que provoca: lluvia ácida, efecto invernadero, contaminación urbana, etc.

En los años cincuenta, una nueva tecnología -la fisión atómica- prometía acabar con estos inconvenientes de los combustibles fósiles. Pero a cambio de otros, algunos incluso más graves. El uranio es un elemento natural y se encuentra en muchas regiones del globo, aunque en unas proporciones muy bajas. En una central nuclear se manejan unas 500 toneladas de uranio enriquecido, el

equivalente a 750 000 toneladas de tierras con alta concentración de este mineral. Además en el reactor se forman elementos inexistentes en la naturaleza, mucho más radiactivos que el uranio, como el plutonio, que tiene una vida de miles de años y que produce la muerte con sólo una milésima de miligramo que se ingiera. Durante el funcionamiento de toda central nuclear y de las instalaciones necesarias para preparar y procesar el combustible fisible siempre se escapa a la atmósfera y al agua una pequeña cantidad de sustancias radiactivas, a pesar de las grandes medidas de seguridad que se toman. Estos elementos se acumulan en los seres vivos, sin que éstos los puedan expulsar o asimilar. Y ello sólo representa uno de los problemas de la energía nuclear. Muchos accidentes se empeñan en demostrar la imposibilidad de garantizar al 100% la seguridad de los reactores. Aún sin contar el problema de los residuos radiactivos.

Todo este lastre negativo asociado al consumo masivo de combustibles fósiles y fisibles no ha sido reconocido hasta hace apenas poco tiempo. Por motivo a que nunca se ha utilizado tanta energía como ahora. Se dice que en los últimos cien años el mundo ha gastado la misma energía que en toda su historia anterior. Pero hoy los efectos están a la vista, y sólo hay dos salidas: O reducimos drásticamente el consumo, o nos pasamos a otra forma de obtener la energía. En los países industrializados casi nadie está dispuesto a renunciar a las comodidades de la vida moderna, por otro lado, la gente del Tercer Mundo también tiene la oportunidad de mejorar su situación. Aún así, ni el carbón ni el uranio son eternos. Por ello, es más sensato la segunda opción: sustituir el actual modelo energético por otro basado en fuentes renovables y no contaminantes.

En realidad, si exceptuamos la de origen geotérmico y nuclear, toda la energía de que disponemos en la Tierra procede de una u otra forma del Sol, incluso la contenida en los combustibles fósiles. El sol impulsa los vientos y éstos las olas. También evapora el agua que luego forma los ríos. En unión con la luna, provoca las mareas. Hace crecer las plantas y los árboles, que sirven como leña o como forraje para alimentar animales de tiro. Y su radiación ultravioleta, arranca electrones de ciertos materiales, como el silicio, para producir una corriente eléctrica. ¿Porqué no aprovechar mejor esta fuente primordial, limpia e inagotable?

La explotación de sus manifestaciones directas no causa problemas de combustión, puesto que no queman nada, sólo extraen el contenido energético de la materia. Las técnicas para su aprovechamiento son ya conocidas, de manera directa para la obtención de agua caliente y el acondicionamiento de edificios, o bien puede convertirse en energía eléctrica. Las centrales solares pueden ser de tipo térmico, que utilizan el calor del sol para producir el vapor necesario para mover una turbina o basarse en el efecto fotovoltaico, mediante la utilización masiva de células solares montadas en grandes paneles.

Evidentemente, una exigencia común a todos los sistemas de aprovechamiento de la energía solar, es la necesidad de captar la mayor cantidad posible de la energía incidente en un determinado lugar. Esta máxima captación se obtiene si la superficie colectora se mantiene constantemente en posición normal a los rayos del sol, lo que únicamente puede conseguirse si dicha superficie está dotada de un movimiento de seguimiento del sol.

En comparación con la energía captada por un colector estático, la captada por uno dotado de un sistema de seguimiento del sol puede aumentar hasta un valor del orden de un 35% o más.

Lo expuesto hasta aquí explica la importancia del desarrollo de sistemas de seguimiento del sol paralelamente al desarrollo del aprovechamiento de la energía solar . En este sentido, el presente trabajo muestra el planteamiento general, el diseño, así como la construcción de un sistema de seguimiento solar por medio de un comparador óptico con aplicación en las áreas fotovoltaica y fototérmica.

OBJETIVOS

- Construir un sistema de seguimiento solar, tal que en su base mecánica, se encuentren sintetizados todos los parámetros necesarios para lograr su funcionamiento mediante el arrastre con un sólo motor.
- Construir e implementar un comparador óptico con la suficiente sensibilidad para generar las señales oportunas para controlar un motor de c.d.
- Lograr mediante el sistema, seguir con la mayor precisión posible la trayectoria del sol; lo que se traduce en mayor eficiencia en procesos de conversión fotovoltaica y fototérmica.
- Fomentar el interés por las fuentes no convencionales de energía; en especial, la solar.

CAPITULO I

CONCEPTOS BÁSICOS DE ENERGÍA SOLAR

La cantidad de energía que emite el Sol es enorme: como referencia, basta decir que en un cuadro de 150 Km. por lado en una superficie terrestre, convirtiendo 10% en electricidad, sería suficiente para satisfacer el consumo eléctrico mundial de 1978.

1.1 La Radiación Solar

El sol es una estrella que tiene una masa 334 000 veces mayor que la de la Tierra. La luz solar es un conjunto de radiaciones electromagnéticas similares a las ondas de radio pero de mayor frecuencia.

La mayor parte están situadas en la banda de frecuencias a la que el ojo es sensible con una parte importante en el infrarrojo y una mínima parte en el ultravioleta, ambos no detectables por la vista humana. Entre las longitudes de onda de 0.2 a 3.0 micras.

D = Diámetro del Sol
 1.39×10^9 m.
 8.64×10^8 mi.

d = Diámetro de la Tierra
 127×10^3 m.
 7900 mi.

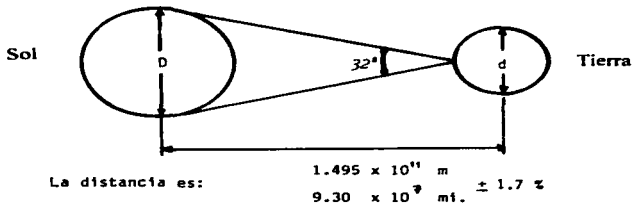


Fig. 1.1 Relaciones Tierra-Sol

La radiación solar es originada por las reacciones nucleares que ocurren en los materiales que forman un núcleo central, que quizás ocupe sólo un 3% del volumen del Sol. El material circundante, de un espesor de unos 500 000 Km., modifica la radiación liberada, que comenzó en forma de radiación gamma. Todas las radiaciones electromagnéticas tienen un carácter análogo, diferenciándose sólo en la longitud de onda.

La radiación gamma tiene la longitud de onda más pequeña que se conoce del orden de una cienmillonésima de milímetro.

Se comprende mejor actualmente, como se producen las acciones recíprocas entre la radiación y la materia, si suponemos que la radiación existe en forma de partículas discretas, llamadas Fotones, cada una lleva una cantidad fija de energía o Cuanto.

Transmitiéndose a una velocidad de 300 000 Km./s., su radiación alcanza la órbita de la Tierra recorriendo una distancia aproximada de 150 millones de Km., que es el radio medio, pero la energía producida por el sol es tan grande que la intensidad por unidad de superficie, es aproximadamente 1300 watts por metro cuadrado.

Aunque la Tierra intercepta solamente una fracción minúscula de energía solar, la que incide en la alta atmósfera durante un período dado es equivalente a decenas de miles de veces las necesidades energéticas actuales para todo el mundo durante ese período. Sin embargo, no toda esta energía llega a la superficie de la Tierra debido a una serie de complejas interacciones con la atmósfera.

En los niveles más altos, por encima de los 25 Km. de superficie, se desarrolla un proceso en el cual se elimina prácticamente la radiación ultravioleta.

Los fotones con longitud de onda dentro del espectro visible e infrarrojo, interaccionan con las moléculas gaseosas y partículas de polvo del aire sin poder producir la rotura del enlace. Por el contrario, lo que hacen es difundirse en todas direcciones, de manera más o menos uniforme, de modo que parte de la radiación regresa de nuevo al espacio.

Las gotas de agua que se encuentran en el aire, también hacen que se disperse la radiación, y, cuando su concentración es grande, como en las nubes densas, la dispersión múltiple puede hacer que hasta un 80% de los fotones incidentes vuelvan al espacio.

Como la cantidad media de nubes en la Tierra ocupa alrededor del 50% de superficie, éste es un factor importante en la disminución de la energía solar.

Otra barrera que se interpone a la incidencia de los rayos, es la absorción real que se produce en las moléculas de vapor de agua, bióxido de carbono y otros elementos.

Estas interacciones con la atmósfera reducen la intensidad de la radiación solar en la superficie de la Tierra a poco más de la mitad de su intensidad en la alta atmósfera. Además, producen variaciones en la distribución espectral de la energía, por absorción, y en la dirección en la que la energía llega a la superficie, por difusión. Estos efectos dependen de la composición local de la atmósfera, variando en forma muy significativa de un lugar a otro. La contaminación en las proximidades de los centros de población, el alto contenido de vapor de agua cerca de la costa, y la variabilidad de la cubierta nubosa, son factores que dificultan la predicción de las intensidades energéticas. El factor más importante es seguramente la longitud del camino que recorre la radiación solar a través de la atmósfera hasta llegar a un lugar determinado. Esto determina las pérdidas por difusión y absorción.

En general, la Tierra recibe permanentemente una radiación solar de 173 billones de Watts, el 30% de esta radiación se refleja en las capas altas de la atmósfera y regresa al espacio, 47% se convierte en calor y el 23 % interviene en la evaporación del agua, proceso que representa indirectamente el origen de la energía hidráulica. Una parte de la radiación se convierte en energía mecánica (olas, vientos, corrientes, etc.), energía que puede ser aprovechada por centrales eléctricas.

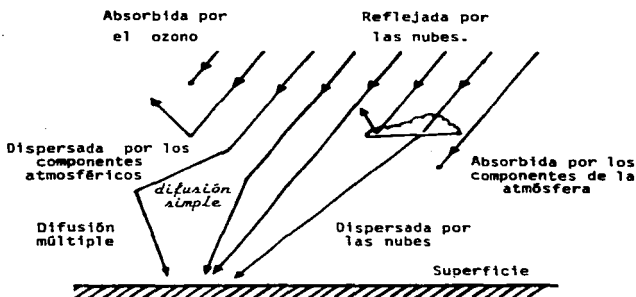


Fig. 1.2 Interacciones con la atmósfera

A pesar de su estructura tan compleja, es suficiente para aplicaciones en ingeniería considerar que el sol se comporta como un cuerpo negro a una

temperatura efectiva de $5\,762^{\circ}\text{K}$. 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.

1.2 La Constante Solar

La *constante solar* (I_{cs}) se define como la cantidad de energía por unidad de tiempo que recibe del sol una superficie de área unitaria perpendicular a la radiación, en el espacio, y a la distancia media del sol a la Tierra.

Se han realizado diversas mediciones directas e indirectas de la constante solar. El valor normal propuesto por Thekaekara y Brummond, es de $1\,353\text{ W/m}^2$ o equivalentes.

El espectro de emisión de los radiadores de cuerpo negro se determina por su temperatura. El espectro de la radiación solar fuera de la atmósfera corresponde entonces casi a la emisión de un cuerpo negro a 6000°K . Es un espectro continuo desde aprox. 200nm (nanómetro = 10^{-9} m .) ultravioleta, a 300 nm infrarrojo, con un máximo aproximadamente a 500 nm .

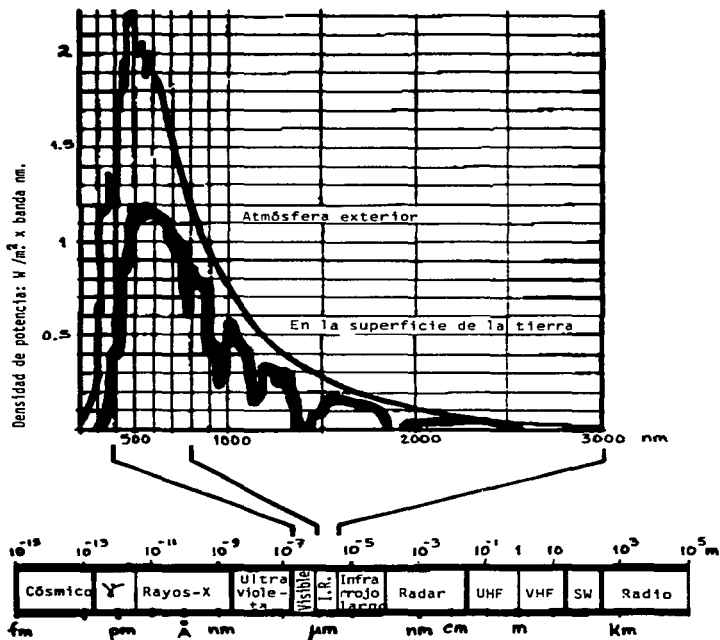


Fig. 1.3 Espectro de radiación solar en relación con el espectro electromagnético total.

La absorción atmosférica es en cierta medida selectiva, cambiando no sólo la cantidad, sino también la composición espectral de la radiación recibida. La fig. 1.3 muestra los dos espectros en relación con la totalidad del espectro de radiación electromagnética.

La radiación electromagnética muestra características dobles que son explicables en términos de teorías corpusculares y ondulares. El contenido en energía de la radiación se determina por su longitud de onda.

Las longitudes de onda más cortas representan un mayor grado de energía. La totalidad de la radiación solar puede convertirse en calor, pero únicamente los componentes de onda corta y gran energía podrán producir un efecto fotoeléctrico.

1.3 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 $[KW/m^2]$
- El valor acumulado se mide en $[KW-h/m^2]$.

Generalmente se reporta el valor acumulado durante un día dado, como:
 $[KW-h/m^2-día]$

Otra forma de expresar el valor acumulado es en $[cal/cm^2-día]$, que se denominan Langley's:

$$1 \text{ Langley} = 1 \text{ cal / cm}^2\text{-día} = 0.0116 \text{ KW-h/m}^2$$

En un día despejado con el sol en incidencia perpendicular (mediodía) la potencia solar es 1 KW/m^2 aproximadamente.

