



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

**ENERGIA SOLAR: CONCENTRACION, CONSTRUCCION
PRACTICA Y APLICACION**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N:

JOEL AGUSTIN GARCIA JIMENEZ

LUCIANO VARGAS CARBAJAL

ASESOR: ING. JOSE ANTONIO SANCHEZ GUTIERREZ

COASESOR: ING. FILIBERTO LEYVA PIÑA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2007



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 CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

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

Energía Solar: Concentración, construcción práctica y aplicación

que presenta el pasante: Joel Agustín García Jiménez
con número de cuenta: 8223418-2 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en
el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 28 de Mayo de 2007.

PRESIDENTE	<u>M.I. José Guadalupe Ramos Anastasio</u>	
VOCAL	<u>Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Eduardo Covarrubias Chávez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Ma. Teresa Pacheco Escalona</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Ricardo Delgadillo Torres</u>	



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

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

Energía Solar: Concentración, construcción práctica y aplicación:

que presenta el pasante: Luciano Vargas Carbajal

con número de cuenta: 08127746-7 para obtener el título de :

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en
el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 28 de Mayo de 2007.

PRESIDENTE M.I. José Guadalupe Ramos Anastasio

VOCAL Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez

SECRETARIO Ing. Eduardo Covarrubias Chávez

PRIMER SUPLENTE Ing. Ma. Teresa Pacheco Escalona

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Ricardo Delgadillo Torres

A mis padres.

Dedico este trabajo a los seres que me dieron la vida, amor y paciencia. Mi más profundo agradecimiento por haberme guiado, orientado y brindado su amistad incondicional. Mi amor y respeto y por ser la fuente principal para la terminación del presente trabajo.

Para Elisa. (q. e. p. d. †)

Donde quiera que se encuentre mi más sincero agradecimiento por su gran interés, apoyo y motivación para seguir adelante en todo momento. Gracias eternamente por la difícil tarea de suplir a una madre.

A mis hermanos.

Con gran afecto y cariño por el respeto y amistad que nos mantiene juntos y por ser más que hermanos, excelentes amigos. (Angelina, Virginia, Soledad, Ezequiel, Alicia, Angélica y Banu).

A mis maestros.

Un profundo agradecimiento a todos los profesores, con respeto y cariño por sus grandes aportaciones y conocimientos en mi formación y por la valiosa ayuda desinteresada e incondicional en todo momento. Gracias. Agradecimientos especiales a los profesores Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez e Ing. Filiberto Leyva Piña.

A la UNAM:

Agradecimiento especial a esta gran institución por haberme formado académicamente y en especial a la FES – C por realizarme como profesionista.

Otras.

A todas aquellas personas que con el simple hecho de conocerlas me impulsaron y motivaron para seguir adelante hasta llegar a la meta. Gracias.

JAGJ

A mis padres Simón y Cecilia,
con gran admiración, cariño y respeto.

A Maria, Raymundo, Joaquín, Paulina, Ángel, Alberto, Jorge, Andrea y Sara,
mis queridos hermanos.

L.V.C

Agradezco a la UNAM,
a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán
y a mis profesores,
por los conocimientos, la formación personal y profesional que me han dado.

Agradezco especialmente a mis asesores,
Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
y al Ing. Filiberto Leyva Piña,
por su amistad, y por su apoyo para la realización de este trabajo.

L.V.C.

ÍNDICE.

Introducción.	3
Objetivos.	5
Capítulo 1. La energía y el sol.	6
1.1. Energía.	7
1.2. El sol.	9
1.3. Energía solar.	10
1.4. Historia de la energía solar.	12
1.4.1. El siglo XVII.	12
1.4.2. El siglo XVIII.	13
1.4.3. El siglo XIX.	13
1.4.4. El siglo XX.	14
1.5. Naturaleza de la energía solar.	15
1.6. Incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre.	16
1.6.1. Radiación sobre la atmósfera terrestre.	16
1.6.2. Radiación sobre la superficie terrestre.	19
1.7. Ángulos solares.	21
1.7.1 La bóveda celeste.	21
1.7.2 Coordenadas horizontales.	22
1.7.3 Coordenadas ecuatoriales.	23
1.7.4 Transformación de coordenadas.	25
1.7.5 La eclíptica.	27
1.7.6 Latitud y longitud.	30
1.7.7 Ángulos solares básicos.	31
1.7.8 Ángulos solares derivados.	33
Capítulo 2. Medios de conversión de la energía solar en energía útil.	32
2.1. Proceso termodinámico.	38
2.2. Proceso fotoeléctrico.	40
2.3. Proceso termoeléctrico.	43
2.4. Proceso fotovoltaico.	45
2.5. La célula solar.	49
2.6. Proceso fotoquímico.	53
2.7. Sistemas termiónicos.	55

Capítulo 3. Colectores de radiación solar.	57
3.1. Colectores solares planos.	59
3.2. Colectores concentradores.	62
3.3. Concentración en un Paraboloide de revolución	66
3.4. Razón de concentración	67
3.5. Análisis para el sistema de seguimiento al sol.	68
3.6. Conceptos relativos a los colectores solares.	69
Capítulo 4. Proceso constructivo de un colector solar tipo concentrador parabólico.	73
4.1 Consideraciones elementales y dimensionamiento del perfil parabólico.	74
4.2 Introducción al proceso constructivo.	78
4.3 Descripción del proceso de moldeo.	78
4.4 Obtención de la superficie del colector.	81
4.4.1 Preparativos.	81
4.4.2 Refuerzos.	82
4.4.3 Sujeción.	85
4.4.4 Aspectos básicos del material. Resina y fibra de vidrio.	85
4.4.5 Proceso principal.	86
4.5 Materiales.	87
4.6 Exposición cronológica del proceso en imágenes fotográficas.	89
Capítulo 5. Aplicación de la concentración solar en un colector.	98
5.1 Planteamiento.	99
5.2 Determinación de los parámetros del concentrador tipo paraboloide de revolución.	106
5.2.1 Geometría.	106
5.2.2 Razón de concentración.	108
5.2.3 Cantidad de energía en el receptor.	111
5.3 Memoria de cálculo de los parámetros del concentrador construido.	117
5.4 Análisis del sistema fototérmico de generación de energía eléctrica.	121
5.4.1 Sistema térmico.	122
5.4.2 Sistema eléctrico.	132
Conclusiones.	134
Bibliografía.	135

Introducción.

Desde el descubrimiento del fuego, la energía en forma de calor ha acompañado al hombre en toda su existencia de tal manera que ha hecho de este el principal medio de aprovechamiento de los bienes que ofrece la naturaleza. No se podría entender el actual desarrollo de la humanidad si no pensáramos en la gran influencia que ha tenido el fuego manifestado en la energía calorífica que de él se obtiene. Aun cuando hay una diversidad de fuentes de obtención de energía no podemos olvidar que la mayor parte, si no es que todas, tienen su origen en el mayor productor de calor que es el sol. De ahí que no sea extraño ni nada nuevo que se investigue y de hecho que ya existan de hace un tiempo, formas de aprovechar la energía que nos envía este astro de características muy especiales, importantes e imprescindibles para la existencia de vida en el planeta tierra. El punto ahora es aprovechar al máximo de manera directa esta energía dado que las fuentes tradicionalmente utilizadas como el gas, petróleo y carbón están en vías de agotarse por lo que es inaplazable lograr el basto aprovechamiento y hacer de esta la fuente principal de energía que además tiene las cualidades de ser limpia e inagotable.

A pesar de la investigación que se ha hecho y de los conocimientos que se tienen sobre los medios de aprovechamiento de la energía solar. Su aplicación a ello es aún muy pobre comparada con el uso de las fuentes de energía tradicionales. Por ello es importante continuar señalando las grandes ventajas que el uso de la energía solar nos ofrece y puede ofrecernos a corto y a largo plazo.

En este trabajo nos hemos dado a la tarea de presentar y realizar un método de construcción de un concentrador solar. Inicialmente el objetivo que se tenía en mente era aún más extenso el cual consistía en realizar un sistema fototérmico de aprovechamiento de la energía solar incluyendo, además del concentrador solar, otros elementos necesarios para efectuar la transformación de la radiación solar a una forma de energía final: energía eléctrica. Al adentrarnos al basto conocimiento de la teoría inherente a la energía solar vimos que tal objetivo tenía un componente al cual le podríamos dedicarle una atención especial y que sería posible llevar a cabo la construcción física del mismo: el concentrador solar.

La investigación inicial nos llevo a plantear la estructura de este trabajo de la siguiente manera, después de haber sufrido algunos cambios que creímos necesarios durante el avance del mismo.

En el primer capítulo: La energía y el sol, hablamos de concepto de energía, se expone una definición y algunos conceptos importantes relativos a ella que pueden resultar interesantes. Enseguida mencionamos algunas características y datos del sol y cómo se entiende o

comprende lo que energía de este astro realiza en el planeta. Un poco de historia resulta interesante para darnos cuenta que la energía solar ha llamado la atención de la humanidad desde siempre. Abordamos La física de la energía solar desde que la radiación se desprende del sol y llega a la atmósfera terrestre, cómo atraviesa ésta y la manera en que llega a la superficie, considerando los efectos debidos a la composición atmosférica y los movimientos de traslación y rotación de la tierra. Y finalmente describimos las características geométricas del comportamiento de la radiación solar para algún punto situado en la tierra.

En el capítulo 2 describimos brevemente los procesos mediante los cuales se puede aprovechar la energía solar, definiendo cada uno de ellos, explicando el sistema que siguen para la transformación, sus características, desarrollo y avance en la investigación.

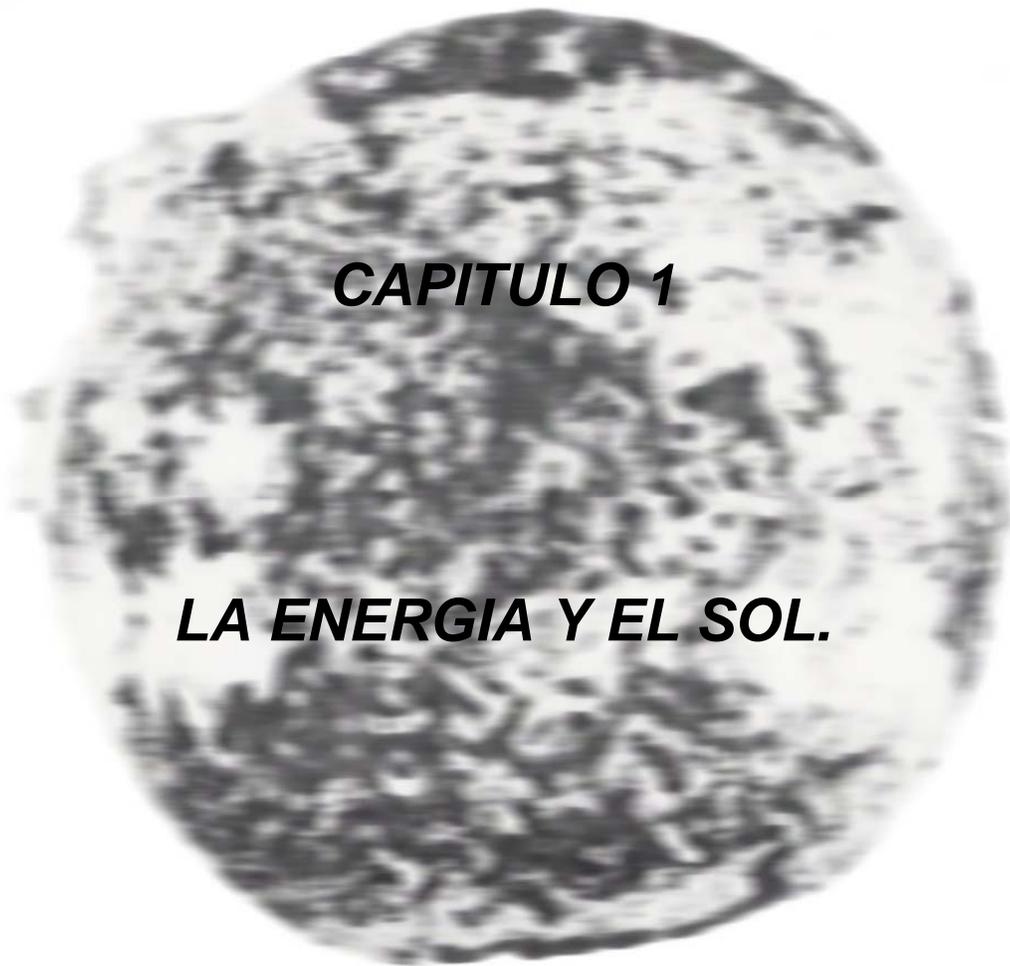
El proceso fototérmico basado en colectores solares lo consideramos en el capítulo 3. En él identificamos y diferenciamos los tipos de colectores solares, en resumen mostramos la teoría y los conceptos comúnmente manejados.

La construcción física de un concentrador solar tipo paraboloide de revolución, punto central de este trabajo, es presentada en el capítulo 4. En él relatamos y detallamos la manera en que es posible construir un concentrador, determinamos las dimensiones y configuración geométrica del elemento, consideramos los materiales y explicamos paso a paso el proceso mediante el cual se obtiene finalmente la estructura rígida del espejo solar pretendido. Al final del capítulo incluimos una serie de imágenes fotográficas que muestran el proceso constructivo que se llevo a cabo en las instalaciones del laboratorio de termofluidos.

Y finalmente en el último capítulo se describe un sistema de generación de energía eléctrica a partir de la concentración solar, considerando al elemento construido formando parte de tal sistema. En este capítulo detallamos los parámetros particulares del concentrador, explicamos cómo se lleva a cabo la captación de la energía solar y el proceso por el cual se llega a la obtención de la energía eléctrica, definimos los elementos que componen el sistema, su función y sus características propias.

Objetivos:

- Señalar la importancia que tiene la energía solar como una fuente de energía alternativa.
- Mencionar las formas de concentración para el aprovechamiento de la energía solar.
- Describir el diseño y construcción práctica de un colector solar tipo parabólico.
- Exponer la obtención de energía eléctrica a partir de la concentración solar.



CAPITULO 1

LA ENERGIA Y EL SOL.

1.1 ENERGIA.

Hemos incluido aquí como primer tema una serie de planteamientos relacionados con el término sobresaliente en el título del presente trabajo, el de energía. No es el propósito en esta investigación presentar un extenso estudio sobre el tema, pero dada la importancia y las implicaciones que presenta la energía para el desarrollo de los países, vimos la necesidad y la justificación de exponer este concepto tan amplio en tan sólo algunos de sus aspectos relevantes.

Uno de los términos muy usados o conocidos en el lenguaje común es el de energía, sin embargo, pocos son los que reflexionan acerca de la gran importancia y amplitud de aspectos que la involucran. Es imposible mencionar un fenómeno que no esté relacionado con él. En la búsqueda de un total conocimiento de nuestro mundo se han creado muchos conceptos como los de número, de tiempo, de espacio, etc., pero ninguno permite expresar tantas cosas relativas a su conocimiento, ni expresarlas y unirlos tan perfectamente entre sí como el concepto de energía. Nada puede producirse en el tiempo y en el espacio sin la intervención de la energía, y aún cuando el tiempo y el espacio se pueden representar en parte vacíos y sin acontecimientos, no se puede imaginar suceso alguno en el cual no tome parte la energía. La energía es un elemento real, esencial, de todas las cosas reales. La energía es lo real porque es lo que actúa;...”cualquiera que sea el acontecimiento que se considere, se indica la causa al mencionar las energías que en él intervienen. Es lo real, además, porque permite indicar el contenido del acontecimiento.”¹

No hay una descripción o definición simple de lo que es la energía, opuesta a una descripción de sus efectos. El Ing. Manuel Polo Encinas menciona que se ha señalado a la energía como uno de los factores esenciales del desarrollo tecnológico y la define como: “...esa capacidad de la materia que hace posibles las transformaciones que se operan en la misma materia.”. Menciona, también, que las conversiones energéticas necesarias para realizar esas transformaciones implican, la mayoría de las veces, una pérdida de esa capacidad de cambio tal que el proceso se hace irreversible y que esta degradación se cualifica y cuantifica por la entropía.²

¹ La energía. W. Ostwald.

²La entropía es un concepto interesante, del cual se hace énfasis en la segunda ley de la termodinámica. Se dice que el incremento de entropía o “desorden” en el universo esta degenerando la capacidad de realizar trabajo

Por otro lado, debemos mencionar que la energía aparece en diversas formas y puede transformarse de una a otra y que cualquier unidad de energía puede aplicarse a cualquiera de ellas.

La ley de la conservación de la energía es el principio que se basa en observaciones físicas, no sujeta a demostraciones matemáticas, que expresa que la energía no puede ser creada ni destruida sólo puede cambiar de forma. A simple vista que la materia se convierta en energía sería una excepción, pero “...los procesos atómicos y nucleares en los cuales la masa se convierte en energía según la ley de Einstein $E=mc^2$, solo indican que el concepto tradicional que separa masa y energía se ha hecho vulnerable. “ Puede decirse que la masa y la energía son dos formas diferentes del mismo fenómeno fundamental y que no difieren entre sí más de lo que difieren las energías térmica y mecánica.

Otro aspecto importante de la energía en cuanto al desarrollo tecnológico son los recursos energéticos, constituidos por reservas naturales. Los orígenes de las formas de energía (y por consiguiente de las reservas naturales) presentes en el mundo pueden reducirse a cuatro: la radiación solar, el calor subterráneo debido a la radiactividad natural, las fuerzas gravitacionales y rotacionales del sistema solar y las reacciones nucleares.

La energía almacenada se encuentra como yacimientos de combustibles fósiles, de materias nucleares, de acumulación de agua, de calor telúrico se puede presentar en otros estados antes de que el hombre la transforme en formas de más fácil uso.

Los combustibles fósiles, carbón e hidrocarburos, son recursos o fuentes de energía no renovables de los que dependen actualmente la mayor parte de las tecnologías industriales del mundo. Otras fuentes de energía se tienen en: la fusión nuclear, que es muy controvertida, la fusión termonuclear del hidrógeno, en la que se plantea obtener hidrógeno del agua que volvería a ser agua, una fuente ideal y sin peligros de contaminación, la energía hidráulica que es renovable, la energía geotérmica, la energía del viento y la energía solar.

Estas cuatro últimas ofrecen las ventajas de ser inagotables y de no presentar contaminación ni trastornos en su uso.

El tiempo de vida del sol es muy largo a escala humana por lo que con frecuencia a la energía solar se le denomina renovable, en contraste con los combustibles fósiles, no renovables, esto con relación al consumo actual y a la producción natural de los mismos.

1.2 EL SOL.

La importancia del sol en la existencia del hombre es ignorada en gran parte ahora que no es posible obtener nuestras propias fuentes de calor y de luz, ahora que ya no se interviene directamente en la producción de los alimentos y vestidos. La mayoría de la gente se alegra de la vuelta del sol tras un largo, y prolongado frío invernal en algunas regiones, pero su vuelta ya no provoca la adoración de aquellos tiempos primitivos, ni las predicciones de algunos fenómenos naturales constituyen un método útil para inspirar temor. Sin embargo, la vida depende de la continuidad de la radiación solar, y el suministro de energía controlada depende, en mayor parte del sol. Es sin duda el sol la fuente de casi toda la energía y seguirá siendo la más importante.

La energía que el sol emite por radiación tiene su origen, como se ha dicho, en procesos de fusión o unión de elementos químicos ligeros para formar otros más pesados. En esta reacción o síntesis nuclear se provoca una reducción de masa (del orden del 3%), y como consecuencia se libera una cantidad de energía equivalente a la masa perdida ($E=mc^2$).

El 90% de la masa del sol es helio e hidrógeno, aproximadamente en cantidades iguales en masa de dichos elementos. Es evidente que la síntesis nuclear de partículas ligeras en el sol deben ser responsables, fundamentalmente, el hidrógeno y el helio.

Para hacer posible el proceso fusión se requiere una elevadísima energía dinámica de partículas atómicas, la cual se logra con el plasma solar en el interior del astro, que se mantiene a una temperatura de 20×10^6 K. La misma energía liberada en la síntesis nuclear sostiene las condiciones propicias del plasma. El campo magnético solar desempeña un papel importante en el control de la propia actividad solar.

No obstante, del sol se escapa continuamente una cantidad de energía inmensa, computándose la potencia de emisión en 3.8×10^{23} Kw. para la superficie solar, estimándose que la actividad del plasma solar alcanza un radio de 7.5×10^9 Km. esto es, diez unidades astronómicas más allá del planeta plutón.

El sol presenta diversos niveles de temperatura desde 20×10^6 K en el interior, hasta 6000 K. en la fotosfera. Para el cálculo de la energía emitida por radiación, de acuerdo con la ley de Stefan – Boltzmann ($E = \sigma AT^4$) se toma como temperatura del cuerpo emisor la de la superficie, en este caso la de la fotosfera, o sea 6000 K.

Dónde :

E – es la cantidad de radiación proveniente de un cuerpo negro. [BTU/hr.] o [w]

σ – es la constante de Stefan – Boltzmann ($0.1713)(10^{-8})$ [BTU/(ft)² (hr)(°R)⁴] o 5.67×10^{-8} [w/m² K⁴]

A – es el área de radiación del cuerpo negro. [ft² o m²]

T – temperatura absoluta en la superficie. [°R o K]

1.3 ENERGIA SOLAR

El sol es la fuente de energía esencial para la sobrevivencia, como se intuyó desde la más remota antigüedad. La energía que nos radia el sol mantiene la vida sobre el planeta, él es quien mantiene todos los ciclos vitales y quien nos da la visibilidad y el calor.

La energía solar se define como la energía radiante transmitida por el sol e interceptada por la tierra. Sin el sol no existirían las fuentes de energía que el hombre suele utilizar, como son el gas, el petróleo, el carbón, la madera, los saltos de agua, el viento, las corrientes marinas, etc. Pero de toda esta gama de fuentes de energía que se han acumulado a lo largo de millones de años y que ahora estamos agotando rápidamente, mientras que otras de características renovables, apenas sí les hacemos caso por desconocimiento de los alcances que se pueden obtener.

La energía solar produce en la tierra la temperatura y las condiciones suficientes para mantener la vida, otra porción es consumida en el proceso de evaporación, precipitaciones, movimientos atmosféricos reservando una mínima cantidad a la energía captada por la clorofila de las plantas verdes. La energía solar hace posible que las plantas, al combinar el agua con el carbono liberen el oxígeno necesario para la vida.

La mayor parte de la energía utilizada en el mundo hasta ahora proviene de las reservas fósiles del carbón y el petróleo, pero al ser previsible el agotamiento de éstas, es preciso considerar su conservación y el empleo de otras fuentes energéticas.

De los combustibles fósiles emanan cuando son quemados, gases y partículas nocivas para la salud, como el óxido carbono o el óxido nítrico, en cambio, la energía solar es inagotable y

no produce contaminación. Los combustibles nucleares también proporcionan desechos radioactivos y calientan las aguas de refrigeración con el cambio de microclima.

Una inmensa cantidad de energía alimenta entre otros el motor de la climatología, calienta el aire y evapora el agua produciéndose el fenómeno del viento y las lluvias o nieve y otros procesos atmosféricos como las corrientes de ríos y arroyos.

La energía del sol es vital, razón fundamental para la existencia de la vida. La irradiación es extremadamente abundante pues en quince minutos el sol difunde sobre la tierra una cantidad de energía equivalente a las necesidades de los habitantes del planeta en un año. Para que dicho fenómeno se cumpla es necesario que el cielo esté claro y el sol radie verticalmente sobre la tierra.

Por otra parte debemos mencionar que la utilización de la energía solar por medio de células o colectores solares que se descubrió hace poco, concretamente en el año de 1954, y a lo largo de la década de los setenta se desarrolló su aplicación y finalmente se llegaron a algunas conclusiones que ésta fuente no es contaminante, es decir, no contamina por gases tóxicos, no calienta el medio ambiente (no calienta el agua de los ríos), no produce ruido ni residuos radioactivos. Finalmente desde este punto de vista, tiene un gran futuro la aplicación de la energía solar y sobre todo agrada a los opositores de la energía nuclear que eran los más escépticos hacia esta nueva fuente de energía.

1.4 HISTORIA DE LA ENERGÍA SOLAR.

La historia de la energía solar se remonta hasta los mismos límites de la prehistoria. El hombre ha utilizado la energía solar desde la antigüedad, basta pensar en los barcos de vela, los molinos de viento, las salinas, etc.

El gran matemático y físico Arquímedes ya utilizaba la energía solar pues prendió fuego a la flota romana en la segunda guerra púnica con la ayuda de un espejo esférico, formado con escudos metálicos, y del fuerte sol de la zona. Después de Arquímedes, durante la época del imperio romano hubo poco progreso en las aplicaciones de la energía solar hasta el renacimiento.

Más al sur, concretamente al otro lado del mediterráneo la ciencia florecía en el mundo árabe, pero se tiene pocas noticias de la utilización de la energía solar mediante dispositivos solares artificiales. Se produjeron grandes avances en astronomía, matemáticas y otras ciencias por los hombres cultos del imperio musulmán, solo queda la curiosidad sobre lo que pudieran haber hecho para poner a trabajar el sol en esa soleada región.

Posteriormente las semillas de la ciencia se transplantaron lentamente a Europa con el resurgir del comercio marino que, estimulado por las cruzadas, emergió con mayor vigor en la época del renacimiento. Finalmente se ven pruebas palpables de un renacer del interés sobre la energía solar en los siglos que se avecinan.

1.4.1 El siglo XVII

Dieciocho siglos después, Athanasius Kircher hizo algunos experimentos para prender fuego a una pila de madera situada a cierta distancia con objeto de ver si la historia de Arquímedes tenía alguna validez científica. Las lentes utilizadas para hacer arder habían sido sin duda los medios principales de utilizar la energía solar.

En 1615, Salomón de Caux publicó la descripción de un motor solar práctico. Utilizaba un cierto número de lentes de vidrio y los monto en un marco que concentraban los rayos solares sobre una cámara de metal estancado parcialmente lleno de agua. Con la luz solar que entraba hacía calentar el aire que se dilataba forzando así al agua a salir en forma de una pequeña fuente, reflejando el resucitar del interés por la energía solar.

En 1695, en Florencia donde los experimentos de Averani y Targioni intentaron fundir un diamante con ayuda de un espejo. De este experimento se tuvieron pocas noticias pero lo que sí se sabe es que el diamante no se funde, sino que se sublima (evapora sin fusión).

1.4.2 El siglo XVIII.

El famoso naturalista George Louis Leclerc Buffon construyó el primero de los muchos hornos solares franceses con espejos múltiples, arte que aún brilla con excelencia en dicho país. El más grande se componía de 360 pequeños espejos planos montados por separado que enviaban la luz solar a un foco común.

En 1747, el astrónomo francés Jacques Cassini, construyó una lente de 112 cm. de diámetro que presentó a Luis XV. Cassini pudo obtener temperaturas superiores a los 1000°C., que eran suficientes para fundir en pocos segundos una varilla de hierro y fundir la plata hasta un estado tan fluido que al derramarla sobre agua fría producía filamentos tan finos como cabellos.

Antoine Laurent Lavoisier, fundador de la química moderna experimentó con hornos solares. El horno lo construyó con dos láminas curvadas de vidrio montadas en forma de lente biconvexa. El espacio entre las láminas se rellenó con alcohol. La lente líquida tenía un diámetro de 130 cm. y una distancia focal de 320 cm. La potencia de esta gran lente de líquido era insuficiente para obtener temperaturas elevadas en el foco, de modo que se colocó cerca del foco una lente menor para hacer mucho más corta la distancia focal efectiva logrando fundir platino a 1760°C.

1.4.3 El siglo XIX.

John Herschel, astrónomo inglés construyó un dispositivo simple para su empleo práctico. Consistía simplemente en una caja negra enterrada en la arena para conseguir su aislamiento, dotada de una doble capa de vidrio que permitía entrar el calor del sol impidiendo que se escapase luego. Se registró una temperatura de 116°C., logrando cocinar carne y verduras.

Los intentos iniciales para convertir la energía solar en otras formas de energía giraron alrededor de la generación de vapor a baja presión para hacer funcionar máquinas de vapor. August Mouchot fue el pionero en este campo construyendo y haciendo funcionar varias máquinas de vapor movidas por energía solar. La evaluación de una de ellas construida en Tours por el gobierno francés demostró que era demasiado cara para considerarla factible.

John Ericsson, que adquirió gran fama durante la guerra de secesión, también prestó atención a los motores de energía solar. Inventó el ciclo Ericsson del motor de aire caliente para la conversión del calor solar en fuerza motriz, utilizando un colector en forma de paraboloide. Su modelo, utilizaba una superficie reflectora cilíndrica con forma parabólica.

1.4.4 El siglo XX.

En los inicios del siglo XX se produjeron desarrollos muy significativos. Las patentes obtenidas dieron pruebas de la existencia de nuevas ideas para combinar los sistemas de vapor mediante el calor solar y baterías de almacenamiento para posibles sistemas de energía.

Samuel Pierpont Langley aprovechando el calor solar creó una cocina en lo alto del Monte Whitney en donde la construyó. Más tarde Charles G. About, en 1916 también construyó un horno que fue sometido a varias pruebas para comprobar su funcionamiento durante varios años en el Monte Wilson. En Pasadena del Sur, se construyó un gran colector focal en forma de cono truncado que producía 4.5 HP utilizando un área de $14 \text{ m}^2 \text{ Hp}^{-1}$. H. E. Wilsic y John Boyle construyeron cuatro motores solares y posteriormente uno de 6 HP y otro de 20 HP que utilizaban agua y anhídrido sulfuroso.

Con el inicio de la Segunda Guerra Mundial el mundo entró en un período tormentoso y el estudio de cosas tan mundanas en esa época como la utilización de la energía solar fue dejada de lado en espera de una mejor ocasión. Cuando resurgió y con renovada esperanza el estudio de la energía solar al mismo tiempo que emergió la visión de las fronteras ilimitadas de la ciencia.

A partir de 1973, la energía solar ha sido de múltiples investigaciones, y sin necesidad de técnicas complicadas cada vez encuentra más aplicaciones sumamente prácticas y atractivas en variadas áreas, como son, en la calefacción y enfriamiento de edificios, calentamiento de agua para consumo doméstico, bombeo de agua para riego etc.

1.5 NATURALEZA DE LA ENERGIA SOLAR.

Al incluir el tema de la naturaleza de la energía solar nos referimos a las características que presenta el sol causantes de esa enorme cantidad de energía que se desprende de él en forma de radiaciones.

Se ha definido al sol como una estrella o un enorme globo de gases incandescentes de 1.4 millones de Km. de diámetro, y, en relación con la tierra, de una masa 334,000 veces mayor y de un volumen 1.3 millones de veces el de ella. La temperatura en su interior es de 12 a 21 millones de grados, en la superficie se estima de 5,800 a 5,900 °C y la energía irradiada en todas direcciones es de 3.7×10^{23} (cerca de 8,000 W/cm²).

Esta extraordinaria cantidad de energía se origina de las reacciones de fusión nuclear en las cuales el hidrógeno se va transformando progresivamente en helio, que da como resultado una aniquilación de masa de 0.7%, que se convierte en energía, lo que equivale a una pérdida de masa por el gran consumo de hidrógeno en el sol en realidad es muy lenta ya que respecto de su masa total del orden de 22×10^6 toneladas, pierde solamente $2 \times 10^{-20}\%$ de su masa por segundo. En el transcurso de 6,000 millones de años el sol habrá consumido solo el 10% de su hidrógeno, esto le da su cualidad de ser una fuente de energía inagotable.

Hemos mencionado que las reacciones de fusión nuclear que se producen en el núcleo del sol dan como resultado la transformación de masa en energía. Esta energía es liberada en forma de radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia. La teoría más aceptada, que es difícil de comprender y visualizar pero permite describir y predecir como actuará la radiación, representa a las radiaciones electromagnéticas como una vibración ondulatoria de campos eléctricos y magnéticos o como un flujo de partículas llamadas fotones.

La radiación, que se clasifica por su longitud de onda, se emite desde la superficie del sol en todas las longitudes que van desde las más largas, las de radio, hasta las más cortas, las de rayos x y gamma. A cortas longitudes de onda, muy altas frecuencias, el sol radia la mayor parte de su energía, a una temperatura media de 5,500°C.

La longitud de onda se mide en micras, una micra es la millonésima parte de un metro. Las longitudes de onda de 0.35 a 0.75 micras corresponden a la luz visible, a la cual es sensible el ojo humano. Se compone de todos los colores familiares que van desde el violeta, de cortas longitudes de onda (0.35 micras), siguiendo el azul, el verde, el amarillo, el naranja, y el rojo de largas longitudes de onda (0.75 micras).

El 49% de la radiación emitida por el sol se presenta en forma de calor con una longitud de onda más larga que el rojo del espectro visible, mayor de 0.75 micras.

Del sol se desprende toda la radiación electromagnética con un flujo uniforme de rayos divergentes, viajando en el espacio a la velocidad de la luz (300,000 Km por segundo). De esta radiación la tierra intercepta, a una distancia de 150'000,000 de Km del sol, una pequeña cantidad donde los rayos pueden considerarse paralelos, aproximadamente intercepta dos billonésimas partes de la radiación que emite el sol, cerca de treinta y cinco mil veces la energía total utilizada por la humanidad en un año.

Hasta aquí se ha considerado y expuesto en forma sencilla las características que presenta el sol para proveer o generar esa gran cantidad de energía mencionada y la manera en que se difunde en el espacio. Lo siguiente es conocer la forma en que la radiación electromagnética es interceptada por la tierra. Esto lo abordamos en el siguiente tema.

1.6 INCIDENCIA DE LA RADIACION SOLAR SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE.

En esta parte consideramos la manera en que la radiación electromagnética emitida por el sol llega a la atmósfera terrestre y a su superficie, además de los aspectos que son necesarios conocer para poder aprovechar de alguna u otra forma a la energía solar.

1.6.1 Radiación sobre la atmósfera terrestre.

Dentro de los conceptos manejados es tomada en cuenta la cantidad de radiación solar que es interceptada fuera de la atmósfera terrestre por unidad de superficie en la unidad de tiempo. Se considera un valor de 1164 Kcal. de energía que interceptaría un metro cuadrado de algún material colocado en el exterior de la atmósfera terrestre y perpendicular a los rayos solares. Este valor es conocido como la constante solar y es equivalente a 1,353 W. por metro cuadrado y por hora o a $2 \text{ cal.cm.}^2\text{min.}^{-1}$ aproximadamente.

La figura 1.1 muestra la distribución de energía entre las diferentes longitudes de onda en la radiación solar que incide sobre la atmósfera exterior, que es en esencia, la misma de un radiador perfecto, o cuerpo negro, calentado a 6,000° C. La línea continua muestra una distribución típica sobre la superficie de la tierra.

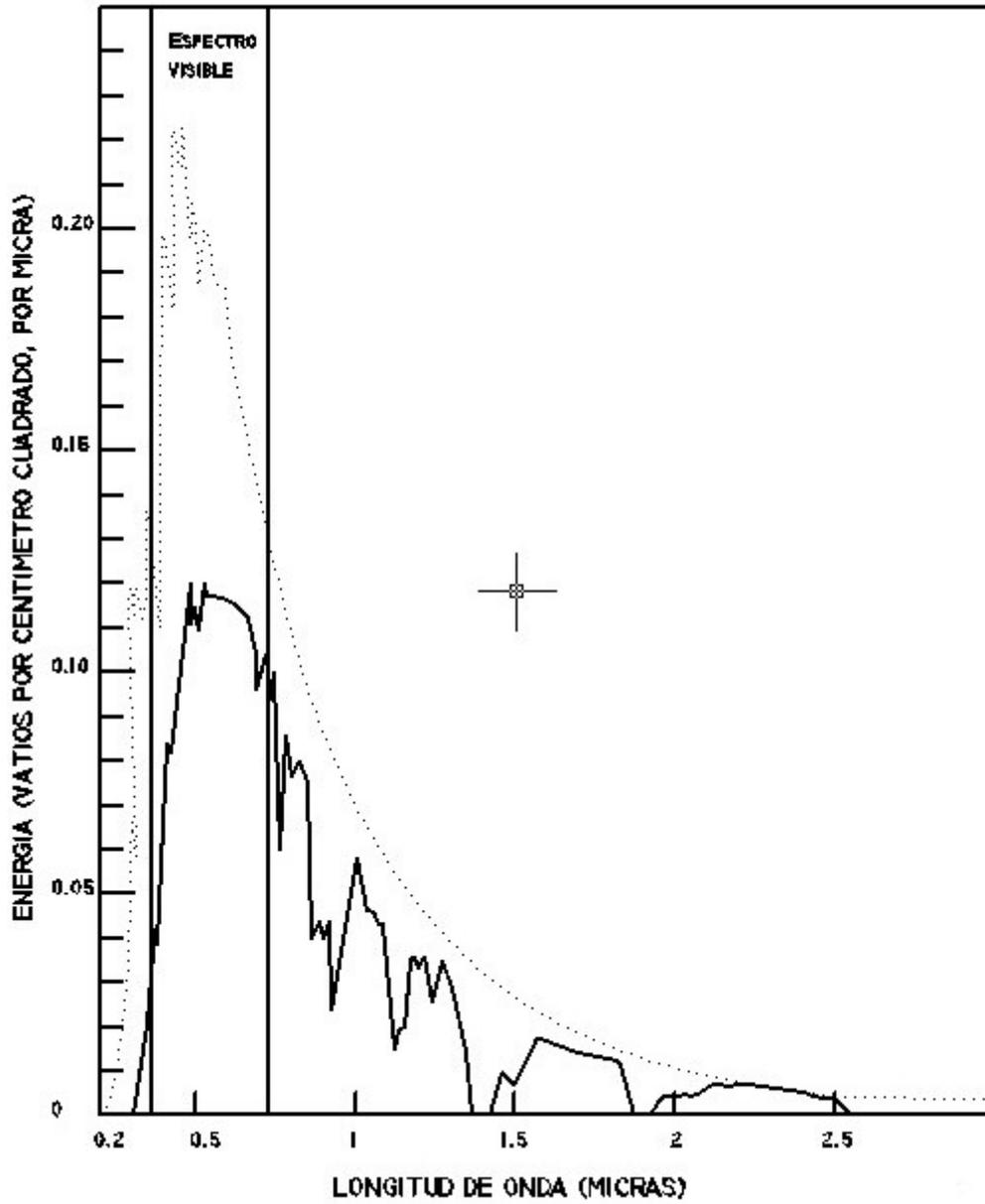


Fig. 1.1 Distribución de la energía solar en las diferentes longitudes de onda.

