



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

91
Res

**CONSTRUCCION DE UN COLECTOR SOLAR
PARA PRACTICAS EN EL LABORATORIO DE
INGENIERIA QUIMICA**



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

HECTOR ROBERTO MIRANDA PEREZ

MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: PROF. ANTONIO VALIENTE BARDERAS

VOCAL: PROFA. LUCILA CECILIA MENDEZ CHAVEZ

SECRETARIO: PROF. HECTOR GERARDO MENDEZ FREGOSO


PRIMER SUPLENTE: PROF. GENOVEVO SILVA PICHARDO

SEGUNDO SUPLENTE: PROF. MARIANO PEREZ CAMACHO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE QUÍMICA**

ASESOR DEL TEMA:



I.Q. HECTOR GERARDO MENDEZ FREGOSO

SUSTENTANTE:



HECTOR ROBERTO MIRANDA PEREZ

DEDICATORIA

La gratitud es ese sentimiento que se va ganando en la lucha de lo cotidiano cuando te levantas por la mañana y sabes que junto a tí hay personas por las cuales vale la pena superarse y que a veces con sus palabras y a veces con su silencio, pero siempre con su aliento están contigo.

con infinita gratitud a mis padres:

Sr. ROBERTO MIRANDA JIMÉNEZ.

Sra. LÓRENZA FÉREZ DE MIRANDA.

con infinita gratitud a mi compañera:

SAKA SUSANA RODRIGUEZ LÓPEZ.

con infinita gratitud a mis hijos:

JERÓNIMO ROBERTO.

SEBASTIAN CAMILO.

VALERIA AURORA.

a mis hermanos:

MARTHA.

MARIO.

REBECA.

LANOLINA.

Deseo Expresar mis mas sinceros

AGRADECIMIENTOS

Al I.O. HECTOR GERARDO MENDEZ FREGOSO

por su apoyo, su interés, paciencia y acertada guía en este trabajo.

Al Fis. ANTONIO GONZALEZ.

por su apoyo en la construcción del medidor de radiación solar.

A Ir. ARTURO FERNÁNDEZ MADRIGAL.

por su asesoría en el diseño de la práctica propuesta y por facilitar el equipo para las corridas de prueba.

A FABIOLA FONSECA.

por sus dibujos

A JULIO Y A ESTEBAN

fui el ultimo de los tres, pero como buen corredor llegue a la meta.

A la Lic. ROCÍO ARCHUNDIA.

Al I.O. VALENTIN LÓPEZ GARCUN

el apoyo e interés que brindaron a este trabajo llego en un momento estratégico.

C O N T E N I D O

	PAGINA
PREFACIO	1
I INTRODUCCION	3
LA ENERGIA ESTA PRESENTE EN NUESTRA VIDA DIARIA.	3
¿EN QUE USAMOS LA ENERGIA?	3
¿CUALES SON NUESTRAS FUENTES DE ENERGIA?	4
LA ENERGIA ES GRATUITA	4
LOS ASPECTOS ECONOMICOS DE LA ENERGIA	4
NO TODOS LOS COSTOS ENERGETICOS SE PAGAN CON DINERO	5
¿FUENTE DE ENERGIA O ALMACEN DE ENERGIA?	5
EL SOL ES LA FUENTE PRIMARIA DE ENERGIA	5
PANDORAMA GENERAL DE LA ENEGIA SOLAR	6
DISPONIBILIDAD DEL RECURSO SOLAR	7
RADIACION SOLAR	7
METODOS DE CALCULO DE LA RADIACION SOLAR	7
TRANSFORMACIONES DEL RECURSO SOLAR	8
TRANSFERENCIA DE CALOR	8
PRINCIPIOS DE LA CONVERSION FOTOTERMICA	8
SISTEMAS FOTOTERMICOS	8
COLECTORES SOLARES PLANOS	9
PRINCIPIOS DE LA CONVERSION FOTOVOLTAICA	9
USOS DE LA ENERGIA SOLAR	10
REFRIGERACION SOLAR	10

- 1 -

FALLA DE ORIGEN

SELAPO SOLAR	10
PRINCIPIOS BIOLIMATICOS	10
SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACION	11
FUENTES RELACIONADAS CON LA ENERGIA SOLAR	12
ENERGIA EOLICA	12
BIOMASA	12
II EL RECURSO SOLAR	14
DESCRIPCION FISICA DEL SOL	14
ALGUNAS MEDIDAS	14
LA CONSTANTE SOLAR	14
RADIACION SOLAR Y ESPECTRO ELECTROMAGNETICO	17
RADIACION ELECTROMAGNETICA Y DEFINICION DE CUERPO NEGRO	18
LLEGADA DEL RAZ LUMINOSO	20
EL MOVIMIENTO DE TRANSLACION	21
LA INCLINACION DEL EJE DE ROTACION DE LA TIERRA	22
DECLINACION SOLAR	23
ANGULOS SOLARES	24
ANGULO DE INCIDENCIA SOBRE UN PLANO	25
EL EFECTO DE LA ATMOSFERA	27
MEDICION DE LA RADIACION SOLAR	33
CONSTRUCCION DE UN PIANSMETRO PARA LOS CSP	
DEL LABORATORIO	35
CALIBRACION DE INSTRUMENTOS	35
CARACTERISTICAS COMUNES DE LOS INSTRUMENTOS	36
DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE CALIBRACION	37

FALLA DE ORIGEN

ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR	39
IRRADIANCIA SOBRE UNA SUPERFICIE FIJA PLANA HORIZONTAL	43
IRRADIANCIA SOBRE SUPERFICIES PLANAS INCLINADAS	44
III TEORIA DE COLECTORES SOLARES PLANOS	46
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES FRENTE A LA LUZ	47
LA CUBIERTA TRANSPARENTE	51
REFLECTIVIDAD EN LA CUBIERTA TRANSPARENTE	52
ABSORTIVIDAD DE LA CUBIERTA TRANSPARENTE	56
TRANSMISIVIDAD DE LA CUBIERTA TRANSPARENTE	56
OTROS MATERIALES PARA CUBIERTA TRANSPARENTE	62
LA PLACA ABSORBEDORA	63
SUPERFICIES METALICAS SELECTIVAS	65
IV ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR	67
EFICIENCIA DEL COLECTOR	70
FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR PARA PERIODOS LARGOS	74
REMISION DEL CALOR	76
FUENTES DE INEFICIENCIA	76
VELOCIDAD DE FLUJO	76
FLUIDO COLECTOR DE CALOR	77
TRANSFERENCIA DE CALOR AL FLUIDO DE TRABAJO	78
FLUJO TURBULENTO	79
FLUJO DE TRANSICION	80
FLUJO LAMINAR	80
DISEÑO DEL COLECTOR	82

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA TRASFERENCIA DE CALOR	83
EFICIENCIA DE LA ALETA	83
CURVAS DE EFICIENCIA	94
SELECCIÓN DE LA RAPIDEZ DE FLUJO	97
V PRACTICA SOBRE COLECTORES SOLARES PLANOS	99
OBJETIVOS	100
INTRODUCCIÓN	100
DESCRIPCIÓN DEL CALENTADOR SOLAR DE AGUA	102
ECUACIONES DE TRABAJO	103
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	107
ACTIVIDADES	108
CUESTIONARIO	109
CONCLUSIONES	110
BIBLIOGRAFIA	110
HOJA DE DATOS	111
GLOSARIO DE TERMINOS	112
BIBLIOGRAFIA	118

PREFACIO

La energía solar, aunque poco difundida, es en la actualidad motivo de una intensa investigación, sus aplicaciones son cada vez mas amplias, ahí donde se requiera energía puede ser usada la que proviene del sol.

En México son varias las instituciones dedicadas a la investigación de la energía solar, el Instituto de Investigaciones en Materiales y el Instituto de Ingeniería en la UNAM, el IPN, el ITESM (Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas por mencionar algunos. Cada institución investiga en uno o en varios campos de la energía solar, pero difícilmente en todos a la vez.

Si una sola persona se dedicara a estudiar la energía solar en su conjunto, gastaría una buena parte de su vida antes de llegar a concretar alguna aplicación práctica de algún aspecto solar. Esto nos lleva a delinear con claridad los alcances del presente trabajo. Nuestra intención es dar una introducción muy general del panorama y aplicaciones de la energía solar en la primera parte, en la segunda acompañamos a la radiación solar desde su cuna, el sol, hasta su llegada a la tierra y analizamos los factores que afectan este arribo, en la tercera parte tratamos la teoría de los colectores solares planos desde el punto de vista de los materiales que lo constituyen, en la cuarta parte se vuelve a la teoría de los colectores pero esta vez siguiendo su funcionamiento y en el último capítulo proponemos una práctica que sirva de introducción y motivación a los alumnos del Laboratorio de Ingeniería Química

hacia el estudio de esta fuente alternativa y a la vez abundante de energía en su aspecto de csp y el análisis de su eficiencia.

Siendo nuestro objetivo así de concreto, la única virtud de este trabajo es el concretar por primera vez dentro de la facultad un dispositivo que permita visualizar prácticamente a los alumnos de la facultad la viabilidad de usar la energía solar.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

LA ENERGIA ESTA PRESENTE EN NUESTRA VIDA DIARIA.

Cuántas veces en un día despejado hemos visto al sol caer a plomo sobre la tierra. ¿Alguna vez hemos hecho el siguiente experimento? tocar una superficie "muerta" como concreto asfalto o la lamina de un coche y luego tocar una superficie "viva", un cespéd o una hoja de árbol.

En la superficie "muerta" la energía se acumula produciendo un aumento de temperatura en el cuerpo que está recibiendo la radiación. Cuando la temperatura de la superficie aumenta esta empieza a rerradiar la energía en exeso a los alrededores.

En la superficie "viva" la energía se acumula en forma de enlaces químicos por medio de la fotosíntesis, este proceso es usado para sintetizar compuestos de mayor contenido energético a partir de CO₂ y agua. Esto explica porque el prado o el bosque son muy frescos, la energía radiante se acumula.

¿EN QUE USAMOS LA ENERGIA?

Una sociedad como la nuestra no podría ser concebida sin el uso de la energía. Podríamos pensar que el grado de "civilización" es el grado de uso de energía. En el hombre primitivo el consumo de energía era mínimo. conforme avanzamos en la historia el gasto de energía aumenta hasta llegar al tiempo presente en que usamos la energía para gobernos, para iluminarnos, para comunicarnos, para calentar o enfriar nuestro medio ambiente, para mover la industria, para calentar el agua con que nos lavamos, para refrigerar nuestros alimentos, para procesar nuestros alimentos, etc.

¿CUÁLES SON NUESTRAS FUENTES DE ENERGÍA?

Todos los usos que hacemos de la energía son cubiertos actualmente casi en exclusiva por el petróleo y el gas, en menor proporción se usan el carbón y la leña aunque hay otras fuentes potenciales de uso que trataremos brevemente al final de esta introducción.

LA ENERGIA ES GRATUITA.

Si pensamos por un momento que el petróleo, como un recurso natural, está presente en forma de yacimientos en la tierra y que antiguamente incluso brotaba espontáneamente llegaremos a la conclusión que el petróleo es un energético gratuito. Nos preguntamos entonces ¿por qué pago por llenar el tanque de gasolina de mi automóvil o por el gas con que caliento el agua de baño?. No hay que buscar mucho para dar con la respuesta, en realidad no estoy pagando por el energético, estoy pagando el trabajo necesario para llevarlo desde el lugar donde se encuentra inicialmente hasta el momento en que lo recibo, esto es, estoy pagando por el costo de las instalaciones necesarias para extraer, transportar, procesar y comercializar el energético.

LOS ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA ENERGIA.

Si generalizamos el caso del petróleo a los demás recursos energéticos veremos que nos enfrentamos a esquemas semejantes, el recurso en sí es gratuito, el costo se da en la inversión que es necesario hacer para poder utilizar el energético. Las naciones gastan gran parte de su PIB en la investigación que optimice estas inversiones, que aumenten la eficiencia de los dispositivos que transforman el energético en usos prácticos y podríamos pensar que hasta ahora la fuente más barata sigue siendo el petróleo.

NO TODOS LOS COSTOS ENERGÉTICOS SE PAGAN CON DINERO.

Pero no todo lo barato es lo mas económico, hay un precio que nuestra sociedad está pagando y no precisamente con dinero sino con costos mas altos por usar energía barata. Los costos a los que se hace referencia son el de la contaminación y las consecuentes alteraciones que esta produce en el ambiente y en nosotros, esto sin considerar lo siguientes: que un recurso es renovable si se produce a mayor o igual velocidad de la que se consume pero este no es el caso del petróleo pues a la naturaleza le llevó millones de años acumularlo en los yacimientos, nosotros en cambio en menos de cien años hemos gastado una buena parte de los recursos originales.

¿FUENTE DE ENERGIA O ALMACEN DE ENERGIA?

Pensemos por un momento en la teoría de formación del petróleo. En otro tiempo en la tierra la vegetación gigante que la cubria llevaba a cabo activamente la fotosíntesis acumulando la energía solar en forma de energía química. Después estos grandes bosques fueron cubiertos y sometidos ya dentro de la tierra a presiones y temperaturas elevadas, lo que condujo a la formación del petróleo.

Visto de esta forma el petróleo más que una fuente es un almacen de energía. Nos preguntariamos entonces ¿cual es la fuente primaria de energía?

EL SOL ES LA FUENTE PRIMARIA DE ENERGIA.

De lo expuesto en el parrafo anterior concluimos que el sol es la fuente primaria de energía y también es gratis. Pero tiene ciertos problemas para su uso. La radiación que llega a la tierra desde el sol esta muy "diluida" y actualmente la tecnología

necesaria para "concentrarla" y poder así utilizarla está en su etapa de desarrollo y es todavía más cara que la convencional, sin embargo, la tendencia es a acortar esta diferencia, por lo que se espera que en un futuro cercano la energía proveniente del sol llegue a sustituir paulatinamente a la energía convencional

PANORAMA GENERAL DE LA ENERGIA SOLAR.

Para hacer uso de una fuente de energía es necesario estudiarla (sobre todo si su uso será racional) en todas las etapas que van desde su descubrimiento hasta la utilización final. Ampliando más el concepto con un ejemplo, en el caso del petróleo se conocen en la actualidad las reservas probadas y las reservas probables, es decir, el recurso se ha cuantificado, se ha construido además una gran industria (refinerías, compañías de perforación etc.) para procesarlo y dejarlo en condiciones de ser usado. Los usos son variados pero los podemos agrupar en usos que requieren la transformación directa a energía mecánica y los que requieren transformación a energía mecánica como paso previo para su uso final.

Actualmente casi todo el transporte usa el paso directo del energético a energía mecánica.

Como secundario se menciona el paso del energético a energía eléctrica antes de su uso final (transporte, alumbrado, industria etc.). En México según estadísticas de la Comisión Federal de Electricidad el 72.63 % de la electricidad producida hacia finales de marzo de 1987, fue a partir de hidrocarburos.

El criterio para el estudio de la energía solar es semejante y puede dividirse igualmente en tres partes. En la primera se investiga la disponibilidad del recurso; en la segunda las

transformaciones que hacemos de él y en la última sus usos

DISPONIBILIDAD DEL RECURSO SOLAR

RADIACIÓN SOLAR

El sol puede considerarse un cuerpo negro que emite radiación a 6000°K a todo el espacio que le rodea. La cantidad de radiación que interceptaría la tierra en el supuesto de que no tuviera atmósfera se conoce como la constante solar. El efecto que tiene la atmósfera es atenuar esta radiación e incluso filtrar la radiación peligrosa (ultravioleta).

MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR.

Existen dos procedimientos para medir la energía radiante que llega a la tierra: El método directo y el método analítico.

En el método directo se usan dos instrumentos; el piranómetro y el pirheliómetro.

El piranómetro es un aparato que está fijo y que mide la radiación tanto directa como difusa (que llega a la superficie después de ser dispersada por choques contra partículas de polvo, agua, contaminación o moléculas de aire), es decir, mide la radiación global (radiación global = radiación directa + radiación difusa). En tanto el pirheliómetro es un instrumento que sigue la trayectoria del sol en todo momento (manual o automáticamente) y mide solo la radiación directa (la que no sufre dispersión).

La cantidad de energía radiante que proviene del sol y que llega a la tierra sufre variaciones cíclicas que dependen del movimiento de translación de la tierra, la latitud del lugar y de variaciones cíclicas como el clima (las estaciones del año). De lo anterior se desprende que siendo un fenómeno cíclico, el cálculo de

la radiación solar puede ser simulada mediante un modelo matemático. Todos los modelos matemáticos se basan en el ajuste que se hace de los datos de radiación solar que se toman para una localidad dada.

TRANSFORMACIONES DEL RECURSO SOLAR

TRANSFERENCIA DE CALOR.

Para tener una idea clara de como la energía radiante se puede transformar en otras formas de energía es necesario investigar como es que se transmite ésta y las ecuaciones que modelan este comportamiento. Esto es, tenemos que estudiar los fenómenos de la conducción, convección y radiación de energía.

PRINCIPIOS DE LA CONVERSION FOTOTERMICA.

Toda radiación que incide sobre un cuerpo provoca que la temperatura de éste se eleve, cuando el cuerpo eleva su temperatura él mismo se convierte en un emisor de radiación, la cantidad de energía radiada depende de la cuarta potencia de la temperatura. Si el cuerpo radia la energía que recibe, entonces esta energía se pierde, pero si por el cuerpo hacemos pasar un fluido (aire, agua etc.) este disminuirá la temperatura del cuerpo que recibe la radiación disminuyendo con ello la energía perdida por reradiación y el fluido habrá ganado energía térmica. Este es el principio de la conversión fototérmica.

SISTEMAS FOTOTERMICOS

La variedad de arreglos que pueden armarse para exponer un material a la radiación solar y las distintas formas de hacer que un fluido enfrie esta superficie para aprovechar el calor conforman los distintos sistemas fototérmicos. Entre los principales estan

los colectores solares planos, colectores solares de concentración, estanques solares, colectores solares de panel etc. Y entre los fluidos de colectores los mas usados son: agua, aceite o aire.

COLECTORES SOLARES PLANOS.

Si toda la energía radiante que se recibe en el área del colector solar se transformara en aumento de la energía térmica del fluido, la eficiencia sería del 100%. Varios factores impiden esto, entre ellos la velocidad del viento que circula cerca del colector, la temperatura ambiente, la temperatura de operación (que se puede considerar el promedio de la temperatura de entrada y salida del fluido de trabajo) y de la velocidad a la que circula el fluido. Si todos estos parámetros se controlan y se conviene en darles un valor o intervalo determinado, la eficiencia que se calcule será una eficiencia normalizada que podrá ser comparada contra la eficiencia normalizada de otros dispositivos semejantes.