1.4 Las Horas-Pico

En un día despejado de Verano, la energía acumulada durante todo el día es hasta 7.5 KW-h/m^2 . Observar que la energía acumulada durante todo un día equivale a tener 7.5 horas, el Sol al máximo. Estas horas se denominan Horas-Pico.

Las Horas-Pico corresponden al período 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^2 , es decir, equivale a 1.6 Horas-Pico, aún cuando en realidad el Sol nunca haya estado en el máximo.

1.5 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 la radiación difusa. Como referencia, se presentan dos datos:

Radiación día despejado: 1 KW/m² máximo.

Radiación día nublado: 0.10 KW/ m² típica.

Lo anterior resulta en que mientras en un día despejado se obtienen hasta 7.5 horas-pico, en un día nublado total es difícil tener más de 1.8 horas-pico.

1.6 Mapas de Insolación

- La insolación en los mapas se expresa usualmente como el valor promedio diario para el período considerado.
- Se presenta el mapa de insolación promedio anual en México. El mapa (fig. 1.4) muestra la insolación global (difusa + directa) para el plano horizontal.
- Los valores de insolación expresados en cal-cm²/día pueden convertirse a horas-pico multiplicando por el factor 0.0116 .

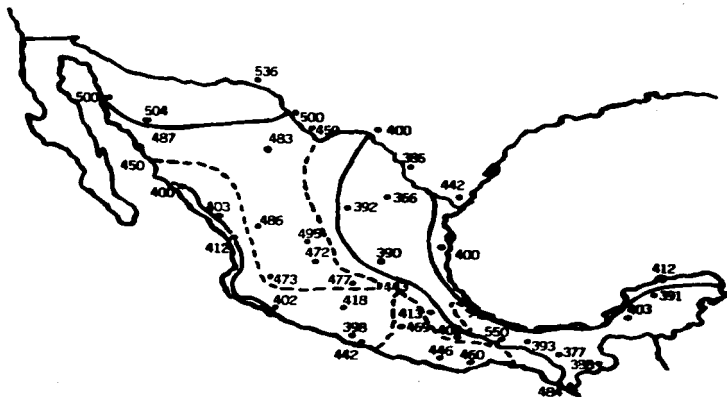


Fig. 1.4 Mapa de Radiación solar global promedio anual [Cal/cm² día].

1.7 Sistemas de medición de la radiación

Existen diversos instrumentos para medir la radiación solar. Todos ellos convierten a otra forma de energía, dando como resultado una media o lectura proporcional a la intensidad de la radiación.

El piranómetro, utilizado para medir la radiación global, es un instrumento que determina la radiación solar total sobre un plano horizontal. La radiación global, es la suma de la radiación solar directa con la radiación solar difusa, siendo la primera, la energía que llega a la superficie de la Tierra en forma

directa, de toda la que es recibida en los límites de la atmósfera, pues una gran parte se refleja al espacio exterior, y la difusa es dispersada hacia abajo, principalmente por las nubes, y en todas direcciones por el polvo, vapor de agua y bióxido de carbono.

El piranógrafo, instrumento utilizado para la medición de radiación global, consta de una tira bimetalica, una tira blanca y una negra. La tira oscura sufre una expansión al exponerse a la radiación, y como resultado de los cambios de temperatura y su expansión y contracción es transferida mecánicamente a una plumilla, la cual registra el valor de la radiación sobre un tambor mecánico giratorio. La tira blanca está por lo general aislada de la radiación solar. El tiempo de respuesta de estos instrumentos por lo general es de 10 a 15 minutos y es apropiado para registros de medición global total diaria.

Para medir la radiación solar difusa se emplea un piranómetro como el empleado para la radiación global pero con la diferencia de que este instrumento va montado sobre un dispositivo para discriminar la radiación directa. Este dispositivo consta en general de una base donde va fijo el piranómetro, y de un aro metálico, cuyo propósito es eliminar la componente de radiación directa.

Las dimensiones del aro metálico, radio y ancho, dependen de las mediciones de la sombra que va a proyectar sobre el sensor.

El instrumento que mide la radiación atmosférica, es el **radiómetro**. De aspecto muy parecido al piranómetro, difiere en que tiene un domo plateado, que

se emplea para discriminar el paso de la luz visible y dejar pasar sólo la radiación atmosférica.

Los instrumentos de radiación global, atmosférica y difusa deben estar nivelados para asegurar que estén registrando la radiación en el plano horizontal. Para el registro de la radiación difusa se debe colocar la guía del dispositivo en la latitud del lugar de observación, posteriormente la punta de esta guía debe estar orientada en dirección norte-sur astronómico para obtener la sombra sobre el sensor durante cada día.

Para el registro de insolación se emplea en general un *heliógrafo* del tipo Campbell-Stokes. Este instrumento consiste de una esfera de vidrio sólido y pulido de 10 cm. de diámetro aproximadamente, su eje debe orientarse en la dirección norte-sur astronómico.

Esta esfera actúa como una lente y la imagen enfocada se mueve a lo largo de una tira especial, graduada en horas y medias horas. Esta graduación está referida al tiempo solar verdadero y registra las horas de insolación durante el día. Este instrumento como los demás debe estar nivelado y colocado en la latitud del lugar de observación.

Para la observación y registro de la radiación solar directa se emplea el instrumento conocido como *pirheliómetro*, el cual consta de una base sólida unida a un cilindro hueco en cuyo interior se encuentra el sensor. La base tiene un movimiento azimutal y un movimiento angular sobre el plano horizontal.

El cilindro hueco consta en general de un revólver que comúnmente tiene de tres a cuatro filtros, además de una mirilla que sirve para apuntar el instrumento al sol, y un termómetro para conocer la temperatura del instrumento, ya que la medida de la observación de radiación debe compensarse por temperatura.

El sensor del pirheliómetro es una termopila en forma de oblea y sus terminales se hayan en la parte posterior del cilindro.

CAPITULO II

TRAYECTORIAS SOLARES

2.1 La trayectoria solar vs. la latitud del lugar

La fig. 2.1a muestra que en el equinoccio, el sol sale exactamente en el este y se levanta hacia el oeste en todas las latitudes del globo. El sol describe un arco de círculo, es decir, una figura bidimensional, el centro del cual está en el punto de observación.

El hecho de que la órbita solar se debe inclinar para todas las latitudes excepto en el Ecuador se demuestra tomando el ejemplo de la posición a mediodía en la latitud 23.5°N , en la fig. 2.1a (punto B'). Allí la radiación forma un ángulo de 23.5° con la dirección perpendicular al observador, la dirección del cenit, dada por la línea AB'. Esto se reproduce para el movimiento aparente del sol en la fig. 2.1b.

La fig. 2.1c muestra el camino del sol en el solsticio de verano en el hemisferio norte, aquí se muestra que en el Trópico de Cáncer (23.5°N) a mediodía, el sol

pasa por el cénit. Se puede ver también que, en el solsticio de verano, el sol no sale por el este en ninguna latitud. Por ejemplo, en el Ecuador sale a 23.5°N hacia el nordeste (fig. 2.1*d*). En las demás latitudes sale aún más hacia el norte.

En todas las latitudes, la figura producida durante un día por la rotación solar que veía un observador es un sector de cono.

Las mismas observaciones son ciertas para la rotación solar tal como aparece en invierno (fig. 2.1*e*). En todas las latitudes el sol sale más o menos hacia el sureste. Para el hemisferio sur, los fenómenos son los mismos, pero opuestos; se deben intercambiar en la figura anterior "invierno" y "verano", y "norte" y "sur".

La figura 2.2 ilustra la variación estacional en una latitud dada. Cada día el sol describe un arco de círculo que no está centrado en el observador, excepto en los equinoccios. Todos los círculos son paralelos unos a otros.

Sus centros están sobre una línea en el plano del cénit norte-sur que cruza la localidad del observador y se orienta hacia la estrella polar. Se ilustra el cambio entre verano e invierno en la fig. 2.3 .

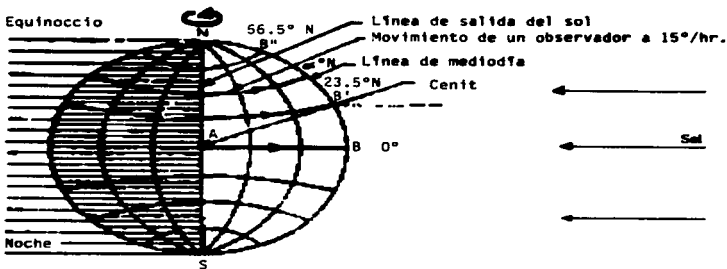


Fig. 2.1a Movimiento del globo en el equinoccio.
El cénit se indica para el punto B' (23.5° N) al mediodía.

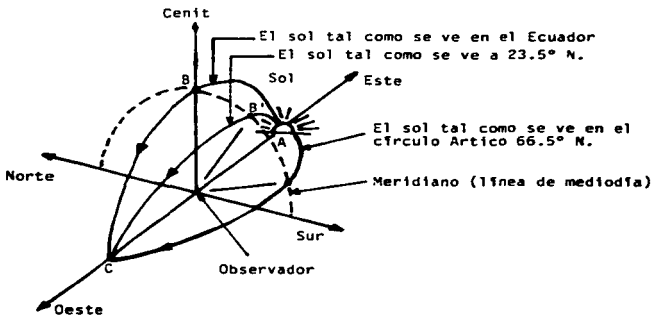


Fig. 2.1b Movimiento aparente del sol
en el equinoccio a varias latitudes.

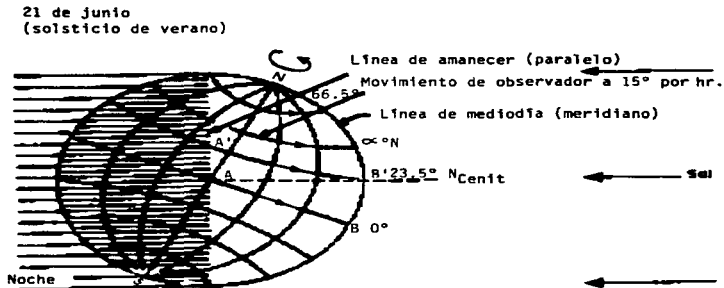


Fig. 2.1c Movimiento del globo en el solsticio de verano.

Fig. 2.1 Rotación actual diaria del globo y aparente rotación del sol en el equinoccio, en el solsticio de verano y en el solsticio de invierno para el ecuador y 3 latitudes en el hemisferio norte.

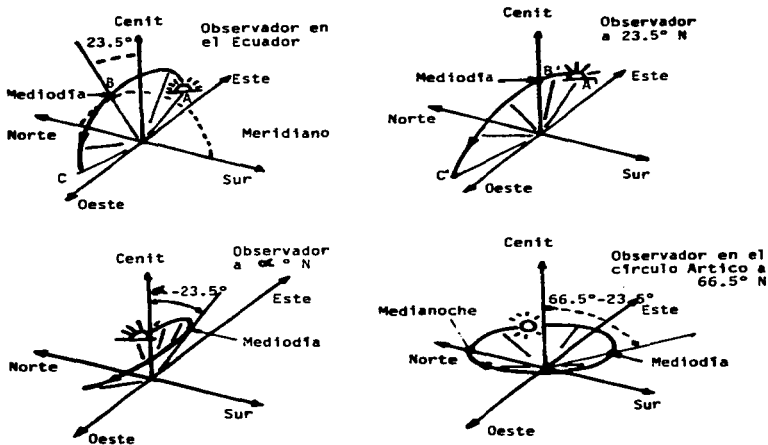


Fig. 2.1d Movimiento aparente del sol a varias latitudes (21 de junio)

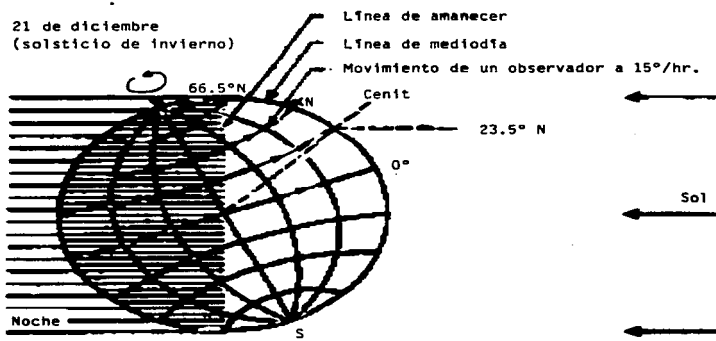


Fig. 2.1e Movimiento del sol en el solsticio de invierno.

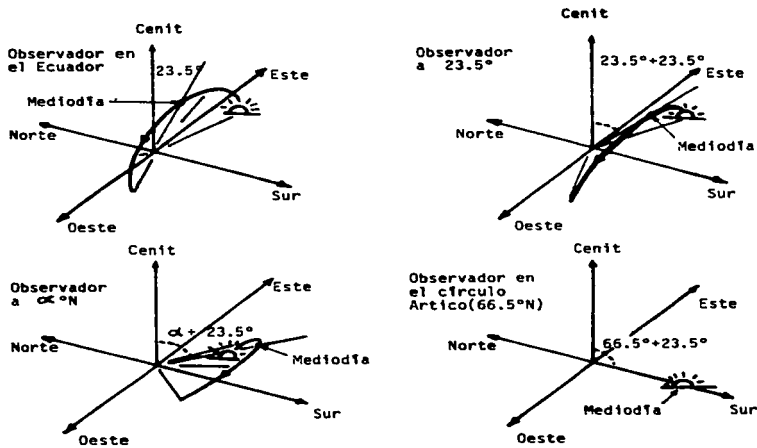


Fig. 2.1f Movimiento aparente del sol a varias latitudes (diciembre 21).