La radiación total que intercepta la atmósfera es de 2.4×10^{15} Kcal.min⁻¹ o de 1.7×10^{14} KW y varía únicamente en 3.3 por ciento, a medida que la tierra, por su órbita elíptica, se aproxima o se aleja del sol.

En la intercepción de la radiación solar por una superficie, o incidencia sobre la superficie, como en la atmósfera, se presenta, entre otros, el fenómeno de la reflexión.³ La radiación incidente en la atmósfera terrestre es reflejada en gran parte por la superficie exterior de las nubes y por la misma atmósfera, después, al atravesar esta, otra parte es absorbida o dispersada (difractada) por las moléculas de aire. De esta radiación difractada una parte llega a la superficie de la tierra desde todas las direcciones de la bóveda celeste.⁴

Aproximadamente un tercio de la energía incidente es refractada y reflejada por las nubes y las partículas de polvo en la atmósfera, el vapor de agua, anhídrido carbónico y el ozono absorben otro 10 a 15%. En la atmósfera superior, el ozono elimina toda la radiación ultravioleta de alta frecuencia⁵, el vapor de agua y el anhídrido carbónico de la atmósfera inferior absorben parte de la radiación, en particular en la banda de infrarrojos.

Además de los aspectos anteriores otro factor muy importante que determina el total de radiación solar que alcanza la superficie de la tierra es el espesor de atmósfera que debe atravesar. El mínimo espesor se tiene a mediodía cuando los rayos solares atraviesan perpendicularmente la atmósfera y, en condiciones de cielo despejado, el valor de la radiación solar sobre una superficie horizontal es el máximo en el ecuador. El movimiento del sol con respecto a la tierra es de este a oeste barriendo un arco de 15° cada hora en todas las latitudes. A la puesta del sol, al amanecer, y con el sol en el horizonte, al atardecer, los rayos solares siguen un trayecto oblicuo más largo para llegar a la superficie de la tierra por lo que el contenido energético es menor al aumentar el espesor de atmósfera que deben atravesar ya que implica un aumento en la absorción y en la difracción.

La tierra gira una vez por día alrededor de un eje que va del polo norte al polo sur, inclinado 23.47° respecto al plano que forma la órbita terrestre alrededor del sol donde sigue un trayecto ligeramente elíptico. La variación del clima en las estaciones es debido a la

³ Cuando la radiación solar incide sobre la superficie de un material, puede suceder que: la radiación se refleje, se transmita y/o sea absorbida.

⁴ El color azul del cielo despejado se debe a la radiación difractada primariamente en la zona azul del espectro visible.

⁵ La radiación ultravioleta podría causar quemaduras y perjudicar a la vista e incluso resultar letal por encima de dosis moderadas.

inclinación del eje de la tierra que es constante alrededor de la órbita solar. En los meses de verano el hemisferio norte esta inclinado hacia el sol, recibiendo más horas de asoleo y la radiación solar incide más perpendicularmente a la superficie de la tierra, situación contraria en invierno que recibe menos horas de asoleo, a un ángulo menor, mientras que es verano en el hemisferio sur.

En resumen por la reflexión, la absorción y la difracción en la atmósfera, además de que el espesor de atmósfera que la radiación solar debe atravesar para llegar a la superficie terrestre varía debido a la traslación y a la rotación de la tierra, la intensidad de la radiación depende de la hora del día, el día del año, la latitud del punto considerado y de la limpidez atmosférica.

Ahora veamos las características de la intensidad de la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre después de atravesar la atmósfera.

1.6.2 Radiación sobre la superficie terrestre.

A consecuencia de los fenómenos de reflexión, absorción y dispersión de la radiación solar, las $2 \text{ cal. cm}^{-2}\text{min}^{-1}$ incidentes en la atmósfera exterior se reducen de tal manera que cuando alcanzan la superficie de la tierra su valor está entre 1.5 y $0 \text{ cal. cm}^{-2}\text{min}^{-1}$.

De esta radiación parte es radiación directa, radiación que llega sin haber tenido cambios en su dirección, otra parte es radiación difusa, la dispersada por la atmósfera, que no tiene una dirección precisa y puede llegar a valer el 50% del total cuando el sol esta bajo en el horizonte y el 100% para un cielo completamente nublado. Sin embargo, en días despejados la radiación difusa sólo representa una pequeña parte del total.

Dentro ya de las técnicas de captación y utilización de la energía solar se hace necesario conocer el comportamiento de la radiación solar incidente sobre superficies determinadas. Por lo pronto se puede decir que una superficie que intercepta a la radiación solar, que decíamos viaja en rayos prácticamente paralelos, interceptará la mayor proporción de energía si esta superficie se encuentra perpendicular a dichos rayos. Si la superficie y los rayos se desvían de la perpendicular decrecerá la energía interceptada, pero aún, una desviación de hasta 25° intercepta más del 90% de la radiación directa. El ángulo que los rayos solares forman con una perpendicular a la superficie, llamado ángulo de incidencia, determina el porcentaje del asoleo directo que intercepta la superficie. Para esto se debe calcular los ángulos solares que comprenden la altura solar y el azimut solar, y que dependen fundamentalmente de tres factores que son la latitud del lugar, la declinación y el ángulo horario.

Si tenemos en mente la cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie de la tierra, (mencionamos que su valor está entre 1.5 y 0 cal. $\text{cm}^{-2}\text{min}^{-1}$) consideremos lo siguiente para tener una idea de la cantidad de energía que podría ser aprovechada.

La unidad comúnmente utilizada para medir la radiación solar es en langley por minuto, 1 langley vale una caloría por centímetro cuadrado. Entonces,...”suponiendo una radiación solar de 1 langley min^{-1} , un metro cuadrado recibe 10,000 cal. min^{-1} ,o bien, 10 Kcal min^{-1} . Un techo de un edificio de 100 m^2 recibirá un millón de calorías por minuto. Suponiendo una media de 1 langley min^{-1} durante 500 minutos al día (algo más de 8 horas, o un tercio del día de 24 horas), el techo de 100 m^2 recibe, en un día caluroso, 5×10^8 Cal o bien 500,000 Kcal día^{-1} . Este calor es equivalente a quemar el peso de un hombre en carbón o 53 litros de gasolina. Convertido a energía eléctrica con un rendimiento del 10 por ciento se podría obtener una media de 56 Kwh mientras haya sol.”⁶...

⁶ Tecnología y aplicaciones de la energía solar. J Richard Williams.

1.7 ANGULOS SOLARES.

En párrafos anteriores se había mencionado que la mayor cantidad de energía solar sobre un área o plano se capta cuando éste se presenta perpendicular a los rayos solares. Por esto es fundamental, en la mayor parte de los elementos captadores de energía solar, saber orientar el plano en dirección de los rayos incidentes sobre la superficie de la tierra en el lugar específico en que se trabaje.

Realmente no es que todos los sistemas captadores de energía solar estén contruidos en forma de superficies planas, sino que se relacionan de alguna manera con un área plana de referencia. Recordemos también que para un observador situado en algún punto determinado en la tierra, la radiación solar incidente varía su dirección a través de un día, a medida que la dirección varía en el cielo, y además esta variación no sigue el mismo comportamiento durante todos los días del año. Esto se hace evidente cuando notamos que la sombra de algún objeto inmóvil sigue un recorrido a lo largo de distintos momentos durante el año.

Para poder aprovechar a la energía solar en su máxima capacidad es importante conocer cómo se desplaza el sol en el firmamento y cómo es recibida esta energía en un punto específico en la tierra. Es necesario entonces adentrarnos con suficiente claridad y amplitud en el campo de la astronomía. En las siguientes líneas abordaremos brevemente algunos conceptos que nos serán de gran utilidad en nuestro propósito de aprovechar al máximo la energía solar.

1.7.1 La bóveda celeste.

En esta sección nos interesa conocer el movimiento del sol y de la tierra, lo que nos lleva a enfrentar el problema geométrico de definir los puntos en la bóveda celeste, como se hace para cualquier otro astro en ella.

Todo lo que hay en el cielo se mueve. El sol, la luna, los planetas y también las estrellas se están moviendo en sus respectivas órbitas. Como las estrellas están tan alejadas, no es fácil detectar su movimiento ni siquiera observándolas durante docenas de años, pero el sol, la luna y los planetas están mucho más cerca y su movimiento respecto de las estrellas se detecta fácilmente.

La bóveda celeste la podemos describir como una esfera que rodea al observador situado en el centro y en ella se encuentran aparentemente todos los astros que se pueden observar.

El cenit (Z) es el punto situado en línea recta sobre la cabeza del observador y el nadir (Na) es el punto situado en el lado opuesto, bajo los pies del mismo.

1.7.2 Coordenadas horizontales.

El eje que va del cenit al nadir corta ecuatorialmente al plano del horizonte, el cual se toma como referencia para estas coordenadas. Hay otros planos que pasan por el cenit y el nadir que son los coluros y que cortan a la bóveda como círculos máximos, estos planos pasan por la posición central en que se encuentra el observador.

El eje que atraviesa a la esfera en dos puntos denominados polo norte (P.N) y polo sur (P.S) y en el cual se supone gira diariamente la bóveda, se encuentra contenido en el coluro llamado meridiano que viene del latín meridiem, medio día, esto significa que es el plano en el que se encuentra el sol en la bóveda cuando se habla de medio día.

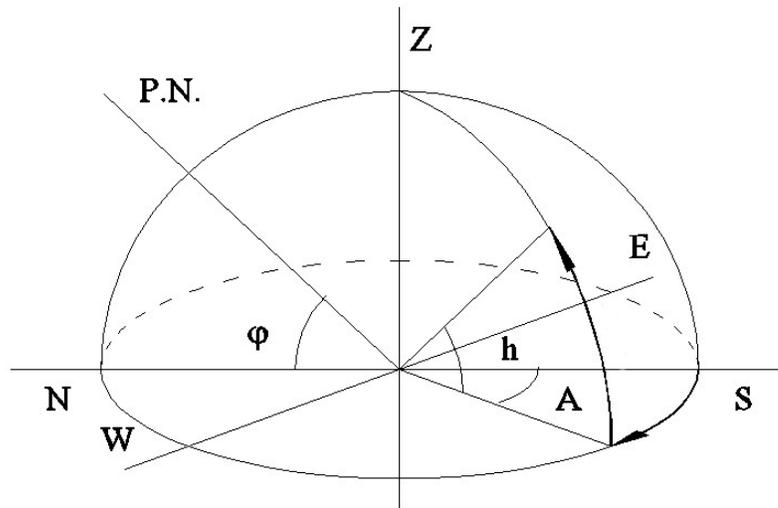


Fig. 1.2 Coordenadas horizontales

Ahora, de acuerdo con la geometría bastan dos ángulos, si consideramos el radio de la esfera celeste como la unidad, para tener las coordenadas que definen cualquier punto de la

bóveda. El azimut (A) es el ángulo medido en el plano del horizonte a partir del meridiano y podría valer desde 0 hasta 360°, pero cuando se trata del sol es conveniente medirlo desde 0 hasta -180° comenzando en el punto sur (S) del horizonte hacia el este (E) y terminando en el punto norte (N) del mismo, y desde 0 hasta +180°, comenzando en el sur y dirigiéndose al norte por el oeste (W). La altura (h) es el ángulo trazado elevándose desde el horizonte, 0°, hasta el cenit, +90°. Por debajo del horizonte se consideran alturas negativas.

Si consideramos diferentes puntos para el observador en la tierra se tiene que la bóveda celeste es diferente para cada uno de ellos. Además el polo norte y el polo sur se encuentran fijos en la bóveda dado que el eje de giro diario pasa por ellos.

Todos los astros, incluyendo las estrellas fijas, dan una vuelta diurna de forma que muchos de ellos aparecen por la parte del horizonte que esta cercana al este (orto del astro) y se ocultan por la parte del horizonte que esta hacia el oeste (ocaso). Hay algunos astros que están cercanos al polo, y que no desaparecen bajo el horizonte, llamados circumpolares, que hacen la excepción. Aún así se tiene el problema de que ningún astro tiene azimut y altura fijos, pues ambos están cambiando continuamente por ello se requiere definir unas coordenadas que observen dicho problema y que tengan valor universal.

1.7.3 Coordenadas ecuatoriales.

Dar la localización de un objeto en el cielo, significa especificar su distancia a puntos o líneas de referencia conocidos. La principal línea de referencia es el ecuador celeste. Las distancias se refieren no a distancias en el espacio sino a distancias angulares.

El ecuador celeste es el plano que refiere al círculo máximo perpendicular al eje polo norte- polo sur y que es en sí la proyección del ecuador terrestre. El ángulo horario (ω) es el ángulo medido en este plano que puede ir de 0 a 360°, o de 0 a 24 si lo medimos en horas, correspondiendo un giro de 15° por cada hora. El meridiano del lugar que sabemos contiene al cenit al nadir y a los dos polos se toma generalmente como origen, contando un ángulo positivo partiendo del meridiano, en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj.

Los astrónomos utilizan los ángulos para expresar distancias en el cielo. Dicen por ejemplo que la luna está a 8° de una estrella determinada, queriendo con ello significar que si

con un brazo apuntamos a la luna y con el otro a la estrella, el ángulo que forman nuestros brazos es de 8°. De esta forma puede describirse la extensión y localización de cualquier objeto celeste.

La declinación (δ) es el ángulo que se mide en el meridiano que pasa por el astro concreto y que es positivo de 0° a 90° en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur.

Para determinar las coordenadas universales es preciso tomar como origen un punto que este fijo en el ecuador y que gire con la bóveda celeste, ya que el ángulo horario varía continuamente mientras que la declinación se mantiene constante. Este punto es el llamado punto vernal o punto Aries (Υ). Al ángulo medido a partir de Υ se le llama ascensión recta (α) y va desde 0° hasta 360°, o también de 0 a 24 horas, siendo positivo si se mide en sentido contrario a las manecillas del reloj.

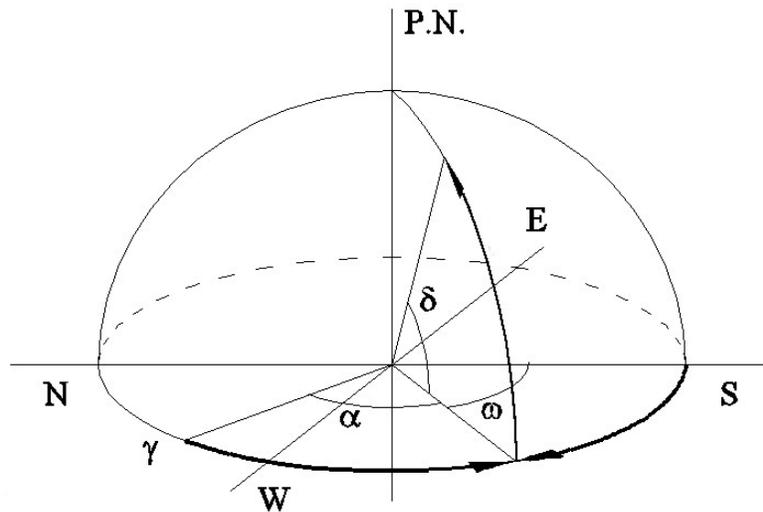


Fig. 1.3. Coordenadas ecuatoriales

Un nuevo día sidéreo, dividido en 24 horas comienza cada vez que el punto Aries, considerado fijo, pasa por el meridiano. Tenemos que el tiempo sidéreo local viene dado por la fórmula:

$$TSL = \alpha * + \omega *$$

donde * puede significar cualquier astro o cualquier punto de la bóveda.

Por tanto la fórmula es válida también para el punto vernal:

$$TSL = \alpha_{\Upsilon} + \omega_{\Upsilon} = \omega_{\Upsilon}$$

Ya que la ascensión recta del punto vernal es cero, por definición. Así que es lógico definir el tiempo sidéreo local como el ángulo horario del punto vernal. Pero por otra parte todos los puntos del meridiano tienen ángulo horario nulo, así que para ellos ese tiempo será:

$$TSL = \alpha_m$$

y por lo mismo queda definido también como la ascensión recta del meridiano del lugar.

Ascensión recta y declinación son coordenadas universales y son las que aparecen en todos los catálogos celestes. Estas coordenadas son en principio constantes, cuando de estrellas fijas se trata, y variables cuando se habla de planetas, cometas, asteroides o cualquier objeto celeste que sea errante, y no se puede excluir de entre ellos ni al sol ni a la luna.

1.7.4 Transformación de coordenadas.

Se puede pasar de unas coordenadas a otras utilizando unas fórmulas de transformación en el caso, por ejemplo, que partiendo de conocer las coordenadas ecuatoriales vistas en un catálogo necesitaríamos saber que azimut y altura tiene un astro en un momento concreto, o al contrario que conociendo el azimut y la altura de otro astro se quisiera saber que coordenadas tendrá en un catálogo. Estas fórmulas se deducen fácilmente siguiendo la trigonometría esférica, y son:

$$\text{Sen } h = \text{sen } \delta \text{ sen } \varphi + \text{cos } \delta \text{ cos } \varphi \text{ cos } \omega$$

$$\text{cos } A = \frac{-\text{sen } \delta + \text{sen } \varphi \text{ sen } h}{\text{cos } \varphi \text{ cos } h}$$

Estas nos permiten pasar de ecuatoriales a horizontales, en ellas φ es la latitud del lugar, y también la altura del P.N. sobre el horizonte.

El paso inverso, que nos permite conocer las coordenadas ecuatoriales a partir de las horizontales nos dan las fórmulas:

$$\text{sen } \delta = \text{Sen } h \text{ sen } \varphi - \text{cos } h \text{ cos } \varphi \text{ cos } A$$

$$\cos \omega = \frac{\text{sen } h - \text{sen } \varphi \text{ sen } \delta}{\cos \varphi \cos \delta}$$

y también:

$$\text{tg } \omega = \frac{\text{sen } A}{\text{sen } \varphi \cos A + \cos \varphi \text{ tg } h}$$

La relación entre ángulo horario y ascensión recta la conocemos de la definición de tiempo sidéreo local:

$$\alpha = \text{TSL} - \omega$$

Recordemos que:

- h es altura
- A azimut
- δ declinación
- ω ángulo horario
- α ascensión recta
- φ latitud del lugar

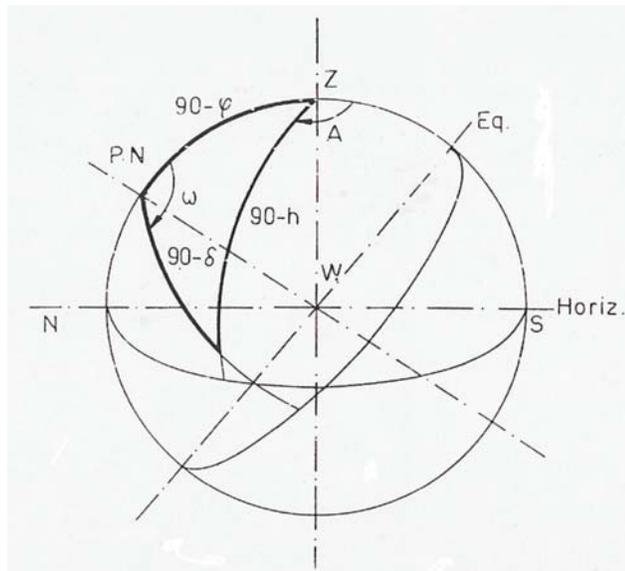


Fig. 1.4. Transformación de coordenadas.

La demostración de las fórmulas anteriores es sencilla, conociendo el teorema del coseno de la trigonometría esférica. Esta se define sobre la superficie esférica de radio unidad. En ella se pueden dar las relaciones existentes entre los ángulos y lados de los triángulos esféricos.

Al adentrarnos a la relación que guardan más específicamente la tierra y el sol, consideremos las siguientes reflexiones.

Estamos familiarizados con el movimiento diurno del sol, por el cual sale, se desplaza por el cielo y se pone, y con el movimiento debido a la rotación y traslación de la tierra sobre su eje hacia el este. La tierra se mueve tan suavemente en su órbita que en realidad no notamos su desplazamiento y nos parece que es el sol el que se desplaza por el cielo.

1.7.5 La eclíptica

La trayectoria que aparentemente describe el sol por el cielo en un año, se llama eclíptica. Ya que el movimiento aparente del sol es debido al movimiento orbital de la tierra es fácil comprender que la eclíptica es la proyección en el cielo de la órbita terrestre. Si la esfera celeste fuera una enorme pantalla iluminada por el sol situado en el centro, la sombra que proyectaría la órbita de la tierra, sería la eclíptica como se observa en la figura 1.5.

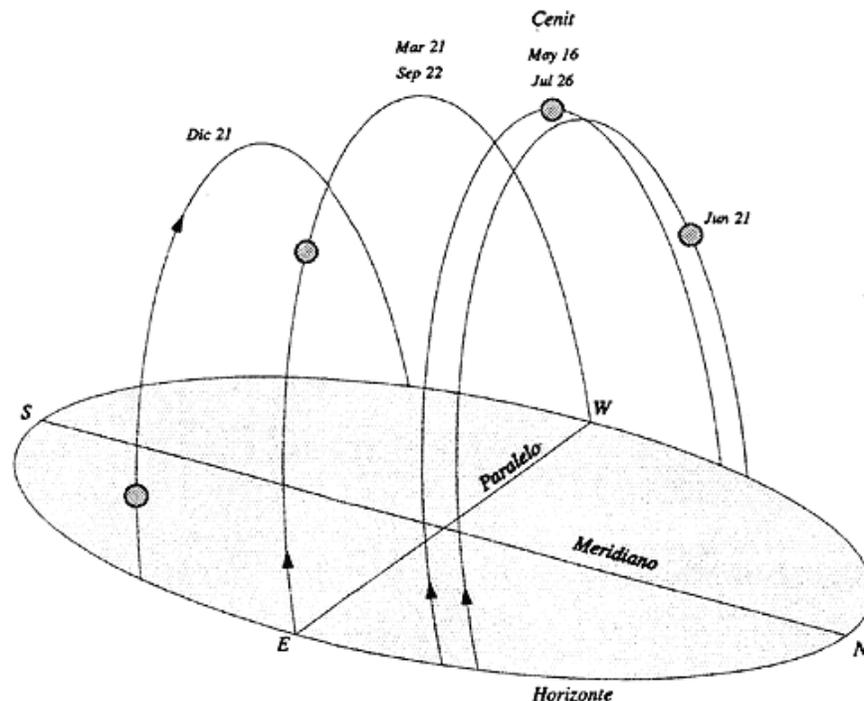


Fig. 1.5. Proyección en el cielo de la órbita de la tierra.

Debido a la rotación de la tierra, no es fácil detectar ese lento desplazamiento del sol hacia el este. Puesto que la tierra gira sobre si misma una vez al día, veremos que el sol, la luna, las

estrellas y los planetas salen por el este y se ponen por el oeste. Pero a la vez que tiene lugar este movimiento diurno el se va desplazando hacia el este sobre la eclíptica a razón de aproximadamente 1° diario, lo cual viene a representar dos veces su diámetro angular.

La eclíptica y el ecuador celeste se cortan en dos puntos de la esfera celeste llamados equinoccio vernal o equinoccio de primavera y es el punto en que el sol cruza al ecuador celeste para pasar al hemisferio norte y el equinoccio autumnal o de otoño es el lugar en que lo cruza para pasar al hemisferio sur.

Sobre la eclíptica pueden identificarse otros dos puntos de referencia, que corresponden a los lugares en que el sol está más alejado del ecuador celeste y son llamados solsticio de verano y solsticio de invierno. Estos cuatro puntos de referencia sobre la eclíptica son importantes pues cada uno de ellos marca el inicio de una de las estaciones.

El planeta Tierra es, aproximadamente, esférico con un diámetro de cerca de 7900 millas. Efectúa una rotación alrededor de su eje cada 24 horas y completa una revolución alrededor del Sol en un período de $365\frac{1}{4}$ días, aproximadamente.

La Tierra se desplaza alrededor del Sol en una trayectoria casi circular con el Sol localizado ligeramente fuera del centro del círculo. Alrededor del 1° de enero la Tierra está en su posición más cercana al Sol, mientras que el 1° de julio, aproximadamente está en la más remota, la cual es cerca de un 3.3 % más lejos. Por esto la Tierra recibe un 7% más de radiación en enero que en julio, puesto que la intensidad de la radiación incidente sobre la atmósfera varía inversamente con el cuadrado de la distancia. El eje de rotación de la Tierra está inclinado 23.47 grados con respecto a su órbita alrededor del Sol. La posición inclinada de la Tierra tiene un profundo significado, pues junto con la rotación diaria y la revolución anual, gobierna la distribución de la radiación solar sobre su superficie, la longitud variable del día y la noche y el cambio de estaciones.

La fig. 1.6 muestra el efecto de la inclinación del eje de la Tierra en los distintos períodos del año. Durante el solsticio de invierno (aproximadamente el 22 de diciembre) el polo norte está inclinado 23.47 grados alejándose del Sol. Todos los puntos de la superficie por encima de los 66.53 grados de latitud norte están en total oscuridad mientras que todas las regiones dentro de 23.47 grados del polo sur reciben continuamente la luz del Sol, esto se puede apreciar en la Fig. 1.7. Lo contrario sucede durante el *solsticio de verano*, cerca del 22 de junio. En la época de los dos *equinoccios* (22 de marzo y 22 de septiembre, aproximadamente), ambos polos están equidistantes del Sol y todos los puntos sobre la superficie de la Tierra tienen 12 horas de día y 12 horas de noche.

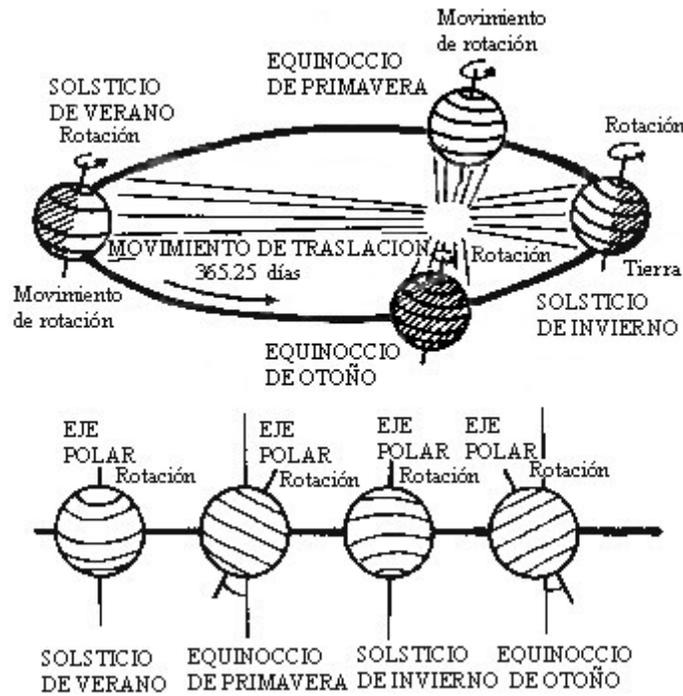


Fig. 1.6 La revolución de la tierra alrededor del Sol.

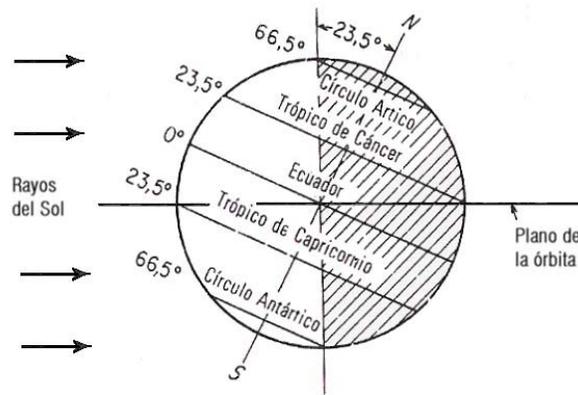


Fig. 1.7 Posición de la tierra en relación con los rayos solares en la época del solsticio de invierno.

A causa de su eje inclinado, la superficie de la Tierra se ha dividido en 5 zonas. La *zona tórrida* incluye todos los lugares donde el Sol está en el cenit (perpendicular a la superficie de la Tierra) al menos una vez al año. La zona tórrida se extiende 23.47 grados a cada lado del ecuador. Las *zonas templadas* incluyen todos los lugares donde el Sol aparece todos los días en el horizonte, pero nunca en el cenit. Las zonas templadas se extienden en latitudes de 23.47 grados a 66.53 grados (norte y sur). Las *zonas frías* incluyen todos los lugares donde el Sol

permanece por debajo del horizonte (o sobre él) al menos un día completo cada año. Las zonas frías se extienden 23.47 grados desde los polos.

Los equivalentes celestes de la longitud y la latitud terrestres son la ascensión recta y la declinación, y se hallan basados en el ecuador celeste. La latitud y longitud celestes no se hallan basadas en el ecuador celeste, sino en la eclíptica o trayectoria aparente del sol en el firmamento. La altitud y el azimut son coordenados basadas en la tierra. Todas las coordenadas se miden en grados a excepción de la ascensión recta (α), la cual se mide en horas, minutos y segundos. Veinticuatro horas de ascensión recta equivalen a 360° , por lo que una hora equivale a 15° , un minuto de α equivale a 15 minutos arco; un segundo de α equivale a 15 segundos de arco.

1.7.6 Latitud y longitud

La tierra está grabada por una red de líneas imaginarias que definen la latitud y la longitud de cada punto de su superficie. La latitud de un observador se mide hacia el norte o hacia el sur del ecuador. así por ejemplo, la gente que vive en la capital del ecuador, quito, tiene una latitud de 0° mientras que un campamento de exploradores situado en el polo norte, tiene una latitud de 90° n

La longitud se mide hacia el este o el oeste de Greenwich, localidad cercana a Londres. Se puede cubrir la tierra con líneas norte –sur o líneas de longitud que serán paralelas en las cercanías del ecuador y que convergerán en los polos. Es frecuente expresar la longitud como un tiempo en lugar de un ángulo ya que la tierra gira un ángulo de 360° en 24 horas, por lo tanto 15° equivalen a 1 hora.

Un sistema de líneas similar al anterior nos define en el cielo el sistema de coordenadas celestes, como mencionamos anteriormente; Sin embargo, en lugar de latitud hablamos de declinación de una estrella y en lugar de longitud decimos ascensión recta, que simbolizamos como (δ) y (α) respectivamente. La declinación se mide hacia el norte o hacia el sur del ecuador celeste. Una estrella situada sobre el ecuador celeste tiene una declinación de 0° y una estrella hipotética que estuviera en el polo norte celeste tendría una declinación de 90° .

Para cálculos de radiación solar los ángulos solares se pueden agrupar en ángulos solares básicos y ángulos solares derivados siguiendo las siguientes descripciones y nomenclatura.⁷.

1.7.7 Ángulos solares básicos

Podemos definir los ángulos básicos tierra sol de acuerdo al sistema de coordenadas ecuatoriales, para conocer la posición en cualquier instante de un punto P sobre la superficie de la Tierra con respecto a los rayos del Sol. Estos ángulos fundamentales son la *latitud* l , el *ángulo horario* ω del punto y la *declinación del Sol* δ , y se ilustran en la figura 1.8 donde el punto P representa un lugar en el hemisferio norte.

La latitud l es la distancia angular del punto P (norte o sur) al ecuador. Es el ángulo entre la línea \overline{OP} y la proyección de \overline{OP} sobre el plano ecuatorial. El punto O representa el centro de la Tierra.

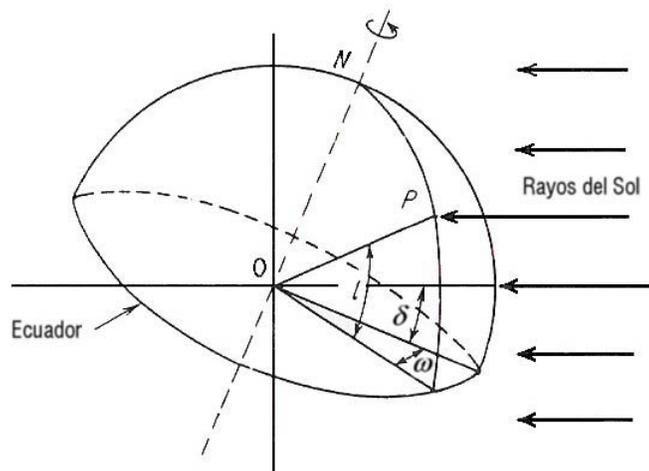


Fig. 1.8 Latitud, Ángulo horario y declinación del Sol.

El ángulo horario ω es el ángulo medido sobre el plano ecuatorial de la Tierra entre la proyección de \overline{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 $360/24 = 15$ grados de ángulo horario.

⁷ La simbología en los materiales consultados difiere en la mayoría de ellos en algunos conceptos, aquí presentamos los símbolos más comunes que pudimos observar.

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.

La Fig.1.9 ilustra esquemáticamente una *esfera celeste* donde la Tierra se ha tomado como centro del Universo, donde parecería que el Sol se mueve en el plano de la órbita de la Tierra, además se muestra el ángulo de declinación del Sol.

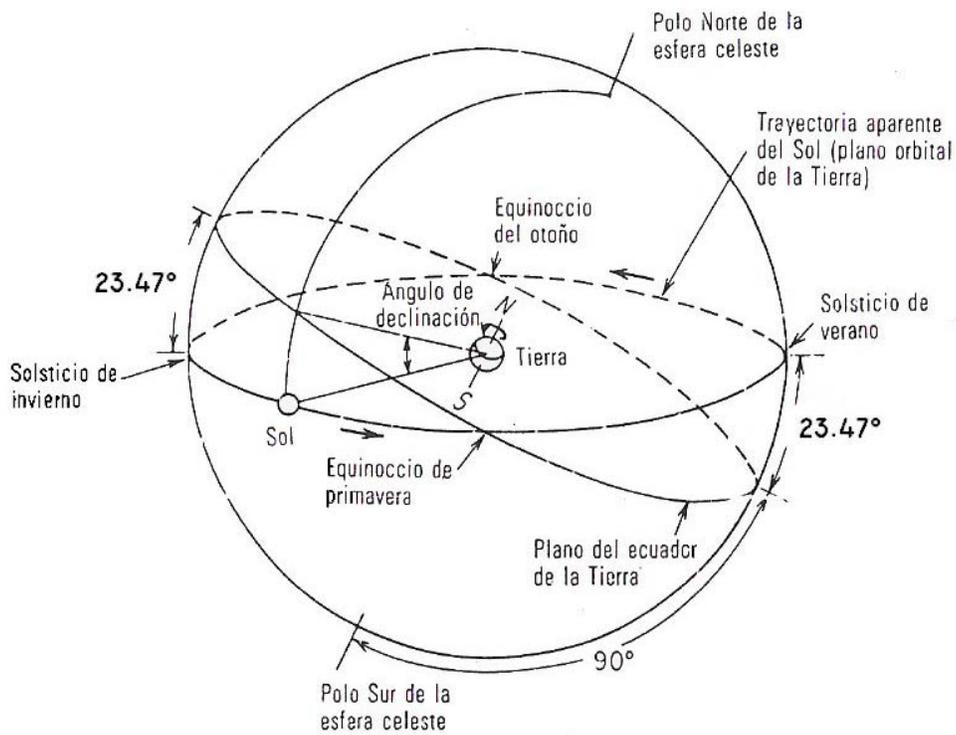


Fig. 1.9 Esfera celeste esquemática mostrando la trayectoria aparente del sol y el ángulo de declinación del sol.

En la época del solsticio de invierno los rayos del Sol estarán 23.47 grados al sur del ecuador de la Tierra ($\delta = - 23.47^\circ$). En la época del solsticio de verano, los rayos del Sol están 23.47° al norte del ecuador terrestre ($\delta = 23.47^\circ$). En los equinoccios, la declinación del Sol será cero. La Fig. 1.10 ilustra, aproximadamente, la variación de la declinación del Sol a lo largo del año. A causa de que el período de una revolución completa de la Tierra alrededor del Sol no coincide exactamente con un año calendario, la declinación del mismo día varía ligeramente de un año a otro.

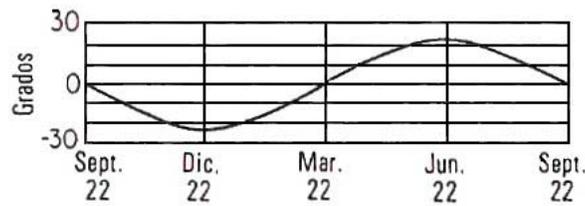


Fig. 1.10 Variación de la declinación del sol.

Se pueden obtener valores precisos para un año particular en tablas astronómicas, tales como las *American Ephemeris and Nautical Almanac*⁸. En cálculos ordinarios es suficientemente preciso utilizar los valores de cualquier año. Para un día dado, la declinación puede suponerse constante.

Los cálculos de radiación solar deben hacerse en función del tiempo solar. El tiempo medido por el movimiento diurno del Sol se denomina *Tiempo Solar Aparente o Tiempo Solar*. Mientras un *día civil* es exactamente de 24 horas, un *día solar* es ligeramente diferente, debido a irregularidades en la rotación de la Tierra, oblicuidad de la órbita de la Tierra y otros factores.⁹

1.7.8 Ángulos solares derivados

Además de los tres ángulos básicos, latitud, ángulo horario y declinación del Sol, tienen utilidad otros ángulos en cálculos de radiación solar. Tales ángulos incluyen al *ángulo del Cenit* ψ , el *ángulo de altitud* β y el *ángulo de Azimut* γ . Para una superficie de una orientación particular, se pueden definir el *ángulo de incidencia* θ , y el *ángulo de Azimut sol-pared* α . Todos estos ángulos adicionales pueden ser expresados en función de los tres ángulos básicos.