PRINCIPIOS DE LA CONVERSION FOTOVOLTAICA.

Cuando un elemento con gran cantidad de electrones es expuesto a la radiación, un fotón puede golpear alguno de los electrones externos dandole suficiente energía para salir. Si por otro lado tenemos un elemento con deficiencia de electrones (o alta capacidad de retenerlos) el electrón que dejó el primer elemento puede llegar con cierta facilidad a este segundo elemento. Si mediante algún medio se encaminan los electrones desprendidos que van al segundo elemento dispondremos de una fuerza electromotriz (FEM) o voltaje. Este circuito puede ser usado como una fuente de corriente eléctrica convencional. Esto se consigue depositando (o envenenando) pastillas de silicio unas con el material donador de electrones y otras con el material aceptor de electrones. Al

unirlas apropiadamente tendremos un sistema para el flujo de electrones (corriente eléctrica). Un dispositivo de este tipo es llamado celda fotoeléctrica y como cada celda proporciona voltajes e intensidades de corriente bajas. Mediante arreglos en serie y/o paralelo de varias celdas es posible aumentar tanto voltajes como intensidades de corriente hasta valores útiles.

USOS DE LA ENERGIA SOLAR

REFRIGERACION SOLAR.

Este término aparentemente contradictorio es posible gracias a dos principios distintos, uno mecánico y otro fisicoquímico.

El mecánico se basa en la energía eléctrica producida por celdas fotovoltaicas para mover los motores de un sistema de refrigeración convencional. También se puede usar el vapor producido por un colector solar para mover una turbina con el mismo efecto.

El método fisicoquímico se basa en el principio de la absorción y desorción de un fluido refrigerante (como amoníaco) mediante la ayuda de una zona fría (el refrigerador) y una zona caliente (el colector solar).

SECADO SOLAR

Cuando el fluido que se utiliza para retirar calor del colector solar es aire, este puede ser usado, debido a la alta temperatura que logra, para secar, por ejemplo, la cosecha de granos, esto como parte del proceso de almacenamiento.

PRINCIPIOS BIOCLIMATICOS.

El cuerpo humano es una bomba de calor , si no se dispusieran de medios para eliminarlo moriríamos por el inevitable aumento de temperatura, pero ¿qué condiciones del clima favorecen esta eliminación de calor? Sabido es desde hace tiempo cual es la temperatura a la que el cuerpo siente bienestar (22 °C - 28°C), a esta temperatura es fácil eliminar el calor del cuerpo. Una temperatura menor provocaría una pérdida de calor mayor y por lo tanto la sensación de frío, por el contrario, una temperatura mayor dificultaría la eliminación del calor, el cuerpo tendría que recurrir a otros mecanismos para efectuar este trabajo (principalmente la sudoración o mover el aire que circunda el cuerpo o ambos).

En general es mas fácil protegerse del frío que del calor.

SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACIÓN.

La función de una vivienda es proporcionar bienestar a sus habitantes ¿Por qué entonces en ocasiones es más agradable el exterior de la habitación? esto se debe no solo a factores climatológicos sino a un mal diseño térmico. En general se puede decir que en climas cálidos hay que proteger el interior de la vivienda de la radiación solar, esto se puede lograr con una adecuada orientación. Por el contrario en climas templados o fríos lo importante es captar la radiación solar hacia el interior.

Otra forma de climatizar una vivienda es aprovechar otros fenómenos físicos como el desplazamiento ascendente de masas de aire caliente (efecto de chimenea) o el efecto de invernadero, etc.

Comunmente se les denomina Sistemas Pasivos de climatización a los que usan los efectos de la radiación solar en contraposición a

los sistemas que usan energía convencional (eléctrica o combustibles fósiles) para producir climas artificiales.

Los Sistemas Pasivos no pueden ser usados solos en climas muy extremos pero un diseño adecuado considerando estos principios ayuda a disminuir la energía convencional consumida en la climatización artificial.

FUENTES RELACIONADAS CON LA ENERGIA SOLAR.

Hay sobre la tierra otras fuentes de energía que aunque no son solares se pueden considerar producto del sol, entre ellos se encuentran la energía eólica y la biomasa.

ENERGIA EÓLICA.

El origen de los vientos es el calentamiento desigual de la superficie terrestre lo que provoca distintas densidades de las masas de aire. Estas diferencias de densidad provocan el movimiento del aire. Este aire es un recurso que puede ser utilizado para mover turbinas generadoras de corriente eléctrica, sobre todo en lugares en los que el viento presenta cierta regularidad como es el caso de la Ventosa en el Istmo de Tehuantepec.

BIOMASA.

Todas las plantas usan energía del sol para llevar a cabo la fotosíntesis con lo cual crean la materia que las compone a partir de CO₂ y agua.

El uso de estas plantas para producir energía no es nuevo pues el hombre desde hace tiempo utiliza leña para calentarse y calentar sus alimentos, pero la leña no es la única forma de usar biomasa con fines energéticos, existen dos procesos adicionales que son la

fermentación y la digestión.

El cultivo de plantas para producir azúcar y posteriormente por fermentación obtener alcohol es un ejemplo de procesos del segundo tipo, pero también se puede someter a fermentación anaeróbica el lirio acuático produciéndose un biogas.

La basura y los desechos animales pueden ser sometidos a digestión lo que produce por un lado gas combustible y por otro un residuo de alto valor fertilizante sin el inconveniente del mal olor de los productos originales.

Aunque el campo de estudio de la energía solar es muy amplio (como puede verse en forma somera en esta introducción). El capítulo siguiente se va a centrar en el estudio y desarrollo de una parte de este panorama que es el de la conversión fototérmica y en el diseño y construcción de un colector solar plano para luego proponer una práctica para el LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA de la facultad.

CAPITULO II

EL RECURSO SOLAR

DESCRIPCION FISICA DEL SOL.

ALGUNAS MEDIDAS.

El sol por su brillo y tamaño, es considerado una estrella media en la galaxia conocida como "Via Láctea", tiene una masa estimada en 2.2×10^{37} toneladas (1) (aproximadamente 334 000 veces mayor que la de la tierra (2)), un diámetro de 1.39 millones de kilómetros. La distancia mínima (en el perihelio) se alcanza alrededor del 15 de enero, mientras que la máxima (en el afelio) se tiene a fines de junio. La discrepancia entre la distancia mínima y máxima es de 1/60 del valor medio, por lo que se puede considerar prácticamente una órbita circular (3).

En cuanto a la estructura interna del sol los distintos autores solo concuerdan en el número de capas y el nombre de las mismas porque en lo referente a las distancias y las temperaturas de cada zona existen algunas diferencias. El esquema de la pagina siguiente (fig 2.1) compara los datos reportados por dos autores. Los puntos de coincidencia son:

En la zona intermedia la densidad es baja y la energía se transporta por difusión.

En la zona convectiva la densidad es del orden de 10^{-6} g/ml y es zona de convección turbulenta.

En la fotosfera es donde se genera la mayor parte de la radiación solar (1), (2).

LA CONSTANTE SOLAR

En el núcleo del sol se llevan a cabo reacciones

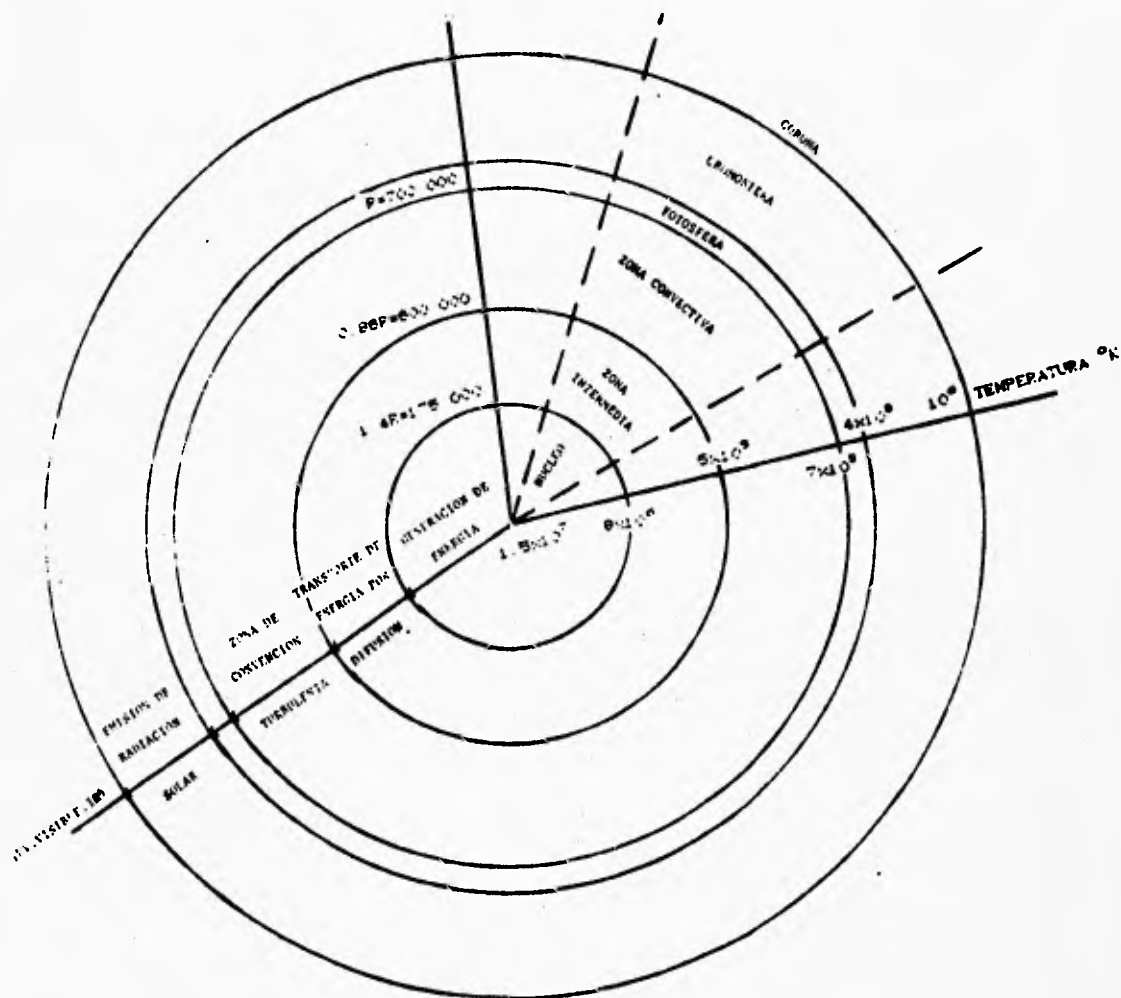


Fig. 2.1: Estructura interna del sol.

termoneucleares en donde se ha calculado que se transforman 564 millones de toneladas de hidrógeno cada segundo para formar 560

millones de toneladas de helio y los 4 millones restantes se transforman en energía de alta frecuencia según la ecuación de Einstein:

$$E = m c^2 \quad (2.1)$$

donde: E = energía

m = masa

c = velocidad de la luz

Sustituyendo c por 300 000 Km/seg o 3×10^8 m/s y m por 4×10^6 toneladas o 4×10^9 Kg se obtiene que en el sol se producen aproximadamente 3.6×10^{26} joules cada segundo.

Si esta energía se distribuye uniformemente en todo el espacio y tuviera que atravesar un área compuesta por una esfera cuyo radio es la distancia tierra-sol, la densidad de flujo que recibiría la tierra sería:

$$I_{cs} = \frac{3.6 \times 10^{26} \text{ Watts}}{\text{Area}}$$

donde: Area es $2.83 \times 10^{28} \text{ m}^2$ y representa el área de la esfera de radio igual a 150 millones de Km, entonces:

$$I_{cs} = \frac{3.6 \times 10^{26} \text{ watts}}{2.83 \times 10^{28} \text{ m}^2} = 1273 \text{ watts/m}^2$$

Esta densidad de flujo sería la cantidad de energía por unidad de tiempo y unidad de área perpendicular a la radiación, que recibe la tierra en el espacio y se le conoce como CONSTANTE

SOLAR y es una magnitud importante para la climatología del planeta. Mediciones realizadas con satélites han dado valores más exactos que el estimado aquí. El valor recomendado por la Organización Meteorológica Mundial es $1\ 370\ \text{Watt/m}^2$ (World Meteorological Organization, 1980) (2).

RADIACIÓN SOLAR Y ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

La definición de constante solar incluye la radiación del espectro total. Sin embargo la radiación solar extraterrestre adquiere solamente valores significativos entre 0.2 y $2.4\ \mu\text{m}$. Algunos autores han propuesto definir la CONSTANTE SOLAR METEOROLÓGICA, la cual incluye la radiación de 0.346 a $2.4\ \mu\text{m}$, es decir, que excluye aquella radiación que no llega a la troposfera y, por lo tanto, que no influye en su régimen térmico (2). Su valor es igual a $1255.4\ \text{W/m}^2$ ($1.80\ \text{cal/cm}^2\ \text{min} = 1.80$ langles/min). En la figura 2.2 se puede apreciar la distribución de la energía en el espectro solar y la distribución de la energía espectral emitida por un cuerpo negro a $5762\ \text{K}$. De esta figura se puede observar que para fines terrestres el sol se comporta como un cuerpo negro a la temperatura mencionada (1).

El área bajo la curva representa el flujo total de radiación. Visto desde este punto de vista el porcentaje de área correspondiente a la región del ultravioleta ($\lambda < 0.38\ \mu\text{m}$) es del 7.8%, en el visible ($0.38\ \mu\text{m} < \lambda < 0.78\ \mu\text{m}$) es de 47.29% y en el infrarrojo ($\lambda > 0.78\ \mu\text{m}$) es 45.71%. Aplicados a la constante solar estos porcentajes dan: $95\ \text{W/m}^2$ en el ultravioleta, $640\ \text{W/m}^2$ en el visible y $610\ \text{W/m}^2$ en el infrarrojo (1).

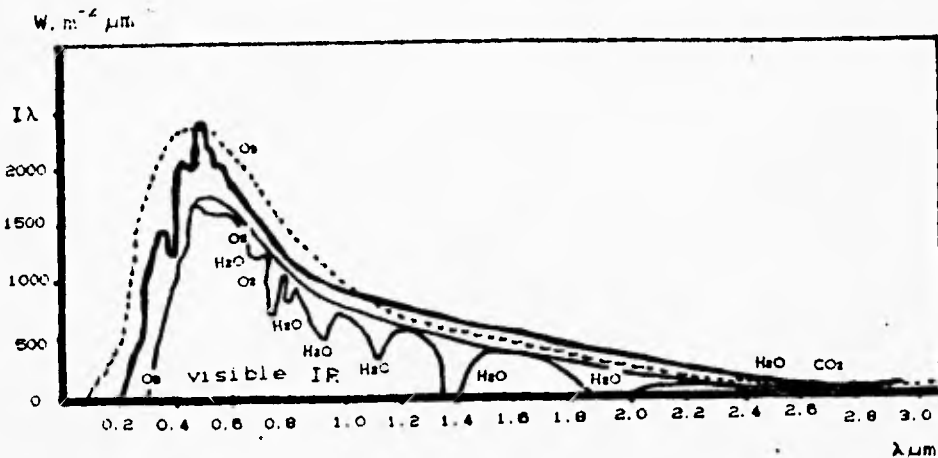


Fig. 2.2: La línea gruesa representa la distribución de la energía en el espectro solar, la línea punteada es la distribución de un cuerpo negro a 5762 K y la línea delgada es la distribución de la energía que llega a la superficie terrestre.

RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y DEFINICIÓN DE CUERPO NEGRO.

El tipo más familiar de radiación electromagnética es la luz, radiación que podemos detectar con la vista. Pero la única característica de la luz que la distingue de otras formas de radiación electromagnética (tal como las señales de radio y televisión, radiación infrarroja y rayos X) es la frecuencia (o en forma equivalente la longitud de onda). Así, los rayos X y la radiación ultravioleta tienen frecuencias más altas que la luz visible, por otro lado las señales de radio y las microondas tienen frecuencias más bajas. Aunque les hemos asignado varios nombres a estas radiaciones, no debemos olvidar que tienen las mismas propiedades básicas y difieren solo en su frecuencia (3).

Con respecto a la radiación electromagnética todos los cuerpos presentan tres propiedades. La radiación incidente puede ser reflejada, transmitida o absorbida (ver figura 2.3).

Un vidrio por ejemplo, transmite casi toda la radiación incidente, refleja y absorbe solo una parte pequeña. Por otro lado, un espejo refleja una gran cantidad de la radiación incidente no transmite y absorbe poca radiación.

¿Qué sucede con la radiación absorbida por un cuerpo? Cuando un cuerpo recibe energía, su temperatura se incrementa. Si el proceso continuara sin modificación el cuerpo podría llegar a fundirse o quemarse, pero esto no sucede, el cuerpo emite la radiación que absorbe alcanzando un equilibrio. En otras palabras,

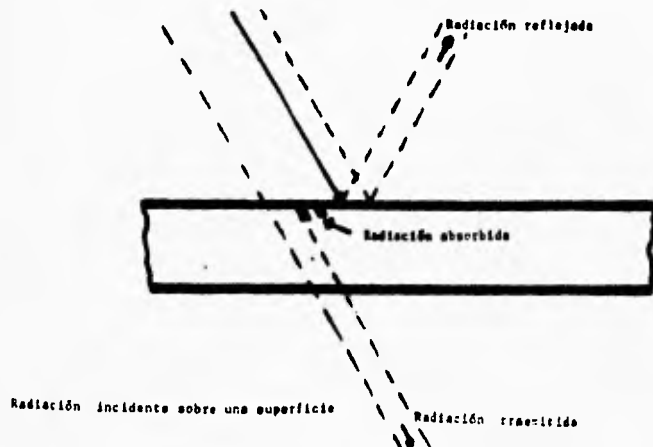


Fig. 2.3: Propiedades de los materiales con respecto a la radiación electromagnética.

la emisión y la absorción son fenómenos estrechamente ligados, un cuerpo empieza a emitir radiación en cuanto la absorbe, por lo tanto, de aquí en adelante cuando se hable de absorción se estará hablando también de emisión. La tierra recibe continuamente vastas cantidades de energía radiante del Sol y aún la temperatura

permanece esencialmente constante (en promedio). ¿Por qué es así? La razón es que la cantidad de energía radiada por un objeto depende fuertemente de su temperatura. La radiación solar absorbida por la tierra ha incrementado la temperatura al punto en que la energía radiada por la tierra es cercanamente igual a la energía absorbida. (De hecho la energía radiada por la tierra es ligeramente mayor que la absorbida debido al calor generado dentro por el decaimiento de la radiactividad natural de las sustancias) (3).