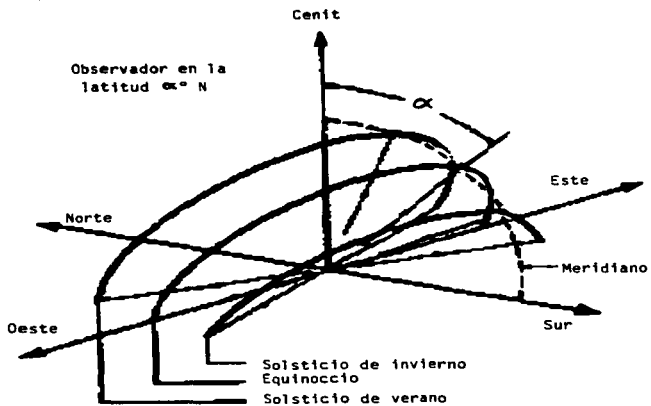


Fig. 2.2 Movimiento aparente diario del sol en la latitud α° norte en el solsticio de verano, en el solsticio de invierno y en el equinoccio.

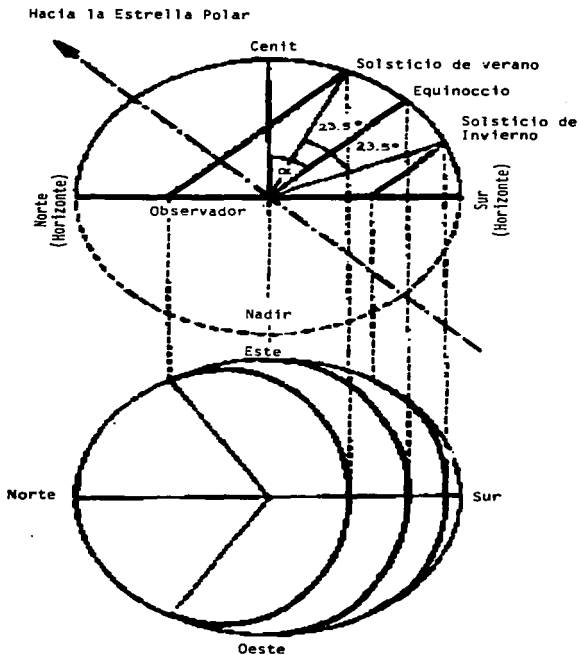


Fig. 2.3 Vista lateral y desde arriba de la curva diurna del sol para un observador en la latitud α° norte.

2.2 Ángulos solares básicos y derivados

Las características más importantes en el movimiento de la Tierra, son su traslación alrededor del sol durante un año y su rotación durante un día.

Aunque la órbita de la Tierra es una elipse, su excentricidad es muy pequeña. El radio medio tiene alrededor de 150 millones de Kilómetros. En Astronomía, las variaciones máximas con respecto a este valor a lo largo del año, sólo representan el 1.5%

Esta variación no es apreciable y no influye significativamente en las estaciones. Estas se deben a la inclinación del eje de rotación, el cual no es perpendicular al plano de la órbita. La inclinación con respecto a este plano es de 66.5° aproximadamente, y al no haber fuerzas que actúen sobre él, el eje está orientado en una dirección fija en el espacio.

Esto produce variaciones sustanciales en el día con respecto a la noche a lo largo del año al moverse la Tierra alrededor de su órbita.

En un punto del hemisferio norte el día más largo se producirá en el solsticio de verano, que se produce el 22 de junio, cuando el extremo norte del eje se dirige hacia el sol, y el periodo de noche más largo en el solsticio de invierno, el 22 de diciembre, cuando el eje se aparta al máximo del sol.

Los dos puntos neutros que se producen entre estos dos periodos, cuando el eje de la Tierra es perpendicular a la línea que une a la Tierra con el sol, son los Equinoccios, que se producen el 21 de marzo y el 23 de septiembre. En estos días, tienen igual duración el día y la noche

La posición de un punto P sobre la superficie de la Tierra se conoce en cualquier instante con respecto a los rayos del sol si se conocen: la latitud α , el ángulo horario H del punto, y la declinación del sol δ . Estos ángulos fundamentales se ilustran en la fig. 2.4

El punto P representa a un punto en el hemisferio norte. La latitud α , es la distancia angular del punto P (norte o sur) al Ecuador. Es el ángulo entre la línea OP y el plano ecuatorial. El punto O representa el centro de la Tierra.

El ángulo horario H 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 del sol con el centro de la Tierra.

En el mediodía solar, el ángulo horario es cero. El ángulo horario expresa el tiempo del día con respecto al mediodía solar. Una hora de tiempo está representada por:

$$360 / 24 = 15^\circ \quad \text{de ángulo horario.}$$

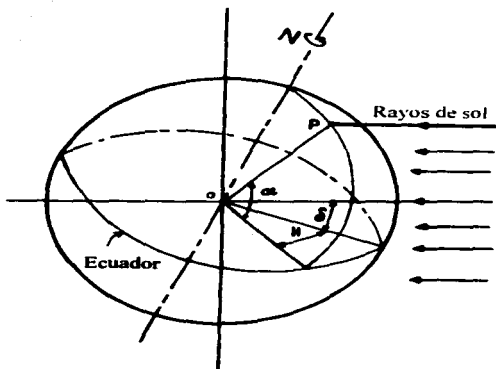


Fig. 2.4 Angulos solares básicos: Latitud α ,
 Ángulo horario H y Declinación del sol δ .

La declinación del sol δ es la distancia angular de los rayos del sol (norte o sur) al Ecuador. Es el ángulo entre una línea trazada desde el centro del sol al centro de la Tierra y la proyección de esta línea sobre el plano ecuatorial de la Tierra en dirección meridional.

En los equinoccios, la declinación es cero, de forma que el sol sale y se pone exactamente en la línea este-oeste. La declinación solar en otras épocas del año se obtiene mejor por medio de tablas, aunque para la mayoría de los casos es posible hacer un cálculo aproximado. Si la época del año la medimos en días N a partir del 1° de enero, la declinación es aproximadamente:

$$\delta = 23.45 \text{ sen } [360 (284 + N) / 365]$$

Además de los tres ángulos básicos: latitud, horario y declinación del sol, tienen utilidad otros ángulos en cálculos de radiación solar. Tales ángulos incluyen al cenit (ψ), altitud (β) y el azimut (γ) para una superficie de una orientación particular se pueden definir el ángulo de incidencia (θ) y el ángulo azimut sol-pared (τ). Todos estos ángulos adicionales pueden ser expresados en función de los tres ángulos básicos.

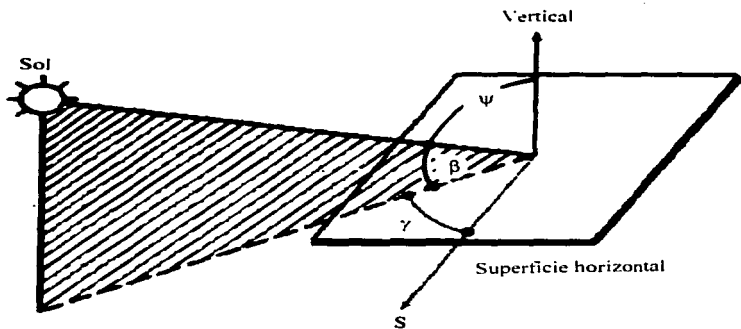


Fig. 2.5 Cenit solar y los ángulos de Altitud y Azimut

El ángulo cenit ψ es el ángulo entre los rayos solares y una línea perpendicular al plano horizontal en P .

El ángulo de altitud β es el ángulo en un plano vertical entre los rayos solares y la proyección de los rayos solares sobre el plano horizontal. Se deduce que:

$$\beta + \psi = \pi / 2.$$

El ángulo de azimut γ es el ángulo en el plano horizontal medido entre el sur y la proyección horizontal de los rayos del sol. (Ver fig. 2.5). Así entonces:

$$\cos \psi = \cos \alpha \cos H \cos \delta + \sin \alpha \sin \delta$$

puesto que : $\beta = \pi/2$, podemos escribir:

$$\text{sen } \beta = \cos \alpha \cos H \cos \delta + \text{sen } \alpha \text{ sen } \delta$$

El ángulo de azimut lo podemos obtener de acuerdo con:

$$\cos \gamma = \sec \beta (\cos \alpha \text{ sen } \delta - \cos \delta \text{ sen } \alpha \cos H)$$

o bien: $\text{sen } \gamma = \sec \beta \cos \delta \text{ sen } H$

El mediodía solar, $H=0$ y $\gamma = \pi$ si $\alpha > \delta$
y $\gamma=0$ si $\alpha < \delta$

En el caso de $\alpha = \delta$ es indefinida para $H=0$.

Deducimos que :

$$\beta_{\text{mediodia}} = \pi/2 - |(\alpha - \delta)|$$

donde $|(\alpha - \delta)|$ es el valor absoluto de $(\alpha - \delta)$. Esta ecuación permite determinar rápidamente la máxima altitud diaria del sol en un lugar dado.

También se dispone de tablas de valores calculados de la altitud del sol y el azimut, y de cartas que dan soluciones menos exactas.

El azimut sol-pared τ es el ángulo medido en un plano horizontal entre la normal a la superficie vertical y la proyección horizontal de los rayos del sol, o sea, τ está asociado con una posición definida de la pared vertical y puede ser determinado a partir del azimut del sol.

Para una superficie inclinada un ángulo q con respecto a un plano horizontal, con un ángulo azimut sol-pared τ . En estas condiciones, (Fig. 2.6) el ángulo de incidencia θ de la radiación directa queda definido como el ángulo entre la normal a la superficie y el haz de radiación. La relación entre θ y los otros ángulos está dada por la expresión:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \alpha \cos q - \sin \delta \cos \alpha \sin q \cos \tau \\ &+ \cos \delta \cos \alpha \cos q \cos H \\ &+ \cos \delta \sin \alpha \sin q \cos \tau \cos H \\ &+ \cos \delta \sin q \sin \tau \sin H \end{aligned}$$

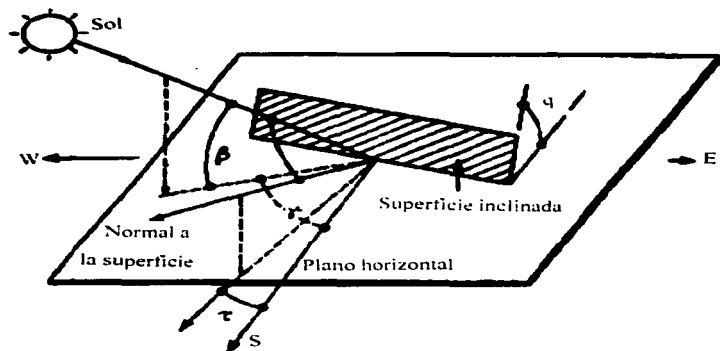


Fig. 2.6 Relación de los ángulos solares con respecto a una superficie inclinada

Así, para una superficie vertical orientada hacia el sur : $q = 90^\circ$ y $\tau = 0^\circ$

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \alpha + \cos \delta \sin \alpha \cos H$$

si la superficie es horizontal: En este caso $q = 0^\circ$

$$\cos \theta = \sin \beta = \cos \psi$$

O sea, que para una superficie horizontal, el ángulo de incidencia es igual al ángulo del cenit.

CAPITULO III

CONVERSION FOTOVOLTAICA

3.1 El efecto fotovoltaico

La conversión directa de luz solar en energía eléctrica se consigue por medio del efecto fotovoltaico, empleando células solares.

Una célula solar consiste en una oblea de material semiconductor en la cual los fotones de la luz solar producen pares electrón-hueco. En algún plano de dicha oblea (células de unión p-n) o en su superficie (caso de células de barrera Schottky o heterounión) un elevado campo eléctrico se encarga de separar los pares electrón-hueco en direcciones divergentes dando así lugar a una corriente fotovoltaica.

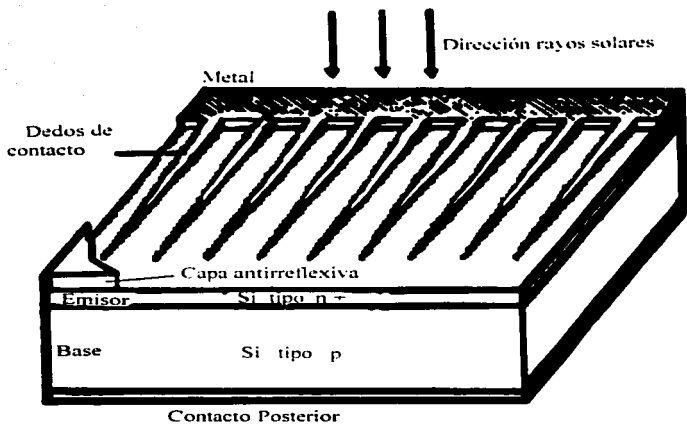


Fig. 3.1 Esquema de una célula solar.

Por último hay que diseñar la célula de modo que una fracción importante de los pares electrón-hueco creados alcancen efectivamente el campo separados, es decir, que hay que disminuir las recombinaciones en las diversas interfaces o superficies próximas en donde son generados los pares electrón-hueco para la obtención de una mayor corriente de cortocircuito.

Podrán obtenerse elevadas tensiones de circuito abierto si se alcanzan altos potenciales de barrera como integral del campo separador. El empleo de materiales con elevada energía de enlace como el arseniuro de galio puede dar lugar a elevados valores de la tensión indicada. Con silicio, los mejores resultados se obtienen dopando la base de la célula más fuertemente de lo que se hacía hace algunos años.

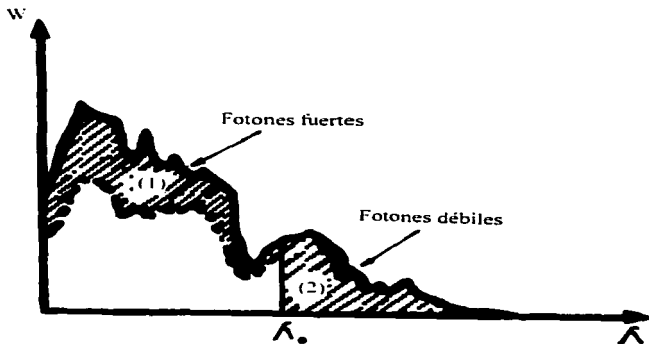


Fig. 3.2 Fotones aprovechados por una célula solar.