Para un observador sobre la Tierra, el Sol parece moverse a través del cielo, siguiendo la trayectoria de un arco circular de horizonte a horizonte. La Fig. 1.11 ilustra esquemáticamente una trayectoria solar aparente y define los ángulos cenital del Sol, altitud y Azimut. El punto P representa la posición del observador, el punto O , el centro de la Tierra e I_N es un vector que representa los rayos solares. El ángulo del cenit ψ es el ángulo entre los rayos solares y

⁸ Referencia citada en Ingeniería del ámbito térmico, p. 289. [U. S. Nautical Almanac Office, *The American Ephemeris and Nautical Almanac* (Washington, D. C., U. S. Naval Observatory, Anual).]

⁹ Ingeniería del ámbito térmico, p. 289.

una línea perpendicular al plano horizontal en P (extensión \overline{OP}). 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 norte y la proyección horizontal de los rayos del Sol.

La Fig. 1.12 muestra un sistema de coordenadas con el eje z coincidente con el eje de la Tierra.

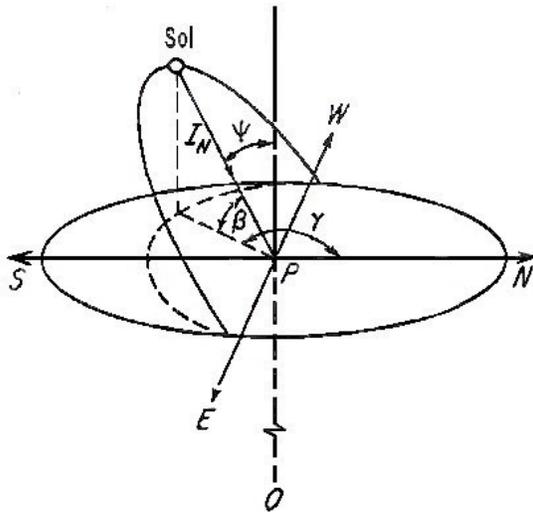


Fig.1.11 Definición del cenit solar y de los ángulos de altitud y azimut.

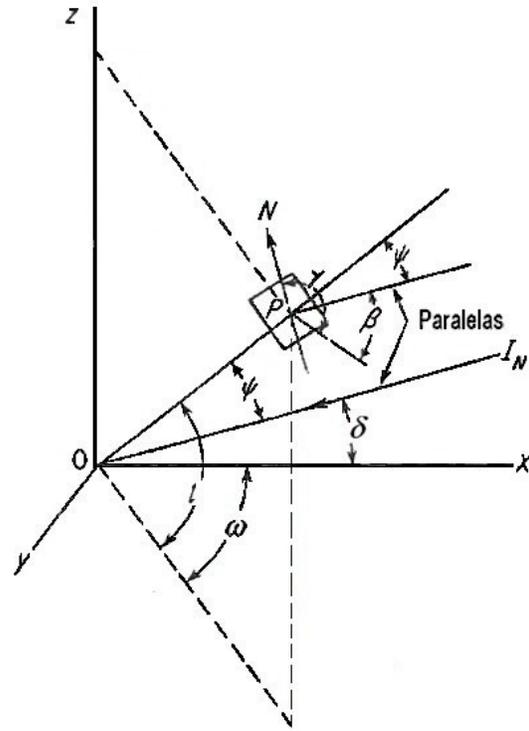


Fig. 1.12 Relación de un punto sobre la superficie de la tierra con los rayos del sol.

El plano $x - y$ coincide con el plano ecuatorial de la Tierra. El vector I_N que representa los rayos del Sol permanece en el plano $x - z$ (coincidiendo con una línea dibujada del centro del Sol al centro de la Tierra). La línea \overline{PN} que apunta al norte desde el punto P es perpendicular a \overline{OP} y permanece en el plano que contiene a \overline{OP} y al eje z.

Mediante un análisis basado en la geometría analítica podemos obtener las relaciones:

$$\cos \psi = \cos l \cos \omega \cos \delta + \text{sen } l \text{ sen } \delta \quad (1.1)$$

Puesto que $\beta = \pi / 2 - \psi$, se tiene

$$\sin \beta = \cos l \cos \omega \cos \delta + \sin l \sin \delta \quad (1.2)$$

Igualmente se puede determinar que el ángulo de Azimut del Sol γ en la Fig. 13.7 está dado por la relación

$$\cos \gamma = \sec \beta (\cos l \sin \delta - \cos \delta \sin l \cos \omega) \quad (1.3)$$

de las ecuaciones (1.2) y (1.3) se puede obtener también la relación,

$$\sin \gamma = \sec \beta \cos \delta \sin \omega \quad (1.4)$$

La Fig. 1.13 muestra las líneas de la Fig. 1.12 para el caso del mediodía solar. En el mediodía solar, $\omega = 0$, y $\gamma = \pi$ si $l > \delta$, y $\gamma = 0$ si $l < \delta$. En el caso de $l = \delta$, γ es indefinida para $\omega = 0$. De la Fig. 1.13 podemos deducir que

$$\beta_{\text{mediodía}} = \frac{\pi}{2} - |(l - \delta)| \quad (1.5)$$

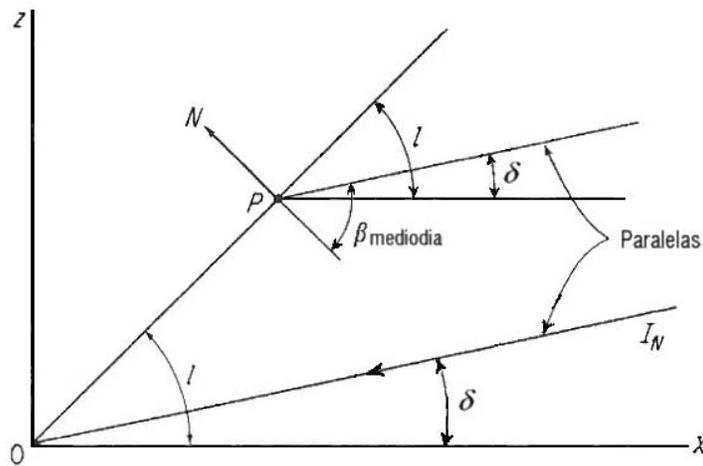


Fig. 1.13 Relación de un punto sobre la superficie de la tierra con los rayos del sol al mediodía.

donde $|(l - \delta)|$ es el valor absoluto de $(l - \delta)$. La Ec. (1.5) permite una determinación rápida de la máxima altitud diaria del Sol en un lugar dado.

Las Ecs. (1.1)-(1.3) permiten el cálculo del Cenit del Sol, la altitud y el Azimut si se conocen el ángulo horario la declinación y la latitud. Al aplicar estas ecuaciones se debe tener cuidado en dar signos correctos a los ángulos de declinación y latitud. Si la latitud norte se considera positiva y la latitud sur negativa, la declinación del Sol será positiva durante el período de verano comprendido entre el equinoccio primaveral y el equinoccio de otoño (22

de marzo a 22 de septiembre, aproximadamente) y negativo en otras épocas. El ángulo horario se mide a cualquier lado del mediodía solar. De este modo, ω está limitado a valores entre 0 y π . Si $\omega < \pi/2$, $\cos \omega$ es positivo y si $\omega > \pi/2$, $\cos \omega$ es negativo.

Los cálculos del ángulo de cenit del Sol mediante la Ec. (1.1) y del ángulo de altitud mediante la Ec. (1.2) son sencillos. Al aplicar la Ec. (1.3), no hay dificultad si consideramos que el azimut se mide desde el norte en el sentido de las agujas del reloj para ángulos horarios anteriores al mediodía y desde el norte en sentido contrario a las agujas del reloj para ángulos horarios después del mediodía. Así el azimut está limitado a valores entre 0 y π . En la Ec. (1.3), si $\cos \gamma$ es positivo, γ es menor que $\pi/2$. y si $\cos \gamma$ es negativo, γ es mayor que $\pi/2$.

En cálculos que impliquen superficies no horizontales, es conveniente expresar la posición del Sol relativa a la superficie en función del *ángulo de incidencia* θ . Para superficies verticales el uso del *azimut sol-pared* α puede ser también útil.

Con el panorama general antes expuesto sobre la incidencia de la radiación solar sobre la superficie de la tierra podemos ahora adentrarnos a las formas de aprovechamiento existentes, las cuales tratamos en la siguiente sección.



CAPITULO 2

MEDIOS DE CONVERSION DE LA ENERGIA SOLAR EN ENERGIA UTIL.

Con el fin de tener una visión de conjunto sobre los distintos modos de captar la radiación solar para aprovecharla en otras formas de energía aprovechable es conveniente captar el calor del sol de alguna manera. Si la finalidad perseguida no requiere temperaturas elevadas, es suficiente captar los voltios por unidad de superficie que nos llega, utilizando los llamados colectores planos. Pero si necesitamos energía a mayor temperatura, tenemos que recurrir a sistemas que nos la concentran en el punto o zona de nuestro interés, utilizando los colectores concentradores. Para una mejor visualización de lo que describe el proceso termodinámico nos basamos en el diagrama mostrado en la página siguiente.

2.1 PROCESO TERMODINAMICO.

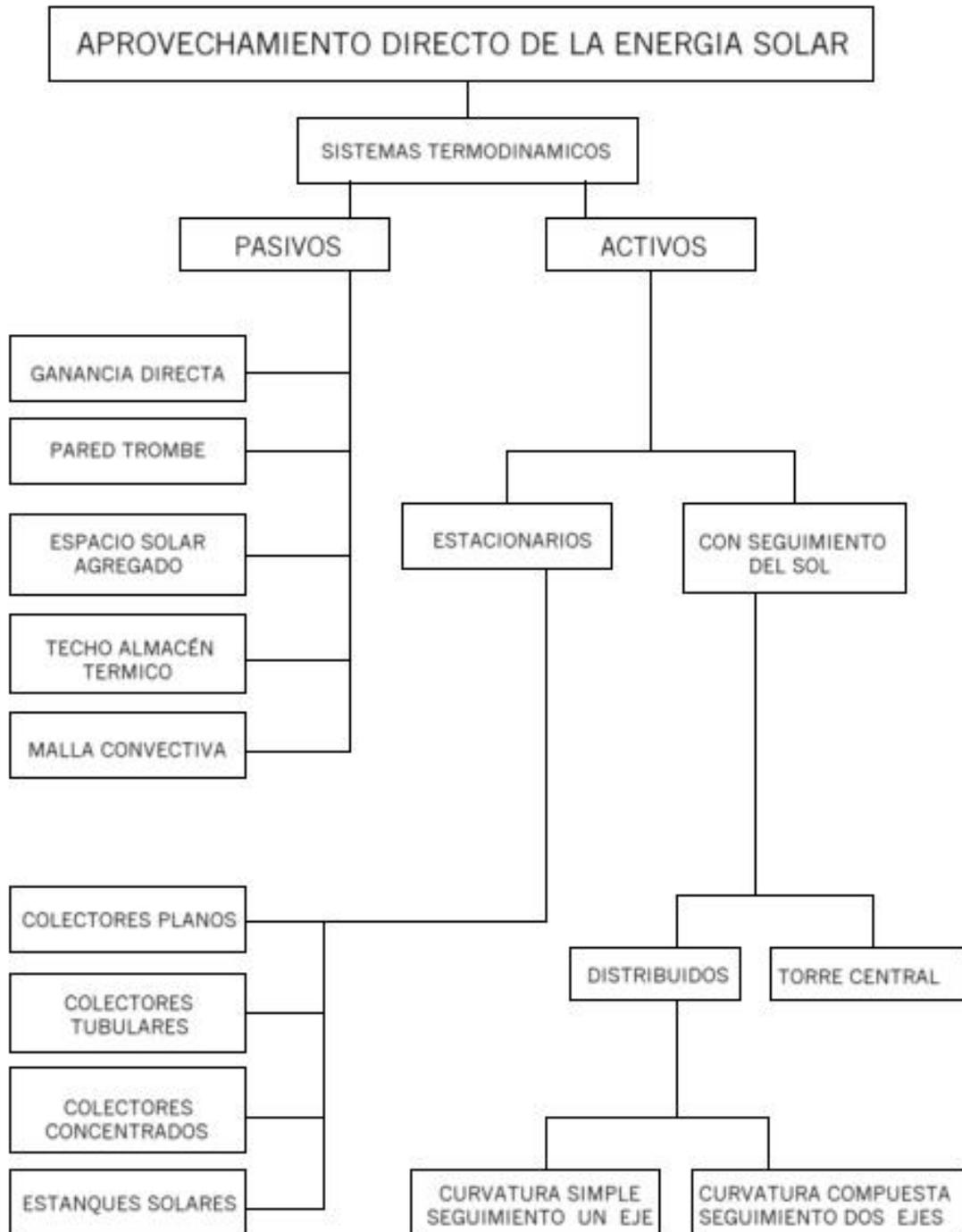
Por otro lado se sabe que una central heliotérmica funciona lo mismo que una central térmica o una central nuclear. La única diferencia existente entre ellas reside en la forma cómo se obtiene el vapor de agua que va a mover el turbogenerador. En una central térmica este vapor se obtiene por combustión de carbón o petróleo; en una central nuclear se aprovecha, para ello, el calor que se desprende en una reacción nuclear de fisión, y en una central solar o heliotérmica se utiliza la energía solar.

Últimamente los especialistas suelen ensayar el rendimiento de centrales solares en las que la energía solar es captada mediante los mencionados colectores solares, específicamente en los de tipo panel de abejas o mediante colectores cilindro – parabólicos. Los primeros cálculos realizados parecen indicar que los colectores tipo panel de abejas pueden hacer que la central resulte más económica.

Actualmente los ingenieros especialistas afirman que las centrales solares termodinámicas pueden ayudar a resolver el problema energético en un plazo relativamente breve, por lo que no está mal realizar fuertes inversiones de dinero en la búsqueda bajo tierra de fuentes de energía, como petróleo, gas y uranio, pero sería un grave error, hoy día, no saber, aprovechar la energía que en nuestro suelo tenemos, teniendo en cuenta que ésta no produce polución, contaminación, ni psicosis de peligro alguno, como las centrales energéticas de otro tipo.

En el presente capítulo se describirán distintos procedimientos para obtener energía eléctrica a partir de la energía solar, sin pasar por una etapa intermedia correspondiente a la energía mecánica. Es decir, sin necesidad de mover una turbina y, por lo tanto, sin necesidad de obtener vapor de agua.

SISTEMAS TERMODINAMICOS



2.2 PROCESO FOTOELECTRICO.

El proceso fotoeléctrico no es más que la energía que emiten los fotones y de que alguna manera la aprovechamos para generar electricidad. Se ha observado experimentalmente que determinados metales expulsan electrones cuando se iluminan. La expulsión de los electrones sólo tiene lugar cuando la luz, energía radiante, que incide sobre el metal, tiene una frecuencia mínima, llamada umbral. Por lo tanto, no toda la energía que procede del sol es eficaz a la hora de expulsar electrones de un metal.

La energía de los fotones, $h\nu$, puede dar origen a corrientes eléctricas por cualquiera de los tres caminos siguientes:

1. Cuando fotones suficientemente energéticos inciden sobre un metal, son capaces de arrancar electrones de su superficie. Si frente a él se dispone convenientemente otro metal, los electrones pueden ser captados por éste, pudiéndose engendrar una corriente eléctrica en un circuito exterior. Este fenómeno tiene su fundamento en el conocido “efecto fotoeléctrico”, y los generadores basados en tal principio se denominan generadores fotoemisivos. La frecuencia mínima de la radiación capaz de producir fotoemisión, como se mencionó anteriormente como frecuencia umbral, es una característica de cada metal, pero en general se puede decir que corresponde a la luz ultravioleta. La fig. 2.1 nos muestra los electrodos de un generador fotoemisor hipotético. Los fotones de radiación llegan al cátodo después de pasar por el ánodo, que aquí está representado por una red de cables. Para evitar que el efecto de carga espacial tenga importancia los electrodos deben colocarse muy juntos.

Cuando un fotón llega al cátodo, éste puede ser absorbido por un electrón, el cual por lo tanto, alcanza un estado energético mayor. Si el aumento de energía es superior al trabajo de salida del material del cátodo, el electrón puede abandonar su superficie; esto es lo que necesitamos. No todos los fotones tienen suficiente energía para que se produzca este efecto. Fig. 2.1

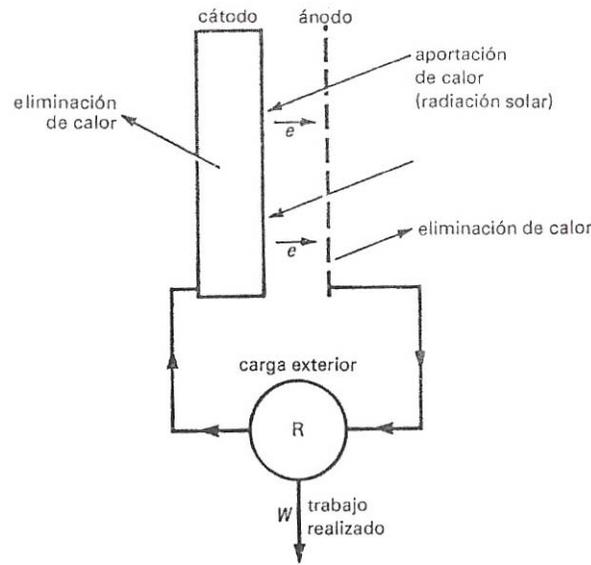


Fig. 2.1 Generador fotoemisor.

2. Una pila electroquímica (pila galvánica) con dos electrodos idénticos da una tensión nula. Si uno de los electrodos es iluminado con luz de longitud de onda adecuada, se establece una d.d.p. entre ambos. Por otro lado, si los electrodos no son iguales y la pila da una tensión determinada, es posible aumentar ésta iluminado uno de los electrodos. De cualquiera de las dos maneras se ha utilizado la radiación solar para provocar o aumentar un flujo de electrones. Se ha construido un generador fotogalvánico. Una pila química consta de dos electrodos, habitualmente metálicos, inmersos en una sustancia llamada electrolito, como el que se muestra en la Fig. 2.2 un electrolito suele ser líquido o viscoso, formado por uno o más compuestos, o una solución de ácidos, bases o sales metálicas.

Tiene la cualidad de conducir la electricidad cuando se conectan los electrodos a una batería o a cualquier otra fuente eléctrica. Para que esto suceda, debe haber algo que pueda llevar los electrones a través del electrolito de un electrodo al otro.

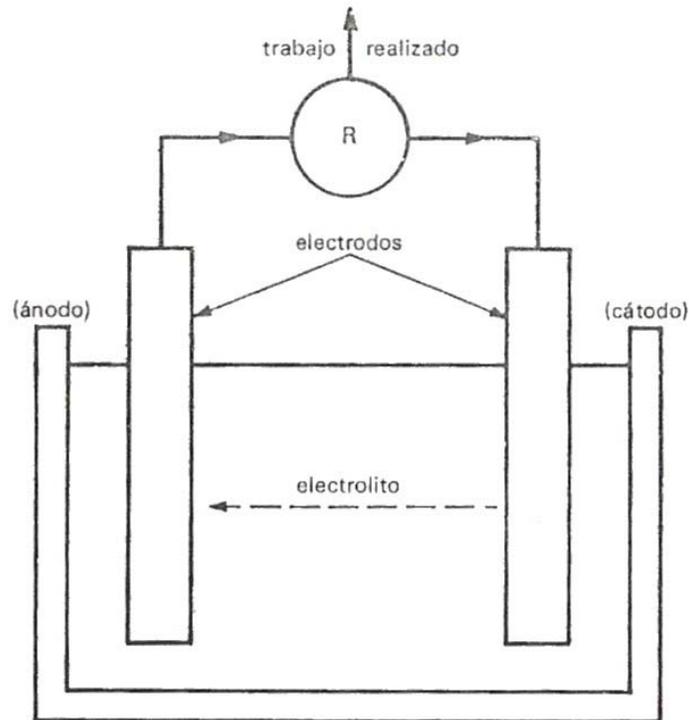


Fig. 2.2 Generador fotogalvánico.

3. Cuando sobre una placa de cobre, recubierta de óxido cuproso, se deposita una película muy delgada de cobre y se ilumina, se observa que entre la base de cobre y la película del mismo metal se establece una d.d.p., siendo la base el polo positivo. El dispositivo se denomina célula de capa obstructora. Al incidir los rayos luminosos sobre la película de cobre la atraviesan por ser extraordinariamente delgada y arrancan electrones del Cu_2O (efecto fotoeléctrico interno), los cuales, al moverse hacia la película del metal, la cargan negativamente.

Por ser la resistencia que los electrones encuentran al moverse desde la base de cobre hacia el recubrimiento mucho menor que en sentido contrario, es por lo que estas resistencias polares encuentran mayor campo de aplicación como rectificadores de corriente alterna. Por otro lado si fuesen dos porciones de un semiconductor, una tipo P y otra tipo N, al alcanzar los fotones la interfase, originan una separación de cargas a ambos lados, dando lugar con ello a una d.d.p. se trata de un generador fotovoltaico, o como más comúnmente se le llama, una célula solar o pila solar. Uniendo varias en serie y en paralelo dando lugar a una superficie grande es un panel solar, constituyendo así una batería solar.

2.3 PROCESO TERMOELECTRICO.

Es factible convertir directamente la energía solar en electricidad por medio de pares termoeléctricos, sin maquinaria y sin partes móviles. Un par termoeléctrico se construye yuxtaponiendo trozos de conductores o de semiconductores de distintos tipos, y calentando una unión y enfriando la otra. La obtención de diferencias de potencial y generación de energía eléctrica por éste método fue descubierta por Seebeck en 1821, quien observó que si construimos un circuito con dos tramos de metales distintos, se establece una corriente de uno de los puntos de unión de los metales está a mayor temperatura que el otro. Si se abre el circuito, se establece entre los dos extremos una diferencia de potencial v , que es proporcional a la diferencia de temperaturas.

Se puede considerar que el efecto Seebeck se produce porque los electrones del extremo caliente tienen mayor energía cinética que los del extremo frío, por lo que la difusión de los electrones en dirección del extremo frío se produce con mayor intensidad que en dirección opuesta. Este fenómeno se ilustra en la fig. 2.3.

En un metal se pueden mover libremente y si se coloca un electrodo cargado positivamente en contacto con el metal, los electrodos se desplazaran hacia él, formándose una corriente eléctrica. Si se calienta un trozo de metal, ocurrirá un desplazamiento de electrones del extremo caliente al más frío, y la acumulación de electrones en el extremo frío depende de la naturaleza del metal. Si se sueldan alternativamente trozos de alambre de dos metales distintos A Y B en series tipo $A_1 - B_1 - A_2$, y la unión de $A_1 - B_1$, se calienta y la $B_1 - A_2$ se enfría, se produce una diferencia de potencial y se puede extraer corriente eléctrica de A_1 Y A_2 para hacer funcionar un motor o un instrumento eléctrico. Se pueden colocar en serie un número indefinido de pares ($A_1 - B_1 - A_2 - B_2 - A_3 - B_3 - A_4 \dots$) y el voltaje en las terminales será la suma de los voltajes de todos los pares. Las resistencias también se sumarán; por tanto la resistencia interna crece y la corriente producida en cortocircuito disminuye a medida que se aumenta el número de pares. Los pares de metales especiales pueden producir voltajes de 20 – 60 microvoltios por grado ($\mu V^\circ C$) y los pares semiconductores especiales de hasta 1000 microvoltios por grado.

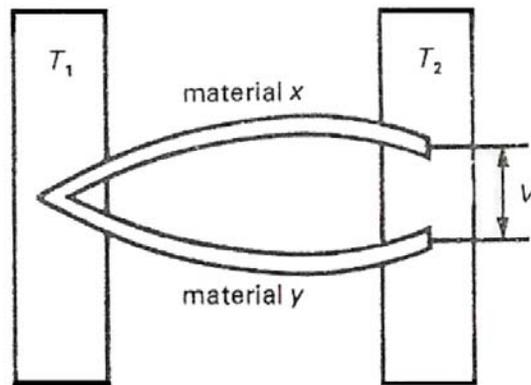


Fig. 2.3 Fenómeno termoeléctrico.

Los semiconductores se construyen añadiendo impurezas seleccionadas a cristales puros. Los cristales muy puros, no son conductores, pero si se le añaden pequeñas cantidades de un elemento de alta valencia, sus átomos se incorporan a la red cristalina y los electrones sobrantes se pueden mover libremente convirtiéndose en conductores bastante buenos, llamados semiconductores. Los semiconductores con electrones negativos que se pueden mover libremente se llaman semiconductores N. Si al cristal se le añade un elemento de una valencia inferior, los electrones quedan fijos en sus átomos y no hay electrones libres para moverse, pero los <<huecos>> positivos dejados por la incorporación de los electrones a la red cristalina se pueden mover. Estos semiconductores se llaman semiconductores P. Los semiconductores P Y N se colocan en series del tipo $P_1 - N_1 - P_2 - N_2 - P_3 - N_3$ ----- similares a las disposiciones A - B descritas anteriormente.

Se han realizado grandes esfuerzos de investigación para encontrar materiales termoeléctricos P Y N que tengan grandes fuerzas termoeléctricas, conductividad térmica baja y conductividad eléctrica alta. Se han utilizado muchos elementos con 4, 5 y 6 electrones en su capa externa, entre ellos pares conteniendo silicio, fósforo, azufre, germanio, arsénico, selenio, estaño, antimonio, telurio y bismuto. Los metales no son apropiados porque la conducción de calor y electricidad se efectúa en ellos a través del mismo mecanismo, y es difícil cambiar la relación entre los dos. En los semiconductores sin embargo, la electricidad se transmite por las cargas libres, y el calor fundamentalmente por vibración de la red cristalina.

Los elementos termoelectricos se colocan en una caja de metal con una lámina gruesa de metal en el extremo caliente que recibe la radiación enfocada de un colector focal y produce una temperatura uniforme en toda su superficie a pesar de las irregularidades de un enfoque imperfecto. Los materiales termoelectricos se colocan presionados contra esta fuente de alta temperatura, a veces con la ayuda de un muelle, y con una delgada lámina de mica intermedia para impedir el contacto eléctrico. La parte trasera se refrigera con agua o aire a través de grandes aletas radiantes. La utilización de una superficie selectiva reduce las pérdidas de calor y produce temperaturas muy altas.

2.4 PROCESO FOTOVOLTAICO.

La conversión fotovoltaica de la energía solar es una de las formas más evolucionadas de aprovechamiento de ese recurso energético ya que transforman la energía luminosa del sol en energía eléctrica. En efecto, se trata de una conversión directa en energía eléctrica sin pasos de transformación intermedios, se aprovecha de forma eficiente el efecto fotovoltaico consistente en la aparición de una diferencia de potencial en un dispositivo cuando éste es iluminado. El sol representa un papel destacado en nuestra vida, y no hay más que pensar en su influencia en los ciclos agrícolas o en la distribución de tareas a lo largo del día. Una influencia que ha llevado a numerosas civilizaciones a lo largo de la historia a dotar al sol de un fuerte valor simbólico, y una influencia de la que el hombre siempre ha intentado sacar provecho. La energía solar fotovoltaica es un claro aprovechamiento. Consiste en transformar la energía luminosa procedente del sol en energía eléctrica, mediante la exposición al sol de ciertos materiales convenientemente tratados (silicio purificado a partir de arena mediante complejos procedimientos, fundamentalmente), y la posterior recogida de la electricidad generada. La potencia de una placa determinada se mide en vatios – pico (wp), que es la potencia que puede generar cuando está sometida a la intensidad máxima y sería la que da mas o menos, el sol al mediodía de un día claro.

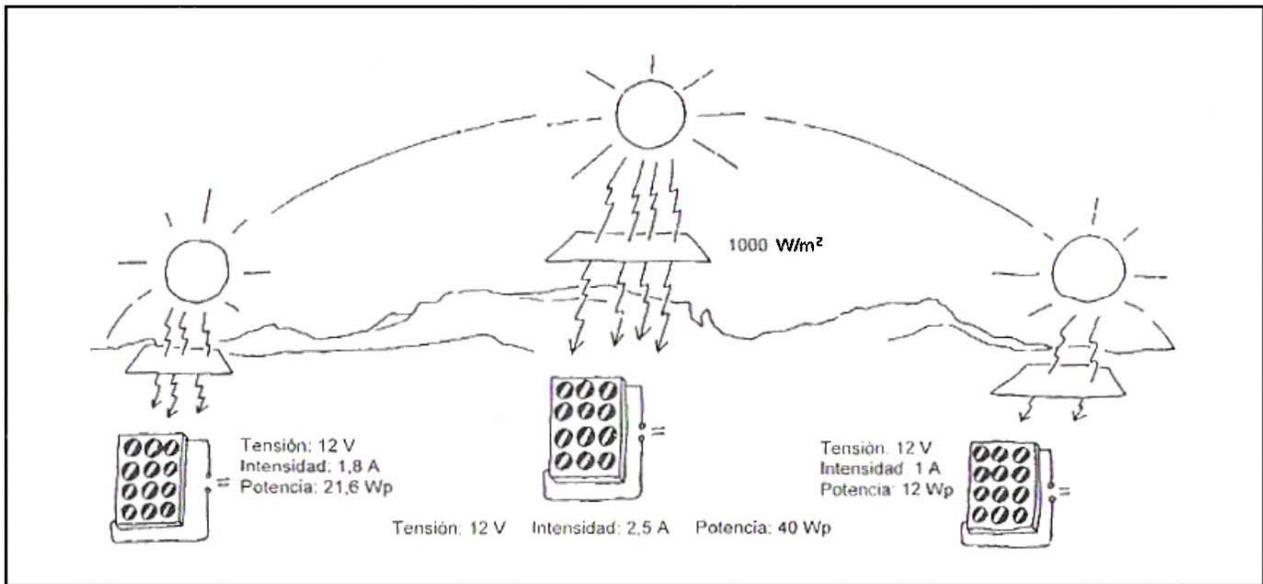


Fig. 2.4 La potencia nominal de las placas es válida para una intensidad radiante de 1000 W/m^2 , que sólo se produce al mediodía de días muy claros. En el resto del día, la potencia de las placas será inferior a la nominal.

A grandes rasgos, los sistemas que aprovechan la energía solar fotovoltaica constan de los siguientes componentes esenciales que son: placas fotovoltaicas y sus respectivos soportes o generador (paneles fotovoltaicos, responsables de la producción de electricidad), un acumulador o batería (para poder almacenar energía sobrante y utilizarla cuando sea necesaria), un regulador (elemento de control entre los anteriores y los equipos que consumen la energía) La posibilidad de almacenar energía para su posterior utilización permite adecuar los procesos de generación y consumo, ondulador o convertidor (para transformar la corriente continua en corriente alterna), sistemas de protección y, en algunos casos, contadores de energía.

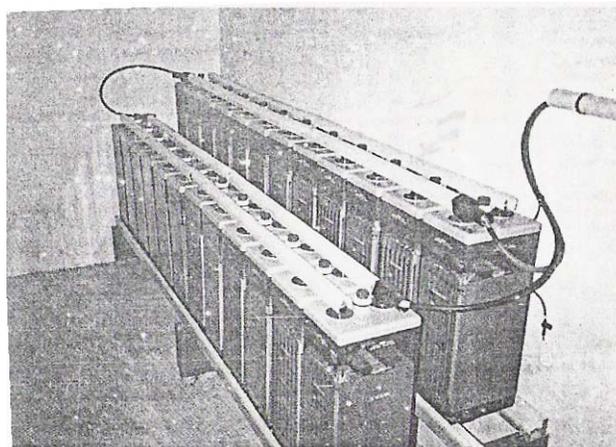
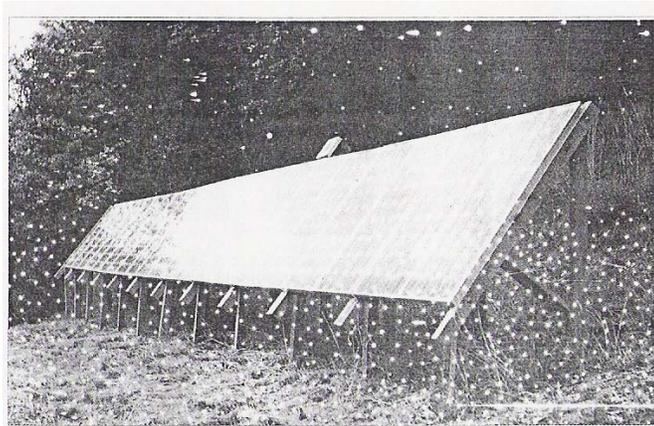
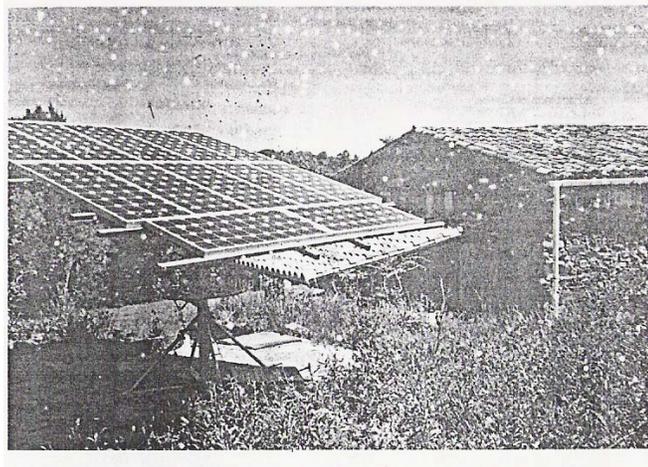


Fig. 2.5 Componentes de las placas fotovoltaicas.

Las placas fotovoltaicas producen corriente continua, normalmente a una tensión nominal de 12 volts, aunque también en el mercado se encuentran placas de 24 v y 48 v. Si se conectan varias placas entre sí uniendo todos los polos negativos por un lado y todos los polos positivos por el otro (conexión en paralelo), en los extremos tendremos igualmente 12 v y una intensidad equivalente a multiplicar la intensidad unitaria de las placas por el número éstas conectadas entre sí. En cambio, si unimos un polo de la primera placa con el contrario de la siguiente y así sucesivamente (conexión en serie), y al final se mide la tensión entre los dos polos libres de la primera y de la última placa, se observará que es igual a 12 multiplicado por el número de placas unidas de esta manera, y la intensidad total será la misma que la de la corriente nominal de una sola placa. Ahora bien, la energía que pueden producir un mismo número de placas conectadas en paralelo o en serie será la misma. Combinando la conexión en serie y la conexión en paralelo, se pueden conseguir tensiones nominales de trabajo (12 v, 24 v, 48 v, etc.) adecuadas para cada alimentación. La conexión en serie de varias placas fotovoltaicas aumenta la tensión, pero no la intensidad de corriente. La conexión en paralelo, por el contrario, aumenta la intensidad, manteniendo la tensión. Para un mismo número de placas, la potencia que se obtiene de una forma u otra es la misma.

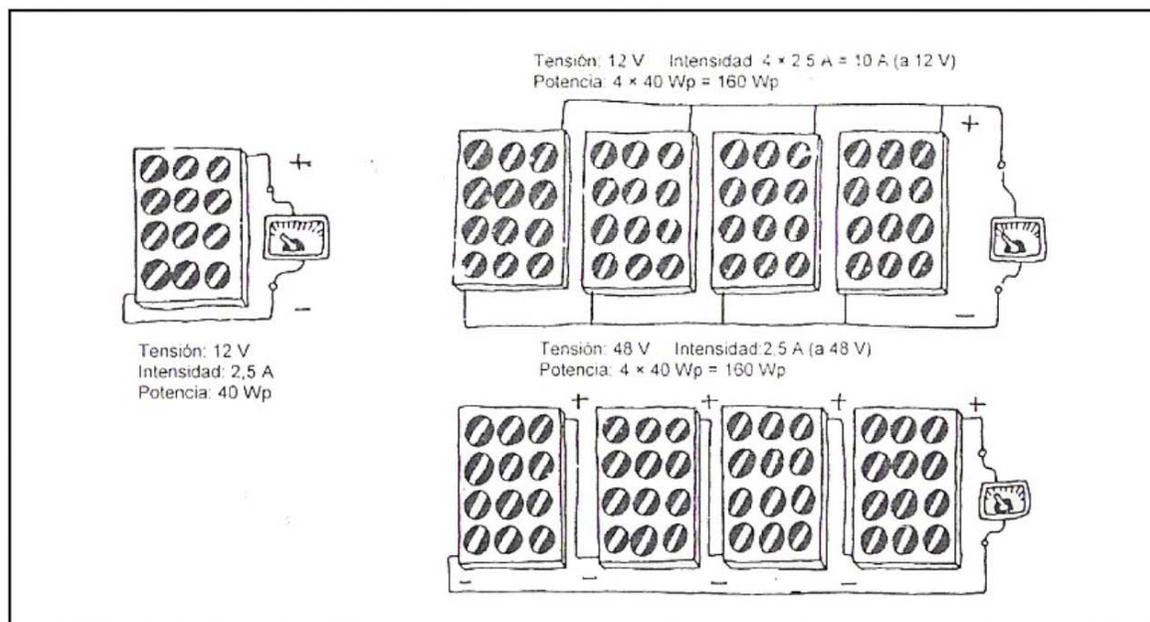


Fig.2.6 Las placas conectadas en paralelo (arriba), o sea, uniendo todos los polos del mismo signo, producen una intensidad que es la suma de la unitaria de cada una y un voltaje igual al de un elemento. Conectadas en serie (abajo), darán una tensión igual a la de un elemento multiplicado por el número total de éstos, y una intensidad igual a la de uno de ellos. La potencia será siempre la misma para el mismo número de placas, independientemente de la conexión que hubiere entre ellas.

El indudable interés práctico de tal fenómeno pronto quedó demostrado al convertirse en un método, casi insustituible, de provisión de energía a los satélites y otros ingenios espaciales. Las aplicaciones terrestres de la conversión fotovoltaica un sitio cada vez más notable al haberse producido una mejora continua de los rendimientos de conversión y un paralelo decrecimiento de los precios unitarios. Asimismo las sucesivas crisis de las fuentes de energía convencionales, por escasez, contaminación o deterioro del medio ambiente, han servido de estímulo al desarrollo de nuevos dispositivos y procesos así como de nuevas aplicaciones y ensayos experimentales. Puede decirse que en la actualidad existen productos consolidados no sólo en el mercado espacial sino también en el mercado terrestre. La célula solar es el dispositivo conversor y se fabrica con diversos materiales y tecnologías, en la mayor parte de los casos, materiales y tecnologías usados en productos microeléctricos. Esta sinergia es un rasgo característico de la tecnología fotovoltaica, lo que ha repercutido indudablemente en su consolidación, no solamente en las aplicaciones espaciales y terrestres ya resaltadas, sino también en el mercado de productos electrónicos de consumo, donde ha alcanzado una posición indiscutible.