Los cuerpos que absorben (o emiten) toda la radiación incidente se les llama absorbedores ideales (o emisores ideales). Los cuerpos que son buenos absorbedores también son buenos emisores. Un absorbedor ideal también será un emisor ideal. En realidad no existen los absorbedores ideales, este es solo un concepto teórico que nos sirve de punto de comparación, pero en general los cuerpos con superficies negras son buenos absorbedores. Un absorbedor ideal o un emisor ideal se conocen a veces como CUERPO NEGRO. A la radiación que emite un cuerpo negro se le llama "radiación del cuerpo negro". (4).

En los párrafos precedentes se ha hablado sobre algunas propiedades del Sol que tienen que ver con el nacimiento de la energía solar (energía radiante). En lo que resta del capítulo nos ocuparemos de la llegada del haz luminoso a la tierra y la forma que hay de medirlo.

LLEGADA DEL HAZ LUMINOSO.

Si la tierra no contara con una atmósfera, el flujo de radiación solar sobre la superficie terrestre sería afectado solo por factores astronómicos, como el movimiento de translación de la

tierra alrededor del sol, la inclinación del plano ecuatorial con respecto a la eclíptica (que es el plano que se formaría con la órbita terrestre) y la rotación diaria del planeta.

EL MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN.

Si la órbita terrestre fuera perfectamente circular la radiación que llegaría a la tierra a lo largo del año sería constante e igual a la constante solar (I_{cs}) definida con anterioridad. Como es sabido la órbita terrestre es una elipse, por lo que, la distancia tierra-sol cambia a lo largo del año y como consecuencia la radiación solar extraterrestre (I_o) también varía. A. Muhlía reporta los siguientes datos:

"La excentricidad de la órbita elíptica de la tierra es $e=0.017$ y la máxima diferencia entre D_o (distancia media tierra-sol) y D (distancia tierra sol instantánea) será el doble de este valor, es decir, 3.5% por lo que I_o variará de $1,427 \text{ Kw/m}^2$ el 2 de enero en el perihelio (distancia tierra-sol menor) hasta $1,355 \text{ Kw/m}^2$ el 6 de julio afelio (distancia tierra-sol mayor)".

En la misma fuente se reporta la ecuación para calcular la variación de la radiación con el cambio de la distancia tierra-sol.

"Sea D_o la distancia promedio tierra-sol (150 millones de kilómetros) y sea D la distancia en el momento de la observación. Sea I_o la intensidad de radiación a la distancia D , entonces:

$$4\pi D_o^2 I_{cs} = 4\pi D^2 I_o \quad (2.2)$$

despejando I_o :

$$I_o = \frac{D_o^2}{D^2} \times I_{cs} \quad (2.3)$$

La ecuación anterior supone que sabemos la distancia tierra-sol en el momento de la observación. Lunde propone otra ecuación en la que la relación de distancias es sustituida por una función del día del año:

$$I_o = \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 N}{378} \right) \right] \quad (2.4)$$

donde: N es el número del día del año.

LA INCLINACIÓN DEL EJE DE ROTACIÓN DE LA TIERRA.

Si el eje de rotación de la tierra fuera perpendicular a la eclíptica, entonces, el Sol saldría siempre en el mismo lugar, no existiría ese movimiento aparente del Sol que nos hace verlo ir de una posición muy al norte en verano hasta una posición muy al sur en invierno. No existirían tampoco las estaciones del año y el clima terrestre sería virtualmente el mismo.

En la realidad sucede que el plano ecuatorial, plano imaginario que pasa por el ecuador terrestre, no coincide con el plano de la eclíptica, plano que forma el movimiento de translación de la tierra, sino que estos dos planos forman un ángulo de 23.45° y se conoce como declinación solar. Esto trae como consecuencia que el sol pase dos veces al año por el ecuador, el 21 de marzo y el 23 de septiembre, es decir, los equinoccios de primavera y de otoño. El punto mas al norte que logra llegar el sol como ya se dijo es 23.45° de latitud norte, o sea el trópico de Cancer y la fecha en que esto ocurre es el 21 de junio en

solsticio de verano, por el contrario el 23 de diciembre en el solsticio de invierno el sol se encuentra en su posición mas al sur que es el trópico de Capricornio situado a los 23.45° de latitud sur.

La zona de la tierra comprendida entre los dos trópicos se conoce como zona tórrida y tiene la característica de recibir dos veces al año los rayos del sol directamente por arriba, es decir, sobre el zenit.

Las zonas comprendidas entre los trópicos y los 60° de latitud norte y sur respectivamente se conocen como zonas templadas y la característica de ellas es que en ninguna época del año reciben en ángulo recto (sobre el cenit) los rayos solares.

Por último entre los 60° y 90° de latitud están las zonas polares, estas tienen como característica ser iluminadas solo seis meses al año alternativamente.

DECLINACIÓN SOLAR.

Para un observador situado en el ecuador el sol "caminaría" alternativamente hacia el norte y hacia el sur alcanzando hacia ambos lados 23.45° máximo. El ángulo con el que este observador vería el sol respecto del cenit se llama declinación (δ). La ecuación que permite calcular la declinación solar en función del día del año es según Lunde:

$$\delta = 23.45^\circ \text{ sen } \left(\left(\frac{N-80}{378} \right) \times 360 \right) \quad (2.5)$$

donde: N es el número del día del año.

O bien según Estrada-Cajigal:

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos T + 0.070257 \sin T - 0.006758 \cos 2T + 0.000907 \sin 2T - 0.002697 \cos 2T + 0.00148 \sin 3T) (180/ \quad)$$

donde: $T = 2\pi \left(\frac{N-1}{365} \right)$

esta ecuación estima δ con un error máximo de 3%.

Para un observador situado fuera del ecuador el ángulo con que vería el sol sería el de la declinación más el de la latitud del lugar.

ANGULOS SOLARES.

El sol se mueve en la bóveda celeste con dos grados de libertad, uno en circunferencia conforme transcurre el día, alcanzando el punto más alto al medio día. El otro es el movimiento aparente de esta circunferencia hacia el norte al llegar el verano y hacia el sur en el invierno como ya se dijo.

Para un observador en la tierra son suficientes dos ángulos para describir la posición del sol: La altura solar α y el acimut γ . El primero de estos ángulos es el que forma la visual al sol con el horizonte, suele considerarse también el ángulo θ o ángulo zenital que es complementario al de la altura solar y sería el ángulo formado por la visual al sol y el cenit del lugar. El segundo ángulo es el formado por los rayos solares respecto del sur verdadero. El cálculo de estos ángulos depende de tres parámetros principalmente: la latitud del lugar ϕ , la declinación δ y el ángulo horario ω (fig. 2.4).

La latitud queda definida mediante el ángulo que determina el lugar de interés sobre la tierra, con respecto al plano del ecuador. La latitud es positiva al norte y negativa al sur.

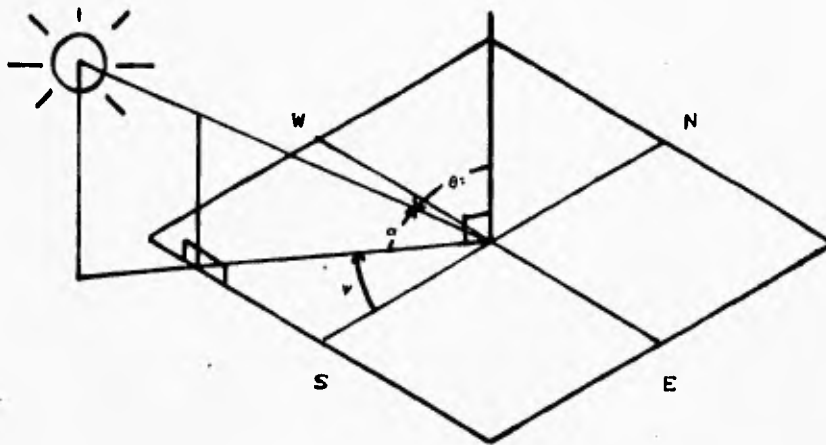


Fig. 2.4: Ángulos para describir la posición del sol. α o altura solar y γ o acimut. Además θ o zenital, complementario de α .

Si dividimos lo 360° de la circunferencia terrestre entre 24 horas que tarda el sol en recorrerla, veremos que el sol avanza a razón de 15° por cada hora. definiendo el ángulo horario ω como cero en el medio día solar, entonces, por cada hora antes del medio día hay que restar 15° y por cada hora después sumar 15° , por ejemplo, a las 10:00 am $\omega = -30^\circ$ mientras que a las 13:00 hrs $\omega = 15^\circ$.

Una vez estimados ϕ , δ , y ω la posición del sol para un observador terrestre esta dada por:

$$\sin \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.7)$$

y

$$\text{sen } \gamma = \frac{\cos \delta \text{ sen } \omega}{\cos \alpha} \quad (2.8)$$

El ángulo del sol al amanecer y en la puesta pueden ser calculados resolviendo la ecuación de la altura solar cuando el sol esta en el horizonte, es decir, altitud cero.

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.9)$$

o bien en horas:

$$\omega_s = \frac{+24 \arccos(-\tan \phi \tan \delta)}{360} \quad (2.10)$$

y restando o sumando a 12 encontramos la hora local de salida y puesta del sol respectivamente.

ÁNGULO DE INCIDENCIA SOBRE UN PLANO.

Con las ecuaciones anteriores es posible calcular la posición del sol para un lugar determinado de la tierra (ϕ), en algún día del mes (δ) y a una cierta hora del día (ω). Ahora bien, la cantidad de radiación que recibe una superficie depende del ángulo de incidencia que forme el haz luminoso con la superficie como puede verse en la figura 2.5 .

Tres son las posibles situaciones:

- a) Superficie normal al haz luminoso.
- b) Superficie horizontal a la superficie terrestre.
- c) Superficie inclinada un ángulo respecto a la horizontal y orientada un ángulo acimutal γ_s con respecto al sur.

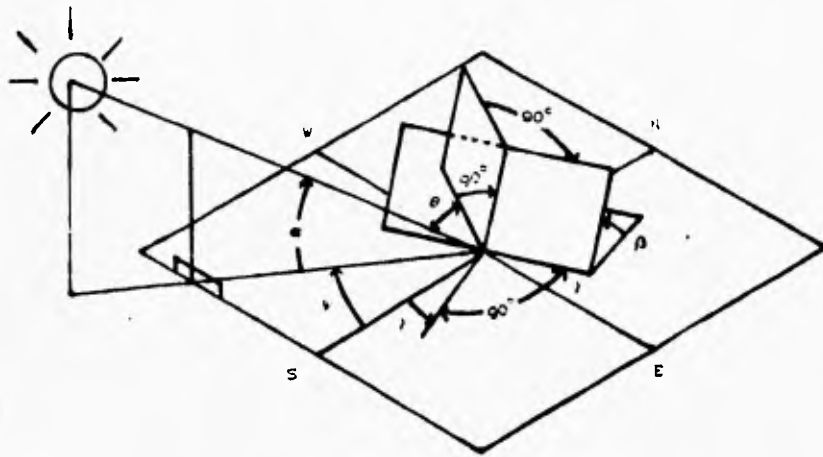


Fig. 2.5: Ángulo de incidencia del haz luminoso con respecto al plano normal a la superficie estudiada y los ángulos necesarios para su cálculo.

El ángulo de incidencia θ es el ángulo formado por la normal a la superficie y el haz luminoso, de tal manera que para el caso c) que es el caso mas general, esta dado como sigue:

$$\begin{aligned}
 \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma_e \\
 & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \cos \beta \cos \omega \\
 & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma_e \cos \omega \\
 & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma_e \sin \omega
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

donde β es el ángulo de inclinación de la superficie respecto de la horizontal como puede verse en la figura 2.6 .

Una expresión mas simple puede desarrollarse usando la altura solar α , el acimut y el ángulo acimutal que la superficie hace con el sur:

$$\cos \theta = \cos \alpha \cos (\gamma - \gamma_s) \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \quad (2.12)$$

Para el caso b) de una superficie horizontal $\beta = 0$ y $\theta = 90^\circ - \alpha = \theta_z$, es decir:

$$\cos \theta_z = \sin \alpha = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.13)$$

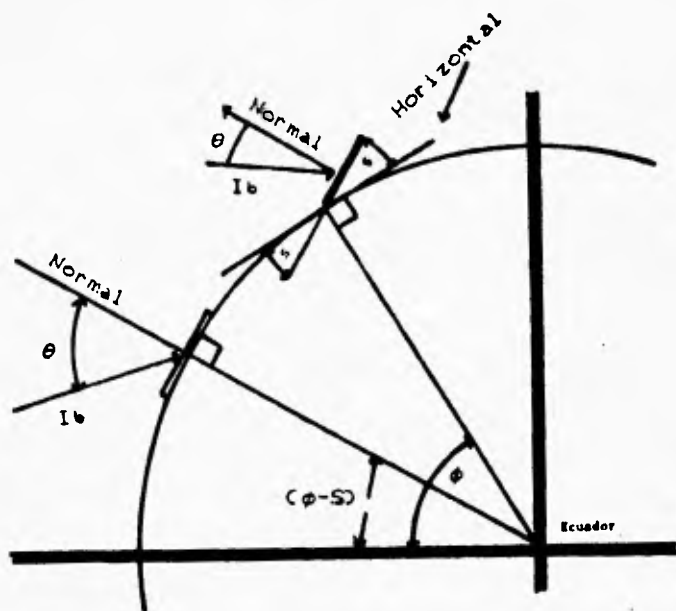


Fig. 2.6 Una superficie inclinada un ángulo β y orientada hacia el sur (γ_s), es equivalente a una superficie horizontal a una latitud $\phi - \beta$.

Un subcaso interesante es cuando $\gamma_s = 0$, es decir, la superficie esta inclinada y orientada hacia el sur, como puede verse en la figura 2.6, esto es equivalente a calcular el ángulo

de incidencia de una superficie horizontal situada a una latitud $\phi - \beta$, entonces:

$$\cos \theta = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen}(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega \quad (2.14)$$

Finalmente el caso a), el más sencillo, simplemente $\theta = 0$, es decir, coinciden la normal a la superficie y el haz luminoso.

EL EFECTO DE LA ATMOSFERA.

De toda la radiación que llega a las partes altas de la atmósfera (radiación extraterrestre, I_0), solo una parte alcanza la superficie terrestre debido principalmente a que la atmósfera actúa como un filtro que selecciona ciertas longitudes de onda y les impide el paso a otras. Otro efecto de la atmósfera es el de desviar parte de la luz en todas direcciones provocando que se difunda y que solo parte llegue directamente a nosotros. A la radiación que no sufre desviaciones en su trayectoria se le llama radiación directa, I_d y a la que sufre desviación en todas direcciones se le conoce como radiación difusa, I_a y la suma de estas dos componentes es la radiación global I_0 que recibe una superficie a nivel del mar:

$$I_0 = I_d + I_a \quad (2.15)$$

Para comprender mejor el efecto de filtro y de atenuación que sufre el haz luminoso en su paso por la atmósfera es conveniente analizar algunas características de esta última.

Los especialistas consideran a la atmósfera dividida en cuatro capas, que son (ordenadas de menor a mayor altura), las

siguientes: Troposfera de 11 a 17 Km de altura; Estratosfera entre 15 a 50 Km; Mesosfera 50 a 90 Km y la Termosfera de 90 a 450 Km.

Los fenomenos meteorológicos suceden en la Troposfera, es decir, dentro de una distancia vertical relativamente corta, por lo que, tienen más influencia en la horizontal que en la vertical. La composición se considera constante en las dos primeras capas: 78 % N₂, 21 % O₂, 0.9 % Ar, 0.03 % CO₂ y restos de otros gases (Manrique). Se estima que el 95 % del vapor de agua atmosférico esta dentro de los primeros 5 000 m de altura y dentro de los 2 000 m esta el 50 %. El vapor de agua absorbe gran parte de la radiación infrarroja. El CO₂ junto con el vapor de agua absorben también la radiación que va mas allá de 2.3 μm. Cuando la humedad es alta se puede llegar a reducir hasta en un 15 % la radiación que pasaría en un día claro y seco (Lunde)

Otro gas importante es el ozono, que se localiza en la estratosfera y proviene de las reacciones:



y



que son catalizadas por los rayos UV de $\lambda < 0.29 \mu\text{m}$. El ozono absorbe casi toda la radiación de $\lambda < 0.35 \mu\text{m}$. (A. Mulhia, Manrique). La radiación UV de 0.3 a 0.4 μm es casi completamente absorbida hasta un valor de 6.1 % respecto de la disponible en la red extraterrestre (Lunde).

La radiación visible que va de 0.4 a 0.7 μm no se ve afectada grandemente salvo la luz azul que es ligeramente dispersada dando

al cielo su coloración azul. A este intervalo se le conoce como la "ventana meteorológica".

El efecto de la polución, aunque poco estudiado, se cree que tiene influencia en las longitudes de onda de la ventana meteorológica.

La absorción no es el único mecanismo de atenuación también la dispersión se debe a los cambios de temperatura y presión que originan cambios del índice de refracción del aire. En realidad este mecanismo solo desvía el haz luminoso en todas direcciones, parte de esta energía dispersada llega luego a la tierra como energía difusa Id.

Con el objeto de tener un punto de comparación para estimar la atenuación de la radiación solar por la atmósfera, se define la "masa de aire" que es la longitud de la trayectoria que siguen los rayos solares al pasar por la atmósfera. Cuando el sol tiene un ángulo cenital igual a cero, es decir, la trayectoria es vertical y nos encontramos al nivel del mar, la masa de aire se considera igual a la unidad. Si cambia el ángulo cenital entonces cambiará la masa de aire (fig. 2.7), la variación, en función de la altura solar esta dada por la expresión:

$$m = 1229 + (614 \operatorname{sen} \alpha)^2 - 614 \operatorname{sen} \alpha \quad (2.16)$$

(Kreider y Kreith)

Si no estamos a nivel del mar la ecuación debe ser corregida usando el factor P/P_0 .