Varios tipos de células se encuentran en proceso de investigación. Entre ellas podemos mencionar las células de silicio y de arseniuro de galio como elementos de aplicación inmediata y relativamente confiable. Las células de sulfuro de cobre-sulfuro de cadmio pese a las expectativas de bajo costo, no son lo suficientemente conocidas para asegurar una producción rentable y una confiabilidad suficiente, y es posible que ésta última no llegue a obtenerse, siendo necesario recurrir a encapsulantes costosos que aislen las células del ambiente.

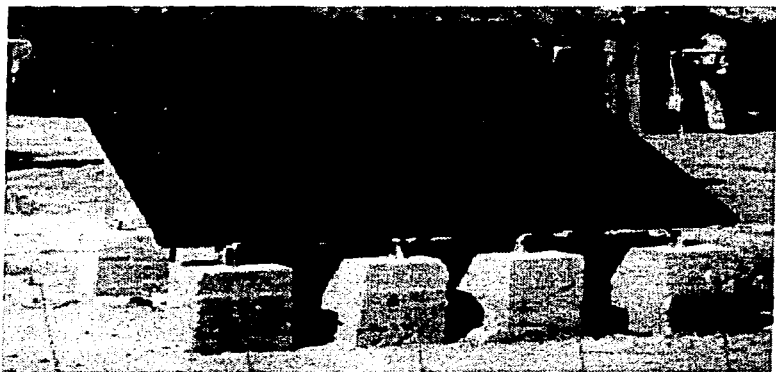


Fig. 3.3 Módulo fotovoltaico orientado hacia el sur.

3.2 Concentración Fotovoltaica

Un procedimiento de abaratar el costo de las instalaciones fotovoltaicas, consiste en reducir el número de células solares necesarias mediante el empleo de la concentración que hace incidir sobre ellas una mayor cantidad de energía.

Para que la solución que brinda la concentración sea interesante, es preciso que el costo del concentrador sea inferior al de las células solares. Es preciso considerar que, en general, los sistemas de concentración que están constituidos por un sistema reflector o refractor, o una combinación de ellos deben mantener constantemente enfocados los rayos solares en las células solares.

Un problema relativo a los sistemas de concentración es el hecho de que una célula solar de dimensiones medianamente grandes no puede admitir excesiva concentración, pues, enseguida aparecen pérdidas excesivas en la resistencia serie de las células. Una concentración entre 30 y 75 se considera apropiada para células de 5 cm. de diámetro.

3.3 Captadores fotovoltaicos con seguimiento.

Los captadores con seguimiento 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 en cada estación del año para obtener una mejor contribución anual. La ventaja es su sencillez y bajo costo.

- **Ángulo Polar Variable a lo largo del día:** El captador sigue al Sol diariamente girando sobre su eje Norte-Sur. La ventaja es su simplicidad (relativa) y su ganancia que puede ser de hasta un 45% más de energía captada, que un arreglo fijo. La desventaja es su costo y que no dan ganancia apreciable en lugares con nublados frecuentes.

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 Azimut variable. Los captadores se mueven en dos ejes, de tal manera que están perpendiculares al Sol en cualquier momento del día y en cualquier época del año, en forma similar a como lo hace una flor de girasol.

Los cálculos muestran que en un clima como el de México, la radiación directa recogida sobre un panel con seguimiento solar es el = 35% de la radiación total (directa + difusa) que se recogería sobre un panel plano, con células solares convencionales, inclinado hacia el sur un ángulo igual a la latitud.

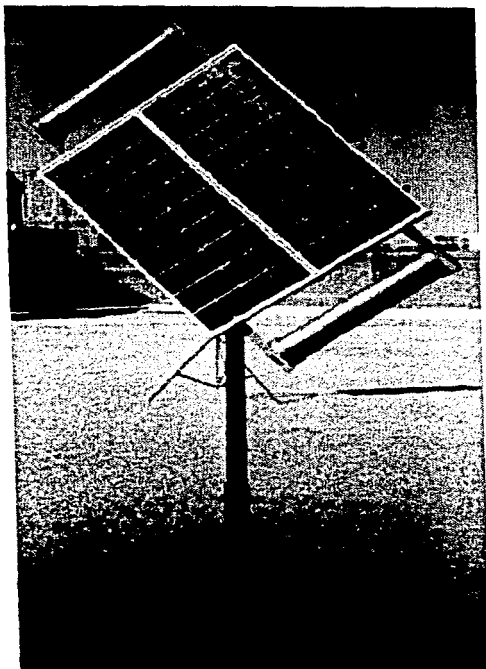


Fig. 3.4 Módulo Fotovoltaico con sistema de seguimiento solar polar tipo pasivo.

En este tipo de diseños tiene la mayor importancia el empleo de células solares, de espejos, etc. de alto rendimiento ya que mientras mayor sea este, más energía puede ser obtenida del sistema, lo que supone un costo inferior por kW-h.

Hay que concluir, que estos sistemas de concentración serán los más rentables en tanto no se consigan los objetivos previstos de abaratamiento de las células solares, o donde esos objetivos no puedan llegar a conseguirse. En un país sin gran potencia industrial puede ser difícil fabricar células solares baratas, aunque sea más fácil fabricar los elementos restantes de una central de concentración. Quiere esto decir, que este tipo de centrales reduciría la dependencia tecnológica y comercial de estos países en el uso de sistemas fotovoltaicos.

CAPITULO IV

CONCENTRADORES TERMICOS

4.1 La Conversión térmica

La energía solar que incide sobre la superficie de la Tierra es de baja intensidad, y damos por hecho que el calor obtenido a partir de colectores de placa plana está restringido a temperaturas relativamente bajas. En consecuencia, para lograr relativamente altas temperaturas en un sistema se hace necesario incrementar la densidad de la energía solar a través de concentradores. En la mayoría de ellos se recurre a una gran superficie reflejante o refractante en donde se capta la energía -sistema óptico-, y de ahí se dirige la radiación hacia el receptor o absorbedor. En esta última parte la densidad es ya del orden de 1.5 ó 2 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico.

Aún cuando las pérdidas de calor en un concentrador se reducen debido a la disminución del área del absorbedor con respecto a la del sistema óptico, otras pérdidas se hacen más importantes.

Existen una variedad muy grande de concentradores. Pueden clasificarse como de enfoque y fijos. Los concentradores fijos permiten incrementar moderadamente la intensidad de la radiación solar. Los de enfoque, deben orientarse para seguir al sol y dirigir de manera precisa la radiación directa hacia el receptor.

El acabado de las superficies debe ser de alta calidad y mantener sus cualidades por largos periodos sin ser deteriorados por el polvo, la lluvia, la oxidación, etc. Así como las demandas de calidad sobre las propiedades de los materiales son mayores: altas temperaturas en el absorbedor, en el fluido de trabajo, en los aislantes, etc.

En la figura 4.1 se muestran las dos familias básicas de colectores de enfoque existentes:

- El colector de receptor central, que comprende un espejo en paraboloides; la central de potencia de torre comprende espejos con muchas caras (heliostatos).
- El colector de enfoque lineal, en forma de artesa parabólica, o empleando tiras de espejos multicaras.

4.2 Concentradores de enfoque

La razón de concentración C se define como el cociente del área efectiva de apertura A_a -es decir, el área proyectada no sombreada del sistema óptico- al área del absorbedor de energía solar A_r . Para el caso de un colector plano es obvio que $C = A_a/A_r$ es igual a la unidad.

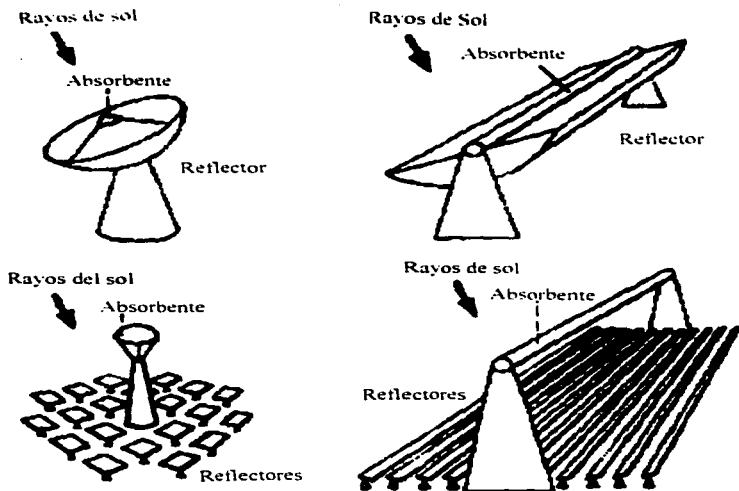


Fig. 4.1 Tecnologías con colector enfocado. Parte izquierda: colectores con receptor central (espejos en paraboloides y planos articulados). Parte derecha: colectores con enfoque lineal (artesa parabólica y espejos planos articulados).

Lentes Fresnel. Una alta razón de concentración puede lograrse por medio de los sistemas que emplean lentes Fresnel, los cuales combinan las ventajas de un conjunto de lentes en una sola unidad. Cada segmento de la lente Fresnel concentra mediante refracción la radiación incidente en un receptor posicionado

centralmente. Pueden colocarse en hileras requiriéndose sólo un seguimiento unidimensional del sol.

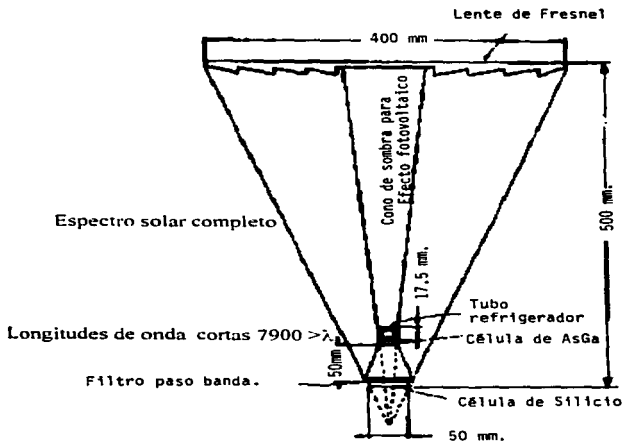


Fig. 4.2 Concentración por medio de lentes fresnel

Concentrador con reflector estacionario/absorbedor móvil. Este concentrador consiste en un segmento de espejo esférico colocado en posición estática dirigida hacia el sol. El absorbedor lineal sigue la imagen solar con un movimiento de giro alrededor del centro de curvatura del reflector.

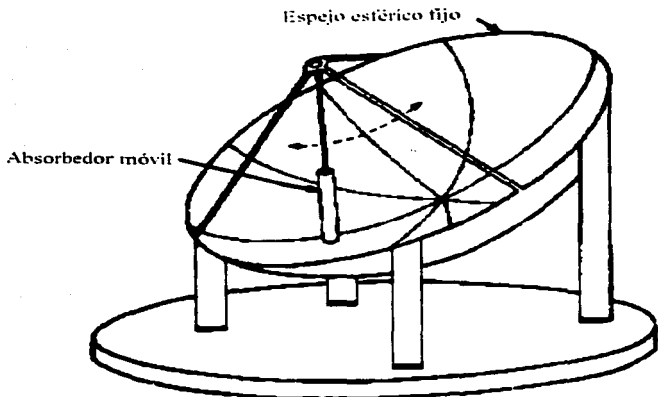


Fig. 4.3 Concentrador con reflector estacionario/absorbedor móvil.

Concentradores Parabólicos. Permite alcanzar razones de concentración muy altas. El disco solar visto desde la Tierra subtende un ángulo de $32'$ de arco, cuando se encuentra a la distancia media del sol. En los concentradores de enfoque es muy importante que el disco solar sea enfocado por el sistema óptico sobre el absorbedor. Haciendo referencia al concentrador de enfoque lineal, el ducto de sección elíptica localizado en el foco de la parábola permite la extracción del calor útil por medio de un fluido de trabajo. Este tipo de

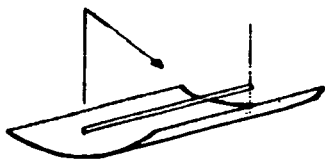
concentrador puede emplearse en aplicaciones que requieren altas temperaturas, pues pueden calentarse gases o líquidos hasta temperaturas del orden de 300° C.

4.3 Orientación en aparatos de concentración térmica

Teniendo en cuenta el movimiento aparente del sol, podemos considerar las condiciones de orientación para dos clases de aparatos de concentración, a saber, los de receptor lineal y central.

Se hace rotar 15° por hora sobre su eje una artesa parabólica, por ejemplo, cuyo eje longitudinal esté orientado en la dirección norte-sur. La imagen del disco solar entonces siempre estará dentro de la línea del absorbente. Esto ocurre a causa de que en una artesa, los rayos solares pueden formar un ángulo con el eje del absorbente, como lo muestra la fig.4.4, pero aún son recogidos.

La fig. 2.3 muestra que, para una artesa cuyo eje esté alineado horizontalmente en la dirección norte-sur, el ángulo de incidencia puede ser tan alto como $\alpha + 23.5^\circ$ al mediodía; con este ángulo y aparte de algunas pérdidas al final de la artesa, toda la luz está enfocada sobre la línea del absorbente.



Vista lateral y en perspectiva de los movimientos de un absorbente heliostático: diariamente (rotación alrededor del eje) y estacional (inclinación del absorbente). α es el ángulo para la latitud.

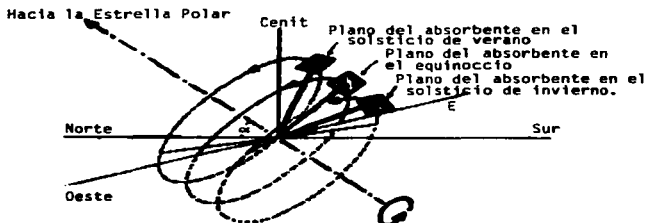
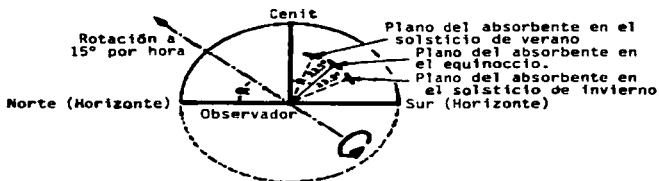


Fig. 4.4 Incidencia de rayos en una artesa parabólica. Para ser recogido en el absorbente, un rayo debe estar en planos paralelos al plano formado por el absorbente y la lima de simetría del reflector de la artesa (=incidencia vertical). Dentro del plano se recogen los rayos de todas las direcciones.