2.5 LA CELULA SOLAR.

La conversión de la energía de las radiaciones ópticas en energía eléctrica es un fenómeno físico conocido como el efecto fotovoltaico. La célula solar es, sin duda, el dispositivo fotovoltaico más importante para la conversión directa de la energía solar en energía eléctrica. Con este fin, las células solares han sido ampliamente utilizadas en aplicaciones espaciales como generadores casi permanentes de energía, sin ningún costo de funcionamiento y con una alta relación de energía/peso, en comparación con otras fuentes de energía.

En el momento actual, las aplicaciones terrestres de la célula solar para la generación fotovoltaica de la energía eléctrica están mereciendo una atención creciente, no sólo en cuanto a la investigación y desarrollo, sino también a la utilización en numerosas aplicaciones. El objetivo de estos esfuerzos es conseguir sistemas fotovoltaicos de conversión al costo más bajo posible, de tal manera que se pueda contribuir, de modo económicamente competitivo, a la necesidad actual de obtención de electricidad a partir de fuentes de energía renovables.

El efecto fotovoltaico en células electroquímicas fue descubierto como ya se mencionó anteriormente por el físico Becquerel en 1839, pero hasta 1954 no se tuvo una célula solar

capaz de convertir con eficiencia la energía solar en energía eléctrica. Este dispositivo fue desarrollado por Chapin, Fuller y Pearson y, desde entonces, células similares a aquella se vienen empleando ya en uso terrestre, para el suministro de energía eléctrica a puntos remotos.

Cuando la luz del sol incide sobre ciertos materiales llamados semiconductores, los fotones que la constituyen son capaces de transmitir su energía a los electrones de valencia del semiconductor para que rompan el enlace que les mantiene ligados a los átomos respectivos. Por cada enlace roto queda un electrón libre para circular dentro del sólido. La falta de electrón en el enlace roto, que se llama hueco, también puede desplazarse libremente por el interior del sólido, transfiriéndose de un átomo a otro debido al desplazamiento del resto de los electrones de los enlaces. Los huecos se comportan, en muchos aspectos, como partículas de carga positiva igual a la del electrón.

El movimiento de los electrones y huecos en direcciones opuestas generan una corriente eléctrica en el semiconductor capaz de circular por el circuito externo, y liberará en él energía de la cedida por los fotones al crear los pares electrón – hueco. Para separar los electrones de los huecos, e impedir que restablezcan el enlace, se utiliza un campo eléctrico (o la correspondiente diferencia de potencial), que hace que ambos circulen en direcciones opuestas, dando lugar a una corriente en el sentido del citado campo eléctrico.

En las células solares convencionales este campo eléctrico se consigue en la unión de dos regiones de un cristal semiconductor, de conductividades de distinto tipo. En el caso de que el material semiconductor sea de silicio, una de las regiones, llamada tipo N, se impurifica con fósforo, que tiene cinco electrones de valencia, uno más que el silicio, y es una región con una concentración de electrones mucho mayor que la de hueco. La otra, llamada P, se impurifica con boro, que tiene tres electrones de valencia, uno menos que el silicio, y es una región con una concentración de huecos, mayor que la de los electrones. Las grandes diferencias de concentraciones de electrones y huecos entre ambas regiones crean, para mantenerse, un campo eléctrico dirigido de la región N a la P, que es el responsable, también, de separar los electrones y huecos extras que se producen cuando la célula está iluminada.

Prácticamente todas las células solares disponibles en la actualidad están constituidas por una unión P – N como la descrita anteriormente. En las células de silicio, que son las más

empleadas en la práctica, la unión se consigue difundiendo una capa de fósforo en una oblea de silicio que originalmente está toda ella impurificada con boro. La unión es muy superficial, con valores típicos de anchura de la capa difundida (región N) de $0.2 - 0.5 \mu\text{m}$. Es muy común denominar emisor a esta capa. El contacto eléctrico sobre la cara iluminada, que es la cara difundida, ha de hacerse de tal forma que deje al descubierto la mayor parte de su superficie, a fin de que penetre la luz en el semiconductor, pero proporcione a la vez, una baja resistencia eléctrica. La solución de compromiso que suele adaptarse consiste en utilizar contactos en forma de peine, como se muestra en la figura 2.7. Por el contrario, el contacto eléctrico sobre la cara no iluminada cubre toda el área. Habitualmente la cara iluminada se cubre con una capa de material antirreflejante para aumentar el porcentaje de la energía solar absorbida.

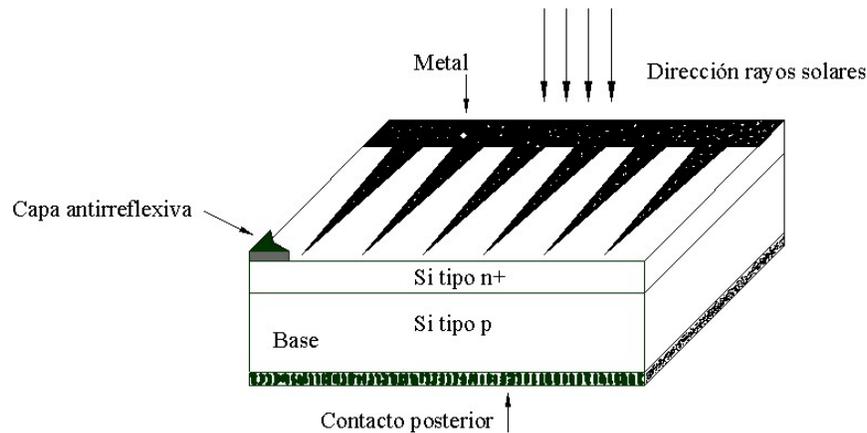


Fig. 2.7 Estructura de una célula de silicio convencional.

Si se ilumina una célula solar que se encuentra conectada a una externa, como la figura 2.8, se producirá una diferencia de potencial en dicha carga y una circulación de corriente que sale al circuito exterior por la terminal positiva y vuelve a la célula por la terminal negativa. En estas condiciones de funcionamiento la célula se comporta como un generador de energía y presenta el máximo interés desde nuestro punto de vista. Los fenómenos que tienen lugar en el interior del dispositivo pueden describirse de la siguiente forma:

1. Los fotones que inciden sobre la célula con energía igual o menor que el ancho de la banda prohibida se absorben en el volumen del semiconductor y generan pares electrón – hueco que pueden actuar como portadores de corriente.
2. El campo eléctrico o la diferencia de potencial, producida por la unión p – n es la causa de la separación de los portadores antes de que puedan recombinarse de nuevo y, por lo

tanto, la causa de la circulación de la corriente por la diferencia de potencial externa, suministrando así energía a la carga.

3. La presencia de voltaje en las terminales del dispositivo produce, como en cualquier dispositivo de la unión P – N, fenómenos de inyección y recombinación de pares electrón – hueco, que en la célula solar actúan como pérdidas de recombinación y que son dependientes del mencionado voltaje.

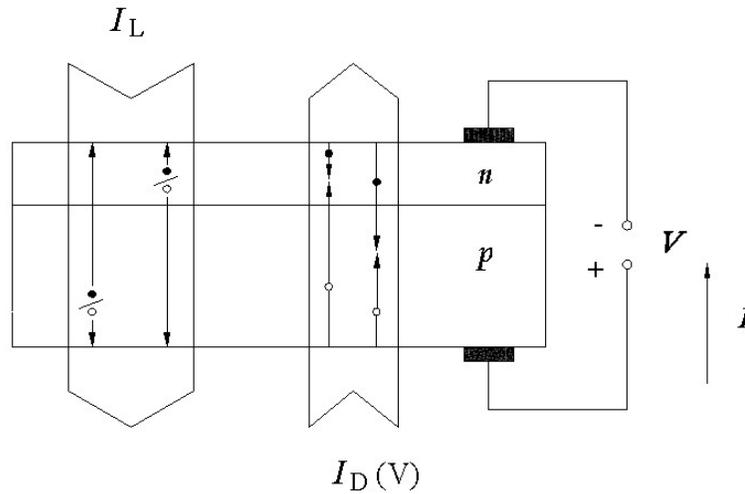


Fig. 2.8 Componentes internas de corriente en una célula solar. Los círculos vacíos representan huecos y los círculos rellenos representan electrones.

En resumen, la corriente entregada a una carga por un diodo semiconductor iluminado es el resultado neto de las componentes internas de corriente que se oponen:

- La corriente fotogenerada o fotocorriente I_L debida a la generación de portadores que produce la iluminación.
- La corriente de diodo o corriente de oscuridad I_D debida a la recombinación de portadores que produce el voltaje externo necesario para poder entregar energía a la carga.

Admitiendo que la célula responde linealmente a éstas excitaciones de iluminación y voltaje (hipótesis cierta en gran número de células prácticas), la corriente neta que circula por el exterior vendrá dada por la suma algebraica de las dos componentes de corriente anteriores. Tomando como positivas las corrientes de generación, se puede escribir:

$$I = I_L - I_D(V)$$

Que es la ecuación característica de la célula solar, válida en todos sus rangos de funcionamiento, incluido cuando el dispositivo actúa como un diodo receptor de energía porque la recombinación excede a la generación.

2.6 PROCESO FOTOQUIMICO.

Utilizando la luz solar en reacciones fotoquímicas en vez del calor solar en máquinas, se evitan varios inconvenientes. La mayor parte de las reacciones fotoquímicas responden únicamente a la luz ultravioleta y a la visible, puesto que la luz de longitud de onda mayor en el infrarrojo no tiene energía de suficiente intensidad para producir actividad química. Por lo tanto, menos de la mitad de la reacción solar es utilizable en la conversión fotoquímica, y en la mayor parte de las reacciones, mucho menos de la mitad.

La ventaja que presenta este proceso con respecto al proceso anterior es que la conversión fotoquímica de luz solar puede funcionar en sistemas más simples y menos costosos, y tiene la gran ventaja de que los productos fotoquímicos se pueden almacenar para ser utilizadas más tarde. Sin embargo, es un problema muy difícil encontrar una reacción fotoquímica conveniente.

Cuando se pasa un rango de luz solar a través de un recipiente que contiene muchas moléculas, parte de la luz lo sin sufrir ningún cambio, pero la luz de ciertas longitudes de onda se puede absorber, coloreando la sustancia absorbente. La luz está compuesta de un gran número de unidades llamadas fotones, cada una de ellas con una energía definida llamada cuanto de energía. Sólo si la molécula puede modificarse de manera que absorba una cantidad de energía aproximadamente igual a la contenida en un fotón dado, el fotón tendrá posibilidades de ser absorbido por la molécula. La absorción de energía de la luz visible y ultravioleta se realiza en el desplazamiento de un electrón desde su posición normal dentro de la molécula. En el infrarrojo, la absorción se realiza por desplazamiento de los átomos dentro de la molécula por rotación de la misma. Para producir reacciones químicas ordinarias es necesario que se produzcan desplazamientos de electrones, a fin de obtener suficiente energía de activación. Para la luz solar las longitudes de onda capaces de producir la varían entre 8000\AA en el rojo y 3000\AA en el ultravioleta, que corresponden aproximadamente a $36,000\text{ cal.mol}^{-1}$ y $95,000\text{ cal.mol}^{-1}$.

Según la importante ecuación de Albert Einstein, cada fotón puede activar únicamente a una molécula. Una vez producida ésta activación por un fotón de luz visible o ultravioleta, pueden ocurrir los siguientes fenómenos:

1. La molécula activada puede transmitir su energía a otras moléculas por colisión, haciendo crecer la energía cinética de las moléculas e incrementando la temperatura. de esta manera la luz se convierte directamente en calor sin causar ningún cambio químico. Este es el efecto más común producido por la luz solar.
2. La activación puede romper un enlace químico en la molécula y producir una descomposición en átomos o grupos de átomos.
3. La molécula se puede activar a un nivel de energía superior con el desplazamiento de un electrón dentro de la molécula, y esta molécula excitada puede transmitir su energía a una molécula de algún otro compuesto químico con el que choque; y ésta segunda molécula puede sufrir un cambio químico. En ésta fotosensibilización, una cierta combinación entre molécula fotoactiva y molécula reaccionante es necesaria aparentemente. Se necesita un cierto tiempo para que suceda la transmisión de energía, y la combinación mantiene a las dos moléculas juntas durante un espacio de tiempo suficientemente dilatado como para que se efectúe la transmisión de energía.
4. Una molécula excitada por la absorción de luz puede fluorescer, despidiendo luz a una longitud de onda distinta de la absorbida. Los estados de energía de los electrones son distintos en la emisión fluorescente y en la absorción.
5. La activación puede tener bastante energía como para hacer salir un electrón de la molécula y producir ionización.

Para los estudios básicos experimentales de fotoquímica es importante utilizar luz con longitudes de onda definidas, porque los efectos químicos pueden ser muy distintos con los fotones de distintas energías. Se puede conseguir luz prácticamente monocromática haciéndola pasar a través de un filtro coloreado o a través de un prisma refractante. Se pueden conseguir filtros de interferencia de metal de espesor calculado depositado eléctricamente sobre vidrio. Es necesario medir cuantitativamente la cantidad de radiación absorbida por el sistema reaccionante. Se puede medir directa o indirectamente por un par termoelectrico ennegrecido y un galvanómetro ajustado con una lámpara de filamento de carbón. Es importante utilizar una superficie ennegrecida que responda uniformemente a la luz de distintas longitudes de onda.

2.7 SISTEMAS TERMIONICOS.

El fenómeno denominado termiónico fue observado por primera vez por el francés Charles Francois Du Fay a mediados del siglo XVIII, quien notó que el gas cercano a un sólido caliente producía electricidad. En 1853 Becquerel anotaba que podría producirse una cantidad medible de corriente eléctrica en una masa de aire con una diferencia de potencial de unos cuantos voltios, si ésta se calentaba entre electrodos calientes de platino.

Los conversores termiónicos están constituidos por un emisor caliente de electrones eléctricamente aislado de un colector frío, con vacío o un par metálico entre ellos. Los elementos están encerrados herméticamente. Típicamente el emisor opera a temperaturas cercanas a los 1700°C y el colector a temperaturas de unos 700°C. Los emisores pueden ser de tungsteno, tantalio o renio, siendo los más comunes los de tungsteno. Los colectores de molibdeno son los más comunes. La energía requerida para que se emitan electrones desde el cátodo está entre 0.6 y 1.5 eV.

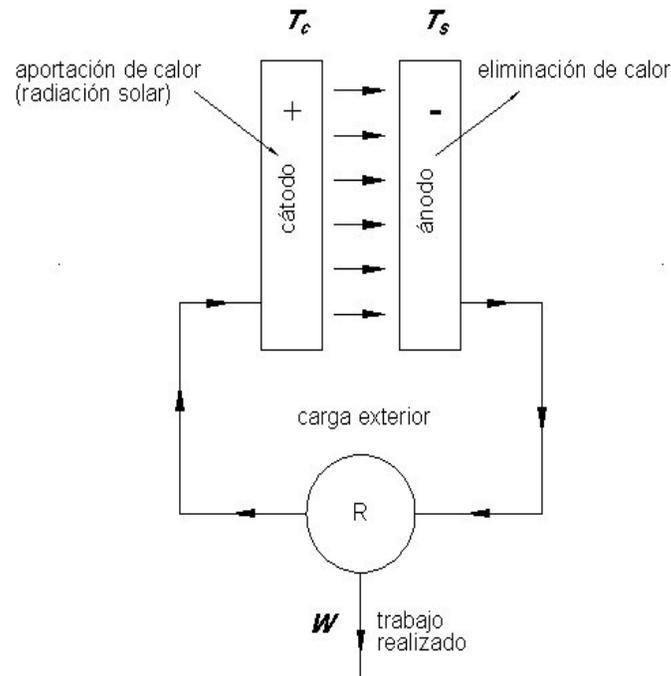


Fig. 2.9 Principio del generador termiónico.

Los sistemas termiónicos convierten la energía calorífica directamente en electricidad, aprovechando la emisión de los electrones de una superficie o cátodo caliente. Los electrones viajan a través del vacío o de un espacio gaseoso hacia un ánodo frío o colector. Al conectar una carga eléctrica entre el cátodo y el ánodo, se puede extraer potencia eléctrica útil. En la

figura 2.9 se ilustra el Principio del generador termiónico. Se basa en un fenómeno llamado emisión termiónica, descubierto por Edison en 1883, aunque las primeras indagaciones para construir este tipo generador se atribuyen a Schlichter en 1915.

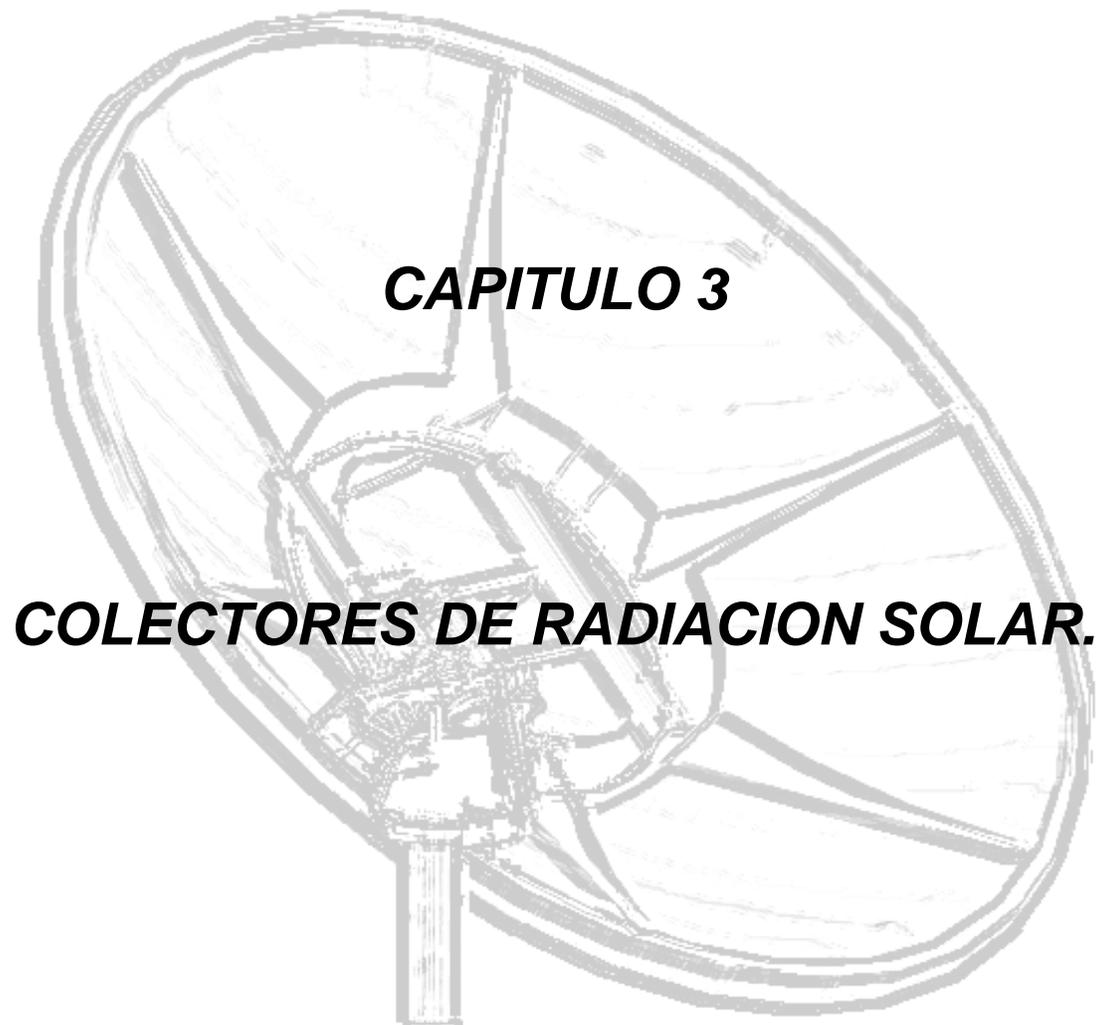
Cuando uno de los electrodos, que después será el CÁTODO, se calienta a una temperatura suficiente, hay una parte importante de sus electrones que adquieren suficiente energía para abandonar su superficie. Por otro lado, si cerca de él hay otro electrodo, el ÁNODO, los electrones emitidos pueden recogerse en él. Esto sería un fenómeno momentáneo si sólo hubiese los dos electrodos porque la creciente carga negativa del ánodo repelería los electrodos que se fueran emitiendo y finalmente ninguno podría llegar a él.

Sin embargo, en un generador termiónico, el ánodo se conecta a través de un circuito exterior con el cátodo. Entonces se produce un flujo de electrones, que constituye una corriente eléctrica, que atraviesa este circuito, para lo cual realiza un trabajo. De la figura anterior, el elemento exterior consumidor de energía se representa por la resistencia R , pero en la práctica podría ser cualquier dispositivo al que hubiese que impulsar, como por ejemplo un motor eléctrico.

De esta forma, el generador termiónico funciona utilizando parte de la energía empleada en calentar el cátodo (en el caso que nos interesa, ésta energía proviene de la radiación solar) para hacer pasar electrones a través del dispositivo exterior de consumo, convirtiéndose en trabajo útil.

Se puede ver enseguida que esta conversión de energía solar en trabajo no se consigue sin pérdidas, por lo que surge la cuestión del rendimiento de este aparato. Los electrones sólo podrán salir del cátodo si se calienta, entonces se perderá energía por radiación. Parte de esta radiación incidirá sobre el ánodo, el cual, si se deja que se caliente excesivamente, emitirá también electrones.

Si alguno de éstos llega a su vez al cátodo, producirá una reducción de la corriente neta. Para mantener frío el ánodo, ha de hacerse también que pierda energía por radiación o mediante cualquier otro mecanismo de enfriamiento. De hecho, como en el generador termiónico ha de transferirse energía hacia un foco frío, se verá que sufre las mismas restricciones que cualquier otra máquina de calor y es de suponer que su rendimiento tendrá análogas limitaciones.



CAPITULO 3

COLECTORES DE RADIACION SOLAR.

Un colector solar es un dispositivo que sirve para captar la radiación (energía) solar y convertirla en un calor utilizable. La energía se encuentra dispersa pero este dispositivo la concentra de manera que proporcione calor utilizable. Un medio de transferencia ya sea el aire o algún fluido, puede transportar el calor desde el colector hasta el lugar en que se va a usar.

Cuando un objeto se expone a la radiación solar su temperatura se eleva hasta que las pérdidas de calor igualan las ganancias. Las pérdidas dependen de la emisión de radiación del material caliente, del movimiento del aire frío que lo rodea y la conductividad térmica de los objetos en contacto con él. Las ganancias dependen de la intensidad de la radiación solar y del poder absorbente de su superficie. La radiación solar se puede recoger de dos maneras fundamentales producir altas temperaturas: cubriendo una superficie receptora con una lámina transparente a la luz del sol de vidrio o plástico, y enfocando la radiación solar recibida en una gran superficie a un receptor de superficie pequeña.

La utilización de la energía solar exige la captación de la energía solar y transportarla al absorbente donde se convierte bien en electrones o en fotones.

Existen básicamente dos tipos de colectores:

1. Colectores solares planos.
2. Colectores concentradores.

La diferencia básica entre ambos radica en como interaccionan con la radiación.

El colector de placa plana es simplemente un absorbente de fotones, convirtiendo los fotones en fonones (calor). No es direccional en el sentido de que un fotón que llega desde cualquier dirección puede ser absorbido; de aquí que se absorbe energía tanto del firmamento y del entorno como del sol. Esto significa que un colector de placa plana es relativamente insensible a las condiciones del cielo y funciona sólo bajo la irradiancia total que incide sobre la superficie absorbente. Por otra parte, un colector concentrador enfoca el flujo incidente sobre el receptor que es menor que la abertura del colector, incrementando por lo tanto la concentración del flujo sobre el receptor. Por las leyes de la óptica, un colector concentrador no puede concentrar la luz difusa procedente del cielo y de aquí que depende solamente de la intensidad de la componente directa de luz solar que llega al colector.

3.1 COLECTORES SOLARES PLANOS.

Los colectores solares planos, figura 3.1, están diseñados para suministrar energía a temperaturas hasta de 150°F aproximadamente sobre la temperatura exterior (ambiental). Sus temperaturas máximas de operación en condiciones de flujo son del orden de 150°F a 240°F. Captan la radiación directa, la difusa y la reflejada no tienen que estar orientados directamente hacia el sol a todas horas y requieren un mantenimiento mínimo a lo largo de su vida útil. Correctamente diseñados y construidos, los colectores solares planos pueden durar de 20 a 25 años o más, dependiendo del diseño.

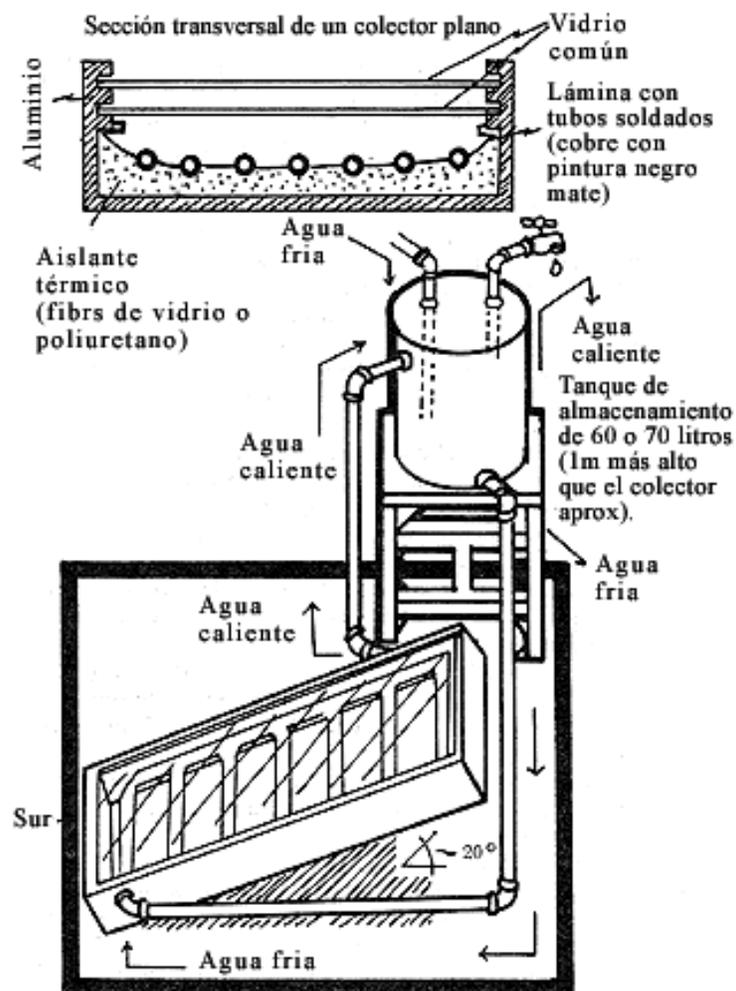


Fig. 3.1 Colector solar plano.

Las grandes superficies receptoras de los colectores planos se suelen hacer de chapa metálica, fundamentalmente de hierro, cobre o aluminio, para obtener una buena conductividad. Se ennegrecen con pintura mate que a menudo contiene negro de humo, o sea se cubren con un revestimiento negro producido químicamente. La chapa incrementa su temperatura al absorber la radiación y transmite su calor a un fluido, normalmente agua o aire, que se mueve en la parte posterior del colector. Generalmente como fluido calorífico se usa agua, puesto que la temperatura de funcionamiento suele ser inferior a la de ebullición. El agua caliente que sale del colector puede usarse directamente, por ejemplo, en un circuito de calefacción convencional de viviendas. Al mismo tiempo el colector cede calor por convección al aire exterior circulante, por conducción al aire y a las partes frías de la estructura que la soporta, y por radiación infrarroja entre 100°C y 300°C la emisión máxima de radiación se efectúa entre 8 y 10 μ en el infrarrojo, lo cual significa que pueden reducirse mucho las pérdidas caloríficas y elevarse la temperatura de trabajo del colector colocando una o dos láminas de vidrio o plástico encima de la superficie receptora, creando un recipiente hermético. La luz del sol de longitud de onda menor que 2.5 μ pasa a través de esta cubierta transparente, pero la radiación infrarroja de gran longitud de onda que emite el receptor caliente no puede volver a salir a través del vidrio o plástico porque se absorbe. Las tapas transparentes enfriadas por el aire exterior y las capas de aire estancadas entre ellas son malos conductores caloríficos y funcionan a una temperatura más baja que la superficie receptora. De esta manera se reducen las pérdidas de calor.

Cuando la radiación solar continúa incidiendo sobre la superficie receptora oscura, la temperatura sube, y las pérdidas caloríficas crecen hasta que alcanzan un estado de equilibrio cuando el calor que se recoge para ser utilizado y las pérdidas de calor igualan al calor recibido. En el estado de equilibrio se cumplirá:

$$CA\tau\alpha = q_0A = q_{\mu}A + (q_r + q_a + q_c)A$$

Donde:

C – flujo total de energía solar recibida por unidad de superficie. Se expresa en cal.cm⁻²min⁻¹, BTUft⁻²h⁻¹, o kilowatios. Normalmente los observatorios meteorológicos nos dan Ch, radiación en una superficie horizontal, que deberá multiplicarse por la relación de la radiación recibida en el receptor inclinado a la recibida en el horizontal. Esta relación se puede calcular a partir del coseno del ángulo de incidencia para la radiación directa, pero no para la difusa. Se puede determinar C experimentalmente con un medidor de radiación calibrado, inclinado al mismo ángulo que el colector plano.

A – área total del receptor.

\mathcal{T} – transmisividad de las láminas de vidrio o plástico que atraviesan los rayos del sol.
Depende del ángulo de incidencia si el ángulo es muy oblicuo.

α – poder de absorción de la superficie receptora, también depende del ángulo de incidencia si este es oblicuo.

q_0 – absorción de energía radiante por unidad de tiempo y por unidad de área.

q_0A – calor radiante absorbido por unidad de tiempo en la superficie total del receptor.

$q_\mu A$ – energía calorífica transferida del receptor al aire o agua por unidad de tiempo.

$q_r A$ – pérdidas por radiación del colector por unidad de tiempo.

$q_a A$ – pérdidas por convección y conducción del colector al aire exterior por unidad de tiempo.

$q_c A$ – pérdidas de calor por conducción del colector a través del aislamiento a la estructura soportante.

El calor útil recogido $q_\mu a$ es el calor del que disponemos y vale:

$$q_\mu A = q_0 A - (q_r + q_a + q_c) A$$

Las fórmulas para calcular las pérdidas de calor por unidad de tiempo por radiación, convección y conducción se pueden encontrar en cualquier libro de ingeniería; una regla de cálculo es suficiente para calcular la mayor parte de éstas cantidades. Las pérdidas de calor por convección crecen muy rápidamente con la velocidad del viento y con la diferencia de temperaturas entre el receptor y el aire. Las pérdidas por radiación crecen con la cuarta potencia de la temperatura, por tanto se vuelven muy grandes a altas temperaturas.

3.2 COLECTORES CONCENTRADORES.

A los colectores concentradores se les suele llamar también como colectores de enfoque o seguidores. Todos ellos funcionan según el mismo principio general. Uno o más espejos reflejan la radiación solar y la concentran en un área de absorción muy reducida. Existen en la actualidad muchos tipos de colectores concentradores. La mayoría requieren de dispositivos mecánicos para variar la posición y seguir al sol en su recorrido a través del cielo; algunos requieren lentes ópticas especiales para concentrar la energía solar.

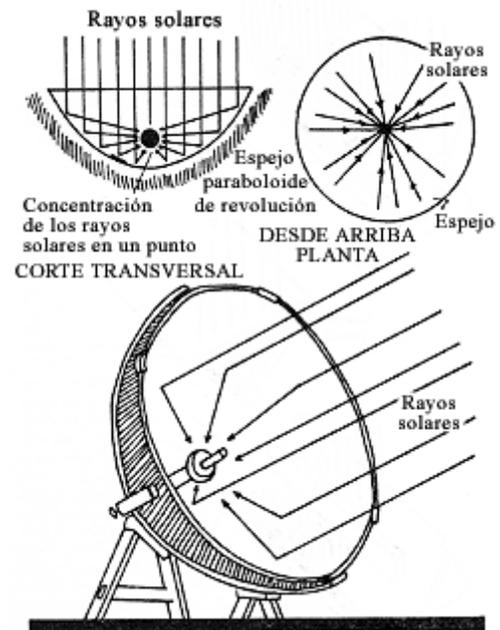


Fig. 3.2 Concentradores solares cilindro parabólico y paraboloide.

Los concentradores solares, como los de la figura 3.2, pueden definirse como aquellos sistemas compuestos de un elemento captador propiamente dicho como superficies reflectantes o refractantes, destinado a concentrar la energía en una zona o región (dónde se situará el elemento receptor o absorbente <<receiver>>) cuyas dimensiones son considerablemente menores que la del elemento captador.

La densidad de flujo F de radiación solar que llega a la superficie terrestre es aproximadamente 1 kw/m^2 (cte. solar) como máximo. Si intentamos captar esta energía absorbiéndola mediante un perfecto cuerpo negro, la temperatura de equilibrio del cuerpo negro será del orden de 364 K por lo que:

$$F = \sigma T^4$$

Donde: $\sigma = 0.1713 \times 10^{-8}$ [BTU/ ft² hr. °R⁴]

ó

$$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \text{ cte. de Boltzman}$$

o sea $T = 94^\circ\text{C}$, temperatura justo por debajo de la temperatura de ebullición del agua. Esta temperatura es suficiente para muchas aplicaciones prácticas dentro de la energía solar como: sistemas domésticos o colectivos de agua caliente, etc. Sin embargo, esta temperatura es insuficiente para otros muchos propósitos como por ejemplo, generar energía eléctrica, etc. por lo que se estaría obligado a cambiar de técnica.

Si se quiere alcanzar temperaturas mayores en el absorbente se requerirá multiplicar por un factor, debido a esa densidad de flujo. Por ejemplo conseguir una temperatura $T \geq 300^\circ\text{C}$ supondría un factor entre 6 y 10. Para ello se necesita concentrar la energía o la radiación, esto es, se necesita un sistema concentrador. Utilizando colectores concentradores es mucho más fácil obtener temperaturas más altas, pero normalmente son más caros, necesitan ser movidos para seguir al sol y utilizan sólo la radiación que no es dispersada por las nubes o la neblina. Dependiendo de la perfección óptica del colector, se puede obtener una temperatura de hasta 3500°C con radiación solar focalizada con espejos circulares de sección parabólica.

La fórmula que nos da el calor producido por un colector focal es similar a la que se ha dado anteriormente para el colector plano, con algunos términos más. El equilibrio térmico, para un colector sin tapa que está siguiendo continuamente al sol:

$$C_n A_c r_s \alpha = q_0 A_t = (q_\mu + q_r + q_a + q_c) A_t$$

En donde:

C_n – radiación directa recibida por el espejo normalmente a los rayos del sol por unidad de tiempo.

A_c – área en proyección del espejo.

r – reflectividad efectiva del espejo para la radiación directa.

s – factor de forma del colector, que nos da la fracción de radiación reflejada que alcanza su objetivo dependiendo de las imperfecciones del espejo a partir de formas ideales parabólicas, esféricas o cilíndricas.

S_r – fracción de la radiación total directa que alcanza el foco después de reflejada en el espejo.

α – poder de absorción de la superficie receptora que está siendo calentada, esto es, la fracción de radiación reflejada que alcanza el foco y se convierte en calor.

q_0 – cantidad de calor absorbida por unidad de área y unidad de tiempo por el receptor situado en el foco.

A_t – área del receptor en el foco que está siendo calentado. Se hace normalmente bastante grande para interceptar una gran parte de radiación focalizada.

$q_0 A_t$ – calor radiante absorbido por el receptor en la unida de tiempo.

$q_u A_t$ – calor absorbido por el receptor y convertido en energía útil a través del fluido circulante por unidad de tiempo.

$q_r A_t$ – pérdida de calor del receptor debida a la radiación por unidad de tiempo.

$q_a A_t$ – pérdida de calor del receptor debida a la convección y conducción por unidad de tiempo.

$q_c A_t$ – pérdida de calor del receptor debida a conducción a otras partes estructurales del colector.

La mayor parte de las medidas de radiación solar se hacen en una superficie horizontal, y nos dan el valor Ch a los valores de C_n tal como han sido definidos en esta fórmula, hace falta restar la radiación difusa de la total y dividir la diferencia por el $\cos\theta$, en donde θ es el ángulo que forman los rayos del sol con el plano horizontal. La manera más sencilla de utilizar la fórmula es emplear las medidas obtenidas con un medidor de incidencia normal y lectura directa. El largo tubo negro del instrumento ha de ser dirigido directamente al sol, moviéndolo

ligeramente para obtener una lectura máxima. Calibrando esta medición se obtendrá la medida de la radiación directa incidiendo normalmente en condiciones tales que excluyen la radiación difusa imposible de focalizar.

El cociente de dividir el área del espejo por la imagen del sol en el foco es una magnitud definida para cada espejo perfecto, pero normalmente los espejos utilizados no son ópticamente perfectos y la imagen del sol no es circular ni uniforme. Algunas partes de la imagen estarán mucho más calientes que otras. Normalmente la superficie receptora se hace bastante grande como para recoger la mayor parte de la radiación focalizada, y el material del que se construye es un buen conductor metálico, de tal manera que se calienta uniformemente a pesar de las desigualdades de la imagen, y el cociente de concentración efectivo es A_c/A_t . El tamaño del receptor depende de la perfección de la forma de la superficie del espejo. Si éste tiene la forma de una parábola perfecta, el receptor puede ser pequeño, si se desvía de ella, parte de la luz enfocada se perderá y habrá que usar un receptor mayor. El área del receptor se mantiene tan pequeña como sea posible, para reducir las pérdidas de calor y producir temperaturas más altas.