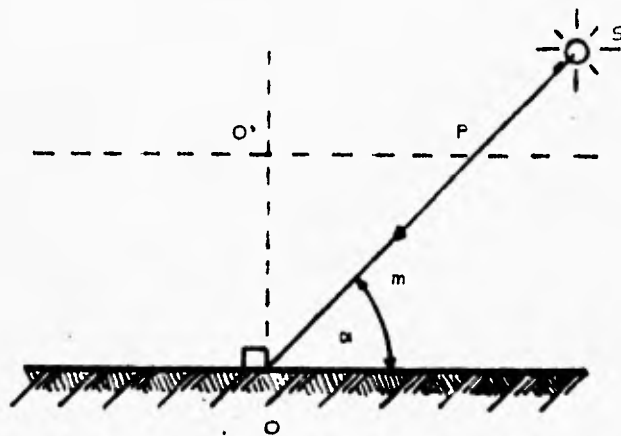


Fig. 2.7: La longitud de la trayectoria de los rayos solares se llama "MASA DE AIRE".

Si I_D es la radiación directa que llega a la tierra e I_0 es la radiación extraterrestre en el momento de la observación, podemos definir la transmitancia atmosférica como:

$$T_{\text{atm}} = \frac{I_D}{I_0} \quad (2.17)$$

y puede estimarse mediante la siguiente correlación:

$$T_{\text{atm}} = 0.5 (e^{0.08 m} + e^{-0.008 m}) \quad (2.18)$$

y la radiación directa sobre la superficie en un día despejado será:

$$I_D = T_{\text{atm}} I_0 \quad (2.19)$$

(Freider y Kreith)

MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.

Después de haber visto la forma de calcular la dirección de llegada del haz luminoso y de analizar la atenuación que sucede en la atmosfera, veremos ahora las formas de cuantificarlo, es decir, las formas de medir la cantidad de energía radiante solar que llega efectivamente a la superficie terrestre.

A la energía radiante del sol le hemos llamado haz luminoso pero a la cantidad de energía que llega en este haz le llamaremos Irradianza y los abreviaremos con la letra I . A la irradianza calculada a la distancia media tierra-sol (150 millones de kilómetros) se le llama constante solar y se abrevia I_{cs} . Como la distancia tierra-sol varia a lo largo del año como se ha visto, la irradianza extraterrestre instantanea se le conoce como I_0 y es función del día del año y de I_{cs} . A la irradianza que no es desviada por la atmosfera se le conoce como irradianza directa o I_D y la que si sufre desviación como irradianza difusa o I_d . La suma de estas dos irradianzas es la irradianza global que llega a la tierra o I_0 . Un segundo indice se usa para determinar el tipo de superficie sobre la que incide la irradianza, así I_{dh} es la irradianza difusa sobre una superficie horizontal, aunque algunos autores prefieren abreviar solo H_d ; donde H es la irradianza horizontal. I_{Dn} sería la irradianza directa sobre un plano normal.

Dos son los aparatos para medir la irradianza: El Pirheliometro, el cual mide solo irradianza directa I_D , para lo cual cuenta con un mecanismo de seguimiento del disco solar ya sea mecánico o de relojería. Aunque el disco solar tiene un ángulo desde la tierra de apenas 5° el pirheliometro abarca un ángulo de

entre 5.6° y 7° aproximadamente en la bóveda celeste.

El segundo instrumento es el Piranómetro, el cual mide la radiación global hemisférica; cuenta con dos semiesferas de vidrio altamente transparente para que solo el haz luminoso sea el que se mida.

Existe un dispositivo llamado heliógrafo de Campbell-Stokes que indica solo las horas de soleamiento en las cuales la irradianza sobrepasa un valor mínimo. Consiste en un lente que concentra los rayos solares sobre una tira de papel, cuando la irradianza sobrepasa el valor mínimo, la tira de papel se quema.

En general el principio en el que se basan estos instrumentos es la conversión de la energía radiante a otra forma de energía más fácil de medir. De acuerdo a esto, los Piranómetros y Pirheliómetros se pueden clasificar en térmicos, termoelectrónicos, fotoelectrónicos etc. Por ejemplo, un piranómetro sencillo consiste en dos láminas de distinto metal, por lo que el coeficiente de dilatación también es distinto, como las láminas están unidas, al ser calentadas estas se curvan sobre una escala previamente graduada.

Los termoelectrónicos como su nombre lo indica convierten la energía radiante en calor y luego en electricidad, un ejemplo es el Pirheliómetro de compensación de Angstron, el cual calienta mediante el haz luminoso una cinta metálica. Otra cinta metálica de características semejantes es calentada eléctricamente. La cantidad de electricidad necesaria para igualar las temperaturas de las dos cintas metálicas es equivalente a la energía radiante que incide sobre la primera placa. Un obturador permite alternar el calentamiento de las cintas con electricidad y con luz, lo cual

aumenta la exactitud del aparato.

CONSTRUCCIÓN DE UN PIRANÓMETRO PARA LOS CSP DEL LABORATORIO.

Otro ejemplo es el piranómetro que se construyó para medir la irradianza global en la práctica propuesta de este trabajo, el cual, aprovecha el efecto fotoeléctrico, es decir, un fotodiodo transforma la energía radiante en electricidad, la cual es luego amplificada por un circuito y medida por un voltímetro integrado y calibrado en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera para dar la lectura de la irradianza directamente en Watts/cm². En la figura 2.8 se muestra el diagrama del circuito electrónico con el que se construyó este aparato.

CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS.

Las características de un instrumento ideal de medición de energía radiante serían su exactitud y su estabilidad, características difíciles de conseguir en la práctica. El problema se ha resuelto usando dos tipos de instrumentos; los absolutos y los relativos. Los absolutos se dividen en estándares y subestándares y se usan como sigue:

De los instrumentos absolutos que son usados como estándares (son más estables y exactos) se ha calculado su error de menos del 1 %. La desventaja es que son muy delicados en su manejo, por lo que se usan para calibrar otros instrumentos subestándares de manejo más sencillo aunque con menor estabilidad y un poco de mayor error.

Estos últimos instrumentos son usados finalmente para calibrar los instrumentos de campo o de uso frecuente cuyo error se estima hasta en 5 %.

Los instrumentos absolutos son exclusivamente pirheliómetros,

mientras los de campo pueden ser tanto pirheliómetros como piranómetros. Periodicamente se llevan a cabo reuniones internacionales para comparar los instrumentos absolutos estandares y determinar errores y estabilidad en estos.

Por considerarlo de interes y porque fue el procedimiento seguido en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM para calibrar nuestro instrumento, reproducimos a continuación el procedimiento para comparar instrumentos y las características que deben tener según A. Muhlia:

CARACTERISTICAS COMUNES DE LOS INSTRUMENTOS.

Algunas de la características instrumentales que comunmente se han identificado son:

- a) Constante de calibración o también llamada sensibilidad; es la relación existente entre la radiación recibida por el instrumento y la señal de salida del sensor; esta definida por:

$$I = K V$$

donde V = voltaje de salida del sensor.

K = constante de calibración.

I = radiación recibida por el instrumento.

- b) Respuesta angular o geométricas: es la variación de la sensibilidad del instrumento (K) con la dirección de la radiación incidente.
- c) Linealidad: Es la constancia de la razón de cambio de la señal de salida respecto del cambio en la radiación incidente, lo cual se manifiesta si su sensibilidad es

constante.

- d) Estabilidad: es la constancia de alguna de las características instrumentales con respecto a las variaciones de algún otro parámetro. Usualmente esta característica es la sensibilidad, y su estabilidad es con respecto al tiempo o edad del instrumento.
- e) Respuesta espectral: es la sensibilidad del instrumento a las diferentes longitudes de onda de la radiación o bien la variación de la constante de calibración con la radiación de diferentes longitudes de onda.
- f) Estabilidad a los cambios de temperatura ambiente: es la variación de la sensibilidad y otras características con los cambios en la temperatura ambiente y del instrumento.
- g) Respuesta dinámica o constante de tiempo: es el tiempo necesario para que la señal de salida sea el 1/e de su valor al cambiar bruscamente la radiación incidente."

Si dispusiéramos de un instrumento ideal las variaciones en las características anteriores no provocarían cambios en K, es decir, sería K realmente una constante cuando varían estos parámetros por lo cual se siguen ciertos criterios para observar la tendencia de cambio de K y así caracterizar el instrumento y su sensibilidad. Al respecto A. Muhlía agraga:

DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE CALIBRACIÓN.

Por comparación con otro instrumento considerado como referencia.

Los piranómetros (dos o más) se colocan en posición horizontal y se cuidan los siguientes parámetros: separación de 1 m sin obstrucciones en el plano del horizonte, con alguna señal en

el instrumento que indique el norte. De preferencia no debe haber obstrucciones en todo el plano del horizonte. Uno (o más) de los piránómetros se toma como referencia. La señal de salida de cada instrumento se mide simultáneamente con la de los demás usando un voltmetro de alta impedancia para evitar alterar significativamente las lecturas. Los voltajes se comparan con el de referencia calculando su cociente, el cual es igual al cociente de sus constantes de calibración; de esta forma la constante del piránómetro se obtiene en términos de la constante de referencia y el cociente de los voltajes, esto es:

$$K = \frac{V}{V_0} K_0 \quad (2.21)$$

en donde:

K es la constante de calibración del piránómetro calibrado.

V es el voltaje (av) del piránómetro calibrado

K₀ es la constante de calibración del piránómetro de referencia.

V₀ es el voltaje del piránómetro de referencia.

Después de haberse estabilizado por lo menos una hora, debe procederse a tomar series de datos suficientemente grandes y calcular las razones promedio en base a las cuales calcular las constantes de calibración. Este procedimiento permite reducir errores."

Hay por lo menos dos criterios de calibración, aquel que sugiere calibrar en días completamente despejados y el que sugiere calibrar en días con condiciones semejantes a las que imperaran mientras se use el instrumento.

ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.

El pirheliómetro y el piranómetro nos permiten disponer de datos de insolación, pero la historia de estos aparatos y los lugares donde se usan es relativamente reciente. Aún en los países avanzados, aunque se cuenta con estaciones solares que tienden a conectarse en redes, no siempre se dispone de datos históricos confiables, por lo que se han desarrollado modelos para simular (estimar) la insolación a partir de datos meteorológicos principalmente, de los cuales si se cuenta con datos confiables y de varios años atrás.

Al buscar en la literatura sobre distintos métodos de estimar la insolación puede llegar a sorprender la cantidad de métodos existentes y para un principiante sería frecuente el desconcierto, tal y como sucedió al inicio de esta investigación. Casi cada autor que escribe sobre insolación propone un método distinto o una variante a un modelo conocido y muchos de estos no son métodos generales, y por lo tanto de difícil aplicación a otras localidades que no sean las que le dieron origen. Buscando entre varios autores se encontró uno, Estrada-Cajigal, que resulta bastante claro al proponer una clasificación de los métodos y que por considerarlo importante se exponen las razones que le llevan a proponer tal clasificación:

"De hecho existen tantos modelos para calcular la radiación solar que llega a ser realmente confuso y difícil elegir cual modelo adoptar." , y mas adelante agrega:

"En general existen dos maneras indirectas para estimar la radiación solar. Un procedimiento es considerar como conocida la radiación solar extraterrestre y después determinar los efectos

que la atmósfera produce sobre ella, como son la reflexión en la superficie exterior de la atmósfera, dispersión molecular y no molecular, absorción por las partículas sólidas y líquidas, absorción por el vapor de agua y otros gases, y la reflexión y absorción por los diferentes tipos de nubes, para finalmente conocer la radiación solar que se recibe en la superficie terrestre. A este grupo se le conoce comúnmente como métodos computacionales, físicos o atmosféricos. El otro procedimiento es el de los métodos empíricos basados en estadísticas de diversos parámetros climatológicos."

En su trabajo propone que los métodos computacionales se clasifican a su vez en cuatro niveles de mayor a menor complejidad. Los dos primeros consideran la insolación espectral, los llama de difícil aplicación y sugiere que la exactitud conseguida con la teoría se ve mermada por el error inherente a la toma de datos para las variables necesarias para la ecuación, las cuales tienen alta incertidumbre.

La base de los métodos del primer nivel se basan en la teoría de transparencia radiativa desarrollada por Chabdrasaknar. Requiere normalmente de integraciones numéricas, pues es una ecuación diferencial. La exactitud que se consigue con la teoría se ve disminuida por el hecho de que las variables usadas, tal como las propiedades ópticas de la atmósfera tienen alta incertidumbre.

El segundo nivel considera a la atmósfera compuesta por una sola capa, se basa en la ley de Beer y también de los valores de irradianza global espectral.

El tercer nivel se diferencia del segundo en que las

características espectrales no son consideradas en la ecuación de Beer.

El cuarto nivel, el más simple, considera a la masa de aire como variable y constantes que son independientes del día del año.

La conclusión general que se obtiene de este trabajo acerca de los métodos computacionales, es que estos son para trabajos especializados y hacen uso de teorías de difícil aplicación práctica.

En cuanto a los métodos empíricos basados en estadísticas los hay también de diversa índole según consideren medidas de humedad, temperatura altitud, nubosidad, etc. Existe uno en especial desarrollado por Angstrom el cual considera solo las horas de insolación, se considera de uso general y el único inconveniente es la asignación correcta de los valores de las constantes a y b obtenidas por regresión estadísticas o por métodos indirectos para los cuales existen varios trabajos. La ecuación es:

$$I = I_0 \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2.24)$$

donde:

I_0 es la radiación extraterrestre diaria promedio obtenida en un mes.

n son las horas de insolación registradas y

N son las horas de insolación calculadas con la ecuación:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.25)$$

que no es otra que la ecuación 2.10 pero multiplicada por dos.

Rietvel propone los siguientes valores para a y b:

$$I = I_0 \left(0.18 + 0.62 \frac{n}{N} \right) \quad (2.26)$$

Estrada-Cajigal propone los siguientes valores:

$$I = I_0 \left(0.178 + 0.589 \frac{n}{N} \right) \quad (2.27)$$

obtenidos de correlacionar los datos de irradianza global registrada en 85 localidades en Latinoamérica.

Para el no iniciado que requiera calcular la irradianza global solo le queda el aceptar el valor de las constantes y usarlas, no siempre es claro el proceso que se sigue para obtener su valor.

A continuación y por considerarlo también representativo de un método estadístico se tratará un modelo propuesto por Lunde en su libro. La ecuación es:

$$I_{DN} = A \exp \left[- \frac{P}{P_0} \frac{B}{\cos \theta_z} \right] \quad (2.28)$$

donde:

θ_z = ángulo zenital

$\frac{P}{P_0}$ = relación de la presión local a la presión estandar.

= $\exp (0.0001164 * \text{altitud en metros sobre el nivel del mar})$

A = valores mensuales de intensidad solar extraterrestre aparente (I_0)

B = coeficiente de extinción.

I_{DN} = Irradianza directa normal.

La diferencia entre I_0 y A consiste en que A no es obtenida por la ecuación 2.3, sino que se tabula de tal manera que sea consistente no solo con la variación de la distancia tierra-sol, sino con los cambios y variaciones en la atmósfera debido a las estaciones del año.

IRRADIANZA SOBRE UNA SUPERFICIE FIJA PLANA HORIZONTAL.

Para una superficie horizontal la cantidad de energía que le llega es igual a la componente del haz luminoso sobre la normal a la superficie, esto es:

$$I_{0H} = I_{0N} \text{ sen } \alpha \quad (2.29)$$

La irradianza difusa se calcula en base a un parámetro C que es la relación mensual promedio de la irradianza difusa a la directa normal para cielo despejado, entonces:

$$I_d = C I_{0N} \quad (2.30)$$

y la irradianza global horizontal será la suma de la irradianza difusa y directas:

$$I_{0H} = I_{0N} \text{ sen } \alpha + C I_{0N} \quad (2.31)$$

La secuencia de cálculo sería:

- a) Conocer la latitud del lugar.
- b) Para el día que se estima, calcular δ .
- c) y para la hora del día calcular ω_s .
- d) Con estos tres parámetros se calcula θ_z y α .

e) Con θ_z y los parámetros A y B se calcula I_{DN}

f) Por último con I_{DN} y el parámetro C, se calcula I_{DH} .

Ahora bien para poder calcular w es necesario usar el tiempo solar verdadero TSV que no siempre coincide con el tiempo local TL pues este es realmente el tiempo en base a un meridiano tomado como referencia MR. Conociendo el meridiano de referencia y el meridiano de la localidad de interés ML es fácil convertirlos a horas dividiendo entre 15. Finalmente el tiempo solar verdadero se calcula mediante:

$$TSV = TL + MR/15 - ML/15 + ECT \quad (2.32)$$

ECT es la ecuación del tiempo, una corrección debida a irregularidades en la órbita terrestre.

IRRADIANZA SOBRE SUPERFICIES PLANAS INCLINADAS.

Una vez conocida la I_{DN} o la I_{DH} es posible calcular la irradianza sobre una superficie inclinada un cierto ángulo, simplemente como la componente del rayo luminoso sobre la normal a la superficie, esto es:

$$I_D = I_{DN} \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} = I_{DN} \cos \theta \quad (2.33)$$

la radiación difusa se estima por la ecuación:

$$I_d = I_{dH} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (2.34)$$

esto es suponiendo que los alrededores no reflejan la luz, si esto no es así, entonces la ecuación se modifica:

$$I_d = I_{dh} \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) + \rho (I_{dh} + i_c) \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \dots (2.35)$$

donde: ρ es la reflectancia de los alrededores y vale aproximadamente 0.2 para suelo ordinario pero para nieve es 0.6 ó 0.15 para grava.

CAPITULO III

TEORIA DE COLECTORES SOLARES PLANOS

Todo sistema de conversión fototérmica de energía tiene como finalidad captar la energía solar y transformarla en calor utili- dirigiéndolo hacia algún medio de trabajo como agua, aire o algún otro fluido. El colector solar plano es el más simple de los dispositivos construidos para llevar a cabo esta tarea. esta constituido por las siguientes partes (fig. 3.1):

Cubierta transparente, placa absorbente, superficie selectiva, aislante y carcasa. En los siguientes párrafos describiremos con más detalle la función de cada una de estas partes, pero antes se repasará algunas propiedades de los materiales con respecto a la luz.