La artesa se instala inclinada al sur en el ángulo de la latitud para evitar las "pérdidas de extremos" y las pérdidas de la reflexión adicional sobre el espejo, lo que ocurre con mayores ángulos de incidencia (orientación polar).

Otra posibilidad es la de instalar la artesa con su eje longitudinal en la dirección este-oeste. Al describir el sol una sección cónica durante su movimiento diurno, un colector este-oeste debe estar orientado durante todo el día excepto en los dos equinoccios. Sin embargo, la regulación es más difícil de conseguir que para los colectores de orientación polar norte-sur, ya que la velocidad de rotación varía de una hora a otra y cada día es distinta.

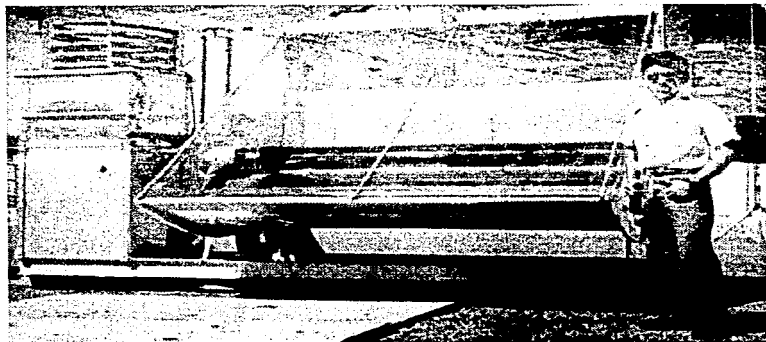


Fig. 4.5 Concentrador aplicado a refrigeración solar.

Una conclusión general es que los colectores necesitan orientación alrededor de un solo eje fijo. Excepto para la orientación este-oeste, la regulación es simple, ya que está limitada a una rotación regular de 15° por hora.

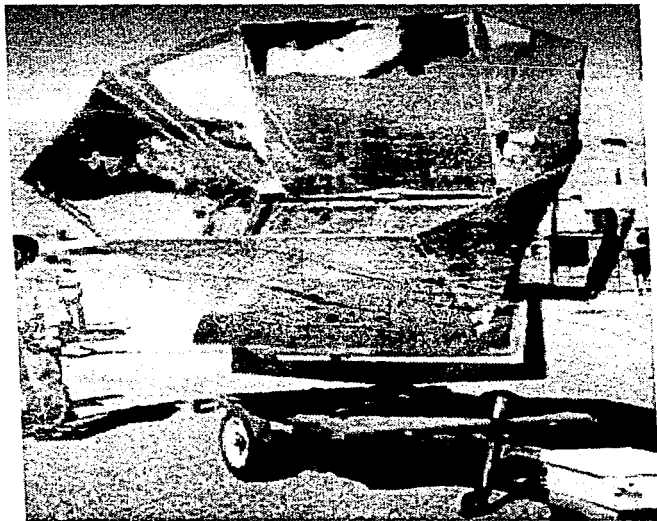


Fig. 4.6 Horno solar.

CAPITULO V

EL SEGUIMIENTO SOLAR

5.1 El reloj como control del seguimiento solar

La unidad estándar de tiempo de 24 horas es el intervalo medio entre dos máximas elevaciones consecutivas del sol por encima del horizonte. Esto ocurre al mediodía cuando el sol cruza el meridiano. Sin embargo, el tiempo actual entre los tránsitos del sol sobre el meridiano, está sujeto a pequeñas variaciones, llamadas la "Ecuación del Tiempo".

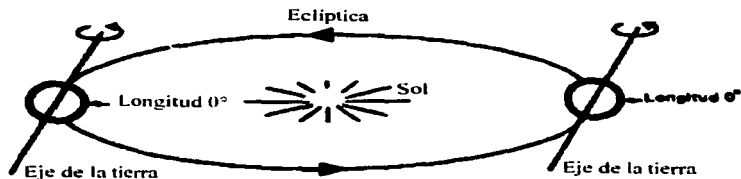


Fig. 5.1

Esto no es debido a la rotación de la Tierra alrededor de su propio eje, que es perfectamente regular, sino a) al movimiento orbital de la Tierra alrededor del sol y, b) a la inclinación del eje relativo de la Tierra a la eclíptica.

El punto sobre la tierra marcado por una flecha en la figura 5.1 en el que se vé al sol en la posición de mediodía en verano, está en la posición de medianoche seis meses más tarde después de un número de rotaciones completas de la tierra. Por este punto sobre la Tierra debe girar 180° adicionales, o 12 horas más para estar de nuevo en el mediodía. Por esto, en todo un año, el punto tiene que girar 360° adicionales, o 24 hrs. más. De aquí que la duración de una rotación plena de la Tierra sea más corta, $360^\circ / 365$ o alrededor de 1° , unos 4 minutos, que el tiempo entre dos puntos culminantes del sol: una rotación plena de la Tierra necesita 23 h. 56 min. 45 seg.

Las desviaciones de la diferencia media de tiempo de 24 horas entre dos culminaciones del sol surgen del hecho de que la velocidad angular de la Tierra alrededor del sol no es absolutamente regular. Esto es evidente cuando se observa que la órbita de la tierra es elíptica: en enero, cuando el sol está relativamente cerca, la tierra se mueve $61'$ por día; en julio, cuando el sol está más lejos, la tierra se mueve sólo $57'$ por día sobre su órbita de 360° alrededor del sol.

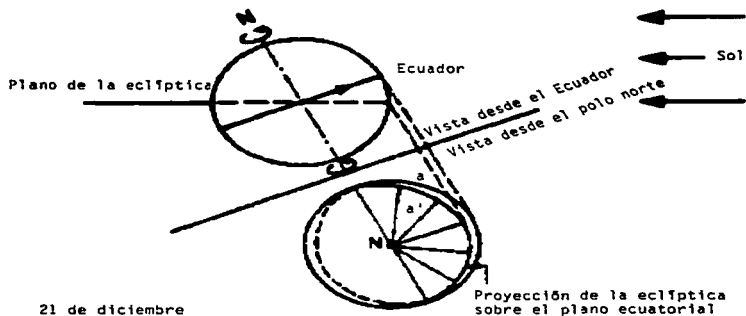


Fig. 5.2

La segunda desviación aparece a partir de la inclinación del Ecuador de la Tierra, relativo a la eclíptica en verano y en invierno.

En la proyección de ambos planos dados arriba, uno para la eclíptica y otro para el ecuador, se puede ver que, como resultado de la rotación de la Tierra a velocidad constante se recorren iguales distancias a , a lo largo del círculo ecuatorial por unidad de tiempo; pero las correspondientes distancias a' a'' a lo largo de las proyecciones de la eclíptica sobre el plano ecuatorial son desiguales; así, a un observador sobre el ecuador le parece que hay una ligera modulación de la velocidad angular del sol. Este efecto es máximo en los solsticios de verano e invierno; en los equinoccios, se convierte en cero, ya que la proyección de la eclíptica coincide con el Ecuador. A menudo, cuando el reloj marca mediodía, el

sol puede no haber alcanzado su mediodía real o punto culminante por encima del horizonte en un día particular.

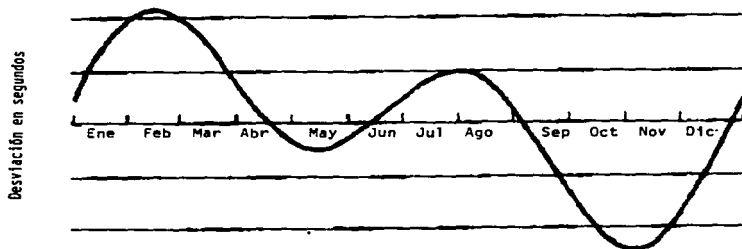


Fig. 5.3 Desviación en segundos

El gráfico muestra la desviación del mediodía real del mediodía (indicado por el reloj) para el año 1926 en el meridiano de Greenwich. Los relojes normales no son, por tanto, apropiados para usarlos como aparatos de seguimiento, para los que se necesita una orientación exacta en la escala de algunos minutos de arco. Para el seguimiento, sería fácil programar relojes electrónicos digitales de tal modo que indicaran el tiempo real del sol.

5.2 Importancia de los sistemas de seguimiento del sol

La necesidad del desarrollo de nuevas fuentes de energía ha renovado el interés por el aprovechamiento de la energía solar, la cual puede aprovecharse de

manera directa para la obtención de agua caliente y el acondicionamiento de edificios, o bien puede convertirse en energía eléctrica.

Las centrales solares, pueden ser de tipo térmico, que utilizan el calor del sol para producir el vapor necesario para mover una turbina, o basarse en el efecto fotovoltaico, mediante la utilización masiva de células solares montadas en grandes paneles de células.

En cualquier caso, la primera condición que debe reunir un sistema de aprovechamiento de energía solar es la de recoger la mayor cantidad posible de energía recibida en un determinado lugar. Esta condición exige que la superficie colectora sea, en todo momento, perpendicular a los rayos solares y, por tanto, una colección óptima sólo puede conseguirse si dicha superficie está dotada de un movimiento de seguimiento del sol.

Utilizando un colector con seguimiento, la energía total recibida en un día claro, puede ser del orden de un 35% mayor que para el mismo colector estático. Un incremento de esta cuantía compensaría sobradamente la energía requerida para el seguimiento. Éste es imprescindible cuando se trata de grandes colectores y es completamente necesario en el caso de aquéllos sistemas que se basan en la concentración óptica de la radiación solar. También es imprescindible en el caso de los campos de heliostatos de una central térmica solar que han de enfocar, todos ellos, luz solar sobre un único colector.

Todo lo expuesto hasta aquí explica la importancia del desarrollo de sistemas de seguimiento del sol paralelamente al desarrollo del aprovechamiento de la

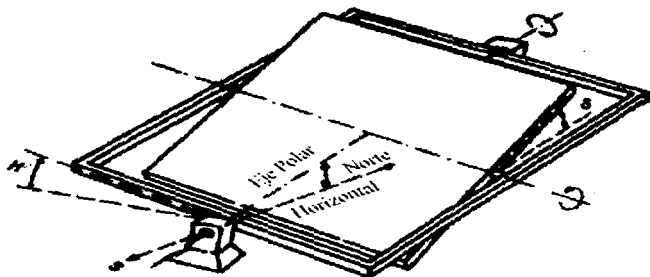
energía solar. En ese sentido, se presenta una explicación del planteamiento general y de las funciones que se esperan de un sistema de seguimiento.

5.3 Cinemática del seguimiento del sol.

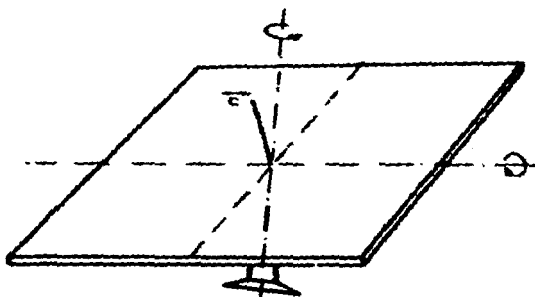
Una superficie colectora está apuntada al sol cuando un vector perpendicular a la misma es paralelo a los rayos solares. En general, para mantener un colector apuntado en todo momento, se precisa un giro del mismo alrededor de dos ejes.

Sin embargo, salvo para los sistemas que utilizan sistemas ópticos de concentración con punto focal, es posible usar sistemas de seguimiento de un solo eje.

Las configuraciones de dos ejes más comunes en la práctica, están representados en la fig.5.4 . El montaje polar (fig. 5.4a) posee un eje de giro paralelo al de la tierra y otro, horizontal, perpendicular a éste. El giro alrededor del eje polar es de velocidad prácticamente uniforme e igual a la del reloj y el giro alrededor del eje horizontal se necesita para las variaciones de la declinación solar.



(a)



(b)

Fig. 5.4 Montaje Polar y montaje Azimut-elevación

En el caso de los grandes espejos de una central térmica solar o de los paneles de una fotovoltaica, por ejemplo, el montaje mas utilizado es el de "azimut-elevación" (fig. 5.4b) que tiene un eje vertical y otro horizontal perpendicular a él. Del análisis de los ángulos solares, se obtiene:

$$\text{sen } \beta = \text{cos } \psi = \text{sen } \alpha \text{ sen } \delta + \text{cos } L \text{ cos } \delta \text{ cos } H$$

$$\text{sen } \gamma = \text{cos } \delta \text{ sen } H / \text{sen } \psi,$$

fórmulas que permiten calcular el ángulo de elevación del sol sobre el horizonte, β , y el azimut (ángulo entre el meridiano celeste local y la línea entre el cenit y el sol), γ , en función de la declinación solar, δ , la latitud del lugar, α , y el ángulo horario, H .

La declinación varía a lo largo del año debido a la inclinación de la eclíptica respecto al Ecuador celeste, pero puede suponerse constante, aproximadamente, a lo largo de un día. En cuanto al ángulo horario es aproximadamente proporcional a la hora del reloj de tal forma que las velocidades y aceleraciones del movimiento vienen dadas, en primera aproximación, por las derivadas primeras y segundas de β y γ respecto a H .

Todas estas mediciones son de interés para el diseño de motores de arrastre, si se requiere de un seguimiento continuo del sol en su movimiento.

5. 4 Arrastre y control del colector

En el diseño de un sistema de seguimiento, hay que seleccionar el sistema de arrastre y control que mueva el colector y lo mantenga continuamente apuntado al sol.

Para el arrastre pueden elegirse muy diversos medios, que pueden ser hidráulicos, mecánicos, electromecánicos, etc. Pueden utilizarse por ejemplo, simples sistemas de relojería para pequeños montajes de eje polar. Sin embargo, el empleo de un motor eléctrico y un reductor de velocidad por cada eje de giro es el sistema más habitual.

En algunos casos sencillos, puede utilizarse un motor sincrónico que gira a la velocidad del sol medio. Los captadores de la orientación del sol y del colector proporcionan cada uno una señal de error. Esta actúa sobre el sistema de control del motor que genera las señales oportunas, que convenientemente amplificadas moverán el motor y, por tanto, el colector.