La reflectividad efectiva r depende de la perfección de la superficie reflectora, que a su vez depende de las macro y micro imperfecciones de la superficie. Un vidrio plano con un buen depósito de plata proporciona la mejor clase de superficie reflectora. Si el depósito está en la parte de delante del vidrio, casi toda la luz incidente será reflejada. Si el depósito está en la parte de atrás, como se hace normalmente para asegurar la estabilidad del depósito al tiempo y a los agentes corrosivos, hay cierta pérdida por absorción en el vidrio y por reflexión en dioptrio aire – vidrio. La reflexión producida por un cristal plateado en la parte de atrás es del orden del 92%. La superficie de una película de plástico es mucho menos regular y cuando se cubre con un metal reflejante, las irregularidades y microdepresiones afectan a la luz reflejada. Las irregularidades de forma del plástico aluminizado pegado en una cáscara parabólica, y causadas por partículas de polvo y pequeñas arrugas, también hacen que la luz reflejada no alcance su objetivo.

3.3 CONCENTRACION EN UN PARABOLOIDE DE REVOLUCION.

Se hace referencia a todos los dispositivos que captan el calor del sol en una superficie más o menos grande y lo concentran en una zona reducida. Estos equipos utilizan esencialmente la porción directa de la radiación solar, y necesitan estar orientados continuamente hacia el sol. Existen muchas posibilidades de concentrar la radiación solar: combinaciones de espejos planos, reflectores cilindro – parabólicos, reflectores parabólicos y lentes de Fresnel (cilíndricas o esféricas). Dado que los diversos tipos de lentes (sean de Fresnel o simples lupas) no se pueden utilizar para grandes concentraciones de energía, nos referiremos solamente a los sistemas reflectores.

Basado también en las interesantes características ópticas de la parábola y mediante la rotación de ésta sobre su propio eje se generan los concentradores discos parabólicos (fig. 3.3). Son sistemas reflectores de los denominados de foco puntual, con seguimiento de dos ejes, el receptor está situado en el foco del paraboloide de revolución. Debido a la curva parabólica del concentrador y a la baja relación de distancia focal/diámetro se pueden conseguir altas concentraciones de trabajo.

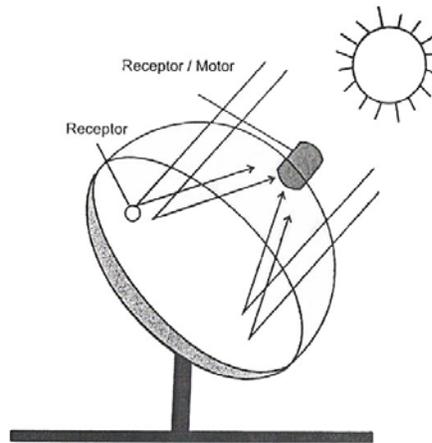


Fig. 3.3 Concentrador disco parabólico.

Estos dispositivos utilizados para alcanzar altas concentraciones fundamentalmente para aprovechamiento térmico y no fotovoltaico. En aplicaciones térmicas los sistemas formados por un disco parabólico y un motor Stirling son los que han demostrado una mayor eficiencia de conversión de radiación solar en energía eléctrica. Las altas concentraciones obtenidas permiten alcanzar altas temperaturas de operación y por lo tanto altas eficiencias en el ciclo termodinámico. Ya desde los primeros prototipos de trabajo han conseguido porcentajes de

eficiencia pico por encima del 30% y hasta un 25% de promedio diario de conversión de la energía solar en eléctrica, lo cual constituye todo un récord.

En el presente capítulo analizaremos el comportamiento del concentrador parabólico que hemos construido y de la manera en que afectan los rayos incidentes provenientes del sol al comportamiento directo de nuestro concentrador parabólico. Nos interesa que nuestro concentrador tenga la máxima potencia de recepción y que introduzca el mínimo de fugas de radiación. Las ondas que nos llegan del sol debido a la enorme distancia a la que nos encontramos lo hace en forma de rayos paralelos a la superficie del concentrador que posteriormente serán reflejados y concentrados mediante un absorbedor. La parábola es la única cónica que permite concentrar todos los rayos que se reflejan en ella, en un punto denominado foco manteniendo la igualdad de fase. Se tiene entonces que el reflector concentra en el foco todos los rayos que se reflejan en él. (Ver fig. 3.4)

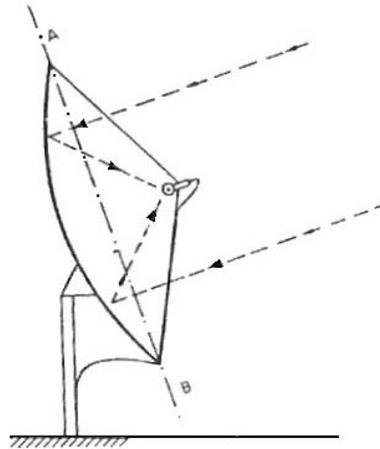


Fig. 3.4 Concentración en el foco

3.4 RAZON DE CONCENTRACION

La definición más común de razón de concentración que se usará aquí, es una razón de concentración por área y se denotará de la siguiente manera:

$$C = \frac{A_a}{A_r}$$

Donde:

C es la razón de concentración

A_a es el área de apertura de entrada de los rayos solares

A_r es el área de apertura de salida del receptor por donde emergen los rayos solares

En la práctica, si se obtienen temperaturas por debajo de la de ebullición del agua, se sabe que estas temperaturas serán suficientes para aplicaciones prácticas dentro de la energía solar como en sistemas domésticos o colectivos de agua caliente, calefacción etc. La temperatura obtenida por debajo de la de ebullición será insuficiente para nuestro propósito que es la de generar electricidad. Si se ha alcanzado temperaturas mayores que la de ebullición en el absorbente, por ejemplo una temperatura $T \geq 300^\circ\text{C}$, se necesitará un sistema concentrador y esa es la característica básica de la razón de concentración en los colectores concentradores.

La razón de concentración máxima para un concentrador parabólico es función de la geometría del receptor, ya que ésta determina la manera en que son interceptados los rayos solares que han sido concentrados. Así, cada receptor presenta una forma particular de interceptar la radiación solar concentrada estableciéndose entonces diferentes distribuciones de energía por unidad de área. En esta sección analizaremos el concentrador parabólico con receptor plano. Este análisis se basa en el tamaño de la imagen solar formada en el plano focal del espejo parabólico al ser interceptada por un receptor circular o plano.

La geometría del paraboloide de revolución permite concentrar la radiación incidente en su plano receptor. Se establece que la radiación solar directa se encuentra en un cono angular $\alpha = 0.53^\circ$ (el ángulo que sustente el Sol a la distancia Tierra - Sol, $\alpha = 32'$) y que la radiación entrante es normal a la apertura del concentrador. Se especifica que la radiación concentrada impacta un receptor circular o plano, el cual se sitúa en el plano focal del concentrador.

3.5 ANALISIS PARA EL SISTEMA DE SEGUIMIENTO AL SOL

Para un adecuado nivel de concentración, un sistema de seguimiento solar debe hacer rotar al concentrador a lo largo de dos ejes, lo que asegura que el eje óptico esté orientado adecuadamente en dirección de la radiación solar directa. Los mecanismos que proporcionan los dos grados de libertad que permiten al concentrador enfocar los rayos solares en el receptor son:

Elevación azimut y de eje polar. El primero hace rotar al concentrador en un plano paralelo a la tierra (azimut), y en otro perpendicular a éste (elevación), lo que proporciona al concentrador una rotación arriba/abajo y derecha/izquierda. En el segundo caso se hace rotar al concentrador mediante un eje paralelo al eje de rotación de la tierra a una velocidad constante de 15° por hora, y un eje de declinación, el cual es perpendicular al eje polar y presenta variaciones pequeñas de $\pm 23.5^\circ$ al año.

De esta manera, en los sistemas de orientación mecanizado se encuentran los sistemas de rastreo solar y los sistemas programados. Los sistemas de rastreo solar usan detectores para determinar la alineación y mediante controladores electrónicos realizar las correcciones necesarias. Los sistemas programados, por otra parte, mueven al colector en una manera predeterminada (por ejemplo 15°/hr sobre el eje polar) y requieren la verificación de su alineación. Cualquier sistema deberá tener la capacidad de ajustar la posición del colector al final del día a la posición de operación del siguiente día, así también, ajuste a una posición de estiba para cualquier eventualidad como por ejemplo una racha de viento intenso o una situación de emergencia.

3.6 CONCEPTOS RELATIVOS A LOS COLECTORES SOLARES

En esta sección definimos de manera breve conceptos relacionados a los colectores solares con el fin de que sirva como una guía para tener en cuenta y que puedan ser ampliados más profundamente para comprender mejor el funcionamiento de los mismos.

Radiación solar – energía radiante recibida del sol en su forma directa y difusa. La componente directa es la que se recibe directamente del sol sin haber sufrido ninguna desviación en su trayectoria; la difusa se debe a su dispersión al atravesar la atmósfera y reflexión sobre la tierra.

Colector solar – dispositivo que concentra la componente directa de la radiación solar y transfiere su energía a un fluido.

Concentrador – dispositivo que concentra la componente directa de la radiación solar sobre un absorbedor.

Absorbedor – componente de un dispositivo solar que tiene como función captar y retener la mayor cantidad de radiación solar.

Área del absorbedor – área que recibe la radiación solar.

Área de apertura – área del captador que intercepta la radiación solar.

Razón de concentración – se define como el cociente entre el área de apertura colectora y el área del absorbedor.

Angulo de aceptancia – amplitud de la zona angular dentro de la cual la radiación es captada por el absorbedor de un concentrador. El valor mínimo de aceptación es del orden de $\frac{1}{2}^\circ$ y se debe al tamaño finito del sol, mientras que un colector plano tiene un ángulo de aceptación de 180° .

Eje de concentrador – línea que pasa por el foco y su vértice.

Angulo de borde – ángulo formado por el eje de un concentrador (tipo parabólico) y la línea imaginaria que va desde su borde al punto focal.

Absortancia – razón de la radiación solar absorbida a la radiación incidente.

Emitancia – razón entre la energía radiante (calor) emitida desde una superficie de un cuerpo a la radiación emitida por un radiador perfecto o por un cuerpo perfectamente negro a la misma temperatura.

Eficiencia óptica de un colector – razón de la energía captada por el colector solar a la energía solar incidente sobre el colector. Razón de radiación que recibe la apertura de un colector ideal en dirección al sol a la que es eventualmente absorbida por el absorbedor de un colector real que puede no estar dirigido directamente hacia el sol.

Helióstato – dispositivo que sirve para reflejar la componente directa de la radiación solar sobre un blanco fijo.

Reflejancia – razón de radiación reflejada de un material a la radiación incidente sobre el mismo.

Reflejancia especular – esta consiste cuando una fracción de la energía entrante incide sobre un espejo con un ángulo de incidencia particular, entonces ésta es reflejada dentro de un cierto ángulo sólido que estará centrado alrededor de un rayo saliente con un ángulo igual al de incidencia respecto de la normal.

Factor de forma – razón de la energía (radiación) incidente sobre el absorbedor a la radiación directa sobre el área de apertura del concentrador.

Transmitancia – razón entre la radiación o de la energía radiante transmitida por un material dado a la energía solar incidente.

Absortividad – la razón entre el número de energía radiante absorbida por un cuerpo y la que cae sobre el mismo. Es igual a la emisividad por radiación de la misma longitud de onda.

Fotón – cantidad discreta de energía electromagnética. Los fotones tienen momentos, pero no masa o carga eléctrica.

Insolación – absorción de la energía solar por la superficie de la tierra. La velocidad con la que la energía llega a la superficie de la tierra procedente del sol.

Irradiación – radiación incidente; exposición a la radiación, como en un reactor nuclear.

Irradiación solar – cantidad de radiación, tanto directa como difusa, que puede ser recibida en un lugar determinado.

Lumen – cantidad de luz necesaria para iluminar 1 pie cuadrado con una intensidad promedio de 1 pie-bujía.

Radiación – emisión y propagación de la energía a través de la materia o del espacio por medio de perturbaciones electromagnéticas, las que actúan tanto como ondas como en forma de partículas; partículas conocidas como fotones, flujos de partículas alfa y beta en rápido movimiento; neutrones libres y radiación cósmica.

Refrectancia – razón entre la radiación reflejada por un superficie y la radiación total incidente en dicha superficie.

Reflectividad – razón entre la energía radiante reflejada por un cuerpo y la que cae sobre el mismo.

Reflexión – rechazo de los rayos luminosos o de otra índole cuando chocan con una superficie sólida. en la prospección sísmica es la energía que regresa (en forma de ondas) desde u disparo que ha sido reflejado por una discontinuidad en velocidad hacia un detector; indicación en un registro de la energía reflejada.

Refracción – un cambio en dirección de un rayo de luz cuando pasa de un medio a otro con densidad óptica diferente.

Emisividad – razón entre la energía radiante emitida por un cuerpo, y la emitida por un cuerpo perfectamente negro. Este último tiene una emisividad de 1; un reflector perfecto, una emisividad de 0.



CAPITULO 4

**PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN
COLECTOR SOLAR TIPO
CONCENTRADOR PARABOLICO.**

4.1 CONSIDERACIONES ELEMENTALES Y DIMENSIONAMIENTO DEL PERFIL PARABOLICO

Dentro de los objetivos del presente trabajo de investigación, es mostrar la manera de obtener o generar determinada cantidad de energía, teniendo como fuente alternativa, la energía radiante suministrada o proveniente del sol comúnmente referida como energía solar. La manera de hacerlo para nosotros es en principio describiendo la construcción física de un concentrador solar, el cual es necesario dimensionar, antes que todo, basándose en ciertos criterios para ser capaz de captar la radiación solar que proporcione la energía requerida para una necesidad específica. Inicialmente hemos considerado que las dimensiones dadas al colector sean apropiadas para generar energía eléctrica mediante un sistema que describiremos en el capítulo 5. Esta cantidad de radiación solar debe ser lo suficiente elevada para cubrir las necesidades promedio de una vivienda de nivel medio y satisfacer las demandas tanto de accesorios como de aparatos elementales a plena carga con un factor de demanda del 100% y en horas críticas.

Dado que la energía final que se logre obtener dependerá de la eficiencia total del sistema, la cual es el resultado de la eficiencia de cada uno de los elementos que lo forman y en particular del concentrador solar, de momento enfocaremos nuestra atención en éste pensando en lograr la mayor eficiencia posible, tomando en cuenta los siguientes aspectos.

Sabemos que la energía solar es muy intermitente teniendo una variación al llegar a la superficie de la tierra de entre 1.5 y 0 cal. $\text{cm}^{-2} \text{min.}^{-1}$. El concentrador solar que construyamos estará expuesto a esta energía variable y la cantidad que podamos aprovechar depende en principio del área de apertura del colector. Las consideraciones que tomamos en cuenta para dimensionar el diámetro que determina esta área son de carácter práctico y se refieren a la mayor distancia, que es la apropiada para poder trabajar y en base a los medios con que se cuente. La dimensión y el peso que nos permitirá manipular el elemento también se han tomado en cuenta tanto para el movimiento de la base para un adecuado seguimiento solar así como su traslado al lugar de operación sin el apoyo de artefactos de carga, sino con el apoyo y el esfuerzo de varias manos.

De la geometría recordemos que una parábola es la gráfica de todos los puntos cuya distancia a un punto fijo es igual a su distancia a una recta fija. El punto fijo se llama foco y la recta fija directriz. Una variante de la ecuación que cumple las condiciones de la definición de parábola es

$$y^2 = 2px, \quad p > 0$$

A esta expresión se le llama ecuación de la parábola con foco en el $(p/2, 0)$ y directriz en el $x = -p/2$. El vértice está en el origen y el eje de la parábola es el eje x .

Es claro que si variamos la distancia al foco se obtienen distintas gráficas de parábolas que podrían considerarse dentro de las dimensiones apropiadas para un colector como el que se está por construir. Esto nos lleva a obtener las gráficas de varias parábolas con distinta distancia focal y seleccionar la más apropiada para un diámetro determinado.

Utilizando la ecuación anterior graficaremos dichas parábolas, dando distintos valores a p para varios puntos (x, y) . El intervalo que consideraremos es de $p = 75$ a $p = 285$ en variación de 15 unidades. Daremos el valor de x empezando con $x = 10$ y variando 10 unidades.

Como ejemplo veamos los puntos de la gráfica con $p = 75$

$$y^2 = 2px \quad \text{sustituyendo para } x = 10$$

$$y^2 = 2(75)(10)$$

$$y^2 = 1500$$

$$y = 1500^{1/2}$$

$$y = 38.729$$

sustituyendo para $x = 20$

$$y^2 = 2(75)(20)$$

$$y^2 = 3000$$

$$y = 3000^{1/2}$$

$$y = 54.772$$

sustituyendo para $x = 30$

$$y^2 = 2(75)(30)$$

$$y^2 = 4500$$

$$y = 4500^{1/2}$$

$$y = 67.082$$

La tabla 4.1 muestra los resultados hasta $x = 160$ y para los demás valores de p y similares valores de x para encontrar los puntos (x, y) con los que graficaremos las parábolas consideradas.

P	X	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
75	y	38.72	54.77	67.08	77.45	86.60	94.86	102.46	109.54	116.18	122.47	128.45	134.16	139.64	144.91	150	154.91
90	Y	42.42	60.00	73.48	84.85	94.86	103.92	112.24	120.0	127.27	134.16	140.71	146.9	152.97	158.74	164.31	
105	y	45.82	64.80	79.37	91.65	102.46	112.24	121.24	129.61	137.47	144.91	151.98	158.74	165.22	171.46		
120	y	48.98	69.28	84.85	97.97	109.54	120.00	129.61	138.56	146.96	154.91	162.48	169.70	176.63			
135	y	51.96	73.48	90.00	103.92	116.18	127.27	137.47	146.96	155.88	164.31	172.33	180.00				
150	y	54.77	77.45	94.86	109.54	122.47	134.16	144.91	154.91	164.31	173.20	181.65					
165	y	57.44	81.24	99.49	114.89	128.45	140.71	151.98	162.48	172.33	181.65						
180	y	60.00	84.85	103.92	120.00	134.16	146.96	158.74	169.70	180.00							
195	y	62.44	88.31	108.16	124.89	139.64	152.97	165.22	176.63	187.34							
210	y	64.80	91.65	112.24	129.61	144.91	158.74	171.46	183.30								
225	y	67.08	94.86	116.18	134.16	150.00	164.31	177.48	189.73								
240	y	69.28	97.97	120.00	138.56	154.91	169.70	183.30	195.95								
255	y	71.41	100.99	123.69	142.82	159.68	174.92	188.94	201.99								
270	y	73.48	103.92	127.27	146.96	164.31	180.00	194.42									
285	y	75.49	106.77	130.76	150.99	168.81	184.93	199.74									

Tabla 4.1 Valores (x, y) en cm., para parábolas con distintos puntos focales. Sólo se consideran valores positivos de “y”

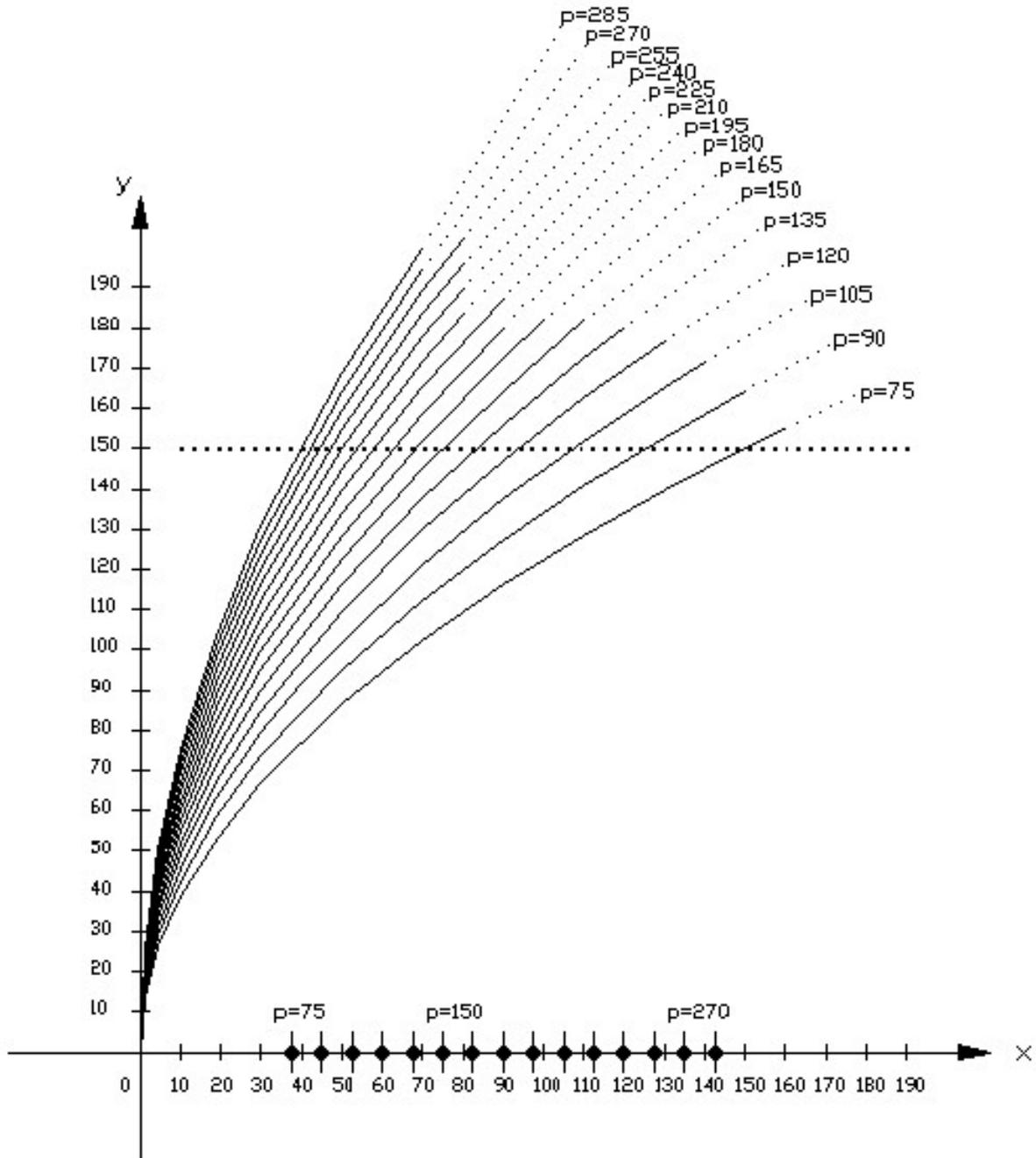


Fig. 4.1 Gráfica de parábolas con distintos puntos focales. Sólo se consideran valores de “y” positivos.

Hemos determinado construir un colector concentrador con un diámetro de 3.00m con distancia focal de 1.35m. Hay métodos de trazado prácticos, aproximados, para el trazo de un perfil parabólico, en este caso el trazo lo realizamos, primeramente, a partir del dibujo en computadora por ploteo a escala natural, sin embargo, se incurre en un error debido al deslizamiento del papel en el equipo, lo cual hace necesario una rectificación manual sobre el mismo trazo, asegurando mayor exactitud.

4.2 INTRODUCCION AL PROCESO CONSTRUCTIVO.¹⁰

La técnica más comúnmente empleada para la construcción de colector concentrador del tipo que hemos considerado aquí es la de la construcción de un molde convexo a nivel de piso, en el cual se aplica un material que da forma al cuerpo cóncavo principal del colector.

Para obtener la mayor eficiencia del colector es necesario tener el máximo cuidado en el trazo del perfil parabólico que dará forma al molde y éste a su vez al cuerpo del colector. Un punto importante que se tiene que considerar es la estructura final que se obtiene. Referente a la resistencia mecánica, considerar una rigidez que soporte los esfuerzos y prevenga posibles fracturas del material, esto muy relacionado al peso del mismo, una mayor cantidad de material no necesariamente hará una estructura más resistente, por el aumento de peso, igualmente aumentara la dificultad para manipular el elemento.

El primer paso consiste en construir un elemento rígido con la forma y las dimensiones, previamente determinados, de la parábola, el cual contará con un centro de giro que permitirá ir dando forma al molde. Enseguida detallaremos paso a paso todo el proceso.

4.3 DESCRIPCION DEL PROCESO DE MOLDEO.

Es importante en cualquier proyecto la selección adecuada de los materiales que darán vida al mismo, tanto por el rendimiento óptimo que puede ofrecer por uso de los mismos, como por el desembolso o costo que se tenga que hacer para ofrecer un motivo más de viable para la realización del proyecto. En este caso la selección no ha sido muy exhaustiva y se ha optado por materiales simples y comúnmente utilizados y de fácil adquisición.

¹⁰ Para la realización de este proceso constructivo contamos con la colaboración de dos compañeros tesistas que igualmente deberán presentar su trabajo escrito.

Mediante los resultados obtenidos se procede al acarreo y compra de materiales que juntos darán forma a la superficie seleccionada. Simultáneamente se empieza a construir por separado la estructura metálica que servirá de apoyo para el moldeo empezando con el rolado del perfil tubular cuadrado quedando como se muestra en las figuras 4.2 y 4.3, que se armará de tal forma que se montará sobre un poste pivote fijado rígidamente al suelo con taquetes de expansión que nos servirá de guía para dar forma a la superficie de la parábola requerida.

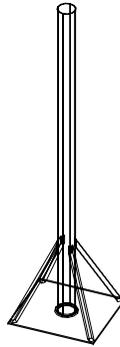


Fig. 4.2 Poste pivote.

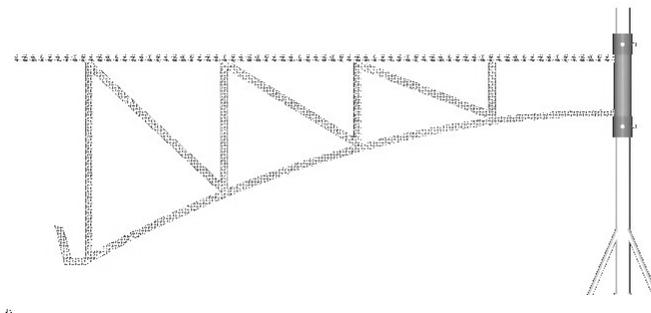


Fig. 4.3 Estructura metálica parabólica.

Hechos los ajustes necesarios para el perfil de trabajo, se procede con el acarreo de diversos materiales de relleno (unicel, block, tabique, grava, arena, cemento y aro metálico de 15 cm. de espesor para la conformación de la parábola, realizando un relleno con el material acarreado para la parte inferior. Para la parte superficial se empieza a aplicar varias capas con mezcla de cemento y arena, describiendo una trayectoria circular uniforme para construir un plato parabólico rústico.

En base a todo lo anterior se pueden distinguir 5 etapas para la construcción de la parábola que son:

- Selección del área de trabajo
- Acarreo de material
- Relleno para la superficie
- Construcción de la superficie
- Acabado de la superficie

El proceso se puede visualizar al final del capítulo mediante los reportes fotográficos ordenados cronológicamente.

En esta etapa lo que se pretende es preparar la superficie para recibir una serie de procesos que darán forma al alma de la parábola que, sin duda, será una de las más importantes de todo este proyecto ya que de ello dependerá que tan eficiente sea el colector concentrador. Durante esta segunda etapa se empieza con la limpieza general de la superficie de la parábola, así como del lijado de las partes rugosas y el resane de las imperfecciones. Finalizado el proceso de acabado fino, se inicia con el pintado de la superficie, aplicando una serie de capas con pintura esmalte especial para superficies de cemento. Acabado el proceso de pulido se realiza nuevamente otra etapa de limpieza de impurezas con lija fina, dando un retoque con pintura esmalte. Posteriormente viene el proceso de enceración de la superficie con aditivo químico especial para superficies llamado “cera desmoldante”, que con la aplicación de varias capas se deja reposar la superficie por varios días para iniciar con el pegado de gajos de lamina de acero inoxidable acabado espejo. Esta etapa se ve reflejada por medio de las exposiciones siguientes. Figuras 4.4 y 4.5.

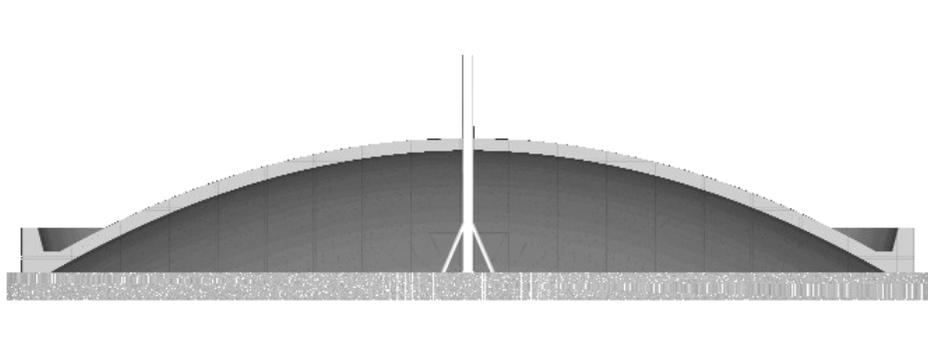


Fig. 4.4 Corte frontal del molde de concreto

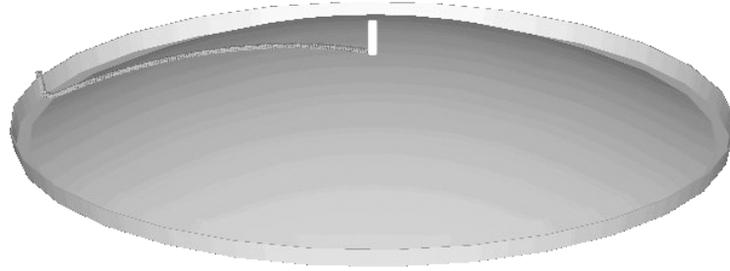


Fig. 4.5 Molde de concreto.

4.4 OBTENCION DE LA SUPERFICIE DEL COLECTOR.

Una vez terminado el molde realizado en concreto, se puede empezar a dar forma al concentrador utilizando la resina y fibra de vidrio antes mencionada. La aplicación de dichos materiales requiere herramienta apropiada para la aplicación y manejo de estos productos, tanto para facilitar su uso así como para guardar las medidas de seguridad necesarias.

4.4.1 Preparativos.

Antes de iniciar con la aplicación de la resina y de la fibra de vidrio se requiere de algunos preparativos relacionados con el desmolde y la fijación del material reflejante. Relativo al desmolde es necesario aplicar varias capas de cera desmoldante. Se coloca una cantidad suficiente de cera en una sección de área sobre el molde esparciéndola, dando un poco de tiempo para un secado apropiado y después se pule con estopa o un trapo suave. Esto se realiza sobre todo el molde, principalmente en toda la orilla donde la resina estará mas en contacto con el mismo. Puede aplicarse también una película desmoldante además de la cera.

En cuanto al material reflejante, este debe estar listo para colocarse sobre el molde antes de la aplicación de la resina y de la fibra de vidrio. Los cortes que se realizan sobre las hojas de acero inoxidable con dimensiones de 3.05 m x 0.915 m, se indican en la figura 4.6.

El criterio seguido para determinar el contorno dado a las secciones del material reflejante es, por un lado, el máximo aprovechamiento del material y por otro la fácil y mejor colocación y conformación que toma el material sobre el molde con configuración parabólica.

Continuando con la preparación de la lámina, a una cara de la misma se lija un poco con la idea de que la resina y fibra de vidrio tengan una mayor adherencia. Una vez hecho esto se van uniendo las secciones triangulares con cinta adhesiva por el lado de la cara pulida, la cual quedara apoyada sobre el molde. Se colocan las secciones hasta cubrir toda la superficie parabólica del molde, procurando que todo el recubrimiento con este material reflejante obtenga, en lo posible, la misma configuración, esto es que se encuentre pegado al molde.

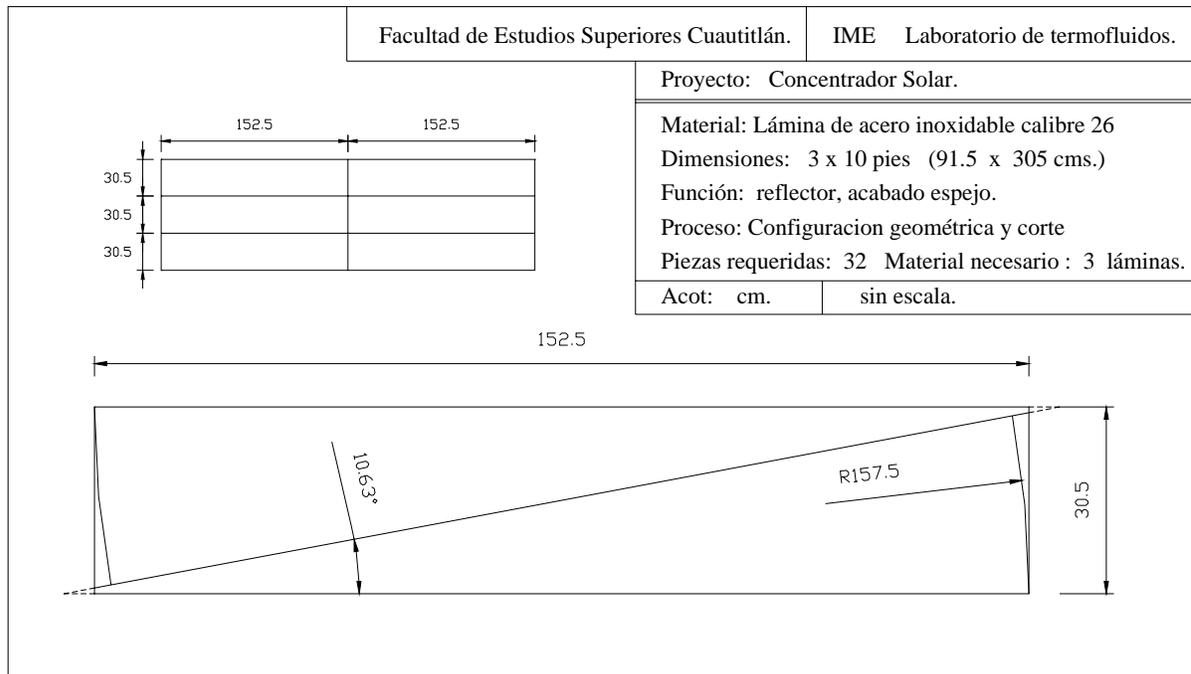


Fig. 4.6 Configuración y dimensionamiento del material reflejante.

4.4.2 Refuerzos.

Un elemento necesario en el concentrador son los refuerzos. Estos proporcionan una estructura rígida que permite la manipulación, el movimiento, el soporte y la resistencia a cualquier esfuerzo al que sea requerido en el uso normal. En las figuras 4.7 y 4.8 se detalla la configuración dada a los refuerzos de nuestro concentrador.

Estos los conformaremos con un molde hecho de cartón, cortados y unidos mediante cinta adhesiva, dando la forma requerida. Posteriormente definiremos el momento de su uso en el proceso constructivo. Aquí solo definimos como se ha realizado el molde.

FESC. UNAM

Laboratorio de termofluidos.

Proyecto de tesis. Colector solar.

Geometría de base apoyo elementos de sujeción.

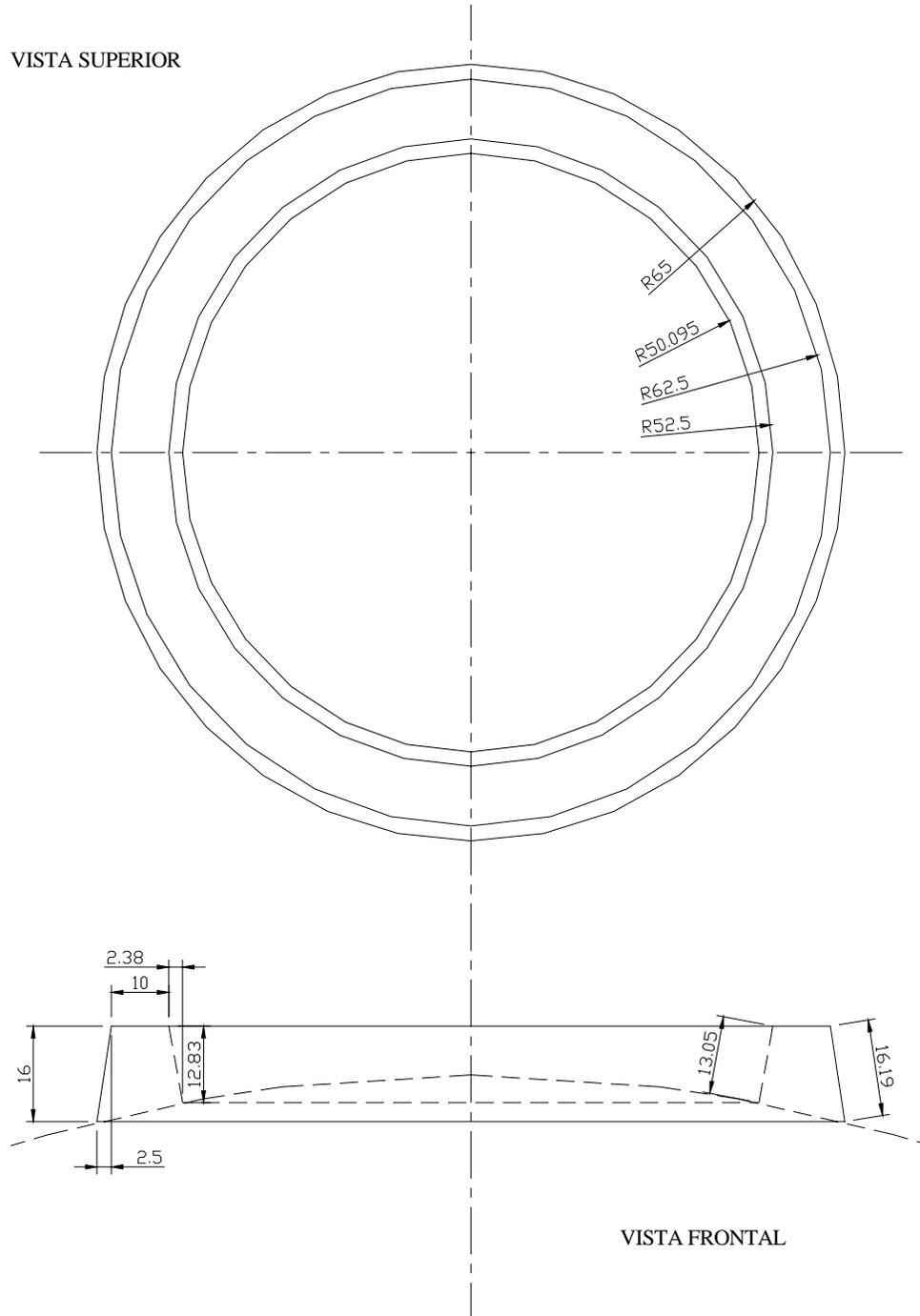


Fig. 4.7 Apoyo elementos de sujeción.