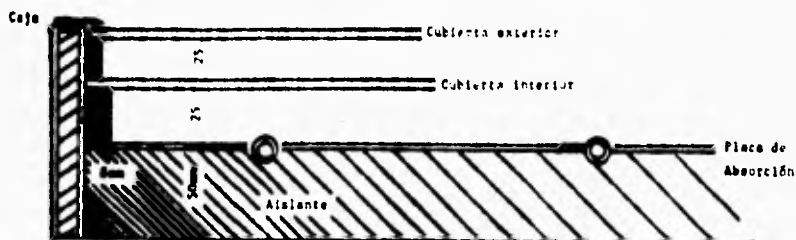


Fig 3.1: Partes de un colector solar plano.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES FRENTE A LA LUZ.

En la figura 2.2 se puede apreciar el recorrido típico del haz luminoso dentro de un colector solar plano (csp).

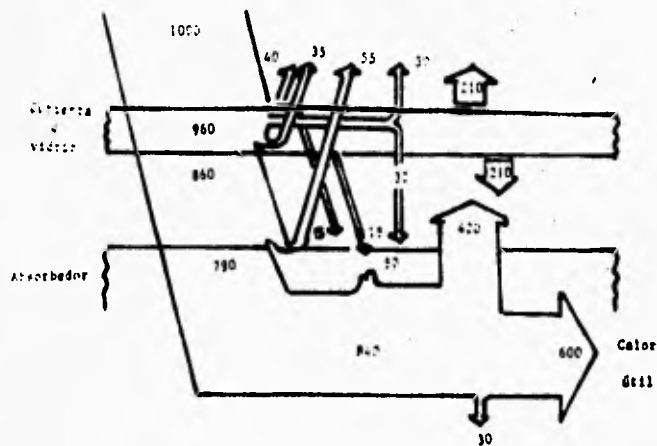


Fig. 2.2: Recorrido del haz luminoso.

Aunque a primera vista el recorrido parece complicado, es relativamente fácil explicarlo en base a cuatro conceptos fundamentales que rigen las propiedades de los materiales frente a la luz. Estos son: reflexión, absorción, transmisión y emisión. Estos conceptos se trataron en el capítulo anterior, ahora es tiempo de profundizar en ellos.

Cuando algún material es expuesto a la luz, este puede transmitirla, reflejarla o absorberla. En ocasiones pueden haber combinaciones de este comportamiento, es decir, algún material puede absorber y reflejar la luz, otro puede reflejar y transmitirla etc.

Refiriendonos a la figura 3.2, si I_0 es la irradianza total que llega a la cubierta transparente (100%), entonces una parte de ella será reflejada, llamémosle I_r a esta irradianza. Otra parte de I_0 será absorbida por el material que forma la cubierta, llamémosle I_a y el resto pasará a través de la misma esto es I_t (ver fig. 3.3).

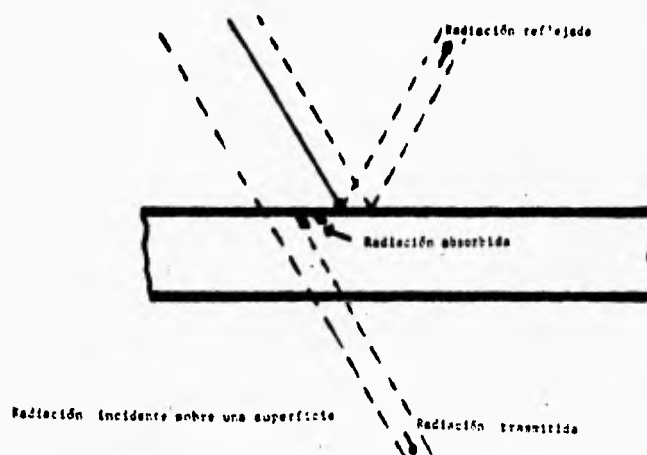


Figura 3.3: La radiación incidente sobre una superficie se puede reflejar, transmitir o absorber.

Como puede verse I_0 es descompuesta en tres partes al tocar el material de la cubierta, en otras palabras la suma de la I_r , I_a e I_t será I_0 :

$$I_0 = I_r + I_a + I_t \dots (3.1)$$

Si normalizamos la ecuación anterior, esto es, la dividimos entre

lo tendremos:

$$1 = \frac{I_r}{I_0} + \frac{I_a}{I_0} + \frac{I_t}{I_0} \dots (3.2)$$

Cada uno de los sumandos de la ecuación 3.2 representa la fracción de radiación que es reflejada, absorbida o transmitida respectivamente. Llamemos a cada una de estas fracciones: reflectancia, absorbancia y transmitancia y abreviemos con las letras griegas: ρ , α y τ , esto es:

$$\rho = \frac{I_r}{I_0} \dots (3.3)$$

$$\alpha = \frac{I_a}{I_0} \dots (3.4)$$

$$\tau = \frac{I_t}{I_0} \dots (3.5)$$

De este modo la ecuación 3.1 puede ser escrita como:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \dots (3.6)$$

Aunque esta ecuación es válida para cualquier longitud de onda no es necesario que cada sumando presente el mismo valor al cambiar esta. Por ejemplo, la ρ puede tener dos valores diferentes para dos longitudes de onda diferentes, pero como la ecuación se debe cumplir, los otros valores deben ser tales que la suma sea uno.

por lo tanto, la ecuación funciona tanto para la radiación que proviene del sol como para la radiación de onda larga del colector. Mas aún, en ocasiones puede ser útil el cambio de valor de estas propiedades al cambiar de la longitud de onda del sol a la longitud de onda del colector. Ampliando más este concepto diremos lo siguiente; la radiación que llega del sol presenta una distribución semejante a la de un cuerpo negro ideal a la temperatura de 5780°k , esta es la radiación que atraviesa la cubierta transparente e incide en la placa. Una vez absorbida esta energía, se convierte en energía térmica y la placa la reemite solo que a una temperatura mucho menor, que en todo caso no rebasa los 100°C . Entonces, por un lado la placa recibe radiación de longitud de onda mas corta y por otro reemite radiación térmica de longitud de onda más larga (figura 3.4).

La cubierta transparente ideal para esta aplicación es la que posee una alta transmitancia para la primera radiación (la proveniente del sol) y baja transmitancia para la segunda (la del colector) impidiendole la salida creando así el efecto invernadero.

La cuarta de estas propiedades, la emisión, no es en realidad un parámetro independiente, pues como se explico en el capítulo anterior todo material que absorbe una cierta cantidad de radiación, debe también emitir otra fracción equivalente para conservar un equilibrio y, por lo tanto, la emitancia puede ser definida como:

$$e = a \dots (3.7)$$

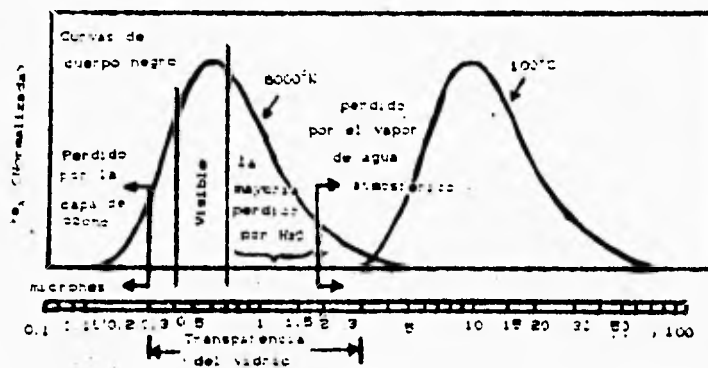


Figura 9.4: Radiación solar comparada con la reradiación de la placa de un colector.

Como puede observarse el camino que sigue la luz es una serie de reflexiones, absorciones, transmisiones y reemisiones.

Se tratará ahora bajo estas definiciones cada una de las partes del colector.

LA CUBIERTA TRANSPARENTE.

Para que un material sirva como cubierta transparente debe cumplir, por un lado, que la transmitancia de la luz solar sea alta y, por lo tanto, que la absorptancia y la reflectancia sean lo mas bajas posibles y por el otro debe ser opaco a la radiación termica emitida por la placa creando lo que se llama el efecto invernadero. El vidrio sigue siendo el material mas cercano a este

FALLA DE ORIGEN

ideal, y aunque se están desarrollando nuevos materiales, no se observa a corto plazo que se llegue a obtener alguno con características mejores a las del vidrio.

REFLECTIVIDAD EN LA CUBIERTA TRANSPARENTE.

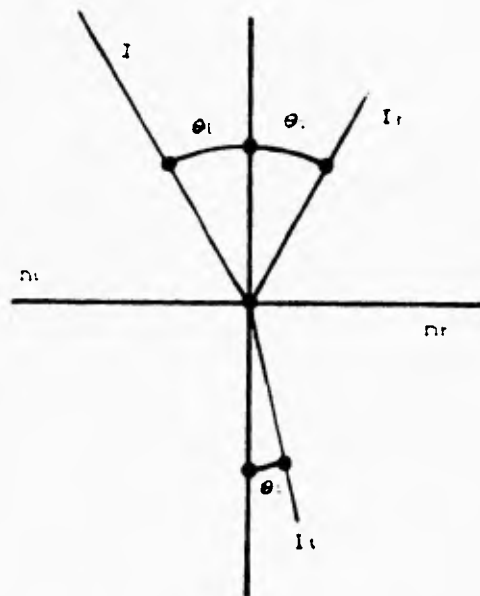


Figura 3.5: Ángulo de incidencia y Ángulo de refracción.

La reflectividad de un material transparente o translúcido depende de dos variables: el índice de refracción y el ángulo de incidencia del haz luminoso respecto de una línea perpendicular a la superficie considerada. Según la teoría electromagnética la radiación que incide o es emitida en una superficie puede ser considerada como compuesta por dos planos de polarización, uno en paralelo al ángulo de incidencia y otro perpendicular al mismo. El ángulo de incidencia (θ_i) y el ángulo de refracción (θ_r) (ver

figura 3.5) están relacionados con los índices de refracción de los dos medios por la ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{\eta_r}{\eta_i} = \eta \dots (3.8)$$

Los componentes polarizados perpendicular y paralelo de la reflectancia se pueden calcular:

$$F_T = \frac{\text{sen}^2 (\theta_i - \theta_r)}{\text{sen}^2 (\theta_i + \theta_r)} \dots (3.9)$$

$$P_n = \frac{\text{tan}^2 (\theta_i - \theta_r)}{\text{tan}^2 (\theta_i + \theta_r)} \dots (3.10)$$

despejando θ_r de 3.8 para eliminarla de 3.9 y 3.10 tenemos:

$$P_T = \left[\frac{(n^2 - \text{sen}^2 \theta_i) - \cos \theta_i}{(n^2 - \text{sen}^2 \theta_i) + \cos \theta_i} \right]^2 \dots (3.11)$$

$$P_n = \left[\frac{n^2 \cos \theta_i - (n^2 - \text{sen}^2 \theta_i)}{n^2 \cos \theta_i + (n^2 - \text{sen}^2 \theta_i)} \right]^2 \dots (3.12)$$

que son conocidas como las ecuaciones de Fresnel. Un caso especial es cuando el ángulo de incidencia θ_i es cero, es decir, incidencia normal, entonces:

$$P_T = P_n = \left[\frac{n - 1}{n + 1} \right]^2 \dots (3.13)$$

Si la radiación está uniformemente polarizada, entonces los

dos componentes son de igual intensidad y :

$$P_{(v)} = \frac{1}{2} (p_r + p_n) = \left[\frac{n-1}{n+1} \right]^2 \dots (3.14)$$

Para tener idea de cual es la perdida por reflexión sin considerar aun el ángulo de incidencia, consideremos el ejemplo del vidrio cuyo indice de refracción es : $n = 1.526$. Al sustituir este valor en la ecuación 3.14 tenemos $p = 0.043$.Como puede verse en la figura 3.2 la luz se refleja dos veces (una en cada cara) en la cubierta transparente, por lo tanto, la fracción de luz perdida en total será el doble de este valor, es decir, $p = 0.086$, en otras palabras el 8.6 % de la luz incidente es perdida por reflexión. Si se va a usar más de una cubierta, entonces las perdidas por reflexión pueden llegar a ser considerables. En el caso del ángulo de incidencia, este tiene relativamente poca influencia en el incremento de la reflexión. Por ejemplo, cuando el ángulo de incidencia es de 60° las perdidas por reflexión serán apenas del 18.6 %.

Se han hecho intentos por reducir los valores de reflexión, esto se intenta por dos caminos principalmente, uno es depositando una delgada capa de un dieléctrico de algunos micrones de espesor. En este caso la reflectividad puede ser calculada por la ecuación:

$$P = 1 - \frac{4 n_1 n_2}{(n_2^2 + n_1^2)(n_1 + 1)} \dots (3.15)$$

esta ecuación presenta dos aspectos interesantes: primero, si $n_1 = n_2$ la ecuación se reduce a la 3.14 .segundo el valor mínimo de

o se da cuando $n_2 = \sqrt{n_1}$. En el ejemplo del vidrio $n_2 = \sqrt{1.526} = 1.235$, sustituyendo este valor en la ecuación 3.9 tenemos que $\rho = 2.2\%$. El material más cercano a este valor actualmente son los fluoruros metálicos usados en los lentes de las cámaras con $n_2 = 1.38$ lo cual da $\rho = 2.8\%$, esto es, un valor global de 5.6% comparado al 8.8% de la superficie si recubrir.

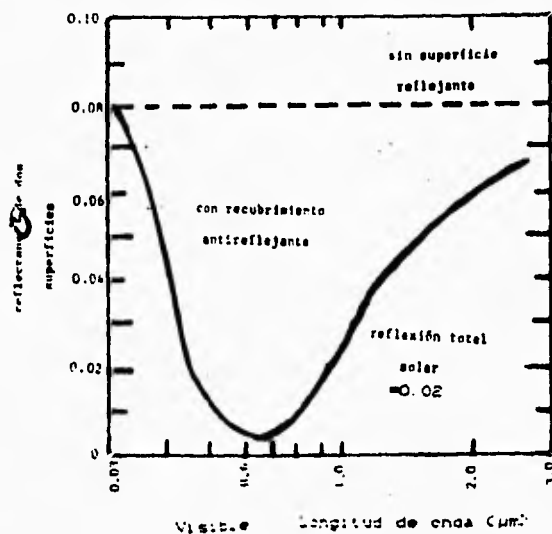


Figura 3.0: Reflectancia de dos cubiertas transparentes en función de la longitud de onda. Una superficie con cubierta reflejante y otra superficie sin cubierta reflejante.

El problema que se presenta con estos recubrimientos es su baja resistencia a la intemperie lo que provoca una baja durabilidad, siendo esta crítica. El segundo método ha ensayado a depositar, o grabar al agua fuerte la superficie, esto se logra

sumergiendo la superficie en un baño de ácido fluorosilicato saturado en sílica. El ácido ataca la superficie del vidrio dejando una capa de sílica porosa con un índice de refracción muy cercano al óptimo. Si el espesor de esta capa es de $1/2$ de la longitud de onda dominante, la reflexión de esta será cero y se incrementará paulatinamente para el resto de las longitudes de onda (figura 3.6), consiguiendo reducir p hasta el 2 %.

La durabilidad de este procedimiento es bastante mejor que el del anterior reportándose un caso en que fue de 20 años sin que se haya deteriorado las propiedades de reflexión apreciablemente.

ABSORTIVIDAD DE LA CUBIERTA TRANSPARENTE.

Hay varios materiales que teniendo alta transmitancia tienen una absorptancia baja: vidrio, aire, agua y algunos plásticos. Si algún color se percibe en ellos es porque están absorbiendo algo del haz luminoso que incide. Por ejemplo, el vidrio suele presentar una coloración verde en la orilla lo cual indica que absorbe esta longitud de onda de la luz incidente, esto puede llegar a representar del 5 al 10 % de pérdidas por absorción. Afortunadamente se sabe que este fenómeno es debido a impurezas de óxido de hierro las cuales son relativamente fáciles de eliminar existiendo en el mercado vidrios claros con bajos contenidos de óxidos de hierro donde las pérdidas por absorptancia se reducen hasta un valor de 2.5 %. Existen incluso un vidrio con muy bajo contenido de hierro, 0.01 %, el cual puede llegar a transmitir hasta un 91.4 % de la luz incidente.

TRANSMISIVIDAD DE LA CUBIERTA TRANSPARENTE.