Pueden agruparse en dos tipos de sistemas de control: los sistemas que utilizan fotosensores para obtener la señal de error de puntería y los que calculan la posición del sol en función de datos astronómicos, geográficos del lugar y la hora del día.

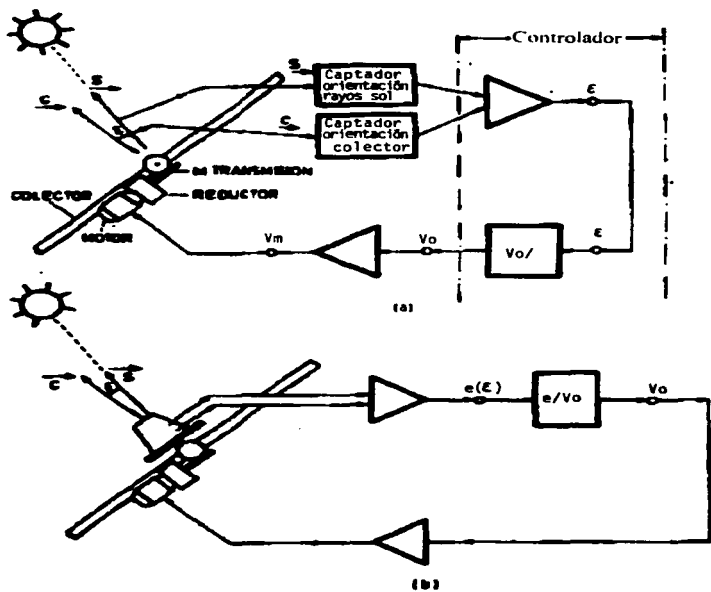


Fig. 5.5 Control típico de un sistema de seguimiento del sol. (a) Esquema de principio, general. (b) Esquema de principio, utilizando un fotosensor.

En el primer caso, el sensor suele estar constituido por pares de elementos fotosensibles (fotorresistencias, fototransistores, foto-células, etc.) montados de tal manera que proporcionan una señal de salida nula cuando la orientación del panel coincide con la del sol y una señal positiva o negativa proporcional a la desviación, en caso de que no se dé tal coincidencia. En estos casos el fotosensor va sólidamente unido al propio colector.

En el caso de seguimiento por coordenadas calculadas, una forma de proceder puede consistir en un calculador que tenga en memoria o calcule la posición instantánea del sol en la esfera celeste y, a partir de estos datos, los del día del año, la hora local y las coordenadas geográficas del lugar, calcule los ángulos de azimut y elevación del sol en cada momento, como se ha indicado anteriormente.

A partir de estos ángulos, el controlador obtiene el vector de orientación S que debería poseer el colector para apuntar al sol y lo compara con el vector de orientación real C del mismo, obtenido a partir de la información recibida del captador de posición angular.

La diferencia entre ambos vectores permite conocer los errores de orientación en azimut y elevación y generar las órdenes oportunas de control para los motores correspondientes (fig. 5.6).

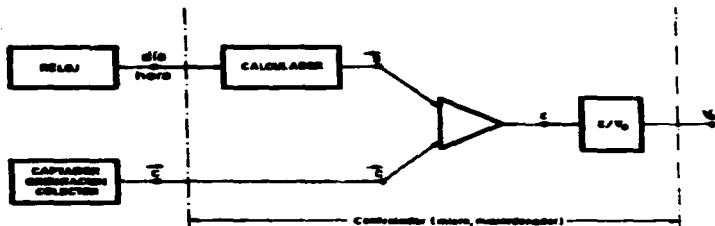


Fig. 5.6 Detalle del cálculo de la señal de mando en un sistema de coordenadas calculadas

Independientemente del sistema elegido para generar la señal de error, hay que seleccionar la forma en que ha de moverse el motor para corregir dicho error. En principio, puede utilizarse la señal de error para modular la velocidad de un motor de tal forma que reproduzca la velocidad del sol en todo momento. Sin embargo, en el seguimiento en azimut y elevación, las velocidades varían en márgenes amplios por lo que los requisitos que ha de cumplir el motor pueden resultar bastante exigentes. Los sistemas de movimiento continuo del motor sólo se emplean para pequeños colectores o plataformas para aparatos de medida.

En los demás casos, lo normal es emplear motores de velocidad constante que funcionan de modo intermitente. Esta forma de funcionamiento se comprende mejor con ayuda de la fig. 5.7 En el instante t_1 , la posición angular del colector ha alcanzado el mayor valor tolerable del error de retraso y el motor comienza a girar para corregir ese error, produciendo un avance hasta que en el instante t_2 se

alcanza el mayor valor tolerable del error de adelanto. El motor se detiene de nuevo, hasta que el colector se vuelve a retrasar y a partir del instante t_3 se repite de nuevo el proceso. En condiciones normales, en el caso del movimiento azimutal, bastaría con que el motor girase en un solo sentido, pero no así en el de elevación, que ha de invertir su sentido de giro cuando se alcance el máximo valor del ángulo (fig. 5.7b). En la práctica, ambos motores suelen girar en los dos sentidos, lo que proporciona mayor flexibilidad a la corrección del error y facilita la realización de otras funciones.

El ángulo subtendido por el globo solar es, en valor medio de 9.31 mrad. Se estima que no es necesaria una precisión de puntería superior a la décima parte de este valor; es decir, mejores que unos 0.10 mrad. En la práctica, esta precisión resulta todavía muy elevada y de hecho una precisión de 3-5 mrad es suficiente para la mayoría de los casos.

Los motores utilizados generalmente son de corriente directa, por su facilidad de controlar; no obstante, pueden utilizarse de corriente alterna y motores paso a paso principalmente en el caso de movimiento intermitente y velocidad constante. Las potencias necesarias son muy pequeñas debido a las bajas velocidades de giro del colector.

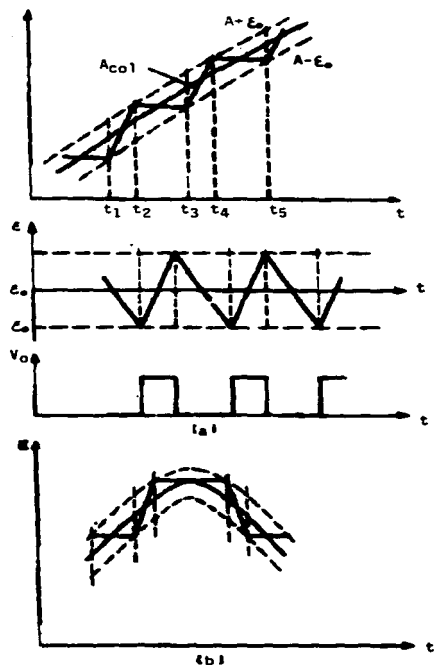


Fig. 5.7 Control por funcionamiento intermitente de los motores y avance del colector por incrementos discretos (a) Movimiento de azimut. (b) Movimiento de elevación.

CAPITULO VI

CONSTRUCCIÓN DEL MECANISMO DE SEGUIMIENTO

6.1 Consideraciones en el diseño

Para mantener un colector apuntado en todo momento, generalmente se precisa un giro del mismo alrededor de dos ejes. Sin embargo, en esta base se encuentran incluidos y sintetizados todos los parámetros para lograr el seguimiento en un solo eje como el que a continuación se presenta:

Este montaje, posee un eje de giro en la dirección N-S, en el que se medirá el ángulo horario H , a una razón de 15° por hora, y otro perpendicular a éste, en el que se ajustará manualmente, el ángulo de latitud del lugar.

Así mismo, consta de los ajustes necesarios para los ángulos de azimut y declinación solar, que se encuentran en un eje vertical y otro horizontal perpendicular a él. Dichos ajustes se logran por medio de mecanismos de sinfín y manivela.

En sí, la base presenta gran robustez mecánica sin grandes complicaciones en las 5 estructuras y del mecanismo de giro. Se utilizarán como articulaciones, tejuelos de acero comercial de $\phi 1 \frac{1}{4}'' \times 1 \frac{1}{4}''$.

La base *A* se fija firmemente sobre la tierra mediante cuatro barrenos, taquetes de expansión y tornillos, ofreciendo así, mayor resistencia al viento. Fue construida con ángulo, solera y tubo; resultando una base sólida con el tubo al centro, perpendicular al plano del piso y cuatro tirantes.

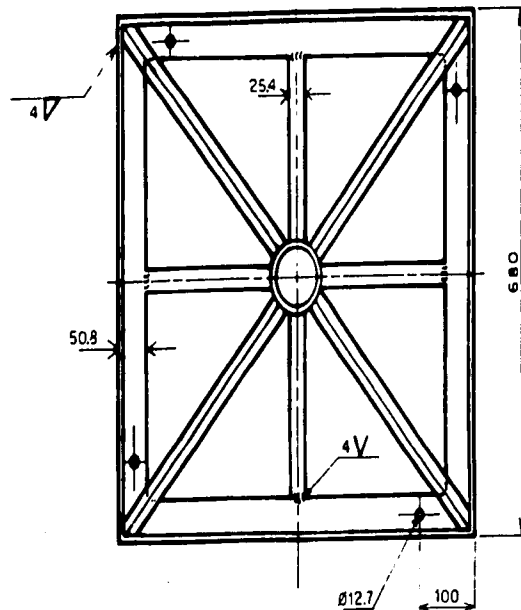
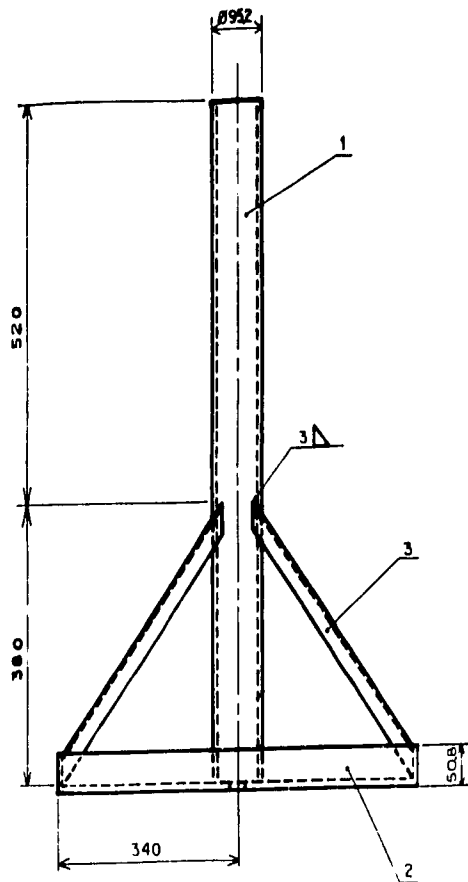
La estructura *B* se fija al poste de la base *A*, por medio de 6 tornillos $5/8''$, por pares espaciados a 120° , orientado en la dirección N-S. En su parte inferior, tenemos el ángulo de azimut, mientras que en la superior, por medio de tejuelos tenemos un eje de giro que nos permite inclinar la estructura *C*, hasta obtener el ángulo de latitud del lugar.

La estructura *C*, cuenta con un brazo, el cual servirá en su extremo, como pivote para que el pistón en su movimiento, lleve a la estructura *D* a la posición del ángulo horario.

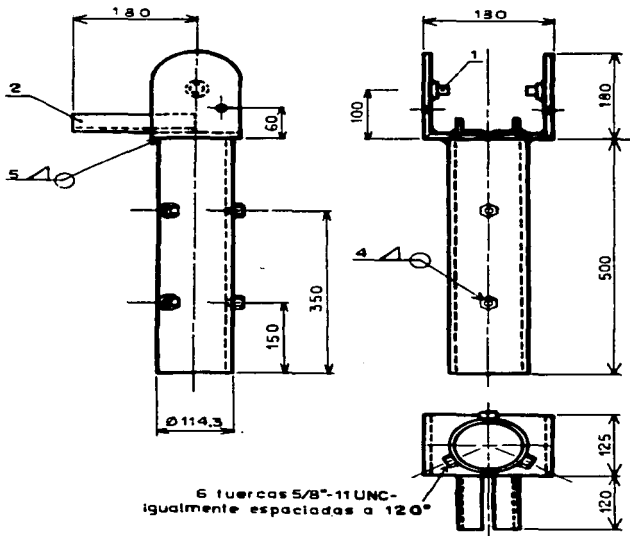
La estructura *D*, es un bastidor rectangular con brazo, construido con tubular cuadrado PTR de $2'' \times 1/8''$, que tendrá la función de girar sobre su eje longitudinal 15° por hora, en su extremo sur, se encuentra el eje de giro para ajustar manualmente la declinación solar δ , correspondiente al día del año.


Sobre la estructura *D*, se encuentra articulada por medio de bisagras la estructura *E*, que servirá para corregir las variaciones de la declinación solar, por lo que muy bien puede hacerse únicamente una vez al día, o incluso, varias veces al año. Sobre ésta se coloca el colector (ya sea térmico o fotovoltaico) que ha de llevar a cabo la conversión de energía.

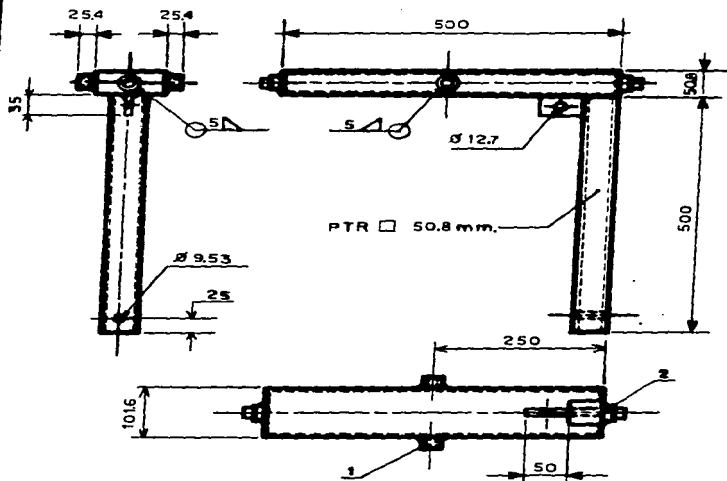
Las dimensiones correspondientes a cada una de las partes constitutivas del mecanismo, tales como espesores, tolerancias, dimensiones exteriores, separaciones y en general la proporción de ellas, se basan puramente en la práctica y en la experiencia adquiridas en el diseño de partes similares. Es decir, las bases, placas de apoyo, flechas, soportes, etc., no requieren cálculos detallados, sino, que se hace uso de un buen sentido de la proporción; por lo tanto, no se indican cálculos al respecto.