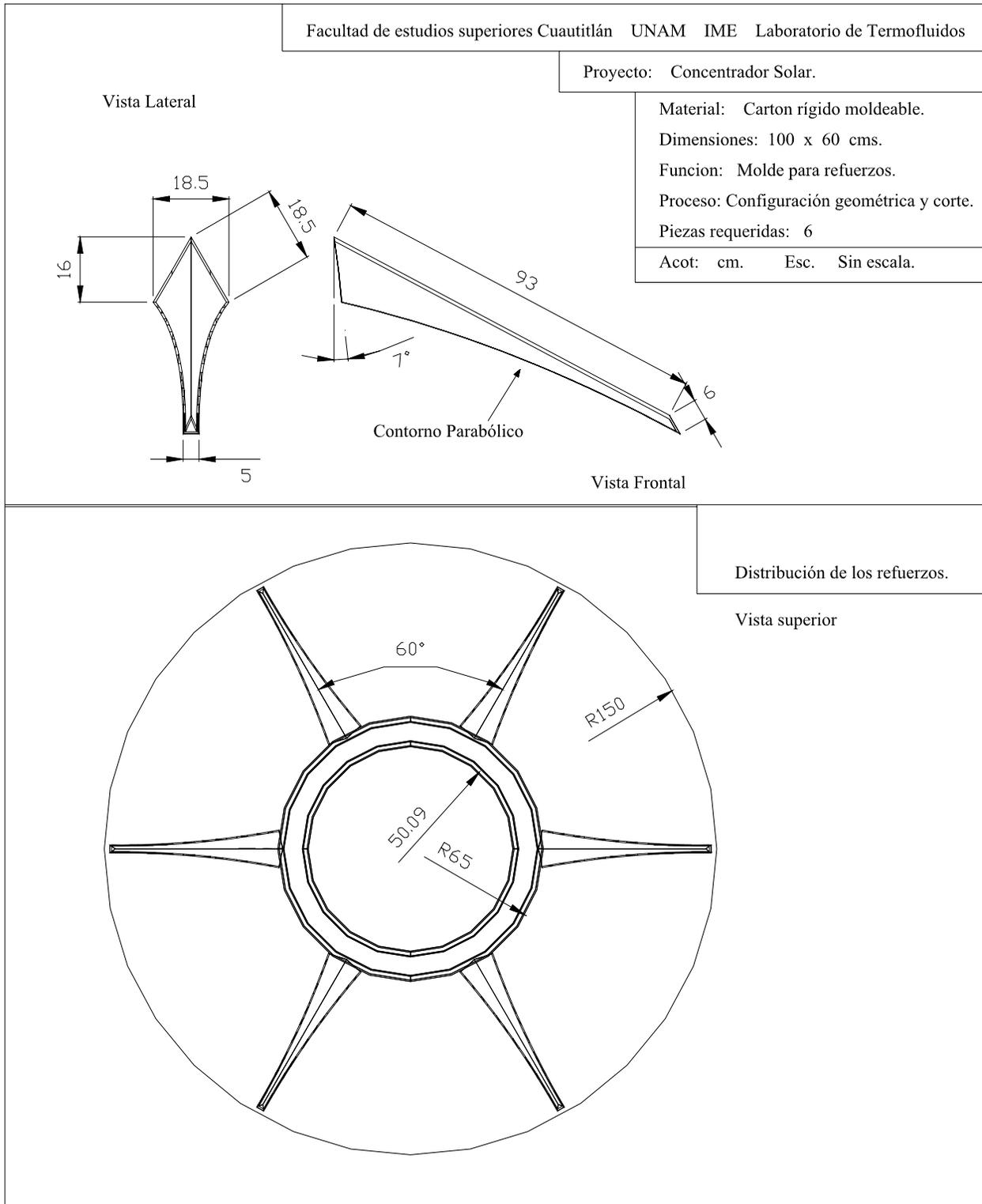


Fig. 4.8 Distribución y configuración de moldes para refuerzos.

4.4.3 Sujeción.

La sujeción de la parábola en una base apropiada debe tomarse en cuenta en este punto dado que formara parte tanto del molde como de la estructura misma del colector. El siguiente dibujo muestra como se han realizado las formas metálicas básicas, con tuercas soldadas, que permitirán el fácil montaje y sujeción a la base del colector.

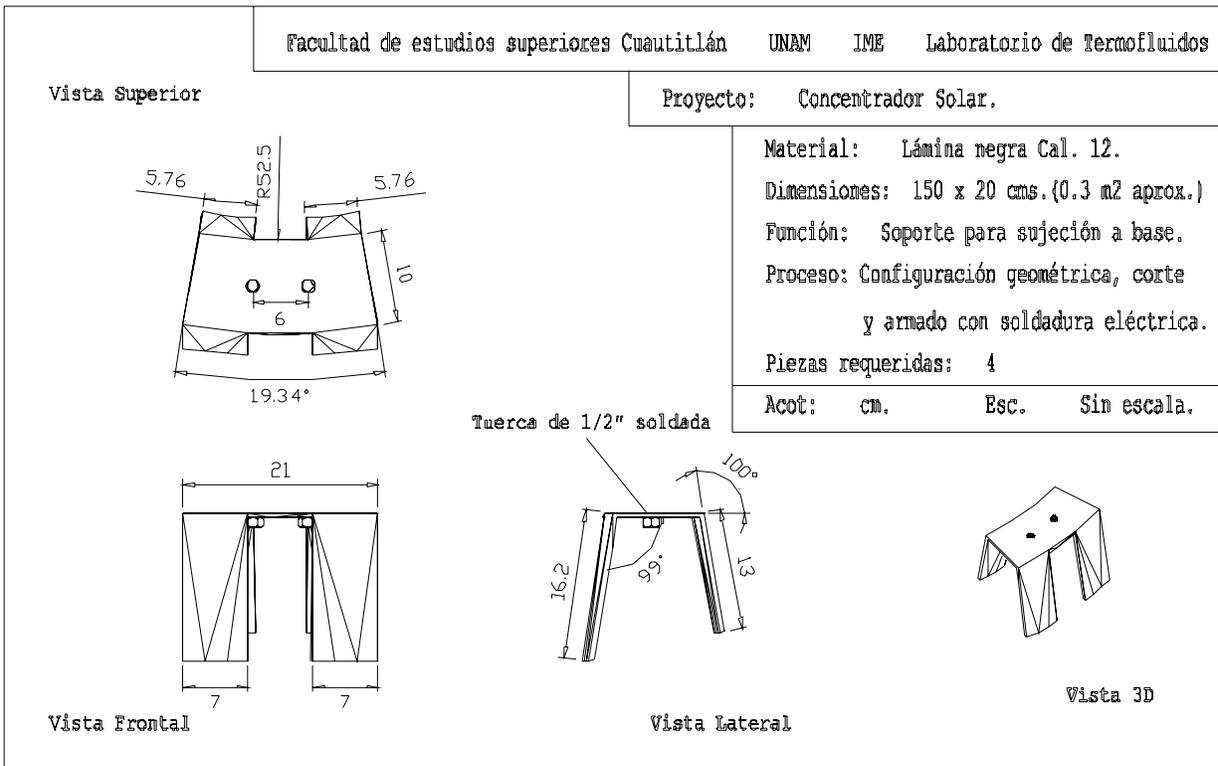


Fig. 4.9 Soportes metálicos para sujeción a base.

4.4.4 Aspectos básicos del material. Resina y fibra de vidrio.

La resina es un material líquido, de productos químicos, que necesita de un catalizador que en cantidad apropiada permite trabajarlo por un cierto tiempo antes de que obtenga una consistencia sólida, rígida y dura. En combinación con la fibra de vidrio se obtiene un material más resistente, con cierta flexibilidad, al cual puede darse las más diversas formas, de acuerdo a un molde realizado previamente.

4.4.5 Proceso principal.

La superficie preparada de la manera antes descrita, se encuentra limpia y libre de polvo, es decir, la colocación de la lámina, se hace en la misma sesión de la primera capa aplicada de resina y fibra. La orilla del molde también debe encontrarse limpia y libre de polvo. Se prepara una cantidad suficiente de resina y catalizador en una proporción sugerida por el proveedor de estos materiales, que permita aplicar el total de producto, de preferencia sin desperdiciar nada. La aplicación se realiza con brocha, esparciendo una capa delgada de resina preparada en una parte del área, la cual se cubre con lienzos de fibra de vidrio, previamente cortados en dimensiones y configuración que se amolden lo mejor posible. Sobre estos lienzos se vierte otra cantidad de resina preparada, haciendo que penetre en la fibra, hasta que su interior se encuentre libre de burbujas de aire y se obtenga un material homogéneo. Es preferible preparar una cantidad moderada de resina y catalizador las veces que sean necesarias hasta cubrir toda la superficie del molde, de manera que no se desperdicie el producto si este empieza a gelar, ya que en este punto no se puede aplicar y se hace necesario desecharlo.

En otra sesión una vez que el material de la primera capa obtenga su consistencia sólida, se puede aplicar una segunda capa. Antes de ello es necesario recortar y lijar las puntas y protuberancias de fibra de vidrio que hayan quedado sueltas y que pueden ocasionar problemas para aplicar una segunda capa al no poderse adherir satisfactoriamente sobre la primera. También una limpieza, quitando mugre y polvo que pudieran haber caído darán mejores resultados. Esta capa se aplica de la misma manera que la anterior sin embargo, para esta utilizamos petatillo en lugar del tipo de fibra utilizada en la primera.

El siguiente paso, en otra sesión, es distribuir y colocar los moldes de cartón para los refuerzos y la base de apoyo para los elementos de sujeción. También se colocan los elementos en su posición final donde quedarán sumergidos y adheridos con la fibra de vidrio y la resina que se aplicaran una vez que los moldes se fijen con cinta adhesiva procurando que la misma no interfiera entre la segunda capa y la tercera que se aplicara junto con los refuerzos. Es necesario que los refuerzos y la base de apoyo cuenten con al menos tres capas de fibra de vidrio y resina para tener una resistencia apropiada.

Para terminar, se aplica una capa de resina y colorante, básicamente para una mejor presentación y acabado de la superficie final.

La aplicación de la resina nos ha dado la configuración final del colector, que aún se encuentra sobre el molde de concreto. Hay algunos aspectos a considerar como el desmolde y el acabado.

Para el desmolde se introdujo agua entre el molde de concreto y el colector, sobre todo en todo el alrededor para permitir el fácil desprendimiento. Los mismos elementos de fijación colocados permiten sujetar el colector, levantarlo y moverlo totalmente fuera del molde.

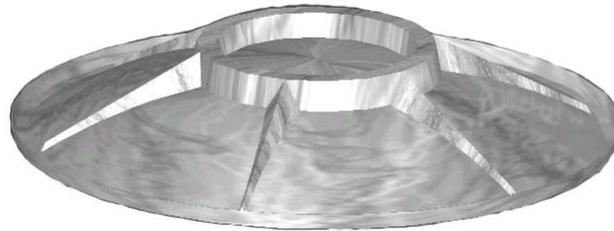


Fig. 4.10 Aspecto final del concentrador parabólico con sus refuerzos en una vista 3D modelizada del diseño.

4.5 MATERIALES.

Es importante en cualquier proyecto la selección adecuada de los materiales que darán vida al mismo, tanto por el funcionamiento óptimo que se puede obtener por uso de los mismos, como por el costo que pueda ofrecer un motivo más de viabilidad para la realización del proyecto. En este caso la selección no ha sido muy exhaustiva y se ha optado por materiales muy comúnmente utilizados y de fácil adquisición. Consideremos cuatro diferentes grupos de materiales utilizados: de apoyo, que nos servirán durante el proceso constructivo pero que no formaran parte del producto final; para moldeo, los utilizados para configurar la forma parabólica; el material principal del cuerpo del concentrador; y por último el material reflejante.

De apoyo.

Definamos los elementos de apoyo construidos con estos materiales y el tipo de los mismos.

Base central para moldeo: Tubo de 1 ½", tramo de lámina calibre 12, refuerzos de cuadrado de 3/8", 2 topes de bronce (no necesariamente de este material).

Estructura de configuración parabólica lateral: Tubular cuadrado de $\frac{3}{4}$ ", tubo de $1\frac{3}{4}$ ", laminillas de ajuste.

Para moldeo.

Consideremos dos moldes por separado, el molde que dará la forma convexa al concentrador y otro que dará forma a los refuerzos los cuales a su vez contendrán los puntos de sujeción a la base.

Para el primero son necesarios materiales de construcción y de relleno, como son tabiques, piedras, cubos de unicel, arena, grava, cemento, yeso, además de un aro metálico de 15 cm. de ancho y de largo suficiente para rodear el perímetro del colector y por último pintura acrílica para recubrimiento final.

Para el segundo se utilizara cartón de grosor suficiente para mantener cierta rigidez, para no permitir la deformación con el recubrimiento del material principal. Mencionamos aquí el material utilizado para la sujeción dado que formara parte del molde, este consta de láminas de calibre 12 y 10, según diseño, tuercas de $\frac{1}{2}$ " y pequeños tubos también de $\frac{1}{2}$ ".

Para cuerpo del concentrador.

Este material, aún no mencionado hasta aquí, consiste en fibra de vidrio, en hoja y otra entretejida conocida como petatillo, además de resina y colorante. La aplicación de estos productos en combinación apropiada da como resultado un material ligero, con buenas propiedades de resistencia, es de fácil aplicación y de costo bastante accesible.

Reflejante.

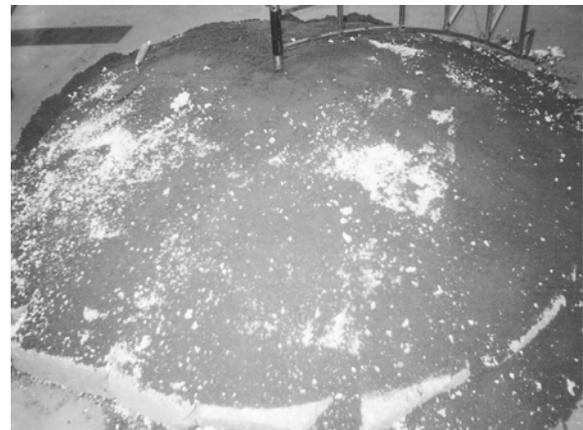
El material utilizado para reflejar los rayos solares es muy importante en el proyecto ya que de él dependerá la obtención de la máxima cantidad de energía que se pueda aprovechar. La selección del material se da, basándose en la mayor eficiencia que pueda mostrar aunado a las implicaciones económicas del mismo. El material utilizado aquí es lámina de acero inoxidable con acabado espejo, de calibre 26, por ende muy ligero y flexible, propiedades que dan suficientes características apropiadas para poder ser utilizado en este tipo de concentradores.

4.6 EXPOSICION CRONOLOGICA DEL PROCESO EN IMAGENES FOTOGRAFICAS.

Secuencia 1. Fijación de la base metálica central de apoyo



Secuencia 2. Conformación del montículo con los materiales de relleno.

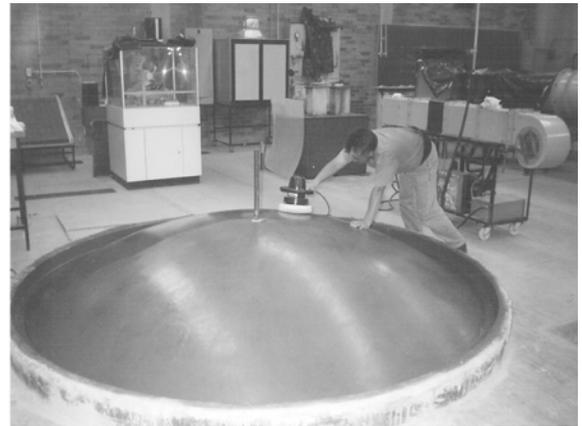


Secuencia 3. Conformación de la superficie del montículo con mezcla (arena, cemento, agua y yeso).

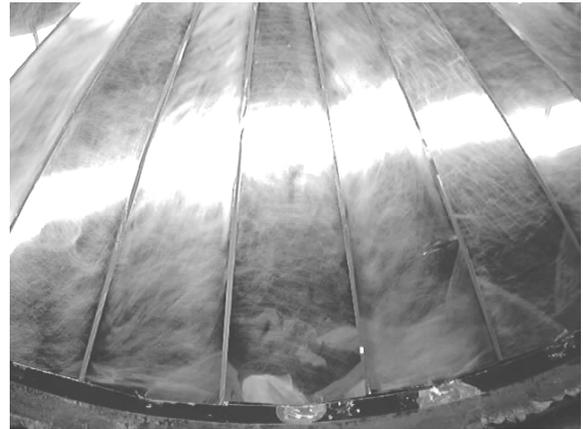




Secuencia 4. Acabado de la superficie: alisado, lijado, pintado y pulido con cera.



Secuencia 5. Preparación y colocación de gajos de lámina de acero inoxidable.

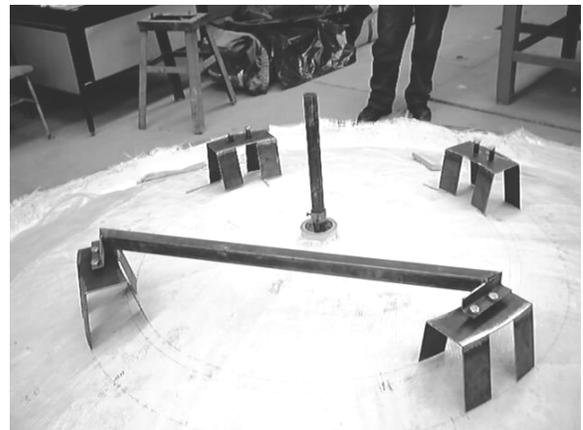
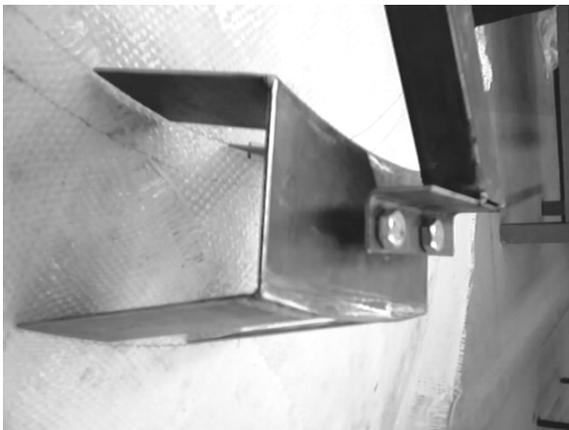
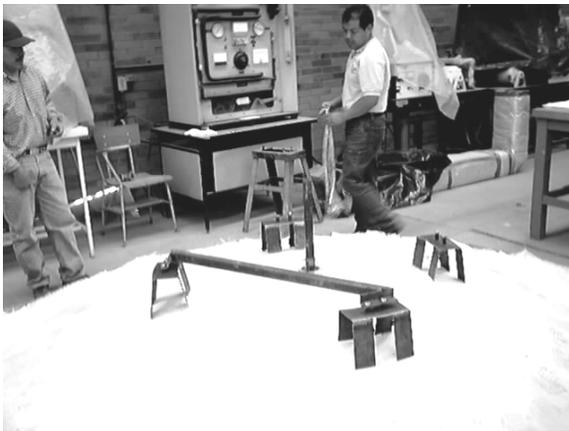


Secuencia 6. Aplicación inicial de resina, fibra de vidrio y petatillo.





Secuencia 7. Colocación de bases metálicas para sujeción y moldes de cartón para refuerzos.





Secuencia 8. Aplicación de resina y fibra para refuerzo sobre el molde de cartón y las bases de sujeción.



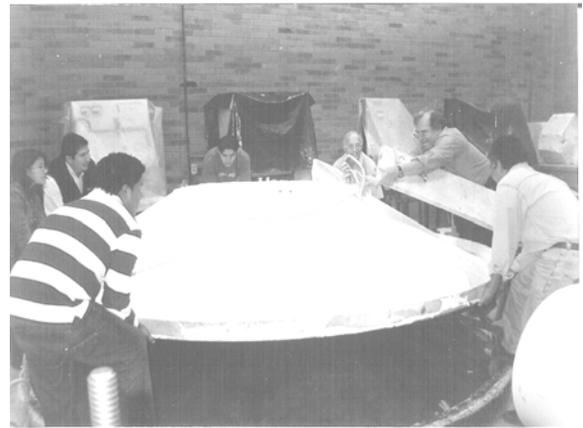
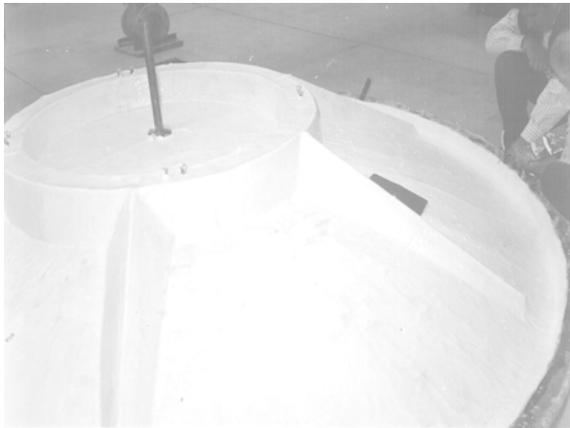
Capítulo 4 Proceso constructivo de un colector solar.



Secuencia 9. Aplicación final de resina, fibra de vidrio y colorante.

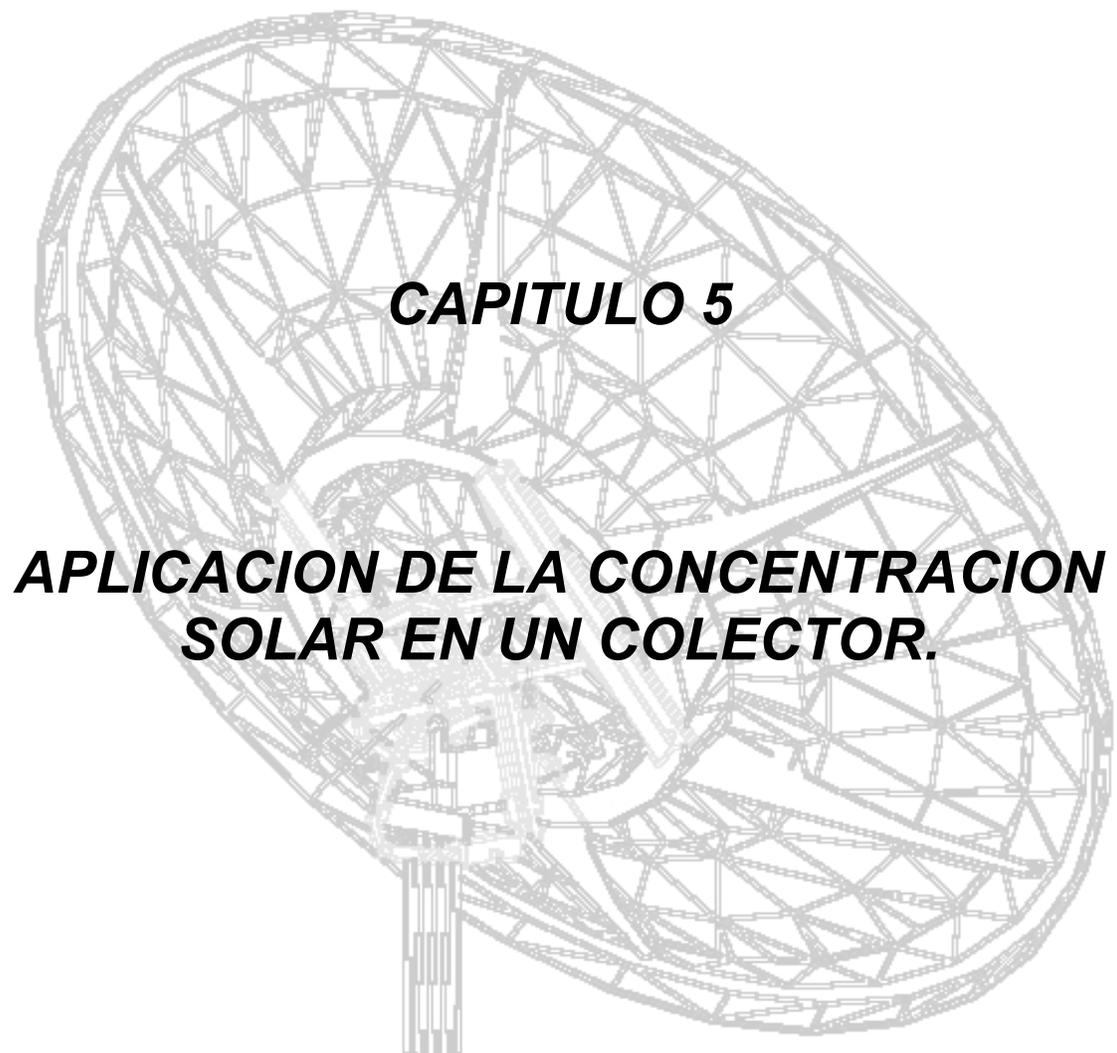


Secuencia 10. Desmolde del concentrador parabólico.



Secuencia 11. Demostración y comprobación inicial de la concentración solar.





CAPITULO 5

APLICACION DE LA CONCENTRACION SOLAR EN UN COLECTOR.

5.1 PLANTEAMIENTO.

Uno de los objetivos de este trabajo es el describir una aplicación para el concentrador construido. Planeamos poder obtener una cantidad de energía eléctrica, a partir de la energía radiante suministrada por el sol, suficiente para cubrir las necesidades promedio de una vivienda de nivel medio, como anteriormente se había mencionado, para lo cual se considerará una lista comúnmente utilizada de gastos energéticos de aparatos de uso común con el fin de estimar la cantidad de energía eléctrica que debemos generar para ello, considerando las eficiencias manejadas comúnmente de los elementos principales del sistema que emplearemos. De esta manera partiremos de conocer una aproximación de la energía que debe captar el concentrador y de ahí hacer algunas consideraciones para dimensionar el mismo. La tabla 5.1. muestra la lista de aparatos mencionada y en la figura 5.1 se tiene el diagrama unifilar que incluye los elementos principales necesarios para el sistema de generación de energía eléctrica y las eficiencias de los mismos junto con la estimación de energía necesaria propuesta.

La eficiencia de algunos de los elementos que componen el sistema depende de las condiciones de operación, de diseño, materiales, de la selección apropiada del tipo de elemento y algunos otros factores que influyen en este. Tal es el caso del concentrador, el intercambiador de calor y la turbina, en los cuales no es tan simple referirse a una eficiencia específica, pero los valores considerados aquí son posibles de alcanzar y de manera optimista los consideramos así para efectos de estimar la radiación solar que debemos captar para obtener la potencia eléctrica que debemos generar en nuestro sistema. El que la energía solar sea intermitente, como se ha mencionado, marca claramente la dificultad para determinar con exactitud los requerimientos del sistema, esto es fijar el área de apertura más apropiada del concentrador así como la localización del foco, la distancia focal.

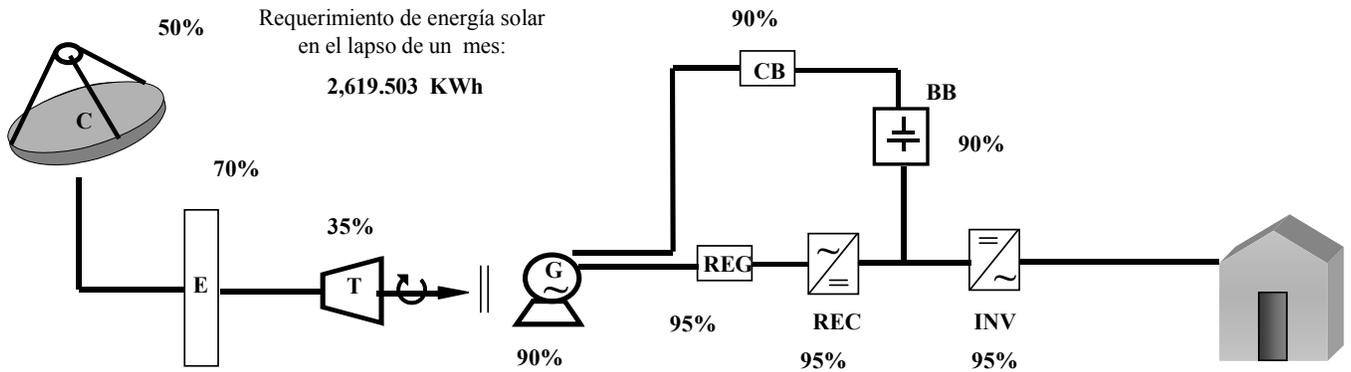
Tabla 5.1 Estimación de la energía utilizada por los aparatos más comunes encontrados en una casa habitación durante el lapso de un mes.

Aparato Eléctrico	Potencia Watts	Uso diario** minutos	Uso mensual Horas (30 días)	Energía utilizada w-h
Radio	15	60	30	450
Videocasetera o DVD	25	30	15	375
Exprimidor	35	10	5	175
Abrelatas	60	5	2.5	150
Estéreo	75	60	30	2250
Cuchillo	95	5	2.5	237.5
Ventilador	100	60	30	3000
Máquina de coser	125	15	7.5	937.5
Batidora manual	140	10	5	700
Televisor a color	150	120	60	9000
Computadora	150	120	60	9000
Extractor de jugo	250	15	7.5	1875
Licuadaora	350	15	7.5	2625
Lavadora	375	30	15	5625
Bomba para agua	400	15	7.5	3000
Refrigerador	575	120	60	34500
Cafetera	700	15	7.5	5250
Secadora de pelo	825	5	2.5	2062.5
Plancha	1200	30	15	18000
Aspiradora	1200	20	10	12000
Horno de microondas	1200	5	2.5	3000
Iluminación *	1200	180	90	108000
Total de energía utilizada en el lapso de un mes (watts- hora)				222212.5
Fuente de potencias de los aparatos: L y F del Centro				222.2125 Kw-h

* Se consideraron 12 luminarios incandescentes de 100 w.

** Algunos aparatos no tienen un uso diario, por lo que se estimo un tiempo semanal y se obtuvo un promedio por día.

ANALISIS ENERGETICO DEL SISTEMA EN BASE A EFICIENCIAS PROMEDIO DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES



Eficiencia total del sistema:

$$\eta_{tot} = (\eta_i \times \eta_{i-1} \times \dots \times \eta_{i-n})$$

$$\eta_{tot} = (\eta_C \times \eta_E \times \eta_T \times \eta_G \times \eta_{CB} \times \eta_{BB} \times \eta_{INV})$$

$$\eta_{tot} = (0.50 \times 0.70 \times 0.35 \times 0.90 \times 0.90 \times 0.95)$$

$$\eta_{tot} = 0.08483$$

$$\eta_{tot} = 8.48 \%$$

Requerimiento de energía eléctrica en el lapso de un mes:

222.2125 KWh

Determinación de la Energía requerida con base en la Eficiencia total del sistema:

$$\eta_{tot} = \text{Energía saliente} / \text{Energía entrante}$$

$$\text{Energía entrante} = \text{Energía saliente} / \eta_{tot}$$

$$\text{Energía entrante} = 222.2125 / 0.08483$$

$$\text{Energía entrante} = 2,619.503 \text{ KWh}$$

C - CONCENTRADOR PARABOLICO	G – GENERADOR
E - INTERCAMBIADOR DE CALOR	CB – CARGADOR DE BATERIAS
T – TURBINA	BB – BANCO DE BATERIAS
	REG - REGULADOR
	REC - RECTIFICADOR
	INV - INVERSOR

Fig. 5.1 Elementos del sistema y eficiencias

Debemos ahora determinar el área efectiva de captación de energía solar, que de acuerdo a nuestros datos iniciales anteriores, es necesaria para obtener la energía eléctrica que hemos planteado. Y en base a ella obtener el perfil de la parábola que dará forma a nuestro primer elemento del sistema, el concentrador solar.