En la figura 3.2 se puede apreciar que la luz incidente es

reflejada dos veces hacia afuera, una en la cara externa del vidrio y la segunda en la cara interna, también se ve que esta segunda reflexión vuelve a reflejarse cuando al ir hacia afuera vuelve a chocar con la cara externa, de hecho en esta figura solo se marcan la suma de reflexiones que en realidad sufre el haz luminoso. Un análisis mas detallado muestra que, en realidad, una vez dentro, el rayo se refleja una infinidad de veces. (fig 3.7)

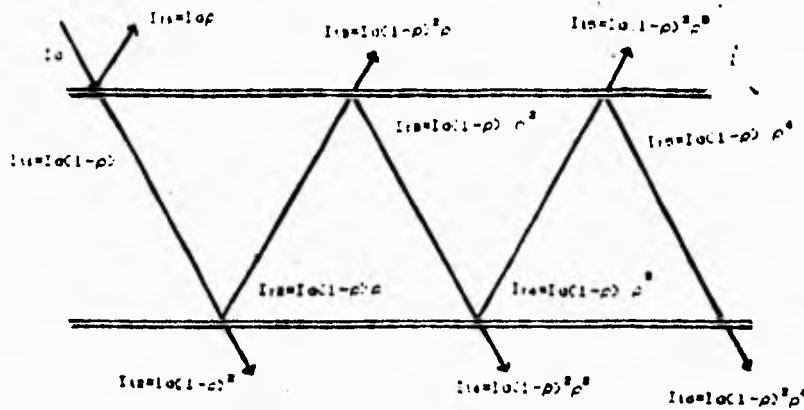


Figura 3.7: Reflexiones y transmisiones sucesivas sobre las caras interna y externa de una superficie transparente.

en cada reflexión sucesiva algo del rayo original atraviesa la cubierta para escapar o para quedar atrapado dentro del colector, por lo tanto, lo que se expresa en la figura 3.2 (y 3.7), es en realidad la suma de las reflexiones. Nuevamente sea I_0 la intensidad del rayo que incide sobre la cubierta, por la ecuación 3.3 vemos que la luz reflejada la primera vez por la cara externa

será:

$$I_{r1} = \rho I_0 \dots (3.16)$$

y la radiación que atravieza hacia adentro de la cubierta va a ser la que incide menos la que se refleja, esto es:

$$I_{t1} = I_0 - I_{r1} = I_0 - \rho I_0 = I_0(1-\rho) \dots (3.17)$$

En el planteamiento anterior se considera despreciable la absorción de la cubierta. Ahora bien, la luz que llega al interior e incide sobre la cara interna de la cubierta se ve reflejada por segunda vez de regreso hacia el medio externo, la cantidad reflejada será la que incide multiplicada por ρ (ec. 3.3) esto es:

$$I_{r2} = I_{r1} \rho = I_0(1-\rho) \rho \dots (3.18)$$

y la que logra atravesar la cara interna hacia dentro del colector por primera vez será la que incide menos la que se refleja:

$$I_{t2} = I_0(1-\rho) - I_0(1-\rho) \rho = I_0(1-\rho-\rho^2) = I_0(1-\rho^2) \dots (3.19)$$

Si continuamos con el procedimiento, la luz que es reflejada la segunda vez de regreso al exterior se refleja en parte por segunda vez en la cara externa nuevamente al interior y parte atravieza hacia afuera. Por un análisis semejante se ve que:

$$I_{r3} = I_{r2} \rho = I_0(1-\rho)^2 \rho \dots (3.20)$$

$$\begin{aligned} I_{t3} &= I_{r2} - I_{r3} = I_0(1-\rho) \rho - I_0(1-\rho)^2 \rho = I_0(\rho^2 - \rho^3 + \rho) \\ &= I_0(1-\rho)^2 \rho \dots (3.21) \end{aligned}$$

donde I_{r3} es la radiación reflejada hacia adentro por segunda vez e I_{t3} es la radiación que atraviesa la cara externa para perderse en el exterior. I_{r3} se vuelve a reflejar en la cara interna en una fracción ρ y el resto pasa por segunda vez hacia el interior:

$$I_{r4} = I_{r3} \rho = I_0(1-\rho)^3 \rho = I_0(1-\rho)^3 \rho \dots (3.22)$$

$$\begin{aligned} I_{t4} &= I_{r3} - I_{r4} = I_0(1-\rho)^2 \rho - I_0(1-\rho)^3 \rho = I_0(\rho^3 - \rho^4 + \rho) \\ &= I_0(1-2\rho+\rho^2) \rho^2 = I_0(1-\rho)^2 \rho^2 \dots (3.23) \end{aligned}$$

todas las ecuaciones anteriores dependen de ρ e I_0 para calcular la cantidad reflejada así como la cantidad transmitida. Si normalizamos todas las ecuaciones desde la 3.16, esto es si dividimos entre I_0 , tendremos en lugar de la irradianza que se transmite y la que se refleja, en cada paso, la fracción reflejada o transmitida con respecto del total. (fig. 3.8)

Como se aprecia en la figura, la energía transmitida a través de la cubierta es la suma de todas las transmitancias de la cara interna, esto es:

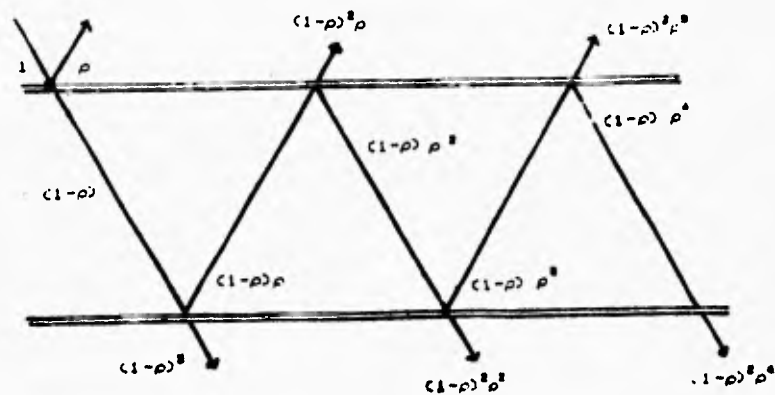


Figura 3.8: Fracción de radiación reflejada y transmitida en las dos caras de una cubierta transparente.

$$\tau = (1-\rho)^2 + (1-\rho)^2 \rho^2 + (1-\rho)^2 \rho^4 + \dots$$

$$= (1-\rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{(1-\rho)^2}{(1+\rho)} \dots (3.24)$$

$$\tau_r = \frac{1-\rho}{1+\rho} \dots (3.25)$$

Aunque para más de una cubierta el análisis se complica, se puede demostrar que:

$$\tau_r = \frac{1-\rho}{1+(2n-1)\rho} \dots (3.26)$$

donde: n = número de cubiertas

y τ_r = transmitancia considerando solo pérdidas por

reflexión.

Cuando la absorción no puede despreciarse, entonces suponemos que la atenuación de la radiación es proporcional a la intensidad del medio y a la distancia recorrida en este, es decir:

$$t_a = \frac{I_L}{I_0} = e^{-kL} \dots (3.27)$$

donde: t_a = es la transmitancia debida a la absorción.

I_L = es la irradianza después de haber recorrido una distancia L .

I_0 = es la irradianza global que incide en la cubierta.

k = se conoce como coeficiente de extinción y

L = a la distancia recorrida por el haz (o grosor de la cubierta).

La ecuación anterior es la forma integrada de la ley de Bouger.

Por último la transmitancia global considerando los efectos de absorción y reflexión será:

$$\tau = \tau_r t_a \dots (3.28)$$

Otra forma sencilla de calcular τ es a partir de la ecuación 3.6:

$$\tau = 1 - \rho - \alpha \dots (3.29)$$

y como hemos visto, para ρ y α se tienen los siguientes valores típicos: $\rho = 0.088$ y $\alpha = 0$ a 0.01 , entonces: $\tau = 0.911$. En otras palabras 91.1% de la luz incidente puede ser transmitida, aquí no se consideran problemas de suciedad en el vidrio.

En la siguiente tabla se sintetizan las propiedades del vidrio.

TABLA 3-1. Propiedades del Vidrio.

Propiedad	Tipo de Vidrios		
	Ordinario	Medio	Blanco
contenido de oxido de hierro, %	0.12	0.05	0.01
Indice de refracción	1.52	1.50	1.50
Transmitancia de la luz, % (normal)	79-84	88-89	91.2-91.6
Grosor en cm	0.64-0.32	0.32-0.48	0.56-0.32
Perdidas por reflexión, %	8.2-8.0	8.1-8.0	8.0
Perdidas por absorción, %	8-13	3-4	abajo 1.0

Como se vió antes para la reflexión, el ángulo de incidencia es también importante para la transmitancia solo cuando este es mayor de 45°, esto es debido a la influencia que tiene no solo en la reflexión sino también en la absorción pues según la ec. 3.27 la absorción depende de la distancia L que recorre la luz en el medio, esto es, al aumentar el ángulo de incidencia del haz, aumenta la distancia de recorrido del mismo.

OTROS MATERIALES PARA CUBIERTA TRANSPARENTE.

Varios plásticos se han ensayado como material de cubierta transparente en sustitución del vidrio y se puede decir que ninguno supera en forma global al vidrio pues suelen ser más caros y solo en ocasiones mejoran alguna propiedad del mismo. Un ejemplo es el plástico conocido comercialmente como Tedlar, el cual tiene un índice de refracción menor al del vidrio y es, por lo tanto, más transparente (mayor τ) a la radiación visible que el vidrio

pero también lo es a la radiación infrarroja, por lo que el efecto invernadero es también menor. Otra desventaja de los plásticos es la degradación que sufren a la radiación ultravioleta excepción hecha del Teflón que ha demostrado resistencia a esta degradación.

LA PLACA ABSORBEDORA.

La luz que atraviesa la cubierta transparente llega finalmente a la placa absorbedora donde cumple con la función principal que es transformarse en radiación térmica que luego es recolectada por algún fluido que la transporta al lugar donde será usada. Así como en la cubierta transparente se busca la máxima transmisividad de la radiación, aquí en la cubierta se busca la máxima absorción. Como se vió anteriormente todo cuerpo que absorbe radiación la emite también, esta reemisión no es deseable en el caso de la placa, pues representa energía que se pierde a los alrededores y que, por lo tanto, no es aprovechada. De lo anterior se deduce que, adicional a la máxima absorción es importante minimizar la emisión de la placa. Esto es posible gracias a que ciertas superficies, llamadas "selectivas", presentan alta absorción a la radiación de longitud de onda corta de la luz solar y emisión baja a la radiación térmica de longitud de onda mas larga que emite la placa.

Es evidente que las propiedades ópticas de la placa son importantes y por lo tanto conviene analizarlas.

A diferencia de la cubierta, la placa es un material opaco, esto es, no transmite la luz, por lo tanto, la ecuación 3.6 se reduce a:

$$\alpha + \rho = 1 \dots (3.30)$$

según la ecuación 3.30 la luz que incide en la placa se absorbe o se refleja, pero la suma de la absorptancia y reflectancia debe ser uno, por lo que, basta hablar de una de ellas para que la otra quede automáticamente fijada. Por otro lado según la ley de Kirckhoff $\alpha = \epsilon$, para ciertas circunstancias la absorptancia y emitancia monocromáticas pueden integrarse para todo el espectro manteniendo la igualdad, esto es $\alpha = \epsilon$ (ec 3.7). La emitancia y la absorptancia dependen además de la temperatura, de la longitud de onda, de esta manera los científicos solares han encontrado útil definir la absorptancia de un material para la radiación de onda corta de la luz solar mientras que la emitancia se define a la longitud de onda de la radiación térmica que reemite la placa, la cual es a una menor temperatura que la del sol. Ahora la ecuación 3.7 no es aplicable pues se habla de α y ϵ pero a diferentes temperaturas y diferentes longitudes de onda. Una superficie selectiva para placa de colector solar plano es aquella que tiene alta absorción de la luz solar y baja emitancia de la radiación térmica que es reemitida por la placa.

A continuación analizaremos algunos recubrimientos que permiten mejorar las características de las superficies colectoras.

Pinturas.

Una pintura consiste de pigmentos, un endurecedor orgánico y solventes que facilitan su aplicación. En el caso de la pintura negra mate cuyo pigmento generalmente usado es el carbón, se tienen valores de absorptancia y emitancia de 0.95 a 0.98 lo cual le hace un recubrimiento no selectivo. Sin embargo, se han

realizado algunos experimentos combinando capas muy delgadas de pintura sobre superficies con alta reflectividad como el aluminio provocando que se tenga alta absorción de la pintura con la baja emittancia (alta reflectividad) del aluminio, consiguiendose así superficies selectivas, mas aun, si la pintura es mejorada agregando como pigmentos mezclas de óxidos de cromo, cobre, hierro o manganeso, las propiedades ópticas pueden llegar a ser de $\alpha = 0.92$ y $\epsilon = 0.1$ a 0.13 las cuales son las mejores reportadas. La dificultad práctica consiste en obtener las capas delgadas y uniformes de pintura, lo que hace difícil la aplicación. Adicional al problema anterior está la resistencia que debe tener la pintura a las altas temperaturas de la placa y en general a las condiciones de operación del colector lo que reduce la vida útil de la pintura. La ventaja que presentan las pinturas es su bajo costo respecto a los otros métodos.

SUPERFICIES METÁLICAS SELECTIVAS.

El cromo y el níquel se han usado como recubrimientos protectores y de decorado pero cuando se depositan bajo condiciones ligeramente modificadas se obtienen acabados que en lugar de tener apariencia metálica y brillante son mate y oscuros, esto es debido a que se depositan pequeños cristales del metal sobre la superficie. El tamaño de los cristales es tal que la longitud de onda de la luz solar penetra por las irregularidades del acabado rebotando varias veces dentro, lo que propicia una gran absorción y por lo tanto el color oscuro que se aprecia en la superficie, por otro lado, el tamaño de los cristales depositados es demasiado pequeño para la longitud de

onda larga de la radiación térmica, la cual no penetra la microestructura provocando una alta reflectancia de esta radiación y como consecuencia una baja emisividad, condiciones de una superficie selectiva. Es como si bolas de ping pong penetraran a través de un enrejado metálico pero pelotas de basquetbol no pasaran y rebotaran. En la figura 3.9 se puede apreciar las reflexiones que sufre la luz antes de salir en un electrodeposito cuyos cristales tienen forma de V.

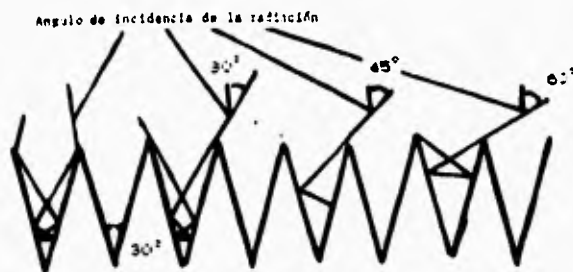


Figura 3.9. Reflexiones de la luz dentro de un electrodeposito con cristales en forma de V.

De los dos metales que se usan en los recubrimientos, el de níquel es el que reporta mejores propiedades ópticas con $\alpha = 0.96$ y $\epsilon = 0.07$ mientras que para cromo negro se tienen $\alpha = 0.95$ y $\epsilon = 0.15$ aunque la resistencia del níquel al calor y la humedad es menor a la del cromo sobre todo si este último se deposita después de un primer electrodeposito de níquel.

Se ha ensayado también obtener superficies selectivas no por electrodeposito sino por reacción química, aunque las propiedades ópticas no son tan buenas como las primeras.

CAPITULO IV

El análisis del funcionamiento de un colector solar plano parte (como en todo equipo de ingeniería química) de un balance de materia y energía. En el caso del balance de masa es el más simple, puesto que en régimen estable no hay acumulación y por lo tanto, todo lo que entra es igual a lo que sale: esto es, la misma masa de fluido de trabajo que entra sale.

Un caso diferente representa el balance de energía pues aquí, aunque tampoco hay acumulación en régimen estable, toda la energía que entra se reparte en dos rubros a la salida a saber el calor que se pierde al medio ambiente (y que por lo tanto no se aprovecha) y el calor que se transfiere al fluido de trabajo, llamado por esta circunstancia calor útil, en forma de ecuación se puede representar de la siguiente manera:

$$Q_u = Q_a - Q_l \dots (4.1)$$

donde:

Q_u = calor útil o calor transferido al fluido de trabajo.

Q_a = calor absorbido o calor que entra al csp.

Q_l = calor perdido por el csp hacia el medio ambiente.

La aparente sencillez de esta ecuación se va perdiendo conforme el análisis del funcionamiento se va haciendo más profundamente, así por ejemplo, hablar de régimen estable en un sistema que usa la energía solar es un concepto poco práctico dada la gran variabilidad del recurso solar. Este problema genera dos tipos de solución, o bien el análisis se hace para un periodo muy corto en el que se pueda considerar régimen casi estable en donde

las variables involucradas serán variables instantáneas, o bien para grandes periodos donde las variables involucradas serán globales.

Este y otros problemas han generado diferentes soluciones en diferentes autores, se intentará analizar en este capítulo las diferentes propuestas que en ocasiones requerirá de algún tipo de simplificación si se quiere mantener las ecuaciones de diseño relativamente simples.

Volviendo al balance de calor, el calor que entra al csp va a depender de la cantidad de radiación solar que llegue en ese momento a la tierra por unidad de area, esto es I , también del área del colector A_c y por último de un factor conjugado que involucra la transmisividad de la cubierta de vidrio y la absorptividad de la placa colector, es decir, $\tau\alpha$. En forma de ecuación tenemos:

$$Q_a = \tau\alpha I A_c \dots (4.2)$$

En cuanto al calor perdido por el csp, aunque la pérdida de energía se lleva a cabo por los tres mecanismos conocidos (conducción, convección y radiación), y através de toda la superficie del colector (adelante, atras y a los lados), dadas las características de construcción, de diseño y de materiales empleados, se pueden hacer las siguientes simplificaciones:

- 1.- Las pérdidas por conducción por la parte trasera y por los lados son pequeñas.
- 2.- Las mayores pérdidas se dan en el frente del colector por

convección y por radiación a la temperatura ambiente y por radiación hacia el cielo y los alrededores.

3.- El gradiente que impulsa estas pérdidas se da entre la temperatura representativa promedio de la placa colectora, T_c y la temperatura del medio ambiente, T_a .

4.- Dado los puntos anteriores, se puede definir un coeficiente global de pérdidas de calor del colector, U_L que englobe todos los mecanismos anteriores, sea que contribuyan poco o mucho a las pérdidas.

Los puntos anteriores, sobre todos 3 y 4 pueden expresarse en forma de ecuación de la siguiente forma:

$$Q_L = U_L A_c (T_c - T_a) \dots (4.3)$$

El calor útil o ganado por el colector está dado por la cantidad de calor que un cierto gasto del fluido de trabajo puede retirar y esta representado por la ganancia neta de temperatura, es decir, la diferencia entre la temperatura de entrada y de salida de este fluido. Se calcula de la manera usual, esto es:

$$Q_u = m C_p (T_s - T_e) \dots (4.4)$$

Combinando todos estos terminos tendremos el balance global de calor del colector que es:

$$Q_u = m C_p (T_s - T_e) = \tau \alpha I_c - U_L A_c (T_c - T_a) \dots (4.5)$$

En la ecuación anterior Q_u es la velocidad a la que el colector gana calor en toda su área mientras que I es el flujo de energía por unidad de área. Si dividimos toda la ecuación anterior entre el área del colector y definimos $q_u = \frac{Q_u}{A_c}$ como el flujo de calor en la unidad de área entonces:

$$q_u = \tau \alpha I - U_L (f_c - t_a) \dots (4.6)$$

en donde todas las variables son flujos en la unidad de área. Esta ecuación fue desarrollada primero por Hottel y Whillier y suele ser el punto de partida para el análisis de muchas situaciones de funcionamiento del colector.

EFICIENCIA DEL COLECTOR.

Si toda la energía radiante I de que dispone el colector en un instante dado pudiera ser transformada íntegramente en calor útil, el colector trabajaría con un 100 % de eficiencia, desafortunadamente esto no es posible y varias son las causas. Como ya se vio, solo una fracción de la radiación solar logra llegar a la placa debido a una eficiencia óptica dada por el factor $\tau \alpha$. La velocidad a la que circula el fluido de trabajo es también importante, una velocidad baja se traduce en una elevación de temperatura de la placa lo que a su vez conduce a mayores pérdidas de calor al medio ambiente por reradiación. Pero esta no es la única consecuencia pues un flujo lento es un flujo laminar y sabido es que no favorece la transferencia de calor (de la placa colectora al fluido). En forma cuantitativa podemos definir la

eficiencia del colector como la relación existente entre el calor útil y la energía disponible, o sea:

$$\eta = \frac{q_u}{I} \dots (4.7)$$

Habiendo suficiente radiación disponible el colector ganará calor y el intervalo de valores de η será de entre 0 y 1 pero en el atardecer o en un nublado repentino, cuando el valor de I disminuye considerablemente, entonces el colector en lugar de ganar calor lo va a perder, pudiendo η tener valores negativos.