3	4	Tirantes	hierro negro	ángul: 254x3.2
2	1	Base cuadrada	hierro negro	ángulo 50.8x3.2
1	1	Poste	galvanizado	
No.	Cant.	Designación	Material	Observaciones
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN				
Escala: 1:6 Acotación: mm Fecha:			Rev. Ing. Leyva	
UNAM			Dib. Navarro	
BASE ESTRUCTURA "A"				

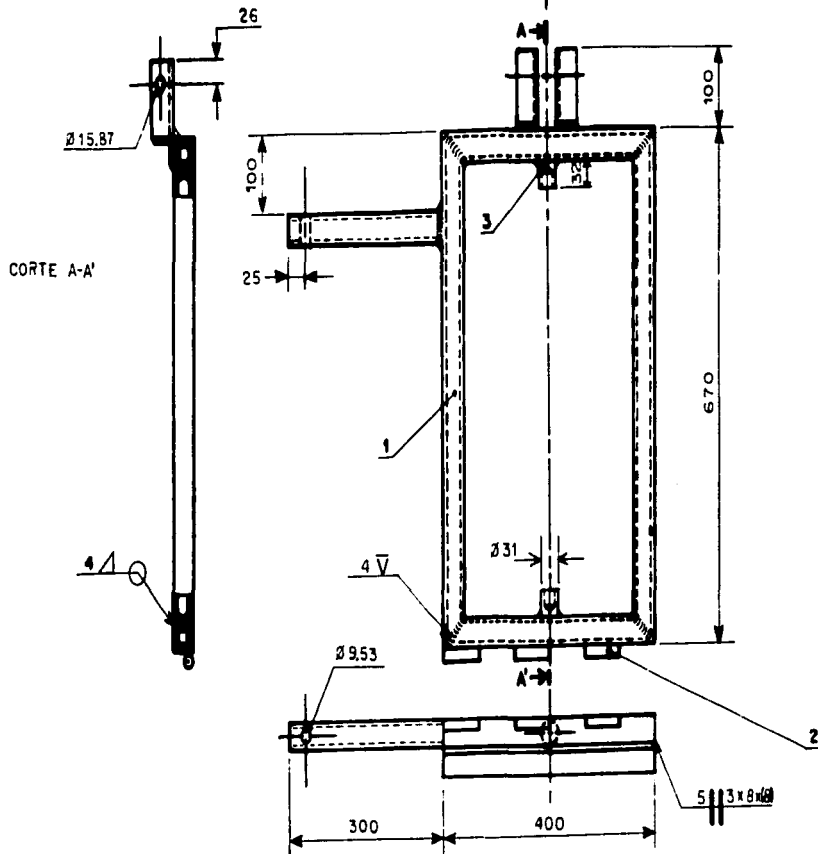


2	2	Soporte	hierro negro	ángulo 38.1 x 3.2
1	2	Tejuelo recto m.	acero comercial	38.1 x 31.8 @
No.	Cant.	Designación	MATERIAL	Observaciones
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES				CUAUTITLAN
Escala: 1:6		Anotación: mm. Fecha:		Rev. Ing. Leyva
UNAM	ESTRUCTURA "B"			Dib. Navarro
				

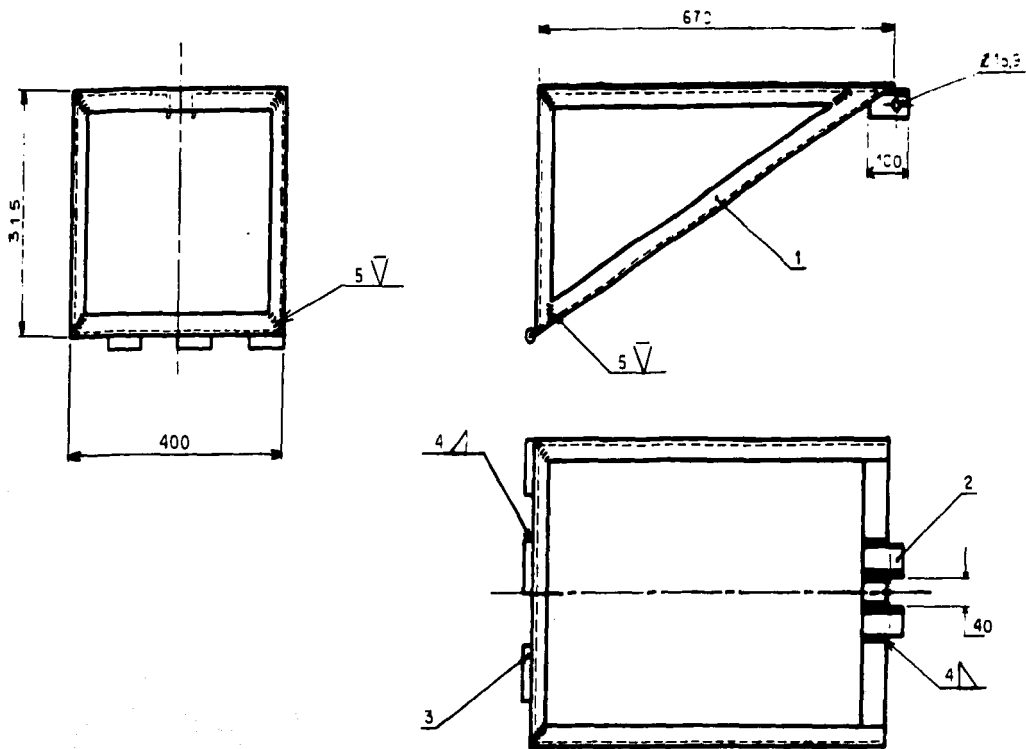


PTR \square 50.8 mm.

2	2	Tejuelo macho	acero comercial	38.1 x 31.8 ϕ	
1	2	Tejuelo recto hamb	acero comercial	25.4 x 31.8 ϕ	
No.	Cont.	Designación	Material	Observaciones	
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN					
Escala: 1:6			Acotación: mm.	Fecha:	
UNAM			ESTRUCTURA "C"		Rev. Ing. Leyva
					Dib. Navarro



3	2	Tejuelo cónico	acero comercial	32 x 31.8 ∅
2	3	Bisagra	hierro negro	60 mm.
1	1	Bastidor con brazo	hierro negro	PTR □ 38.1 x 3.2
No.	Cant.	Designación	Material	Observaciones
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - C.				
Escala: 1:6		Acotación: mm.		Fecha:
				Rev. Ing. Leyva
				Dib. Navarro
UNAM			ESTRUCTURA "D"	



3	3	Bisagras	hierro negro	60 mm.
2	2	Soportes	hierro negro	ángulo 3.81x3.2
1	1	Estructura	hierro negro	ángulo 2.54x3.2
No.	Cant.	Designación	Materia	Observaciones
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN				
Escala: 1:6		Acotación: mm.		Fecha:
UNAM		ESTRUCTURA "E"		Rev. Ing. Leyva
				Dib. Navarro



CAPITULO VII

CONSTRUCCIÓN DEL COMPARADOR ÓPTICO

7.1 Fotosensor de la orientación de los rayos solares

El panel a controlar utiliza una configuración de seguimiento tipo ecuatorial, quedando por tanto, determinada su orientación por los ángulos de declinación solar δ , latitud α y horario H . El seguimiento del sol se consigue mediante el diagrama de control que se muestra en la fig. 5.5b, utilizando fotosensores, situados en los costados del panel

7.2 Funcionamiento del circuito comparador

En la fig. 7.1 se ha representado el esquema del circuito eléctrico total que genera la señal de actuación del motor en uno u otro sentido a partir de los sensores.

Su funcionamiento: Se fija una tensión de referencia en la entrada no inversora del operacional mediante el ajuste P , siempre y cuando la tensión presente en la entrada inversora no supere la de referencia; la salida del operacional se mantendrá a un nivel alto ($+V_{cc}$), saturación positiva o alimentación positiva. Cuando la tensión de la entrada inversa supere la de referencia, la salida quedará en estado de saturación negativo ($-V_{cc}$).

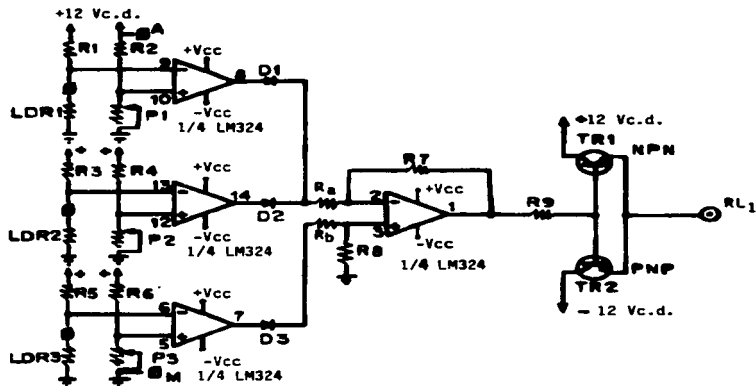


Fig. 7.1 Diagrama del circuito comparador

La variación de la tensión en la entrada inversora se consigue utilizando un divisor formado por R y LDR, que dependerá proporcionalmente de la cantidad de luz que incida sobre el sensor.

Circuito restador : El circuito restador obtiene en su salida una señal proporcional a la diferencia de las tensiones presentes en las entradas inversora y no inversora del operacional. Se trata simplemente de un amplificador de la señal V_d , siendo $V_d = V_{e1} - V_{d2}$.

Los disparadores atacan al circuito restador a través de los diodos D_1 , D_2 . Estos evitan el cortocircuito de la salida de los mismos en caso de que se encuentren a niveles de saturación de distinta polaridad. El diodo D_3 tiene como función simplemente el equilibrar las condiciones de los tres comparadores.

Funcionamiento: De los tres comparadores o disparadores de que consta el montaje, sólo dos tendrán como misión el seguimiento del foco luminoso. Estos serán los formados por LDR_2 y LDR_3 , encontrándose LDR_1 siempre en zona no iluminada, en este caso, en la parte posterior del panel solar. Su misión es hacer retornar el sistema a su posición inicial.

En suma, se trata de un circuito que se auto equilibra. Cuando las señales que provienen de los comparadores, presentes en las entradas del restador, son iguales, la salida de éste se encuentra a cero volts, por lo que los transistores TR_1 y TR_2 se encuentran cortados.

Cuando en las entradas los voltajes sean distintos, su salida mantendrá un nivel de saturación positiva o negativa (+Vcc, -Vcc), según sea el caso. Por tanto, a través de R9 se polarizan los transistores que trabajarán en corte-saturación, por lo que entre los terminales RL₁ y RL₂ la tensión será la de alimentación negativa. Cuando se da la circunstancia inversa, en los terminales aparecerá +Vcc.

$$V_d = -V_{cc} - (+V_{cc}) = -2V_{cc}$$

V_d supera el valor a tensión que alimenta el circuito, por lo que éste dará como máximo a su salida +Vcc, no sobrepasando nunca dicho voltaje.

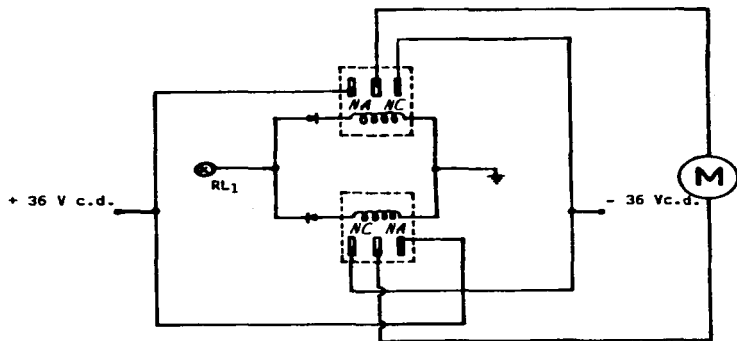


Fig. 7.2 Circuito de relevadores

7.3 Utilización

Dado que con este circuito se pretende accionar un mecanismo conectando y desconectando un motor, se utilizarán relés, puesto que se manejan circuitos de tensiones distintas y por separado (fig. 7.2).

Este circuito se implementará junto con el circuito comparador, formando una sola unidad. La fuente de alimentación para el motor del pistón, estará regulada a 36 V c.d. y ésta se encontrará formando otra unidad junto con los conectores tipo "plug" que reciben la señal de los fotosensores.

Por otra parte, y dado que los rayos luminosos se consideran paralelos entre sí, se utilizan unas "sombrias" (fig.7.3) en LDR_2 y LDR_3 , para que éstas proporcionen la sombra suficiente, de forma que el circuito puede discriminar correctamente. Sin ellas y aunque el sol se desplace, ambos sensores percibirían la misma cantidad de luz.

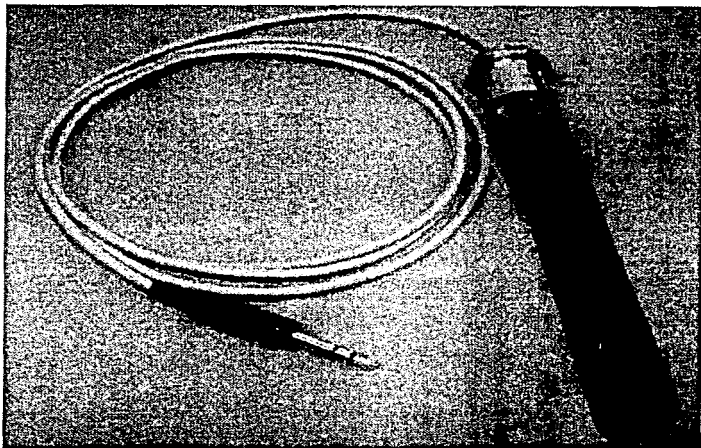


Fig. 7.3 Sombrilla que contiene el sensor (fotorresistencia)

El circuito viene dotado de potenciómetros, los cuales le dan mayor flexibilidad al sistema, permitiendo la regulación óptima en cada caso y pudiendo ser útiles para otras aplicaciones del mismo. De cualquier manera, el ajuste será el mismo para todos y se puede realizar midiendo las tensiones en ellos que deberían ser iguales y próximas a cero.