Si consideramos poder captar la energía dada por el nivel de la insolación global media a la latitud de la ciudad de México (ver tabla 5.2), el área necesaria para poder captar el total de la energía requerida en el lapso de un mes que es de 2,619.503 KWh como hemos planteado la obtendríamos:

$$\text{Energía diaria promedio} = 2,619.503 \text{ KWh} / 30 \text{ días} = 87.317 \text{ KWh} - \text{día.}$$

$$\text{Insolación global media diaria en la ciudad de México} = 5.3 \text{ KWh/m}^2 - \text{día}$$

$$\text{Area efectiva de captación de energía solar} = 87.317 \text{ KWh} - \text{día} / 5.3 \text{ KWh/m}^2 - \text{día}$$

$$\text{Area efectiva} = 16.47 \text{ m}^2$$

Tabla 5.2 Insolación global media inclinación a la latitud en México en kWh/m2-Día

Fuentes: Actualización de los Mapas de Irradiación Global solar en la Republica Mexicana (R. Almanza S. ,E. Cajigal R., J. Barrientos A. 1997)
Reportes de insolación de México. Southwest Technology Development Institute, NMSU, 1999

Estado	Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Min	Max	Med
Aguascalientes	Aguascalientes	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	6.3	6.1	5.9	5.7	5.1	4.8	4.0	4.0	7.2	5.6
Baja CaliforniaSur	La Paz	4.4	5.5	6.0	6.6	6.5	6.6	6.3	6.2	5.9	5.8	4.9	4.2	4.2	6.6	5.7
Baja California	Mexicali	4.1	4.4	5.0	5.6	6.6	7.3	7.0	6.1	6.1	5.5	4.5	3.9	3.9	7.3	5.5
Baja California	San Javier	4.2	4.6	5.3	6.2	6.5	7.1	6.4	6.3	6.4	5.1	4.7	3.7	3.7	7.1	5.5
Baja California Sur	S. José del Cabo	5.0	5.6	5.8	5.9	6.9	6.1	5.8	6.2	5.8	5.8	5.2	4.4	4.5	6.3	5.7
Campeche	Campeche	4.8	5.7	6.0	5.3	5.4	4.9	4.9	5.3	5.2	5.4	5.0	4.3	4.4	6.0	5.2
Chiapas	Arriaga	5.1	5.4	5.5	5.9	5.6	5.2	5.9	5.5	5.1	5.3	5.1	4.7	4.7	5.9	5.4
Chiapas	Juan Aldama	4.4	5.1	4.9	4.5	4.5	4.1	4.4	4.5	4.1	4.3	4.4	4.2	4.1	5.1	4.5
Chiapas	Tapachula	5.4	4.9	4.8	4.6	4.7	4.7	5.2	5.1	4.6	4.1	4.3	4.1	4.1	5.4	4.7
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	3.8	4.4	4.6	4.8	5.3	5.1	5.4	5.3	4.9	4.4	4.1	3.7	3.7	5.4	4.7
Chihuahua	Chihuahua	5.8	6.4	6.8	6.9	6.9	6.4	6.4	6.5	6.8	6.8	6.0	5.2	5.3	8.9	5.9
Chihuahua	Guachochi	3.3	3.5	3.9	4.4	5.1	5.3	5.4	5.6	5.7	5.1	4.9	4.4	3.3	6.9	6.4
Chihuahua	Cd. Juárez	6.0	7.2	7.3	7.3	6.9	6.5	6.3	6.5	6.8	7.4	6.6	5.9	5.9	7.4	6.7
Coahuila	Piedras Negras	3.1	3.6	4.2	4.5	4.8	6.0	6.7	6.3	4.9	4.1	3.3	2.9	2.9	6.7	4.5
Coahuila	Saltillo	3.8	4.2	4.8	5.1	5.6	5.9	5.9	5.6	5.2	4.4	3.6	3.3	3.3	5.9	4.8
Colima	Colima	4.4	5.1	5.3	5.8	6.0	5.2	4.9	5.0	4.6	4.4	4.4	3.9	3.9	6.0	4.9
D.F.	Tacubaya	5.4	6.0	6.4	5.9	5.3	5.1	4.5	4.9	4.5	4.8	5.2	5.2	4.5	6.4	5.3
Durango	Durango	4.4	5.4	6.5	7.0	7.5	6.8	6.0	5.6	5.7	5.1	4.8	3.9	3.9	7.5	5.7
Guanajuato	Guanajuato	4.4	5.1	6.1	6.3	6.6	6.0	6.0	5.9	5.8	5.2	4.8	4.6	4.4	6.6	5.6
Guerrero	Acapulco	4.8	5.3	6.1	5.9	5.6	5.1	5.3	5.4	4.9	5.2	5.0	4.7	4.7	6.1	5.3
Guerrero	Aguas Blancas	5.8	5.9	6.0	5.8	5.8	5.4	5.6	5.8	5.5	5.6	5.5	5.5	5.4	6.0	5.7
Guerrero	Chilpancingo	4.1	4.5	4.9	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	4.7	4.4	4.1	3.8	3.8	5.2	4.7
Hidalgo	Pachuca	4.6	5.1	5.6	6.8	6.0	5.7	5.9	5.8	5.3	4.9	4.6	4.2	4.2	6.8	5.4
Jalisco	Colotlán	4.6	5.7	6.5	7.5	8.2	6.6	5.8	5.6	5.8	5.3	4.9	4.1	4.1	8.2	5.9
Jalisco	Guadalajara	4.6	5.5	6.3	7.4	7.7	5.9	5.3	5.3	5.2	4.9	4.8	4.0	4.0	7.7	5.6
Jalisco	L. de Moreno	4.5	5.3	6.1	6.7	7.2	6.1	5.8	5.6	5.5	5.0	4.7	4.0	4.0	7.2	5.5
Jalisco	Puerto Vallarta	5.2	5.7	6.0	5.8	5.7	5.5	5.6	5.7	5.5	5.6	5.2	4.7	4.7	6.0	5.5

Tabla 5.2 Insolación global media inclinación a la latitud en México en kWh/m2-Día (continua)

Estado	Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Min	Max	Med
México	Chapingo	4.5	5.1	5.6	5.8	5.9	5.4	5.2	5.2	5.0	4.7	4.6	3.9	3.9	5.9	5.1
Michoacán	Morelia	4.2	4.9	5.5	5.8	5.9	5.2	5.0	5.1	4.9	4.6	4.3	3.7	3.7	5.9	4.9
Nayarit	Tepic	3.9	4.3	4.8	5.5	6.1	5.3	4.9	5.3	4.4	4.4	4.0	4.8	3.9	6.1	4.8
Nuevo León	Monterrey	3.2	3.6	4.1	4.3	4.8	5.5	6.1	5.6	5.0	3.8	3.3	3.0	3.0	6.1	4.4
Oaxaca	Oaxaca	4.9	5.7	5.8	5.5	6.0	5.4	5.9	5.6	5.0	4.9	4.8	4.4	4.4	6.0	5.3
Oaxaca	Salina Cruz	5.4	6.3	6.6	6.4	6.1	5.0	5.6	5.9	5.2	5.9	5.7	5.2	5.0	6.6	5.8
Puebla	Puebla	4.9	5.5	6.2	6.4	6.1	5.7	5.8	5.8	5.2	5.0	4.7	4.4	4.4	6.4	5.5
Querétaro	Querétaro	5.0	5.7	6.4	6.8	6.9	6.4	6.4	6.4	6.3	5.4	5.0	4.4	4.4	6.9	5.9
QuintanaRoo	Chetumal	3.9	4.7	5.4	5.7	5.3	4.7	4.9	5.0	4.5	4.4	4.0	3.7	3.7	5.7	4.7
QuintanaRoo	Cozumel	3.9	4.6	5.3	5.7	5.2	4.8	4.9	4.9	4.6	4.4	4.0	3.8	3.8	5.7	4.7
San Luis Potosí	Río Verde	3.6	4.0	4.6	4.9	5.4	5.6	5.8	5.8	5.1	4.3	3.7	3.3	3.3	5.8	4.7
San Luis Potosí	San Luis Potosí	4.3	5.3	5.8	6.4	6.3	6.1	6.4	6.0	5.5	4.7	4.2	3.7	3.7	6.4	5.4
Sinaloa	Culiacán	3.6	4.2	4.8	5.4	6.2	6.2	5.4	5.1	5.2	4.6	4.2	3.4	3.4	6.2	4.9
Sinaloa	Los Mochis	4.9	5.4	5.8	5.9	5.8	5.8	5.3	5.5	5.5	5.8	4.9	4.3	4.3	5.9	5.4
Sinaloa	Mazatlan	3.9	4.8	5.4	5.7	5.7	5.6	4.8	4.9	4.7	5.0	4.5	3.9	3.9	5.7	4.9
Sonora	Ciudad Obregón	5.8	6.4	6.8	6.9	6.9	6.7	6.4	6.5	6.8	7.3	6.0	5.2	5.3	7.26	6.5
Sonora	Guaymas	4.5	5.7	6.5	7.2	7.3	6.8	5.9	5.8	6.3	5.9	5.1	5.6	4.5	7.3	6.0
Sonora	Hermosillo	4.0	4.6	5.4	6.6	8.3	8.6	6.9	6.6	6.7	6.0	4.7	3.9	3.9	8.6	6.0
Tamaulipas	Soto la Marina	3.4	4.2	4.9	4.9	5.1	5.3	5.4	5.4	4.9	4.6	3.7	3.2	3.2	5.4	4.6
Tamaulipas	Tampico	3.3	4.1	4.7	6.4	5.0	4.9	4.9	4.9	4.6	4.6	3.7	3.2	3.2	6.4	4.5
Tlaxcala	Tlaxcala	4.6	5.1	5.5	5.4	5.6	5.2	5.3	5.2	5.1	4.9	4.7	4.0	4.0	5.6	5.1
Veracruz	Córdoba	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.5	4.1	3.5	3.1	2.8	2.8	4.6	3.7
Veracruz	Jalapa	3.2	3.5	3.8	4.3	4.6	4.4	4.9	5.0	4.4	3.7	3.3	3.0	3.0	5.0	4.0
Veracruz	Veracruz	3.7	4.5	4.9	5.1	5.1	4.8	4.7	5.1	4.6	4.8	4.1	3.6	3.6	5.1	4.6
Yucatán	Mérida	3.7	4.0	4.6	5.2	5.7	5.5	5.7	5.5	5.0	4.2	3.8	3.4	3.4	5.7	4.7
Yucatán	Progreso	4.1	4.9	5.4	5.5	5.3	5.1	5.3	5.3	5.0	5.0	4.4	4.0	4.0	5.5	4.9
Yucatán	Valladolid	3.7	4.1	3.1	5.4	5.7	5.3	5.4	5.4	4.9	4.2	3.8	3.5	3.1	5.7	4.5
Zacatecas	Zacatecas	4.9	5.7	6.6	7.5	7.8	6.2	6.2	5.9	5.4	4.8	4.8	4.1	4.1	7.8	5.8

La anterior información nos permite evaluar el área necesaria y la cantidad de energía solar que el colector, que forma parte del sistema, debe captar para poder generar la cantidad de energía eléctrica requerida. Aún cuando se ha estimado la cantidad de energía solar sobre la base de una eficiencia propuesta del colector, el diseño del mismo para lograr tal eficiencia no es tan simple. Un colector reflector de media temperatura se compone de dos partes fundamentales, el concentrador y el receptor. El concentrador es la parte del colector que refleja la radiación solar incidente sobre el mismo, dirigiéndola hacia el receptor, que la absorbe y transmite a un fluido térmico que circula por él. La superficie reflejante que consideramos es un paraboloide de revolución o concentrador circular, que al orientar su eje en dirección al Sol permite incrementar la densidad de radiación directa captada. La construcción del reflector incluye una serie de problemas que hacen conveniente dividirlo en dos partes, el revestimiento de la superficie reflectora y la estructura soporte y de orientación.

Aunque con este tipo de colectores se pueden obtener altas temperaturas de operación, estos presentan varios problemas técnicos desde el punto de vista ingenieril comparados con los colectores solares planos. Deben orientarse continuamente al sol de manera precisa mediante un mecanismo apropiado debido a que este tipo de colectores utilizan únicamente la energía solar directa. Por otra parte, el acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico no sólo debe ser de buena calidad, sino que debe mantener sus propiedades por largos períodos de tiempo sin ser deterioradas por el polvo, lluvia y medio ambiente, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos. También las demandas de los materiales utilizados en el receptor (aislante térmico, fluido de trabajo, tubos absorbedores y cubiertas) son mayores en este tipo de colectores, debido a que es ahí donde se obtienen las altas temperaturas.

Al ser el Sol la fuente de energía, es muy importante conocer la imagen del mismo reflejada sobre el receptor. El ángulo con el que el Sol se ve desde la tierra es de aproximadamente $32'$ y este dato hay que tenerlo presente, (aparte de otros propios motivados por errores de seguimiento y reflexión, así como de la dispersión de la radiación por la superficie reflectora originados por defectos de fabricación, etc.), a la hora de diseñar el dimensionamiento, tanto del concentrador, como del receptor.

Como veremos más adelante, para obtener una imagen del Sol bien definida, el paraboloide deberá tener una distancia focal grande relativa a su diámetro de apertura. Así, al tener un diámetro de apertura pequeño comparado con la distancia focal, la dirección de la radiación reflejada es casi normal al plano focal para crear una imagen solar definida. Sin embargo, una distancia focal grande relativa a la apertura puede no ser un diseño práctico, ya

que el aumento de la distancia focal se traduce en una mayor precisión de seguimiento y un complicado conformado del paraboloide de revolución.

El cuerpo y la estructura soporte tienen una gran importancia e influencia en el funcionamiento correcto del colector que depende de la capacidad de la estructura de mantener la forma de la superficie reflectora y de su orientación, que son factores críticos a la hora de hacer un diseño, en donde habrá que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

a) El cuerpo y la estructura deben tener un soporte que permita obtener las diversas posiciones de orientación, sin que esto provoque una distorsión significativa de la superficie del reflector debida a su propio peso.

b) Deben tener la capacidad de funcionar y, en consecuencia, de no distorsionarse de forma significativa con los vientos que normalmente soplen en el lugar, ya que la carga del viento limita el tamaño práctico de cada concentrador.

c) Tienen que estar preparados para resistir daños estructurales provocados por vientos fuertes y tormentas; en éstas circunstancias se les situará en una posición fija y adecuada que permita eludir tales fenómenos.

Al considerar las anteriores observaciones decidimos dar un diámetro de apertura de 3.00m al concentrador. El área de 16.47 m² obtenida en el cálculo anterior haría necesario dar un diámetro de 4.58 m. En el capítulo 4 hemos graficado varios perfiles parabólicos con distintas distancias de localización del foco cortados al diámetro que consideramos apropiado por varias razones: tipo y costo de materiales, resistencia a los anteriores aspectos, tamaño y peso adecuado para manipulación, traslado y seguimiento solar, etc. y se ha seleccionado la gráfica con la cual se trabajó en la construcción del concentrador. Esta distancia es, como ya sabemos, de 1.35m.

En las siguientes secciones se describen los aspectos geométricos involucrados con esta configuración parabólica y se plantean algunos puntos para el mejoramiento del diseño, para obtener la razón de concentración máxima, para mejorar la eficiencia del colector, mejorando la eficiencia óptica del concentrador, disminuyendo las pérdidas térmicas y aumentando la concentración.

5.2 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL CONCENTRADOR TIPO PARABOLOIDE DE REVOLUCION.

5.2.1 Geometría.

La imagen solar producida por un concentrador depende de su geometría. La geometría de un paraboloide de revolución permite la concentración en el foco de los rayos solares que son paralelos a su eje y perpendiculares al área de apertura. Podemos entender cómo opera el colector de espejo parabólico, si describimos las propiedades ópticas del concentrador y las imágenes solares que éste produce. En esta sección haremos uso de las relaciones geométricas que se obtienen a partir de un análisis, el cual no incluimos aquí, pero que pueden consultarse en la bibliografía citada.

La ecuación que genera el paraboloide de revolución en un sistema de coordenadas xyz es:

$$x^2+y^2=4fz$$

tal ecuación involucra la distancia focal f (distancia medida desde el punto focal al vértice), pero no limita las dimensiones del paraboloide. Una de estas dimensiones es el ángulo de borde ϕ_r que trunca al paraboloide y restringe el diámetro de apertura D_a . Se puede realizar un análisis simplificado en dos dimensiones, en el plano xy, tomando como referencia el esquema de la figura 5.2 y se obtienen las siguientes relaciones.

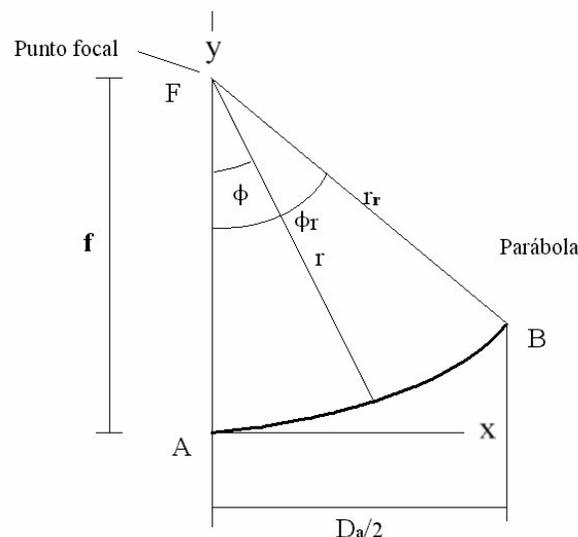


Fig. 5.2 Esquema que muestra la limitación en el perfil de la parábola dado por el ángulo de borde ϕ_r

La expresión que permite determinar la distancia r_r del foco al borde:

$$r_r = \frac{2f}{(1+\cos\phi_r)} \quad (5.1)$$

La relación 5.1 permite determinar el valor de r_r para un cierto ángulo de borde ϕ_r con una distancia focal f determinada. Al retirar el subíndice r de la relación 5.1 se puede tener la distancia entre el punto focal y cualquier punto sobre la rama de la parábola o, en su analogía, la distancia entre el punto focal y la superficie del paraboloides de revolución.

La siguiente marca la relación que existe entre el diámetro de apertura, el ángulo de borde y la distancia focal:

$$f = \frac{D_a}{4\tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \quad (5.2)$$

Por otro lado, se puede determinar una relación para el ángulo de borde en función del diámetro de apertura y el foco.

$$\phi_r = \text{sen}^{-1}\left(\frac{D_a}{2r_r}\right) \quad (5.3)$$

y por último, la distancia que existe desde el foco a cualquier punto dentro de la superficie del paraboloides es obtenida mediante:

$$r = \frac{2f}{(1+\cos\phi)} \quad (5.4)$$

Una vez establecidos los parámetros geométricos involucrados en el paraboloides de revolución se puede determinar una relación que permita conocer el nivel de concentración que es posible alcanzar de la radiación solar directa.

Al sustituir la Relación 5.8 en la Relación 5.7 se obtiene D_r , tal que:

$$D_r = \frac{2r_r \text{sen} 0.267^\circ}{\cos(\phi_r + 0.267^\circ)} \quad (5.9)$$

o bien, al sustituir $2r_r$ de la Relación 5.5 en la Relación 5.9 se tiene:

$$D_r = \frac{D_a \text{sen} 0.267^\circ}{\text{sen} \phi_r \cos(\phi_r + 0.267^\circ)} \quad (5.10)$$

Por otra parte, la concentración máxima C_{\max} se define como la relación que existe entre el área de apertura de captación del paraboloide de revolución y el área mínima de captura para la radiación que se encuentra en la imagen solar formada en el receptor, tal que:

$$C_{\max} = \frac{A_a}{A_r} \quad (5.11)$$

donde A_a es el área de apertura y A_r el área del receptor.

Así, para determinar la concentración máxima C_{\max} para un receptor plano de diámetro D_r en un paraboloide de revolución con diámetro de apertura D_a , se establece:

$$C_{\max} = \frac{A_a}{A_r} = \frac{\frac{\pi}{4} D_a^2}{\frac{\pi}{4} D_r^2} = \frac{D_a^2}{D_r^2} \quad (5.12)$$

donde al sustituir las relaciones 5.5 y 5.10 conducen a:

$$C_{\max} = \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^2 = \left(\frac{\text{sen} \phi_r \cos(\phi_r + 0.267^\circ)}{\text{sen} 0.267^\circ} \right)^2 \quad (5.13)$$

Mediante esta ecuación se observa que la concentración máxima que se obtiene en un concentrador parabólico con receptor plano depende solamente del ángulo de borde ϕ_r , sin embargo, la ecuación 5.13 no contempla la dispersión angular en el receptor. Esta dispersión puede deberse principalmente a tres causas: seguimiento solar inapropiado, rugosidades inherentes en la superficie (mala calidad en el pulido del espejo) y por mal conformado en la curvatura. En la Figura 5.4 se muestra la dispersión angular δ y sus tres posibles razones.

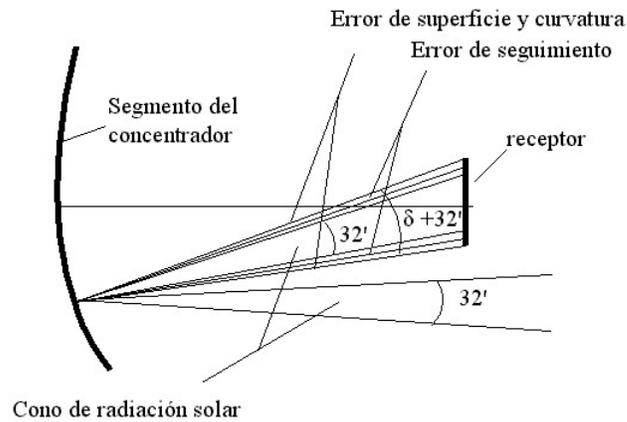


Fig. 5.4 Factores que afectan el diámetro del receptor.

Por lo tanto, el ángulo de dispersión es un factor que debe tomarse en cuenta en el diseño del receptor. De no ser así, una fracción de la energía concentrada se encontrará fuera del área de absorción en el receptor, lo que puede ocasionar daños en los componentes del mismo.

Al considerar que la intercepción de toda la radiación especular reflejada se encuentra en un cono angular con $(0.53^\circ + \delta)$, la Ecuación 5.13 es ahora:

$$C_{\max} = \frac{\text{sen}^2 \phi_r \cos^2 \left(\phi_r + 0.267^\circ + \frac{\delta}{2} \right)}{\text{sen}^2 \left(0.267^\circ + \frac{\delta}{2} \right)} \quad (5.14)$$

Dónde el ángulo de borde ϕ_r es el único parámetro de la geometría del concentrador que se encuentra involucrado. En la Gráfica 5.5 se muestra la concentración máxima sin dispersión ($\delta = 0$), para un receptor plano. Se supone que la radiación solar ha sido concentrada por un paraboloide perfecto, con superficie reflectiva completamente especular y el eje óptico del paraboloide apunta en dirección de la radiación solar directa. Se observa simetría alrededor del máximo que ocurre a un ángulo de borde $\phi_r = 45^\circ$, presentándose un valor de concentración máx. próximo a 12,000.

La distancia focal óptima f_o para lograr una concentración tan alta como sea posible, al proponer un receptor plano de diámetro D_r y un ángulo de borde ϕ_r que trunca al paraboloide, puede ser obtenida al combinar las Ecuaciones 5.2 y 5.13 obteniéndose:

$$f_o = \frac{D_r}{4 \tan \left(\frac{\phi_r}{2} \right)} \left(C_{\max} \right)^{1/2} \quad (5.15)$$

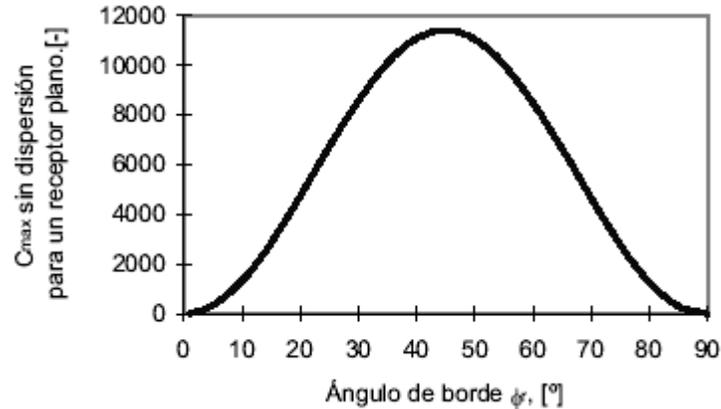


Fig. 5.5 Concentración máxima para un receptor plano para diferentes ángulos de borde.

De esta forma, los parámetros para el diseño de un concentrador parabólico quedan especificados. Se asegura de igual forma que se obtendrá un nivel de concentración máximo.

Para determinar la cantidad de energía que llega al receptor, se puede realizar un análisis a partir de los parámetros geométricos descritos. Enseguida mostramos algunos puntos importantes de este análisis tratando de simplificar un poco los pasos seguidos para llegar al resultado final que es, de momento en este punto, el que más nos interesa.

5.2.3 Cantidad de energía en el receptor

Al realizar un balance de energía se puede determinar que el calor útil Q_u está dado por la energía recibida en el absorbedor Q_{abs} menos las pérdidas de calor al medio ambiente Q_{per} , por lo que:

$$Q_u = Q_{\text{abs}} - Q_{\text{per}} = Q_{\text{abs}} - U(T_{\text{abs}} - T_a) A_r \quad (5.16)$$

donde U es el coeficiente global de pérdidas referido a la diferencia de temperaturas del absorbedor T_{abs} y la del aire ambiente T_a . Este coeficiente no es sencillo de determinar y depende fundamentalmente de los mecanismos de transferencia de calor, del conjunto de materiales utilizados y de su configuración geométrica.

La energía Q_{abs} que se dispone en el absorbedor se determina mediante la relación:

$$Q_{\text{abs}} = \eta_o A_a G_b \quad (5.17)$$

donde η_o es la eficiencia óptica del colector, A_a es el área de apertura del concentrador y G_b es la irradiancia solar directa que incide sobre el colector.

La eficiencia óptica o del colector está dada por:

$$\eta_o = f_t \rho_R \tau_{abs} \alpha_{abs} \gamma F \quad (5.18)$$

donde f_t es la fracción no sombreada por soportes y absorbedor, ρ_R es la reflectancia del espejo, τ_{abs} es la transmitancia del envolvente del absorbedor, α_{abs} es la absorptancia del absorbedor, γ es el factor de configuración geométrico (que depende fundamentalmente de la distancia focal f y el ángulo de borde ϕ_r), y por último F es el error de dispersión (que depende de la dispersión angular).

Si la eficiencia instantánea del colector es:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_b A_a} \quad (5.19)$$

entonces,

$$\eta_c = \frac{Q_{abs}}{A_a G_b} - \frac{U(T_{abs} - T_a)}{G_b} \frac{A_r}{A_a} = \eta_o - \frac{U(T_{abs} - T_a)}{G_b} \frac{1}{C} \quad (5.20)$$

Podemos decir que una mejora en la eficiencia óptica del concentrador, una disminución de las pérdidas térmicas y un aumento de la concentración da como resultado una mayor eficiencia del colector. Un cambio en las propiedades ópticas del sistema afecta en gran medida el funcionamiento del colector.

La cantidad de calor Q_r que se encuentra llegando al receptor antes de ser captada por el absorbedor se puede determinar si suponemos que no hay errores en las propiedades reflectivas del espejo, ni en el seguimiento solar, esto es, con el ángulo de dispersión $\delta=0$, entonces la cantidad de energía Q_{abs} en el absorbedor se escribe:

$$Q_{abs} = \tau_{abs} \alpha_{abs} (f_t \gamma \rho_R A_a G_b) = \tau_{abs} \alpha_{abs} Q_r \quad (5.21)$$

Donde los términos entre paréntesis son Q_r , que es la energía en el receptor que impacta al absorbedor.

Ya se ha dicho anteriormente que los rayos solares no son completamente paralelos debido a que la distancia tierra sol sustenta un ángulo $\alpha = 32'$ provocando que la imagen en el foco de un concentrador parabólico no sea un punto sino una región. Cuando la distancia focal f es corta comparada al diámetro de apertura D_a , se forman imágenes elípticas por la reflexión propia del borde del espejo no así en una pequeña región cercana al centro.

Mediante un análisis matemático que involucra la geometría del paraboloide, el seguimiento solar y la reflectividad del espejo se pueden determinar tanto el área de la imagen solar sin distorsión formada en el plano focal así como el área de la imagen elíptica en el mismo plano. Posteriormente, continuando con el análisis, si se considera la fracción aproximada de energía incidente del flujo solar G_b comprendida en el cono angular α que se encuentra dentro de la imagen solar y si se supone una iluminación uniforme sobre toda la elipse se puede determinar la energía por unidad de tiempo incidente en el plano focal y dentro de la imagen solar, por cada punto de la superficie del reflector, para finalmente obtener el total de la energía por unidad de tiempo Q_r que llega al receptor.

El ángulo ϕ_{\min} de sombreado provocado por el receptor se muestra en la figura 5.6. De esta manera, la energía por unidad de tiempo que llega al receptor Q_r se determina por:

$$Q_r = \pi f^2 \rho_R G_b (\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{\min}) \quad (5.22)$$

Si se utiliza la Ecuación 5.2 para determinar f^2 en función del área de apertura A_a y el ángulo de borde ϕ_r , obtenemos:

$$f^2 = \frac{A_a}{4 \pi \tan^2 \left(\frac{\phi_r}{2} \right)} \quad (5.23)$$

que al ser sustituida en la Ecuación 3.4.15 Q_r es ahora:

$$Q_r = \frac{(\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{\min})}{4 \pi \tan^2 \left(\frac{\phi_r}{2} \right)} \rho_R A_a G_b \quad (5.24)$$

Como se planteó, la energía incidente Q_r en el receptor depende de los parámetros óptico-geométricos del concentrador y receptor. Así, el factor f_t γ se obtiene de comparar los términos de la Ecuación 5.21 y con la Ecuación 5.24, por lo que:

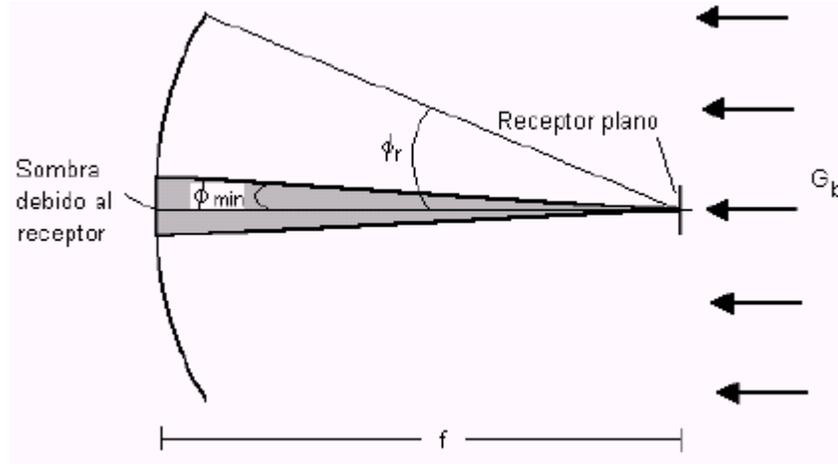


Fig. 5.6 Sombra provocada por el receptor.

$$f_t \gamma = \frac{(\text{sen}^2 \phi_r - \text{sen}^2 \phi_{\text{min}})}{4 \pi \tan^2 \left(\frac{\phi_r}{2} \right)} \quad (5.25)$$

Este factor f_t depende del ángulo de borde ϕ_r al cual el paraboloide ha sido truncado y del ángulo de sombreado ϕ_{min} . Se ha observado que el factor $f_t \gamma$ disminuye al ir aumentando el ángulo de borde ϕ_r . Este comportamiento se debe al tamaño finito del Sol, que al reflejarse en la superficie del espejo parabólico produce imágenes elípticas en el plano focal. Conforme aumenta el ángulo de borde, el semieje de estas elipses se incrementa, causando que en el plano receptor se presente dispersión cada vez mayor y por ende la energía capturada en el área del receptor disminuye comparada a la energía colectada.

La eficiencia óptica η_o puede ser representada como el producto de la eficiencia del absorbedor η_{abs} por la eficiencia de captación en el receptor η_{cr} , de modo que: $\eta_o = \eta_{\text{abs}} \eta_{\text{cr}} = (\tau_{\text{abs}} \alpha_{\text{abs}}) (f_t \gamma \rho_R F)$, donde la eficiencia de captación en el receptor η_{cr} es:

$$\eta_{\text{cr}} = f_t \gamma \rho_R F \quad (5.26)$$

Se puede determinar entonces que con ángulos de borde y de sombreado pequeños se logra tener una mayor eficiencia de captación.

Por otra parte, al sustituir la distancia focal óptima f_o (Ecuación 5.15) en la Ecuación 5.22 se obtiene la máxima energía por unidad de tiempo disponible en el receptor del paraboloide:

$$Q_{r \max} = \pi \frac{D_r^2}{16 \tan^2 \left(\frac{\phi_r}{2} \right)} (C_{\max}) \rho_R G_b (\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{\min}) \quad (5.27)$$

donde D_r es el diámetro del receptor, ϕ_r el ángulo de borde del paraboloide, ϕ_{\min} el ángulo de sombreado provocado por el receptor, G_b la irradiancia solar directa, ρ_R la reflectancia de la superficie del paraboloide y C_{\max} la concentración máxima (Ecuación 5.14).

La Ecuación 5.27 presenta de manera implícita los factores óptico-geométricos del colector y por lo tanto la eficiencia de concentración en el receptor η_{cr} . Esta ecuación evalúa la energía por unidad de tiempo que se puede obtener en un diseño adecuado del concentrador basado en el diámetro del receptor y su ángulo de borde. Esta resulta de gran utilidad y se escribe por simplicidad como:

$$Q_{r \max} = \pi f_o^2 \rho_R G_b (\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{\min}) \quad (5.28)$$

La ecuación 5.27 se escribe de nueva cuenta como:

$$Q_{r \max} = \pi \frac{D_r^2 (\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{\min})}{4 \tan^2 \left(\frac{\phi_r}{2} \right)} (C_{\max}) \rho_R G_b = A_r G_b \rho_R (f_t \gamma C_{\max}) \quad (5.29)$$

donde se observa entre paréntesis, el producto $f_t \gamma$ el cual penaliza la concentración máxima. En la Gráfica 5.7 se presenta el producto $f_t \gamma C_{\max}$ y establece en función del ángulo de borde del paraboloide la máxima concentración posible para la máxima captación de energía. Se observa es esta misma gráfica que la máxima captación de energía, aunada a la máxima concentración posible, ocurre a un ángulo de borde $\phi_r = 40^\circ$ aproximadamente y presenta un valor cercano a 9,000.

No debe olvidarse que la información presentada aquí es el resultado del análisis realizado para un receptor plano, y no debe generalizarse para receptores esféricos.

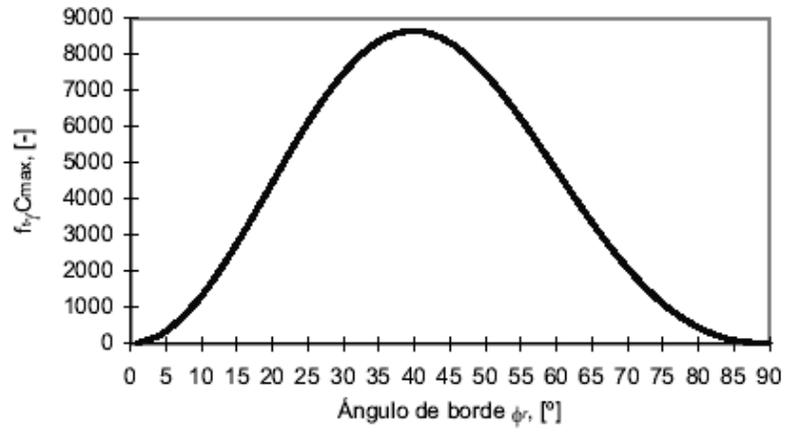


Fig. 5.7 Producto $f_i \gamma$ por la concentración máxima.

5.3 MEMORIA DE CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL CONCENTRADOR CONSTRUIDO.

El concentrador parabólico constituye uno de los elementos más importantes del sistema de captación de los rayos solares dado que es el medio utilizado para recibir las radiaciones y transmitir las hacia el absorbedor. Mediante el análisis de la figura 5.2 determinaremos cada uno de los parámetros requeridos y basándonos en las ecuaciones obtenidas anteriormente.

- f** distancia focal medida desde el punto focal al vértice
- ϕ_r ángulo de borde que trunca a la parábola
- D_a** diámetro de apertura
- r_r** distancia del punto focal al borde de la parábola
- r** distancia del punto focal a cualquier punto del borde de la parábola
- ϕ ángulo de borde a cualquier punto de la parábola
- D_r** diámetro del receptor plano
- R** distancia del receptor plano a la línea de reflexión
- C_{max}** concentración máxima del concentrador parabólico con receptor plano
- A_a** área de apertura del concentrador
- A_r** área del receptor
- δ dispersión angular en el receptor
- f_o** distancia focal óptima

Determinando la distancia del punto focal r_r mediante la relación (5.1) y despejando el ángulo de borde ϕ_r de la relación (5.2) y con los datos obtenidos de la parábola donde el diámetro de apertura $D_a = 300\text{cm}$. y la distancia focal $f = 135\text{cm}$.

$$r_r = \frac{2f}{(1+\cos\phi_r)}$$

despejando ϕ_r de la relación (5.2)

$$f = \frac{D_a}{4\tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)}$$

$$4\tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) = \frac{D_a}{f}$$

$$\phi_r = 2 \tan^{-1} \left(\frac{300}{540} \right)$$

$\phi_r = 58.10^\circ$ ángulo de borde en función del diámetro de apertura y el foco.
Sustituyendo en la relación (5.1)

$$r_r = \frac{2f}{(1 + \cos \phi_r)}$$

$$r_r = \frac{2(135)}{(1 + \cos 58.10^\circ)}$$

$r_r = 176.65 \text{ cm.} \Rightarrow 1.76 \text{ m}$ distancia del punto focal al borde de la parábola.

Determinando la distancia focal mediante la relación (5.2)

$$f = \frac{D_a}{4 \tan \left(\frac{\phi_r}{2} \right)}$$

sustituyendo valores

$$f = \frac{300}{4 \tan \left(\frac{58.10^\circ}{2} \right)}$$

$f = 135.02 \text{ cm} \Rightarrow 1.35 \text{ m}$ distancia focal medida desde el punto focal al vértice con lo que comprueba el valor obtenido anteriormente.

Determinando el ángulo de borde descrita por AFB de la figura 5.2 mediante la relación (5.3).

$$\phi_r = \sin^{-1} \left(\frac{D_a}{2r_r} \right)$$

sustituyendo valores

$$\phi_r = \sin^{-1} \left(\frac{300}{2(176.65)} \right)$$

$\phi_r = 58.10^\circ$ ángulo de borde en función del diámetro de apertura y la distancia del punto focal al borde de la parábola.

Determinando la distancia del punto focal mediante la relación (5.4)

$$r = \frac{2f}{(1+\cos\phi)}$$

sustituyendo valores

$$r = \frac{2(135)}{(1+\cos 58.10^\circ)}$$

$r = 176.65 \text{ cm} \Rightarrow 1.76 \text{ m}$. distancia del punto focal a cualquier punto dentro de la superficie.

Comprobando el diámetro de apertura mediante la relación (5.5)

$$D_a = 2r_r \text{sen}\phi_r$$

sustituyendo valores

$$D_a = 2(176.65)\text{sen}58.10^\circ$$

$D_a = 299.9 \text{ cm} \Rightarrow 3.00 \text{ m}$. diámetro de apertura determinado anteriormente en la fabricación de la parábola.

Determinando el área de apertura mediante la relación (5.6)

$$A_a = \frac{\pi}{4} D_a^2$$

sustituyendo valores

$$A_a = \frac{\pi}{4} (3.0\text{m})^2$$

$A_a = 7.068\text{m}^2$ área de apertura del concentrador

Determinando el diámetro del receptor plano mediante el análisis de la figura 5.3 por medio de la relación (5.10) y sustituyendo valores.

$$D_r = \frac{D_a \text{sen}0.267^\circ}{\text{sen}\phi_r \cos(\phi_r + 0.267^\circ)}$$

$$D_r = \frac{(300\text{cm})\text{sen}0.267^\circ}{\text{sen}58.10^\circ \cos(58.10^\circ + 0.267^\circ)}$$

$D_r = 3.13 \text{ cm} \Rightarrow 0.013 \text{ m}$ diámetro del receptor plano

Determinando la concentración máxima (C_{\max}) mediante la relación (5.13).

$$C_{\max} = \left(\frac{\text{sen}\phi_r \cos(\phi_r + 0,267^\circ)}{\text{sen } 0.267^\circ} \right)^2$$

sustituyendo valores

$$C_{\max} = \left(\frac{\text{sen}58.10^\circ \cos(58.10 + 0,267^\circ)}{\text{sen } 0.267^\circ} \right)^2$$

$C_{\max} = 9,129.86$ concentración máxima que se obtiene en un concentrador parabólico con receptor plano y no contempla la dispersión angular en el receptor.

Determinando el área del receptor de la relación (5.11).

$$A_r = \frac{A_a}{C_{\max}}$$

$$A_r = \frac{7068.9 \text{ m}^2}{129.86}$$

$A_r = 0.000774 \text{ m}^2$ área mínima de captura para la radiación que se encuentra en la imagen solar formada en el receptor.

Determinando la distancia focal óptima (f_o) de la relación (5.15)

$$f_o = \frac{D_r}{4 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \left(C_{\max} \right)^{1/2}$$

sustituyendo valores

$$f_o = \frac{3.13}{4 \tan\left(\frac{58.10^\circ}{2}\right)} \left(9129.86 \right)^{1/2}$$

$f_o = 134.60 \text{ cm.} \Rightarrow 1.346 \text{ m}$ distancia focal óptima que relaciona la concentración máxima, el diámetro del receptor plano y el ángulo de borde que trunca al paraboloides de revolución.

Con respecto al balance de energía del receptor y debido a su complejidad, únicamente se realiza un análisis profundo de todos los parámetros que se involucran en este capítulo,

dejando omitidos los cálculos por no haber llegado a la realización de pruebas del concentrador parabólico por lo que se podrá desarrollar para otro tema de tesis.

5.4 ANALISIS DEL SISTEMA FOTOTERMICO DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.

El sistema lo podemos dividir en dos secciones. Si observamos la figura 5.8, la primera sección se refiere a la fase de recepción, transferencia y transformación termodinámica de la energía solar. La segunda sección se refiere a la generación, regulación, acondicionamiento, almacenamiento y distribución de la energía eléctrica.

DIAGRAMA DEL SISTEMA FOTOTERMICO DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.