Haciendo un poco de álgebra con las ecuaciones, tomemos la ecuación 4.6 y dividámosla entre I y tendremos:

$$\eta = \tau\alpha - UL \frac{T_c - T_a}{I} \dots (4.8)$$

Aunque UL formalmente no es constante según los trabajos de investigadores como Hottel y Woertz, o Duffie y Beckman, si se escoge una UL promedio representativa, no es muy grande el error que se comete por la variabilidad de este coeficiente. Considerando lo anterior entonces la ecuación 4.8 será la ecuación de una recta en donde la ordenada al origen está dada por el factor de eficiencia óptica $\tau\alpha$, la pendiente negativa por UL y la abscisa al origen será $\tau\alpha / UL$. Luego entonces la gráfica de η en la ordenada contra el punto de operación definido por:

$$f_c = \frac{(T_c - T_a)}{I} \dots (4.9)$$

en la abscisa, dará una línea recta.

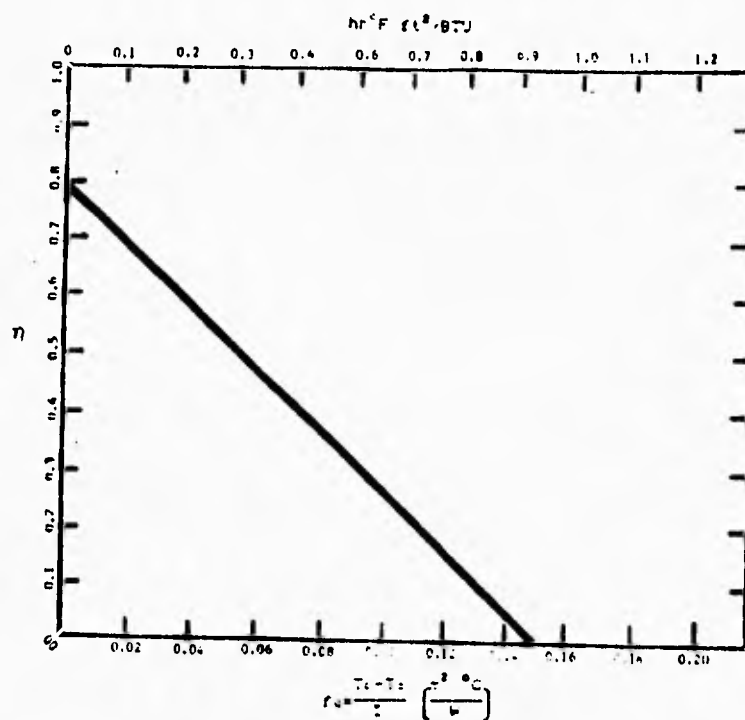


Figura 4.1: Gráfico de eficiencia de un colector solar plano.

Un punto de reflexión sobre este punto de operación del colector nos indica que de las tres variables involucradas, dos de ellas, T_a e I son variables fuertemente dependientes de las condiciones meteorológicas y por lo tanto fuera del control del experimentador. Sin embargo el caso de T_c es especial en el sentido que depende tanto de condiciones meteorológicas como de

variables como la temperatura a la que entra el fluido de trabajo y como ya se dijo que de las variables meteorológicas no se tiene control, la única variable que podemos manejar libremente es T_c a través de manipular la temperatura de entrada del fluido, de esta manera el punto de operación del colector cambiará permitiéndonos contar con diferentes puntos para la gráfica mencionada arriba.

La utilidad que presenta la gráfica emerge con facilidad si se considera que disponiendo de ella es posible predecir el funcionamiento del colector sin necesidad de conocer parámetros como τ_0 o U_L , todo lo que se necesita es evaluar el punto de operación del colector $f_c = (T_c - T_a)/I$, leer la eficiencia de la gráfica y utilizar la ecuación 4.77 con q_u despejado.

$$q_u = \eta I \dots (4.10)$$

La gráfica tiene una utilidad más, puede ser calculada a partir de ella el nivel mínimo de radiación para el cual el colector recogerá calor. A esto se le llama el nivel de radiación de umbral. Esto se hace de la siguiente manera: El colector tendrá eficiencia cero justo antes de dejar de ganar calor y empezar a perderlo, leyendo de la gráfica este punto que no es otro que la abscisa al origen, tendremos el valor del punto de operación f_c del colector para eficiencia cero y despejando I de la ecuación 4.9:

$$I_{th} = \frac{(T_c - T_a)}{f_c} \dots (4.11)$$

Por último, si el fluido de trabajo dejara de circular por el

colector la temperatura de la placa T_c empezaría a elevarse justo hasta el nivel en que el calor perdido a los alrededores por reradiación compense el recibido, esta se conoce como la temperatura de estancamiento y su cálculo se da de manera semejante a I_{lh} pues también en este caso la eficiencia del colector se hace cero al no haber recolección de calor útil y de la ecuación 4.9 conocido I y despejando T_c :

$$T_c = I/c + T_a \dots (4.12)$$

FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR PARA PERIODOS LARGOS.

Como se dijo en un párrafo anterior la irradiancia solar I , la temperatura ambiente T_a y aún la temperatura de la placa colectora T_c , cambian constantemente a lo largo del día durante la operación útil del colector haciendo que la eficiencia sea un parámetro instantáneo válido solo para periodos de tiempo cortos y aunque la gráfica dé mucha información, en última instancia lo que es de mayor utilidad, es conocer el calor útil global recolectado a lo largo del día. El siguiente análisis toma en cuenta parámetros de clima, radiación solar y del colector para este fin.

Para empezar se hará una consideración importante, que el tanque de almacenamiento para el calor colectado es lo suficientemente grande como para que la temperatura del colector sea la temperatura del fluido y que, por lo tanto, no cambia con el tiempo. Como se ve esta es una condición ideal difícil de conseguir en la práctica y que sin embargo nos permitirá hacer un análisis sencillo. Reescribiendo la ecuación 4.6 enfatizando a las

variables que son dependientes del tiempo.

$$q_u(t) = r_0 I(t) - UL(I_c - T_a(t)) \dots (4.13)$$

y para una instantánea diferencial de tiempo

$$q_u(t)dt = r_0 I(t)dt - UL(I_c - T_a(t))dt \dots (4.14)$$

integrando termino a termino para el periodo de tiempo de interes, tendremos el calor util total recolectado.

$$q_{uT} = r_0 \int_0^T I(t)dt - UL \int_0^T (I_c - T_a(t))dt \dots (4.15)$$

Si se tienen datos de I y de T_a para el periodo de tiempo que se quiere evaluar, una integración gráfica dará los valores necesarios para calcular el calor util global. Otra forma opcional de resolver la ecuación 4.15 es definir la I y T_a promedios de la siguiente forma:

$$\bar{I} = \int_0^T I(t)dt/tr \dots (4.16)$$

$$\bar{T}_a = \int_0^T T_a(t)dt/tr \dots (4.17)$$

despejando la respectiva integral y sustituyendo en 4.15.

$$q_{uT} = r_0 \bar{I}tr - UL(T_c - \bar{T}_a)tr \dots (4.18)$$

finalmente como $\bar{I}t$ es la radiación total I recibida en el tiempo t y es un parámetro que proporcionan algunos observatorios meteorológicos la ecuación 4.18 puede escribirse.

$$q_{ut} = \tau_0 I t - U_L (T_c - \bar{T}_a) t \dots (4.18)$$

REMOSION DEL CALOR.

Si el calor absorbido no fuera colectado se acumularia y elevaria la temperatura del colector hasta que la temperatura fuera lo suficientemente alta como para que las pérdidas al ambiente igualen al calor colectado. Si el calor es removido ineficientemente, sucede lo mismo, la temperatura del colector se eleva hasta que las pérdidas al fluido y al ambiente igualen el calor absorbido. Las pérdidas por radiación, tal vez, es el mecanismo principal, y ésta (la radiación) depende de la cuarta potencia de la temperatura absoluta, por lo que es de suponer en base a lo anterior que si se mantiene la temperatura del colector baja mejorará la eficiencia de remosion del calor colectado. El hecho de guardar baja la temperatura del colector es medido por el factor de eficiencia de transferencia de calor del colector:

FUENTES DE INEFICIENCIA:

VELOCIDAD DE FLUJO.

El fluido que remueve el calor del colector se calienta cada vez mas conforme va recolectando la energía absorbida. Si el flujo se mantiene bajo, entonces el fluido elevara mas su temperatura al remover una cierta cantidad de calor. La temperatura media del colector se elevara tambien, aun si la transferencia de calor

fuera perfecta. La velocidad de flujo tiene, por lo tanto, una influencia importante en la eficiencia del colector. Si el colector está siendo usado para calentamiento doméstico de agua, el flujo debe restringirse para mantener una elevada temperatura que es necesaria para este uso. Pero si el colector se usa para calentar un espacio, entonces las temperaturas elevadas no son necesarias y se puede mantener un flujo grande de fluido el cual mantendrá su temperatura ligeramente mayor que la masa de fluido del espacio que se calienta.

FLUIDO COLECTOR DE CALOR.

El mantener una velocidad de flujo adecuada no siempre es la única condición para mantener una adecuada transferencia al fluido colector. Como es sabido un flujo lento provoca que el fluido se mueva de forma laminar lo cual no ayuda a mantener coeficientes de transferencia altos. Por el contrario una velocidad alta provoca un flujo turbulento que es ideal por tener coeficientes altos de transferencia de calor. Sin embargo, mantener un flujo turbulento implica consumir más energía en la bomba o el ventilador, lo que a su vez limita este estado.

Dependiendo del tipo de placa absorbidora que se tenga, será el patrón de transferencia de calor que se tendrá que analizar para explicar el funcionamiento del colector. En el tipo de placa que consta de dos laminas, en medio de las cuales está el fluido recolector, el patrón de flujo de calor es perpendicular a la dirección del flujo del fluido. En este caso el calor atravesará solo una lamina delgada, por lo que la conductividad térmica de la lamina no es muy importante. Si la placa absorbidora está

construida con aletas y tubos atados a ellas, entonces la aleta captará la energía del sol y transmitirá a todo lo largo de ella, el calor, en un espacio que será igual a la mitad del espacio entre dos tubos. Aquí pasa a ser importante para la conducción del calor de la aleta al tubo, no solo la conductividad térmica de la aleta, sino su también su grosor. En los próximos párrafos profundizaremos en este análisis.

TRANSFERENCIA DE CALOR AL FLUIDO DE TRABAJO.

Como es sabido el principal criterio cuantitativo para determinar el tipo de flujo es el número de Reynolds:

$$Re = \frac{4W}{\mu D} \dots (4.20)$$

donde: D = diámetro del tubo.

W = flujo másico.

μ = viscosidad del fluido

todas estas variables deben expresarse en unidades consistentes para dar un número adimensional.

En el caso de que el tubo no sea circular se toma un diámetro equivalente dado por:

$$D_e = \frac{4A_x}{P} \dots (4.21)$$

donde: P es el perímetro del tubo.

A_x = área de la sección transversal.

Considerando la anterior el número de Reynolds se puede expresar en forma más general:

$$Re = \frac{4W}{\mu F} \dots 4. (22)$$

Un número de Reynolds abajo de 2100 se considera un flujo laminar o viscoso. Arriba de 10 000 el flujo es turbulento. En el intervalo de 2100 a 10 000 se considera una zona de transición que aunque es difícil de correlacionar es de suma importancia en los trabajos sobre calentadores solares.

FLUJO TURBULENTO.

En el flujo turbulento debido a la no existencia de capas, lo cual conduce a un líquido bien mezclado, el coeficiente de transferencia suele ser alto y puede estimarse con buena exactitud por la siguiente ecuación:

$$\frac{hD}{k} = 0.023(Re)^{0.8} (Pr)^{1/3} \dots (4.23)$$

como es sabido el término hD/k es el número de Nusselt que al igual que el número de Reynolds es adimensional. El número de Prandtl es a su vez un número adimensional que depende de las propiedades del fluido y está dado por:

$$Pr = cp/k \dots (4.24)$$

donde: c es el calor específico del fluido

μ la viscosidad y

k es la conductividad térmica

por lo tanto toda la ecuación 4.23 es adimensional por lo que es necesario usar un sistema de unidades consistente para que los

terminos lleguen realmente a ser adimensionales.

FLUJO DE TRANSICIÓN.

En el flujo de transición y el flujo laminar rápido los efectos de pasar de un tubo de mayor a menor diámetro y los cambios de dirección son importantes, pues provocan que las capas concéntricas del fluido se mezclen mejorando en estas zonas el coeficiente de transferencia, mejoramiento que dura mientras el flujo laminar no se reestablece.

Los efectos de entrada son importantes en los colectores solares planos y la relación longitud-diámetro del tubo para la cual esto sucede, puede ser estimada por la ecuación:

$$\frac{L}{D} = 0.05 Re Pr \dots (4.25)$$

Tanto en el flujo laminar como el de transición las variables usadas para correlacionar el coeficiente de transferencia son: la relación L/D, el número de Reynolds y el factor j definido por la siguiente ecuación:

$$j = \frac{h A_x}{C W} Pr^{2/3} \dots (4.26)$$

j es también un factor adimensional.

La relación de las tres variables anteriores está dada por la gráfica que presenta J.H. Perry y que se reproduce a continuación.

FLUJO LAMINAR.

Si el flujo es completamente laminar entonces las capas de fluido no se mezclan y el fluido se comporta como un sólido que

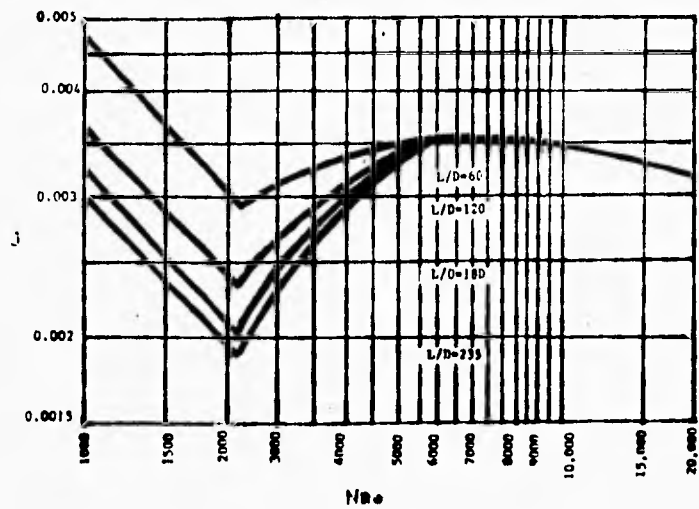


Figura 4.1: Gráfica para correlacionar el número de Reynolds, el factor j y la relación L/D .

transfiere calor por conducción, en estas circunstancias el coeficiente de transferencia depende solamente del diámetro del tubo y de la conductividad térmica de acuerdo a la siguiente información.

$$\frac{hD}{k} = 4.36 \dots (4.27)$$

La velocidad del coeficiente de transferencia de calor es proporcional a U_{Ar} la cual en un tubo circular es dado por:

$$U_{Ar} \approx h_{Ar} = \left(\frac{4.36k}{D}\right)\pi DL = 4.36 \pi kL \dots (4.28)$$

de la ecuación anterior se puede deducir que la velocidad de transmisión de calor al fluido en tubos circulares no depende del diámetro ni del flujo de masa, siempre y cuando el flujo sea laminar.

DISEÑO DEL COLECTOR.

Es más fácil diseñar los colectores enfriados por líquido que los enfriados por aire, pues en los primeros se puede tener coeficientes de transferencia de calor por arriba de los $500 \text{ W/}^\circ\text{cm}^2$ con lo cual se tiene un efecto muy bajo sobre las características del funcionamiento del colector, si los tubos están razonablemente bien dimensionados. En este punto hay dos factores que se contraponen, uno es la distribución del flujo y el otro el coeficiente de transferencia de calor. Si el arreglo de los tubos es en paralelo se tendrá seguramente flujos bajos (laminares) y por lo tanto coeficientes de transferencia bajos que sin embargo pueden ser compensados ya sea aumentando el área (número de tubos) o bien aumentando la potencia de bombeo. Un problema adicional se genera con el arreglo en paralelo y es que si no se tiene cuidado el flujo será desigual en cada tubo, esto sucede normalmente cuando la entrada y la salida del líquido están en el mismo costado del calentador, aquí el tubo que está más cerca de la entrada (y la salida) tendrá una menor caída de presión (tiene un patrón de recorrido menor), y por lo tanto, tendrá un flujo mayor que aquel que se encuentra en el otro lado de la entrada (donde el recorrido es mayor). Este problema se resuelve fácilmente colocando la alimentación y la salida del líquido en la diagonal del colector, pues con esto el patrón del

recorrido para cada tubo será el mismo. Una característica importante del arreglo en paralelo es que presenta caídas de presión pequeñas, y el agua al calentarse y perder densidad fluirá con la suficiente turgencia como para vencer esta caída de presión y circular en el sistema por termosifón, esto además es acompañado necesariamente por un aumento de la temperatura a la que opera el colector, lo cual puede resultar conveniente para el calentamiento doméstico de agua pero la eficiencia del colector disminuye al aumentar la temperatura de operación.

El arreglo en serie no presenta el problema de una distribución irregular de líquido, pues el camino que éste recorre es el mismo, puede evitarse con más facilidad un flujo laminar pero la caída de presión es mayor y necesitará forzosamente de bombeo para hacer circular el fluido, pues el flujo por termosifón no logrará vencer la caída de presión.

La conclusión sería que el flujo en paralelo permitiría mayores temperaturas de calentamiento y autobombéo a costa de la eficiencia del colector y el arreglo en serie tendrá mayor eficiencia de colector pero necesitará mover el líquido el cual tendrá una menor temperatura a la salida.

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR.

EFICIENCIA DE LA ALETA.