7.4 Características y componentes

Alimentación : ± 12 V CD

Consumo de vacío: 20 mA aproximadamente

Tipo de sensores: Fotorresistencia LDR

Sensibilidad: Ajustable.

Para llevar a cabo la construcción del circuito comparador, se utilizaron los elementos que a continuación se enlistan:

R1	10 K Ω	10%	$\frac{1}{2}$ W
R2	100 K Ω	10%	$\frac{1}{2}$ W
R3	10 K Ω	10 %	$\frac{1}{2}$ W
R4	100 K Ω	10%	$\frac{1}{2}$ W
R5	10 K Ω	10%	$\frac{1}{2}$ W
R6	100 K Ω	10%	$\frac{1}{2}$ W
R7	10 K Ω	10%	$\frac{1}{2}$ W
R8	10 K Ω	10%	$\frac{1}{2}$ W
R9	470 Ω	10%	
P1	100 K	potenciómetro de precisión	
P2	100 K	potenciómetro de precisión	
P3	100 K	potenciómetro de precisión	
D1	IN4118	diodo	
D2	IN4118	diodo	
D3	IN4118	diodo	

TR1 MC140 transistor NPN

TR2 MC150 transistor PNP

IC1 LM324 integrado

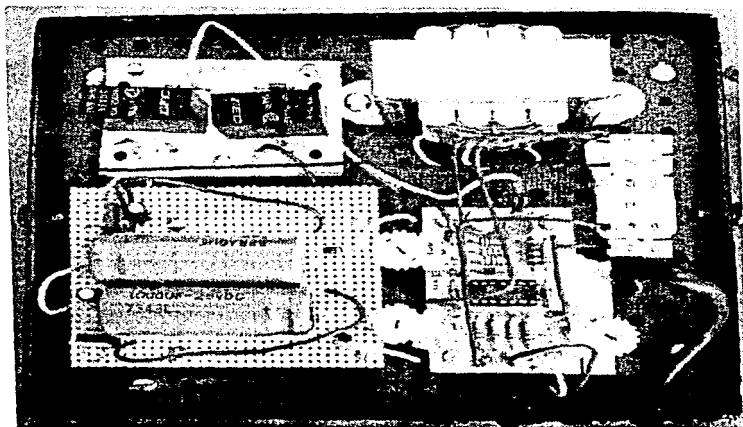


Fig. 7.4 Caja contenedora de el circuito comparador, el arreglo de relevadores y la fuente de alimentación simétrica a 12 V c.d.

Cada unidad de circuitos componentes del aspecto de control del sistema se agruparon en dos cajas metálicas con la finalidad de tener acceso fácil a cada uno de éstos. Los sensores se conectan por medio de “plugs” para facilitar su manejo

y también se incluyó la fuente de alimentación regulada a 36 V cd, para el motor del pistón .

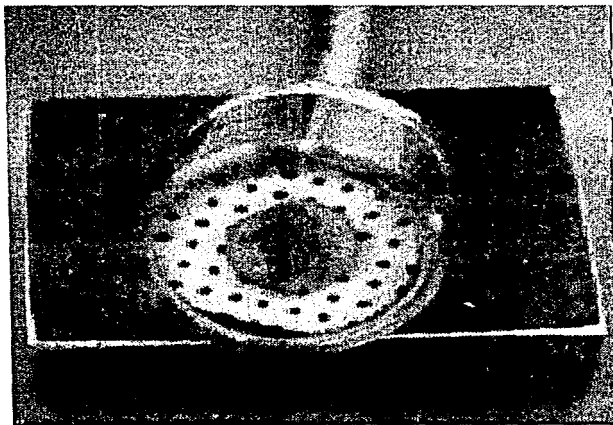


Fig. 7.5 Fotorresistencia del tipo " LDR ".

CAPITULO VIII

INSTALACION, PRUEBAS Y RESULTADOS

8.1 Instalación

La instalación del sistema de seguimiento solar se llevó a cabo en la F.E.S Cuautitlán, y para ello fue necesario seleccionar un lugar libre de sombras, como árboles o edificios. Una vez hecho esto, se fijó firmemente la base "A", al piso mediante taquetes de expansión y sus respectivos tornillos.

La estructura "B" se colocó en seguida cuidando de orientarla adecuadamente en la dirección Norte-Sur y apretando los 6 tornillos de los costados. De esta forma queda ensamblada toda la base de seguimiento.

Ahora, para darle la inclinación adecuada, utilizamos un inclinómetro. La estructura "C" se mueve por medio del sinfín con manivela, hasta alcanzar una inclinación de 19.5° hacia el sur, que es el ángulo de latitud correspondiente a Cuautitlán.

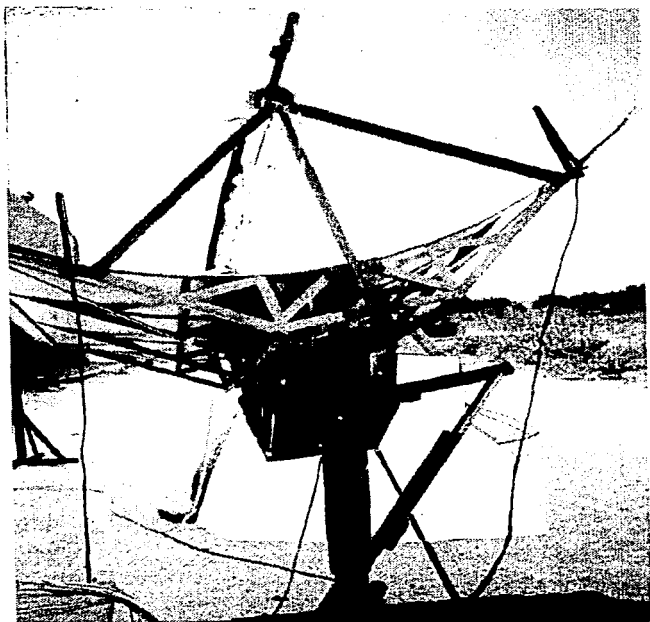


Fig. 8.1 Disposición de los sensores.

La estructura "E" también la colocamos en su posición de declinación para el día en particular. (En este caso $\delta = - 00^{\circ}26'$ correspondiente al día 24 de septiembre).

Los sensores se instalaron en los costados Este y Oeste de la parte superior de la estructura "E" y se conectaron a su respectiva entrada. (Fig. 8.1) Cuidando que las sombrillas quedaran normalmente al plano de la superficie del colector (ya sea módulo FV o concentrador parabólico).

El pistón se instaló a los "brazos" de la estructura "C" y "D", por medio de dos articulaciones móviles en la parte media y extrema de éste, y se conectó a la salida del circuito de relevadores.

En seguida se procedió a conectar a la alimentación normal (110-127 V c.a.) las dos fuentes: la del pistón y la del comparador, Iniciándose así la operación del sistema de seguimiento solar.

8.2 Pruebas

El motor gira y acciona el pistón, extendiéndose y contrayéndose a una velocidad constante y funciona de manera intermitente, de modo, que el seguimiento se realiza mediante el control de sus tiempos de actuación, manteniéndose el error de puntería dentro de una banda de tolerancia.

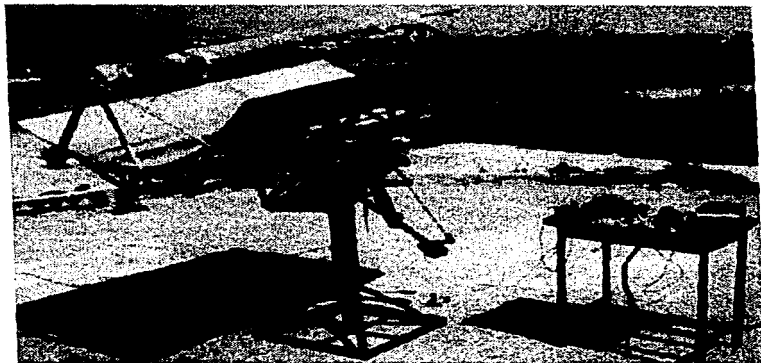


Fig. 8.2 Sistema de seguimiento ensamblado, con una artesa parabólica.

Una de las pruebas que se llevaron a cabo, fue con un concentrador cilindro-parabólico que se instaló a la base. El sistema de seguimiento estuvo operando correctamente; el rayo permaneció orientado a lo largo del tubo absorbedor, durante 4 horas que duró la prueba, logrando así, un incremento importante en la temperatura del agua que circulaba por éste.

Para cuantificar la precisión, se construyó un dispositivo de medición, que consistió en un segmento de transportador con 1m. de radio y en su extremo, una escala con 8° , teniendo como centro el cero y $\pm 4^\circ$ hacia los extremos.

El dispositivo se instaló firmemente y en posición normal al plano de la estructura "E", proyectando una sombra sobre éste, la cual nos daría el dato del desplazamiento angular. Cuando la base está orientada, el cero de la escala coincide con el vértice del dispositivo, cuando el sol "se desplaza", la lectura en la escala proyectado en el plano, nos da el máximo error en el seguimiento.



Fig. 3 "Ajustando la sensibilidad"

2.3 Resultados

En el instante t_1 la posición angular del colector ha alcanzado el mayor valor tolerable del error de retraso y el pistón comienza a reducir el error, produciéndose un avance hasta que se alcanza la orientación en el instante t_2 , el motor se detiene en ése instante. Luego, el panel alcanza de nuevo el error límite de retraso, momento a partir del cual se repite el proceso.

De acuerdo a los datos arrojados de la prueba que duró 3 horas, con el segmento de transportador, el máximo error de puntería obtenido fue tan sólo de 0.1° , con una frecuencia de 8 segundos por "disparo" hacia el motor del pistón (Fig.4).

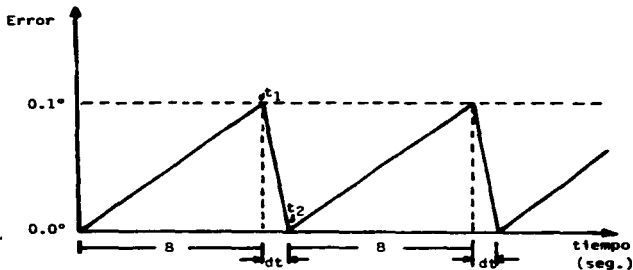


Fig. 4 Gráfica Error vs. tiempo.

CAPITULO IX

CONCLUSIONES

Una vez culminado este trabajo, se concluye con la seguridad de que se puede lograr un seguimiento con una gran precisión utilizando un sólo motor, pues en la base se encuentran sintetizados todos los parámetros necesarios para el continuo seguimiento del colector a utilizar. La sensibilidad del circuito comparador se logró ajustar a un nivel tal que la precisión en el seguimiento resulta casi ideal, los resultados obtenidos han sido sorprendentes, al tratarse de una base de seguimiento que se logró desarrollar con pocos recursos.

Debido a su forma, esta base tiene aplicación en sistemas de conversión fotovoltaica y fototérmica. Los circuitos, la estructura y demás componentes pueden ajustarse a otras aplicaciones, siendo éstas de bajo costo; además, ése costo se amortiza con el ahorro de energía de otro tipo.

Este sistema de seguimiento, puede retroalimentarse perfectamente mediante células solares, debido a su bajo consumo de corriente, tanto en el circuito comparador como en el motor del pistón. No se hizo así por falta de recursos económicos.

El circuito comparador todavía puede mejorarse para ciertas situaciones de posicionamiento de seguridad, de mantenimiento o desorientación.

Es necesario el desarrollo de sistemas de seguimiento a la par con sistemas de aprovechamiento de la energía solar, ya que los sistemas de concentración serán los más rentables hasta que no se consiga disminuir el costo de producción de celdas fotovoltaicas.

Es importante fomentar el uso de las fuentes no convencionales de energía, debido a los problemas de contaminación que ya enfrentamos actualmente, así como al alto costo de producción de los energéticos.

A pesar de las políticas gubernamentales o de otras barreras potenciales para el desarrollo, las tecnologías de energía renovable están haciendo incursiones en la infraestructura tradicional de la energía en muchos países. Se ha demostrado que las renovables como la solar y eólica, la fuerza hidroeléctrica y la biomasa, actualmente proporcionan casi 10% de la energía, y que mediante cálculos conservadores, estas fuentes de energía alternativa -si se usa- pueden ofrecer hasta 75% de esta energía en los próximos 20 o 30 años. Los expertos creen que este porcentaje podría ser mayor.

BIBLIOGRAFÍA

1.-Energía Solar: Aplicaciones prácticas.

Hans Rau. Barcelona. Marcombo. 215 p.p.

2.-Solar Engineering of Thermal Process.

J. A. Duffie and W. Beckman. New York. Ed. WILEY. 762 p.p.

3.-Energía Solar Fotovoltaica.

Autores varios bajo la dirección de José Nanpin Poblet. Serie
"Mundo electrónico". Barcelona, México. Marcombo. 270 p.p.

4.-Alternativas energéticas.

Antonio A. Concheiro, Luis Rodríguez Viqueira. México,
CONACyT, Fondo de Cultura Económica.

5.- Energía Solar: Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas.

José A. Manrique. México. HARLA. 255 p.p.

**6.- Energía Solar: Selección de equipo, instalación y
aprovechamiento.**

Richard H. Montgomery. México. LIMUSA.

- 7.- Documento: "*Las otras energías*", edición especial de "*Muy interesante*" Josep Puig y Joaquim Corominas. 1994.
- 8.- *Diseño y aplicación de sistemas fotovoltaicos*
Universidad de Sonora, Asociación de Energía Solar. México.
1994.
- 9.- *Energía Solar.*
Wolfgang Palz. Editorial Blume- UNESCO. Barcelona. 1980. 270 pags.
- 10.- *ENERGIA RENOVABLE: Guía de alternativas ecológicas*
Jennifer Carless. EDAMEX . 1992. 256 pags.
- 11.- *ENERGIA SOLAR Bases y aplicaciones*
C.C. Cobarg. Paraninfo, Madrid. 1986. 196 pags.