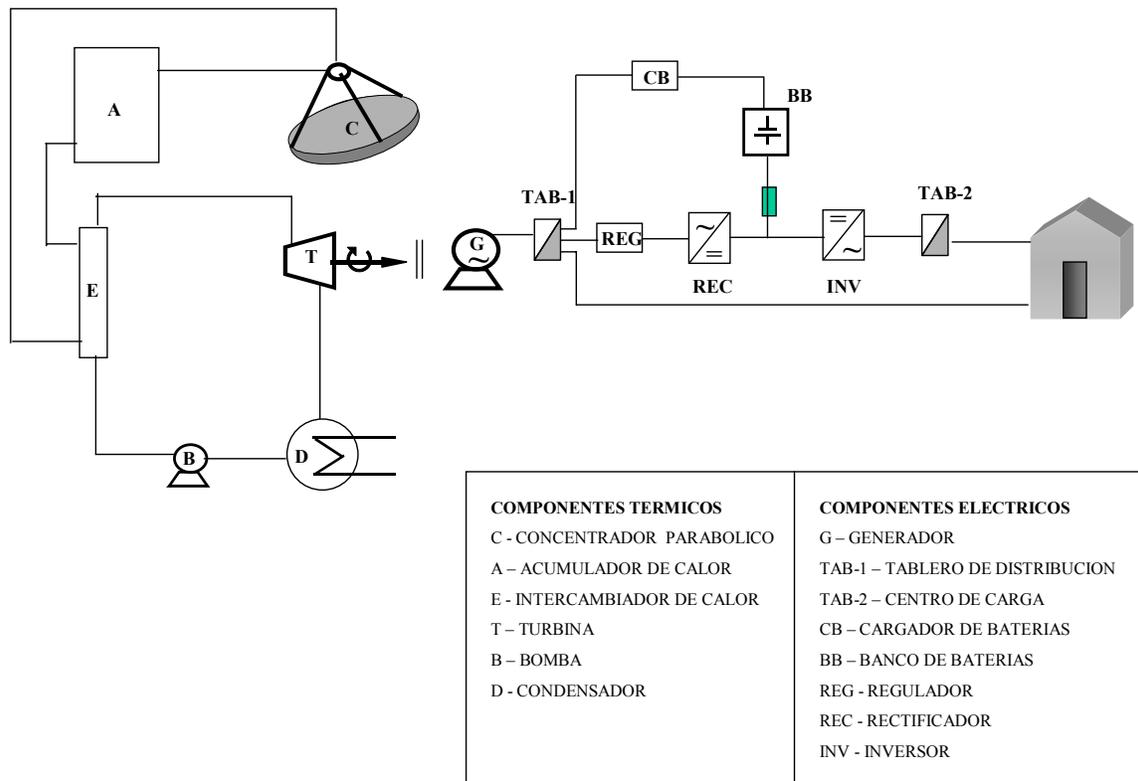
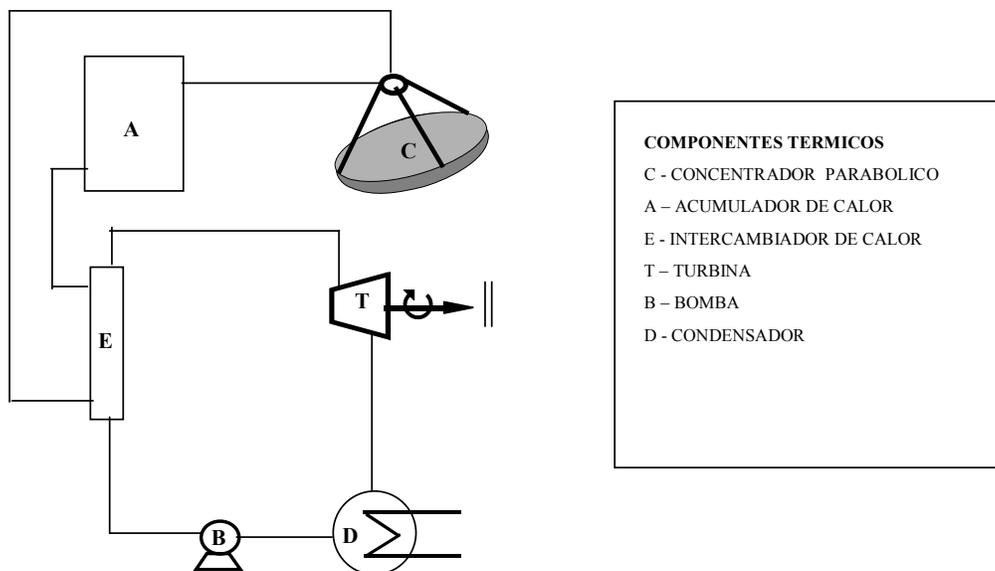


Fig. 5.8 Secciones y componentes del sistema

Existe una interconexión entre ambas secciones dada por un acoplamiento y transferencia de energía mecánica entre la turbina y el generador. Enseguida se describirá la primera sección que inicia con el colector y después continuaremos con la descripción de la segunda sección que culmina con la distribución para uso final de la energía eléctrica.

5.4.1 SISTEMA TÉRMICO.

La sección que se refiere al sistema térmico se muestra en la figura 5.9. La recepción o captación de la energía solar se lleva a cabo en el colector solar. Un colector reflector de media temperatura se compone de dos partes fundamentales, el concentrador y el receptor, como ya se ha dicho. El concentrador es la parte del colector que refleja la radiación solar incidente sobre el mismo, dirigiéndola hacia el receptor, que la absorbe y transmite a un fluido térmico que circula por el mismo. No hay que olvidar tampoco que debe orientarse continuamente al sol de manera precisa mediante un mecanismo apropiado debido a que este tipo de colector utiliza únicamente la energía solar directa.



5.9 Sistema térmico.

La descripción y los parámetros del concentrador ya se han descrito ampliamente. Se tienen varios tipos de receptores y se puede establecer el tipo de seguimiento al sol.

Receptor.

Existe una gran variedad de receptores. El receptor es la parte donde la energía solar se convierte en calor. Este incluye el absorbedor y en ocasiones cubiertas y aislante. Los tipos de receptores pueden ser *cóncavos*, *convexos*, *planos*, *hemisféricos*, *cilíndricos*, *elípticos* y *concavidades*. Cada uno de estos puede ser *lineal* o *puntual*.

Seguidor solar.

Se han desarrollado muchos mecanismos dependiendo del tipo de colector. En general podemos hablar de *mecanismos con uno o dos ejes de movimiento*. Los concentradores cilíndricos normalmente utilizan solo un eje de movimiento e incluso pueden llegar a operar estando fijos. Los circulares necesitan los dos ejes de movimiento para poder hacer un buen seguimiento del sol.

También podemos hablar de *mecanismos automáticos o mecanismos manuales*. Los primeros se utilizan para hacer un seguimiento continuo del sol y los segundos, cuando se tienen que hacer ajustes diarios, semanales o mensuales del colector concentrador.

Una vez que el colector ha concentrado la energía radiante del sol enfocándola en el receptor y este a su vez la ha absorbido en el absorbedor, se transfiere al fluido térmico el cual fluye a través de un circuito de tuberías. Entre los elementos que están interconectados por este circuito de tuberías se encuentran un depósito térmico, para almacenamiento, un intercambiador de calor para transferir energía a otro fluido con propiedades térmicas más adecuadas para trabajar en un ciclo de turbina de vapor, y el absorbedor del colector propiamente dicho.

Almacenamiento de energía solar.

La energía solar es una fuente de energía que depende del tiempo; para una amplia gama de aplicaciones las necesidades de energía dependen también del tiempo, pero en forma distinta del suministro de energía solar, por lo que el desfase entre los períodos de disponibilidad de la energía solar y los períodos de consumo, requieren de alguna forma de almacenamiento.

El almacenamiento de energía solar se tiene que realizar teniendo en cuenta:

- *El tipo de colector solar*
- *Las unidades de almacenamiento*
- *Los aparatos de conversión (tales como acondicionadores de aire o motores), cargas, suministros de energía auxiliares o suplementarios, etc*
- *Los sistemas de control.*

Las características y el COP (coefficient of performance) de cada uno de estos elementos están relacionados con la temperatura; en un proceso termosolar de generación de potencia, el sistema de almacenamiento de energía térmica provoca una gran diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del fluido, lo que a su vez implica una baja temperatura de entrada en la máquina térmica y, por lo tanto, un bajo COP de ésta y de toda la instalación.

La capacidad de almacenamiento óptimo de la energía solar es función de su disponibilidad, que depende de:

- *El tiempo*
- *La naturaleza de las cargas que se pueden esperar en el proceso*
- *La forma en que se suministra la energía auxiliar*
- *Un análisis económico* que determina qué parte de las cargas totales de energía deben ser de *tipo solar* y qué otras partes procedentes de *otras formas de energía*.

Cargas del proceso del colector solar.

Si se considera un proceso solar en el que la variación de la carga P con el tiempo y la ganancia del colector, están relacionados de forma que durante una parte del tiempo, la energía disponible sobrepasa a la carga y viceversa, un sistema de almacenamiento tiene que permitir almacenar un exceso de calor Q_{col} sobre la carga P , cuando Q_{col} sea mayor que P y devolverlo cuando P sea mayor que Q_{col} .

Los parámetros básicos que permiten definir el depósito de almacenamiento son:

- *La duración del almacenamiento*
- *La cantidad de energía a almacenar*
- *La temperatura deseada en el sistema receptor de la energía*, que viene condicionada por la utilización de esta energía

Los medios de almacenamiento se clasifican en,

- *Almacenamiento a plazo corto* (horas o días)
- *Almacenamiento de larga duración* (meses), generalmente del verano para el invierno

Almacenamiento de energía en los procesos solares

El almacenamiento de la energía solar se puede hacer:

- *En forma de **calor sensible***, en el que el calor almacenado aumenta la temperatura de un medio líquido, sólido o gaseoso.
- *En forma de **calor latente***, como el calor de fusión en sistemas químicos.
- *En forma de **calor sensible y latente***, en el que el calor almacenado entraña una variación de temperatura y un cambio de estado del sistema receptor (sólido o líquido); la restitución del calor corresponde al cambio de estado inverso.
- *En forma de **energía química*** originada en algunas reacciones químicas.
- *En forma de **energía mecánica*** que se puede transformar en energía potencial mediante el almacenamiento de fluidos a ciertas alturas.

- *En forma de sustancias obtenidas en procesos solares no energéticos*, como el agua destilada en un alambique solar que se puede almacenar en depósitos para su utilización posterior.

La elección de los medios de almacenamiento de energía depende de la naturaleza del proceso.

- Para el **calentamiento de agua**, resulta lógico el almacenamiento de energía bajo forma de calor sensible.

- Si se usan colectores de **calentamiento para acondicionamiento de aire**, el almacenamiento puede ser tanto en forma de *calor sensible como latente*.

- Si se usan procesos **fotovoltaicos o fotoquímicos**, el almacenamiento es en forma de energía química.

A la hora de diseñar el componente de almacenamiento de energía, pueden existir varias alternativas. En nuestro caso considera un proceso en el que un motor térmico transforma la energía solar en energía eléctrica, por lo que el almacenamiento se puede realizar:

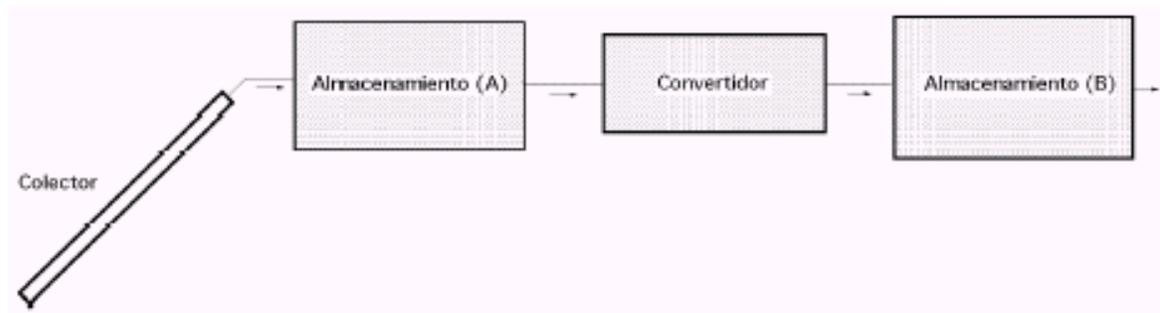


Fig 5.10 Esquema de almacenamiento alternativo

- *Como almacenamiento térmico* entre el colector solar y el motor
- *Como almacenamiento mecánico* entre el motor y el generador, (caso no considerado aquí)
- *Como almacenamiento químico en una batería (acumulador)* entre el generador y la aplicación energética definitiva, que veremos mas adelante.

Estas alternativas no son equivalentes, ni en la capacidad, ni en los costos, ni en las formas de diseño, ni en el COP del sistema. La capacidad necesaria en una unidad de almacenamiento, figura 5.10, en la posición B es inferior a la que hace falta en la posición A, debido a la eficiencia del convertidor que interviene.

El almacenamiento de energía térmica en A tiene la ventaja de que el convertidor se puede diseñar para funcionar a un régimen más próximo al régimen estacionario, originando así una eficiencia de conversión superior y un factor de uso más alto en el convertidor.

La elección entre el almacenamiento de energía en A o en B puede tener efectos muy distintos en la temperatura de funcionamiento del colector solar, en el tamaño del colector y en el costo.

Estos argumentos se pueden modificar de forma sustancial, según se utilice o no energía auxiliar.

Las características principales de un sistema de almacenamiento de energía térmica son:

- *Su capacidad por unidad de peso o de volumen*
- *El campo de temperaturas dentro del cual funciona, es decir, la temperatura a la que se aplica y se extrae calor del sistema*
- *Los medios para aplicar y extraer calor y las diferencias de temperatura asociadas con ellos*
- *La estratificación de la temperatura en la unidad de almacenamiento*
- *Las necesidades energéticas para añadir o extraer calor*
- *Los contenedores, depósitos y otros elementos estructurales asociados con el sistema de almacenamiento*
- *Los medios para controlar las pérdidas térmicas del sistema de almacenamiento*
- *Su costo*

En cualquier sistema de almacenamiento de energía solar tienen un significado especial los factores que afectan al funcionamiento del colector.

La ganancia útil de un colector disminuye a medida que aumenta la temperatura media de la placa; una relación entre la temperatura media del colector y la temperatura a la cual transmite el calor, se puede poner en la forma:

$$\begin{aligned} T_{(\text{colector})} - T_{(\text{transmisión})} = \\ = \Delta T_{(\text{transporte desde el colector al almacenamiento})} + \Delta T_{(\text{almacenamiento de entrada})} + \Delta T_{(\text{pérdida de almacenamiento})} + \\ + \Delta T_{(\text{salida de almacenamiento})} + \Delta T_{(\text{transporte desde el almacenamiento a la aplicación})} + \Delta T_{(\text{entrada en aplicación})} \end{aligned}$$

La temperatura del colector, que es la que determina su ganancia útil, es más alta que la temperatura a la cual se utiliza el calor, debido a la suma de una serie de incrementos como consecuencia de las pérdidas, por lo que uno de los objetivos del diseño general del sistema y

sobre todo de la unidad de almacenamiento, es el reducir al mínimo estas caídas de temperatura.

Es necesario que la estratificación se pueda mantener en los depósitos de almacenamiento dentro de unos límites, por lo que tanto su situación y posición, como el diseño de las conexiones de los depósitos es muy importante.

Almacenamiento de energía con cambio de fase.

Los materiales que experimentan cambio de fase dentro de un determinado campo de temperaturas, pueden resultar útiles para el almacenamiento de energía si se satisfacen algunos criterios, como que el cambio de fase tiene que ir acompañado por un elevado efecto del calor latente.

El cambio de fase se tiene que producir:

- a) *Con un superenfriamiento limitado*
- b) Tiene que haber medios disponibles para *contener el material y transferir el calor* hacia y desde él
- c) *El costo del material y de los contenedores* tiene que ser razonable

Si se cumplen estos criterios, los sistemas de almacenamiento de energía con cambio de fase pueden llegar a tener unas capacidades de almacenamiento de energía interesantes funcionando dentro de pequeños intervalos de temperatura, con importantes reducciones de peso y volumen.

Los compuestos con puntos de fusión congruentes como el $\{\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}\}$ funden de igual manera que las sustancias puras; también se están considerando eutécticos como los indicados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Mezclas eutécticas de interés para el almacenamiento de energía térmica

Composición	Punto de Fusión °C	Calor latente Kcal/kg
$\text{Cl}_2 \text{ Ca} + \text{Cl}_2 \text{ Mg} + \text{H}_2\text{O}$ (41-10-49)	25	41,7
$(\text{Mg} (\text{NO}_3)_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}) + (\text{Al} (\text{NO}_3)_3 \times 9 \text{H}_2\text{O})$ (53-47)	61	35,4
Ácido acetamida-esteárico (17-33)	65	52
Urea- $\text{NO}_3 \text{ NH}_4$ (45,3-54,7)	46	41
$\text{SO}_4 \text{ Na}_2 + 10 \text{H}_2\text{O}$	32,5	60,5
$\text{Li NO}_3 + 3 \text{H}_2\text{O}$	30	70,7
$\text{Mg} (\text{NO}_3)_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	130	
$\text{Mg} (\text{NO}_3)_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	90	38,2

Internamente se pueden considerar dos fenómenos adicionales:

a) El calor latente, que aporta una gran cantidad de calor específico en un rango muy pequeño de temperaturas

b) La resistencia térmica a la transferencia de calor dentro del material, que es variable con el grado de solidificación si se produce un calentamiento o un enfriamiento del material.

A medida que se extrae calor de un material con cambio de fase, se produce una cristalización en las paredes del recipiente; cuando el material solidificado se va calentando, la fusión se produce primero en las paredes y luego se va adentrando hacia el interior del material. Hay que tener en cuenta otros factores prácticos, como la corrosión, pérdidas térmicas laterales, presión de vapor, toxicidad y costo.

Intercambiador de calor.

Un elemento más que se tiene que incluir en este sistema es el intercambiador de calor, si consideramos que el fluido que circula a través del colector es diferente al fluido de trabajo en la turbina. Esto implica la selección o el diseño de un intercambiador. Se tienen diferentes tipos de intercambiadores de calor que pueden clasificarse en tres categorías importantes: regeneradores, intercambiadores de tipo abierto e intercambiadores de tipo cerrado o recuperadores.

Los regeneradores son intercambiadores en donde un fluido caliente fluye a través del mismo espacio seguido de uno frío en forma alternada, con tan poca mezcla física como sea posible entre las dos corrientes. La superficie, que alternativamente recibe y luego libera la energía térmica, es muy importante en este dispositivo. Las propiedades del material superficial, junto con las propiedades de flujo y del fluido de las corrientes fluidas, y con la geometría del sistema, son cantidades que deben conocer para analizar o diseñar los regeneradores

Los intercambiadores de calor de tipo abierto son dispositivos en los que las corrientes de fluido de entrada fluyen hacia una cámara abierta, y ocurre una mezcla física completa de las corrientes. Las corrientes caliente y fría que entran por separado a este intercambiador salen mezcladas en una sola. El análisis de los intercambiadores de tipo abierto involucra la ley de la conservación de la masa y la primera ley de la termodinámica; no se necesitan ecuaciones de relación para el análisis o diseño de este tipo de intercambiador.

Los intercambiadores de tipo cerrado son aquellos en los cuales ocurre transferencia de calor entre dos corrientes fluidas que no se mezclan o que no tienen contacto entre sí. Las corrientes de fluido que están involucradas en esa forma están separadas entre sí por una pared de tubo, o por cualquier otra superficie que se encuentra en el camino de la transferencia de calor. En consecuencia, la transferencia de calor ocurre por la convección desde el fluido más caliente a la superficie sólida, por conducción a través del sólido y de ahí por convección desde la superficie sólida al fluido más frío.

Otra clasificación para los intercambiadores de calor que se puede mencionar es basándose en la distribución de flujo, donde los cuatro tipos de configuraciones más comunes son:

Distribución de flujo en paralelo, los fluidos caliente y frío, entran por el mismo extremo del intercambiador, fluyen a través de él en la misma dirección y salen por el otro extremo.

Distribución en contracorriente, los fluidos caliente y frío entran por los extremos opuestos del intercambiador y fluyen en direcciones opuestas.

Distribución en flujo cruzado de un solo paso, un fluido se desplaza dentro del intercambiador perpendicularmente a la trayectoria del otro fluido.

Distribución en flujo cruzado de paso múltiple, un fluido se desplaza transversalmente en forma alternativa con respecto a la otra corriente de fluido.

Otra clasificación más es según su aplicación, se utilizan en general términos especiales, para los principales tipos son: Calderas, *Condensadores*, *Intercambiadores de calor de coraza y tubos*, *Torres de enfriamiento*, *Intercambiadores compactos de calor* *Radiadores para plantas de fuerza espaciales* y *Regeneradores*.

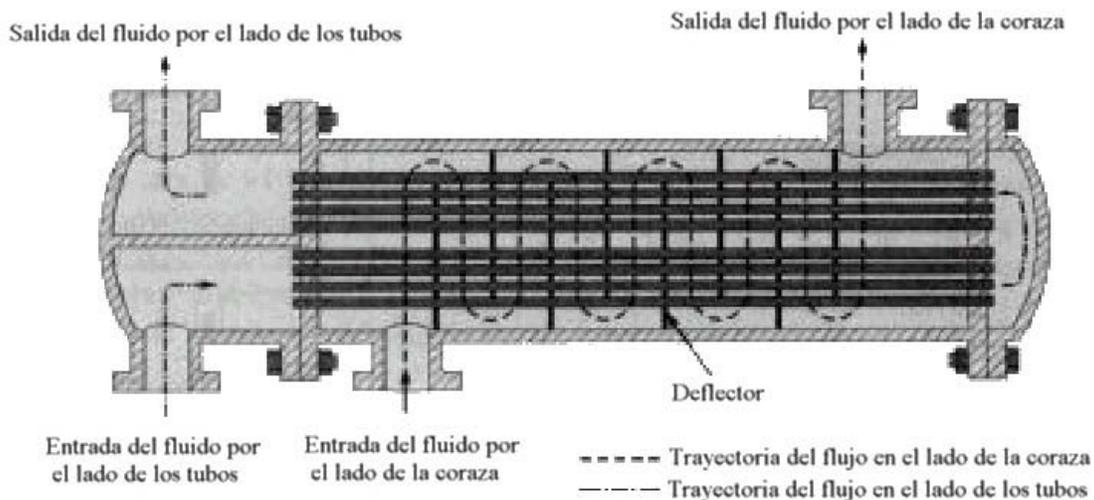


Fig.5.11 Intercambiador de coraza y tubos con deflectores.

Las unidades conocidas con el nombre de *intercambiadores de calor de coraza y tubos*, están compuestas en esencia por tubos de sección circular montados dentro de una coraza cilíndrica con sus ejes paralelos al eje de la coraza. Los intercambiadores de calor líquido-líquido pertenecen en general a este grupo y también en algunos casos los intercambiadores gas-gas.

Son muy adecuados en las aplicaciones en las cuales la relación entre los coeficientes de transferencia de calor de las dos superficies o lados opuestos es generalmente del orden de 3 a 4 y los valores absolutos son en general menores que los correspondientes a los intercambiadores de calor líquido-líquido en un factor de 10 a 100, por lo tanto se requiere un volumen mucho mayor para transferir la misma cantidad de calor.

Existen muchas variedades de este tipo de intercambiador; las diferencias dependen de la distribución de configuración de flujo y de los aspectos específicos de construcción. La configuración más común de flujo de intercambiadores líquido-líquido de coraza y tubos.

Un factor muy importante para determinar el número de pasos del flujo por el lado de los tubos es la caída de presión permisible. El haz de tubos está provisto de deflectores para producir de este modo una distribución uniforme del flujo a través de él.

Turbina de vapor.

Las turbinas son máquinas de flujo permanente, en las cuales el vapor entra por las toberas y se expande hasta una presión más pequeña. Al hacerlo el chorro de vapor adquiere una gran velocidad. Parte de la energía cinética de este chorro es cedida a los álabes de la turbina, de la manera que un chorro de agua cede energía a los cangilones de una rueda hidráulica.

Las presiones del vapor de entrada a la turbina oscilan, hoy en día, entre 40 y 156 bar y la temperatura de entrada entre 400 y 540°C. Por lo general, los valores más altos de presión y temperatura corresponden a las máquinas de mayor potencia aunque existe gran versatilidad. Las turbinas generan su propia característica dependiendo del número de rotores, la presión y la temperatura de trabajo, las posibles velocidades de rotación según el material de que estén hechos los elementos de la turbina que entra en contacto con el vapor.

Para una misma calidad de vapor a la entrada de la turbina en la medida que aumenta el número de rototes de una turbina, se incrementa la potencia total, aunque la velocidad de

aquella decrece más entre más rotores se la agreguen. Para la selección adecuada de una turbina es necesario, primero, basarse en la cantidad de potencia requerida y en la calidad de vapor disponible o considerar la alternativa de seleccionar a la par, el sistema generador de vapor.

Cuando el flujo permanente en este caso el vapor, entra por las toberas a una presión elevada y se expande hasta una presión más pequeña. Al hacerlo el chorro de vapor adquiere una gran velocidad. Parte de la energía cinética de este chorro es cedida a los álabes de la turbina. En el escalón de la turbina la energía térmica del vapor se transforma en energía cinética del flujo, y ésta última, en energía mecánica.

Las turbinas que utilizan el impulso de chorro para mover los álabes se denominan turbinas de acción como se muestra en la figura 5.12, en ellas las toberas son fijas y van montadas sobre el bastidor.

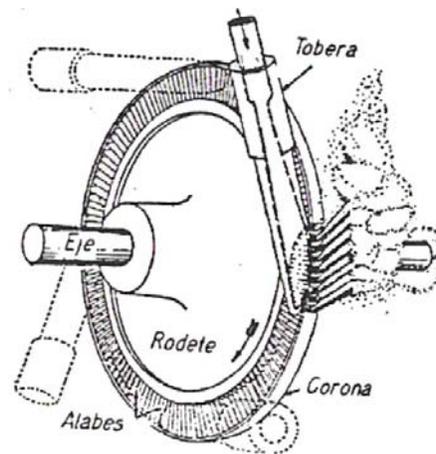


Fig. 5.12 Esquema de una turbina del tipo de acción.

5.4.2 SISTEMA ELÉCTRICO.

Continuando con el análisis de la parte eléctrica se observa (figura 5.13) que el dispositivo que se acopla y se acciona es el generador por medio de la turbina y convierte la potencia mecánica en potencia eléctrica. El tipo de energía que entrega este dispositivo para su aprovechamiento es de corriente alterna.

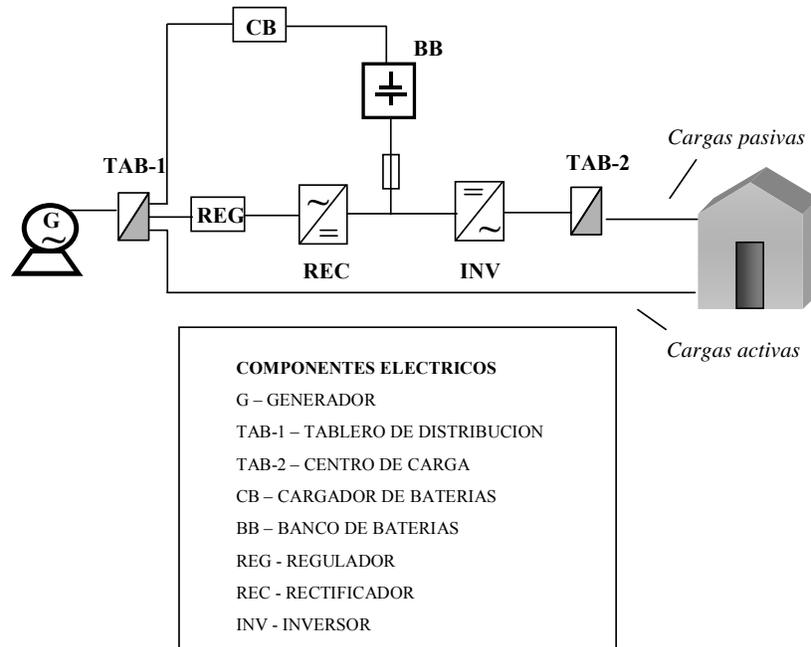


Fig. 5.13 Sistema eléctrico.

Para la alimentación de los diferentes equipos que se involucran en este sistema, se instala un tablero general de distribución con interruptor principal y es alimentado por el generador de corriente alterna, este tablero manejará básicamente dos tipos de carga: carga activa y carga pasiva. Las cargas activas alimentarán principalmente a: bomba, lavadora, ventilador, calentador, refrigerador, cafetera, parrilla, tostador, horno de microondas, plancha y cargas resistivas en general. Y las cargas pasivas que serían todos los elementos que no consumen mucha energía para su funcionamiento.

Posteriormente se instalará en la red otro dispositivo que cumple una misión específica como es la de regular el flujo de electricidad hacia los equipos suministrándoles la tensión e intensidad adecuadas y es como su nombre lo indica el regulador.

Para evitar la falla en el suministro de energía se ha determinado instalar un rectificador que se alimenta de energía alterna y tiene la función de suministrar en forma continua energía de corriente directa. Este dispositivo tiene una particularidad, que es la de entregar la energía perfectamente regulada y estabilizada para el consumo.

Dado que en la red se tiene una alimentación en régimen de corriente directa como se analiza anteriormente pero ahora es conveniente regresar en régimen de corriente alterna y para ello es conveniente instalar otro dispositivo que tiene una misión inversa a la del rectificador y éste dispositivo es el inversor que convierte la corriente continua proveniente de las baterías en corriente alterna y de allí para el consumo.

Otro dispositivo muy importante que interviene en la red y que alimenta al inversor es el banco de baterías o simplemente baterías y su principal función es la de suministrar energía eléctrica a la carga en períodos de poca o nula insolación o es pocas palabras cuando sucede una falla en la red eléctrica en régimen de corriente alterna. Este banco de baterías es alimentado desde el tablero general de distribución por medio de un cargador de baterías para que se mantenga cargado cuando ha sucedido alguna contingencia de emergencia.

Finalmente se instala un centro de carga en régimen de corriente normal para el consumo, con la particularidad de alimentar cargas puramente pasivas.

Conclusiones

Durante el desarrollo del presente trabajo, se fueron descubriendo y adquiriendo una gama de formas de manifestación y aplicación que se le ha dado y se le dará al sol desde tiempo muy remotos hasta llegar a la actualidad que hace posible que el sol sea el elemento más importante de dichos fenómenos y con amplias expectativas hacia el futuro. Se ha visto que la energía solar que recibe nuestro planeta es el resultado de un proceso de fusión nuclear en el interior del sol. De la enorme cantidad de energía que produce ese proceso, el planeta recibe menos de una millonésima parte. Esta energía, que en pocos minutos recorre más de 145 millones de km. que es la distancia que separan al sol de la tierra resulta, una cantidad enorme en proporción al tamaño de nuestro planeta.

Es interesante saber que la energía solar se manifiesta en un espectro que se compone de radiación ultravioleta, visible e infrarroja que al llegar a la tierra pierde primero su parte ultravioleta, que es absorbida por una capa de ozono que se presenta en el límite superior de la atmósfera. Ya en la atmósfera, se pierde la parte infrarroja ya sea por dispersión al reflejarse en las partículas que en ella se presentan o al llegar a las nubes, que son capaces de reflejar hasta un 80% de la radiación solar que le llegan. El resto llega a la superficie, ya sea de manera directa o indirecta como reflejo de las nubes y partículas en la atmósfera.

La intención de este trabajo es aportar con un granito de arena para que la sociedad pueda mejorar en varios aspectos empleando una tecnología de punta que pueda mejorar su calidad de vida. Mediante el análisis de los diferentes tipos de procesos para conversión de la energía solar, nos ha permitido un amplio criterio para seleccionar el proceso correcto el cual adecuaremos al colector construido. Por otro lado cabe mencionar que para el proceso de encerado de la superficie y del lijado de los gajos de la lámina galvanizada se debe tener cuidado ya que un inadecuado tratamiento de ambas superficies puede ocasionar un fácil desprendimiento de los gajos. Una correcta adherencia de las láminas a la superficie indica un tratamiento correcto de la superficie y de las láminas.

La construcción y la aplicación que se dé al concentrador parabólico es suficiente para el calentamiento de agua y para otros fines más prácticos pero también con el diseño del plato del concentrador parabólico se logran incrementos de temperatura sumamente altas, logrando que se cumpla con las expectativas y por ende con el propósito de generar electricidad para una casa – habitación.

Bibliografía:

- John I. B. Wilson. La energía solar. 1ª Edición. Editorial Alhambra. 1982, Madrid, España.
- Carlos E. López Campos. Física de la energía solar. 1ª Edición. Editorial U.A.CH. 1990, México.
- Aden B. Meinel. Aplicaciones de la energía solar. 1ª Edición. Editorial Reverte. 1982, Barcelona, España.
- Edward Mazria. El libro de la energía solar pasiva. 2ª Edición. Editorial Gustavo Gili. 1983, Barcelona, España.
- Richard H. Montgomery. Energía solar: Selección del equipo, instalación y aprovechamiento. 1ª Edición. Editorial Limusa. 1986, México.
- J. Richard Williams. Tecnología y aplicaciones de la energía solar. 1ª Edición. Editorial Librería Técnica Bellisco. 1976, Madrid, España.
- Vittorino Silvestrini. Uso de la energía solar. 1ª Edición. Editorial. Ediciones del Serval. 1981, Barcelona, España.
- B. J. Brinkworth. Energía solar para el hombre. 1ª Edición. Editorial. Herman Blume ediciones. 1981, Madrid, España.
- Farrington Daniels. Uso directo de la energía solar. 1ª Edición. Editorial. Herman Blume ediciones. 1977, Madrid, España.
- José Casanova Colás. Curso de energía solar. 1ª Edición. Editorial. Secretaría de Publicaciones Universidad de Valladolid. 1993, Valladolid, España.
- José Acosta Rubio. Energía solar. Utilización y aprovechamiento. 1ª Edición. Editorial. Paraninfo. 1983, Madrid, España.
- Hans Rau. Energía solar. Aplicaciones prácticas. 1ª Edición. Editorial. Marcombo Boixaren Editores. 1981, Barcelona, España.
- C. C. Cobarg. Energía solar bases y aplicaciones. 1ª Edición. Editorial. Paraninfo. 1986, Barcelona, España.
- José A. Manrique. Energía solar. Fundamentos y aplicaciones fototérmicas. 1ª Edición. Editorial Harla. 1984, México.
- Ken Butti. Un hilo dorado. 1ª Edición. Editorial. Herman Blume ediciones. 1985, Madrid, España.

- Pierre Robert Sabady. Arquitectura solar. Concepto, cálculo y ejecución de edificios solares. 2ª. Edición. Editorial. Ediciones ceac. 1989, Barcelona, España.
- Promotora General de Estudios S. A (Progensa). La energía solar: Aplicaciones prácticas. 3ª. Edición. Editorial. Centro de estudios de la energía solar. (CENSOLAR). 1999, Sevilla, España.
- Rafael Almanza Salgado. Felipe Muñoz Gutierrez. Ingeniería de la energía solar. 1ª Edición. Editorial. El colegio nacional. 1994, México.
- V. Daniel Hunt. Diccionario de energía. 1ª Edición. Editorial. Editorial. Publicaciones Marcombo. 1979, Virginia, Usa.
- Wolfgang Palz. Energía solar. Estudio económico de la energía solar. 2ª Edición. Editorial. Blume. 1979, Barcelona, España.
- Marianella García Villas. Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo. 1ª Edición. Editorial. IEPALA. Ingeniería sin Fronteras. 1999, Madrid, España.
- Luis Castañer Muñoz. Energía solar fotovoltaica. 1ª Edición. Editorial. Ediciones upc Politext (Area tecnología eléctrica y electrónica).1994, Barcelona, España.
- Eduardo Lorenzo. Electricidad solar. Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos. 1ª Edición. Editorial. Promotora General de Estudios S.A. (Progensa). Instituto de energía solar, Universidad Politécnica de Madrid. 1994, Sevilla, España.
- Servicios Energéticos Básicos Autónomos. Manual del usuario de instalaciones fotovoltaicas. 2ª. Edición. Promotora General de Estudios S.A. (Progensa). 2002, Sevilla, España.
- W. Ostwald. La Energía. 1ª Edición. Editorial. Paraninfo. 1968, Madrid, España.
- Armando Deffis Caso. Energía. Fuentes primarias utilización ecológica. 1ª Edición. Editorial. Arbol S.A. de C.V. 1999, México.
- Equipo Técnico de Marketing de Gates Energy Products, Inc. Baterías recargables. Manual de aplicaciones. 1ª Edición. Editorial. Paraninfo. 1999, Madrid, España.
- José Acosta Rubio. Aprovechamiento electroquímico de la energía. 1ª Edición. Editorial. Servicio de Publicaciones. Universidad de la Laguna. 2001, Tenerife, España.
- M. Ibáñez Plana. Tecnologías renovables. Tecnología solar. 1ª Edición. Editorial. Ediciones Mundi Prensa. 2004, Madrid, España.
- Manuel Polo Encinas. Energéticos y desarrollo tecnológico. 1ª Edición. Editorial. Limusa. 1979, México.

Antonio Alonso Concheiro. Alternativas energéticas. 1ª Edición. Editorial. Fondo de Cultura Económica. 1985, México.

Francisco Roselló Coria, Luis Francisco Arreola Quijada. Energía y máquinas térmicas. 1ª Edición. Editorial. Limusa. 1983, México.

Claudio Mataix. Turbomáquinas térmicas. 2ª. Edición. Editorial. Dossat S.A., 1988, Madrid, España.

José A. Manrique. Transferencia de calor. 1ª Edición. Editorial. Harla. 1981, México.

W. H. Severns. La producción energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases. 5ª. Edición. Editorial. Reverté S.A., 1976, Barcelona, España.

James L. Threlkeld. Ingeniería del ámbito térmico. 2ª. Edición. Editorial. Prentice Hall International. 1973, Usa.

M. Castro Gil., A. Colmenar Santos. Energía solar térmica de baja temperatura. 1ª Edición. Editorial. Promotora General de Estudios S.A. (Progensa). 2000, Sevilla, España.

Colin A. Ronan. Historia natural del universo. 2ª. Edición. Editorial. Ediciones del Prado. 1992, Madrid, España.

Michael A. Seeds. Fundamentos de astronomía. 1ª Edición. Editorial. Ediciones Omega S.A. 1986, Barcelona, España.

Referencias electrónicas.

Pedro Fernández Díez. Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura (PDF 5.8 MB), Departamento de Ingeniería eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria; España, http://www.gea.usm.cl/archivos/energia_pfd_energia_solar.pdf

Oscar Alfredo Jaramillo Salgado. Tesis “transporte de energía solar concentrada a través de fibras ópticas: acoplamiento fibra-concentrador y estudio térmico”, Universidad Nacional Autónoma de México.

Varios Autores, Varios temas, La ciencia para todos,
<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/menu.htm>.