A los tubos del colector, ya sea en arreglo de paralelo o serie, se le coloca una aleta unida al tubo para aumentar el área de recepción de la radiación solar. Para simplicidad consideraremos el arreglo en paralelo pero los principios que se desarrollan son aplicables al arreglo en serie. Supondremos que la

radiación se recibe uniformemente en toda la placa colectora. El calor colectado fluirá hacia el tubo más cercano y justo al centro de la aleta entre los dos tubos no habrá flujo de calor. Tendremos dos perfiles de temperatura, a lo ancho de la aleta y a lo largo del colector.

En el primer caso la temperatura será más alta justo en medio de los dos tubos e irá disminuyendo conforme nos acerquemos a la base del tubo (la pared externa), esto generará un gradiente térmico que provocará a su vez un flujo de calor que irá aumentando conforme nos acercamos al tubo de la misma manera que un líquido fluye más de prisa al acercarse a un sumidero. Este gradiente de temperatura causará también que las pérdidas de calor al ambiente sean diferentes (a mayor temperatura, mayor calor perdido) afectando la eficiencia de la aleta.

En el segundo caso el gradiente de temperatura se incrementará de la entrada a la salida del líquido de la placa por efecto del calentamiento del fluido refrigerante.

Como ya se dijo, las pérdidas de calor a todo lo ancho de la aleta (para una posición fija a lo largo del colector) dependerán del gradiente de temperatura, por lo tanto serán mayores en el centro entre los dos tubos y menores en la base del tubo. El calor útil ganado por el fluido en este punto puede ser calculado modificando la ecuación 4.6 de la siguiente manera:

$$q_u = Q/A = \eta_f [ra1 - U_L(T_c - T_a)] \dots (4.29)$$

Donde η_f toma en cuenta la pérdida diferencial de calor a lo ancho

de la aleta y se conoce como la eficiencia de la aleta y T_c es la temperatura en la base del tubo (la pared externa).

La eficiencia de la aleta se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$\eta_f = \frac{\tanh B}{B} \dots (4.30)$$

donde:

$$B = \frac{L}{2} \sqrt{UL/k\delta} \dots (4.31)$$

Aquí L es la distancia de base a base de los tubos, es decir, el ancho de la aleta. La conductividad térmica k , el espesor de la aleta δ , el coeficiente de transferencia global UL y L deben estar en unidades apropiadas para que B sea adimensional.

La tangente hiperbólica está definida por:

$$\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \dots (4.32)$$

Programar una computadora (o calculadora) para obtener la tangente hiperbólica es hoy fácil, pero antiguamente el cálculo era laborioso por lo que se desarrollaron gráficas donde teniendo el valor de B es posible leer la eficiencia de la aleta η_f .

De las ecuaciones anteriores es posible apreciar que la eficiencia de aleta no depende ni de la cantidad de radiación recibida por la placa, ni de su temperatura, ni del calor que

fluye por la aleta, por lo que es un factor constante que afecta la eficiencia que tendría el colector si la superficie entera estuviera a la temperatura de la base del tubo. La eficiencia de aleta depende del coeficiente de pérdidas de calor U_L y de las propiedades físicas de la aleta (grosor δ y conductividad térmica k).

La temperatura máxima que se alcanza en el centro de la aleta puede ser calculada por:

$$\Delta T_{\max} = \left[\frac{r_0 I}{U_L} + T_0 - T_r \right] \left(1 - \frac{1}{\cosh B} \right) \dots (4.33)$$

donde $\cosh x = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x})$ y T_r es la temperatura en la base del tubo que para fines prácticos puede ser considerada la del fluido.

Si bien en la eficiencia de la aleta no intervienen, como se dijo antes, las condiciones de operación del colector, algo diferente ocurre cuando se analiza la situación a lo largo del colector, pues como vimos las pérdidas de calor en un cierto lugar están en función de la temperatura de ese sitio y si se considera que a la entrada del colector el fluido entra frío y se va calentando conforme avanza hacia la salida, en esa misma medida la temperatura de la placa será más fría a la entrada y a la salida alcanzará una mayor temperatura. Las pérdidas serán entonces menores en la entrada y mayores en la salida. Pero si suponemos que las pérdidas de calor promedio pueden ser calculadas con buena aproximación usando la temperatura promedio del fluido, el tratamiento matemático será más simple. Las variables de operación como la velocidad de flujo serán importantes, pues a mayor flujo

menor será la elevación de la temperatura de la placa y mejor será la transferencia de calor.

Las pérdidas en cualquier lugar de la placa depende de la temperatura en ese punto. Como el fluido colecta calor, la temperatura será mas baja en la entrada que en la salida. En la misma medida las pérdidas serán más bajas a la entrada y más altas en la salida. Con el objeto de obtener expresiones simples haremos la suposición de que las pérdidas globales pueden ser aproximadas bastante bien usando la temperatura promedio del fluido. Esta suposición implica además el considerar el efecto de la velocidad de flujo, la transferencia de calor al fluido y la eficiencia de aleta.

Para el análisis que continua se definen las siguientes variables, (un grupo de estas serán definidas como variables continuas porque su valor cambia continuamente conforme se recorre la longitud del colector y el otro las variables globales producto de la suma de las variables continuas):

T_f = (variable continua) temperatura del fluido conforme pasa por el colector.

T_i = Temperatura de entrada del fluido.

T_o = Temperatura de salida del fluido.

T_c = (variable continua) La temperatura efectiva de la placa que corresponde a T_f

A_{ft} = Área total del tubo para la transferencia de calor al fluido.

A_f = (variable continua) Área del tubo para la transferencia de calor al fluido desde la entrada hasta una distancia dada

desde la entrada.

A_c = (variable continua) Área de la aleta equivalente a A_f .
Normalmente A_c y A_f son diferentes debido a la superficie extendida de la aleta con respecto al tubo.

U_f = Coeficiente de transferencia de calor al fluido.

$\bar{\eta}_f$ = La eficiencia promedio de aleta.

Q = (variable continua) El calor colectado acumulado hasta una cierta distancia de la entrada, va de cero a Q_t .

Q_t = Calor total acumulado.

W = Rapidez de flujo de fluido.

c = Calor específico del fluido.

Si suponemos que la velocidad a la que el fluido recolecta el calor es uniforme, entonces, la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie del colector es constante a todo lo largo de la placa. Lo anterior también implica que la temperatura promedio del colector sea el promedio entre la temperatura de entrada y de salida del fluido más el promedio de todas las diferencias de temperatura entre la placa y el fluido. Considerando lo anterior el calor transferido al fluido en un mismo punto es:

$$Q = U_f A_f (T_c - T_f) \dots (4.34)$$

Q , A_f , T_c y T_f se miden en cualquier sitio (pero en el mismo lugar) a todo lo largo del patrón de flujo. El calor total absorbido por el fluido en el mismo punto se calcula por:

$$Q = Wc(T_i - T_o) \dots (4.35)$$

Diferenciando cada ecuación con respecto al área de transferencia A_f tenemos:

$$\frac{dQ}{dA_f} = Wc \frac{dT_i}{dA_f} \dots (4.36)$$

suponemos a T_i constante y como $(T_c - T_i)$ es constante también:

$$\frac{dQ}{dA_f} = U_r(T_c - T_i) \dots (4.37)$$

igualando e integrando a todo lo largo del patrón de flujo:

$$\int_{T_i}^{T_f} dT_i = \frac{U_r}{Wc} (T_c - T_i) \int_0^{A_f} dA_f \dots (4.38)$$

lo que nos da:

$$T_f = T_i + \frac{U_r}{Wc} (T_c - T_i) A_f \dots (4.39)$$

La temperatura del fluido aparece de los dos lados de la ecuación, para eliminarla consideremos la ecuación 4.34 para todo el patrón de flujo y como $(T_c - T_i)$ es constante:

$$Q_T = U_r(T_c - T_i) A_f \dots (4.40)$$

Despejamos T_i :

$$T_i = T_c - \frac{Q_T}{U_f A_{fT}} \dots (4.41)$$

Esta ecuación la sustituimos en la 4.35 y después del algebra correspondiente tenemos:

$$T_c = T_i + \frac{Q_T}{A_{fT}} \left(\frac{A_f}{W_c} + \frac{1}{U_f} \right) \dots (4.42)$$

La ecuación anterior nos permitirá sustituir T_c en la ecuación básica del colector, escrita con la eficiencia promedio de aleta η_f y para una diferencial de área del colector:

$$dQ = \frac{1}{\eta_f} r a I dA_c - U_L (T_c - T_a) dA_c \dots (4.43)$$

sustituyendo T_c :

$$\frac{dQ}{\eta_f} = r a I dA_c - U_L \left[T_i + \frac{Q_T}{A_{fT}} \left(\frac{A_f}{W_c} + \frac{1}{U_f} \right) - T_a \right] dA_c \dots (4.44)$$

integrando através de todo lo largo del patrón de flujo del fluido:

$$\frac{1}{\eta_f} \int_0^{Q_T} dQ = r a I \int_0^{A_{cT}} dA_c - U_L (T_i - T_a) \int_0^{A_{cT}} dA_c - \frac{Q_T U_L}{A_{fT}} \int_0^{A_{cT}} \left(\frac{A_f}{W_c} + \frac{1}{U_f} \right) dA_c$$

... (4.45)

Si relacionamos el área del colector con el área del fluido

mediante la siguiente ecuación:

$$A_i = KA_c \dots (4.46)$$

entonces la última integral es:

$$\int_0^{A_{CT}} \left(\frac{KA_c}{2WC} + \frac{1}{U_f} \right) dA_c = \left[\frac{KA_c^2}{2WC} + \frac{A_c}{U_f} \right]_0^{A_{CT}} = \frac{KA_{CT}^2}{2WC} + \frac{A_{CT}}{U_f} = \frac{A_i A_{CT}}{2WC} + \frac{A_{CT}}{U_f} \dots (4.47)$$

Integrando ahora la ecuación (4.45) tenemos:

$$\frac{Q_T}{\eta_f} = \tau_0 I A_{CT} - U_L (T_i - T_0) A_{CT} - Q_T U_L \left(\frac{A_{CT}}{2WC} + \frac{A_{CT}}{U_f A_i} \right) \dots (4.48)$$

la cual puede resolverse para el flujo total de calor colectado $q = Q_T / A_{CT}$.

Si definimos el factor de transferencia de calor F_i , el flujo de calor colectado será:

$$q = F_i (\tau_0 I - U_L (T_i - T_0)) \dots (4.49)$$

donde F_i está dado por:

$$F_i = \frac{1}{\frac{1}{\eta_f} + \frac{U_L A_c}{U_f A_i} + \frac{U_L A_c}{2WC}} \dots (4.50)$$

En la ecuación anterior A_c y A_f representan el área total del colector.

En ocasiones es significativa la porción de área de tubos que constituyen la placa del colector. Como la radiación solar incide directamente sobre esta fracción de área, que denominaremos r , la eficiencia de aleta en esta fracción es uno, de tal manera que la eficiencia media de aleta se define por la siguiente ecuación:

$$\bar{\eta}_f = \eta_f + r(1-\eta_f) \dots (4.51)$$

El funcionamiento del colector en términos de la temperatura de entrada del fluido puede ser analizado usando las ecuaciones 4.49 y 4.50. En estas ecuaciones no están involucradas variables difíciles de medir como la temperatura de la placa, temperaturas del fluido, temperatura de la superficie del colector etc. todas estas variables están implícitas en estas ecuaciones. Sin embargo, encontrar los valores correctos para η_f y U_f no siempre es fácil, pero esto es un problema aparte. El efecto sobre el funcionamiento del colector de variables como el coeficiente de transferencia de calor, la velocidad del flujo de fluido y la eficiencia de aleta -en términos de la temperatura de entrada del fluido- está dado de manera simple por estas ecuaciones.

Si no se usa la temperatura de entrada del fluido como criterio para desarrollar el factor de transferencia de calor de la ecuación 4.50 entonces otros factores semejantes pueden ser desarrollados usando la temperatura de salida o bien la temperatura media del fluido refrigerante. Las siguientes

ecuaciones se obtiene de manera semejante a la 4.49 y 4.50:

$$q = F_o(t_{oI} - U_L(T_o - T_a)) \dots (4.52)$$

$$F_o = \frac{1}{\frac{1}{\eta_f} + \frac{U_L A_c}{U_r A_r} + \frac{U_L A_c}{2WC}} \dots (4.53)$$

en donde T_o y F_o son la temperatura de salida del fluido y el factor de transferencia de calor para esta temperatura.

Más usado es el factor de transferencia basado en la temperatura media o promedio del fluido dado por las siguientes ecuaciones:

$$q = F_m(t_{oI} - U_L(T_m - T_a)) \dots (4.54)$$

$$F_m = \frac{1}{\frac{1}{\eta_f} + \frac{U_L A_c}{U_r A_r}} \dots (4.55)$$

El uso de la ecuación 4.55 tiene la ventaja de que no es necesario conocer el flujo del fluido. Esto no significa que F_m sea independiente del flujo pues éste influencia a T_m , que puede ser encontrada por medio de la ecuación:

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \dots (4.56)$$

De cualquier forma, la ecuación 4.54 es independiente del flujo, en la medida que éste afecta a U_r .

Una expresión para el factor de eficiencia de transferencia de calor de entrada es dado por Bliss () en la siguiente ecuación:

$$F_i = \frac{WC}{U L A_c} \left[1 - \exp \left[- \frac{U L A_c}{WC} / \left(\frac{1}{\eta_f} + \frac{U L A_c}{U_i A_i} \right) \right] \right] \dots (4.57)$$

La ecuación 4.50 es usada con bastante exactitud en todos los casos prácticos del colector siempre y cuando la temperatura de salida del fluido T_o esté lejos de la temperatura de estancamiento del colector. Cuando la temperatura de salida es más de la mitad de la temperatura de estancamiento, la ecuación 4.57 da mejores resultados.

CURVAS DE EFICIENCIA.

Si las ecuaciones 4.49, 4.52 y 4.54 se dividen entre i y se multiplica los respectivos factores por los sumandos del paréntesis tendremos las siguientes ecuaciones:

$$\eta_i = F_i \tau_a - \left[\frac{F_i U L (T_i - T_a)}{I} \right] \dots (4.58)$$

$$\eta_o = F_o \tau_a - \left[\frac{F_o U L (T_o - T_a)}{I} \right] \dots (4.59)$$

$$\eta_m = F_m \tau_a - \left[\frac{F_m U L (T_m - T_a)}{I} \right] \dots (4.60)$$

la eficiencia de estas tres ecuaciones es la misma y el subíndice es solo para indicar su procedencia.

Si se grafica cada una de estas ecuaciones para dar la curva

de eficiencia, entonces la ordenada al origen será $F_{i\tau a}$, $F_{o\tau a}$ ó $F_{m\tau a}$ respectivamente, así como la pendiente negativa F_{iUL} , F_{mUL} o F_{oUL} y una abscisa al origen común dada por $\tau a/UL$.

Los datos experimentales son la única fuente para obtener los parámetros del colector, y deben ser usados para obtener primeramente η debido a que en la práctica suceden pequeñas variaciones en la velocidad de flujo que no le afectan. A partir de la gráfica se determina $F_{m\tau a}$, F_{mUL} y $\tau a/UL$, es decir, la ordenada al origen, la pendiente y la abscisa al origen. De estos parámetros se puede estimar las curvas para η_i o η_o , como se muestra a continuación, para el mismo flujo o para uno nuevo.

Primero definimos la velocidad de flujo normalizada como sigue:

$$w = \frac{W}{Ac} \dots (4.61)$$

Con esta definición y combinando las ecuaciones 4.55 y 4.50 tenemos:

$$F_i = \frac{1}{\frac{1}{F_m} + \frac{UL}{2wC}} \dots (4.62)$$

multiplicando ambos lados de 4.62 por τa tenemos:

$$F_{i\tau a} = \frac{1}{\frac{1}{F_{m\tau a}} + \frac{1}{2wC(\tau a/UL)}} \dots (4.63)$$

quedando la ordenada al origen para η_i en función de la ordenada

al origen de η_m y de la abscisa al origen común.

De igual manera si multiplicamos ambos lados de la 4.62 por U_L obtendremos la pendiente para η_i en función de la pendiente de η_m :

$$F_i U_L = \frac{1}{\frac{1}{F_m U_L} + \frac{1}{2wc}} \dots (4.64)$$

igualmente combinando 4.55 y 4.53:

$$F_o = \frac{1}{\frac{1}{F_m} - \frac{U_L}{2wc}} \dots (4.65)$$

y por un procedimiento semejante al anterior obtenemos las respectivas ordenada al origen:

$$F_o r_a = \frac{1}{\frac{1}{F_m r_a} + \frac{1}{2wc(r_a/U_L)}} \dots (4.66)$$

y pendiente:

$$F_o U_L = \frac{1}{\frac{1}{F_m U_L} + \frac{1}{2wc}} \dots (4.67)$$

De cualquier manera si cambia el fluido refrigerante o si cambia la velocidad de flujo digamos dentro del $\pm 25\%$ de las condiciones originales, entonces η_m puede no permanecer constante debido a que cambia el valor de U_f , por lo que, es recomendable usar las curvas experimentales solo cerca de las condiciones originales. En caso

de que esto no sea posible deberá hacerse un nuevo análisis con la ayuda de nuevos datos de laboratorio para estimar los nuevos factores correspondientes al nuevo flujo.

SELECCIÓN DE LA RAPIDEZ DE FLUJO.

Si queremos que el colector eleve la temperatura del líquido refrigerante hasta un valor deseado debemos controlar la rapidez del flujo. Si combinamos las ecuaciones 4.54 y 4.55 junto con $Q=WC\Delta T$ obtendremos una expresión para este cálculo:

$$WC = F_m \left[\frac{\tau \alpha I - U_L (T_m - T_e)}{T_c - T_i} \right] \dots (4.68)$$

Esta ecuación tiene dos limitaciones. Supone que la diferencia de temperaturas entre el fluido refrigerante y la placa del colector es la misma a lo largo de toda la placa. Solo se usa cuando la temperatura de salida es menor al promedio de la temperatura de entrada y la temperatura de estancamiento, la cual está dada por la ecuación:

$$T_c = \frac{\tau \alpha I}{U_L} + T_e \dots (4.69)$$

Los pasos a seguir en el diseño de un colector pueden ahora resumirse de la siguiente manera:

- 1.- Se supone una temperatura Promedio \bar{T}_c en la placa de absorción del colector.
- 2.- Se calcula el coeficiente de transferencia de calor U_L .
- 3.- Se evalúa el factor de eficiencia del colector F_m .

- 4.- Se determina el factor de remoción de calor F_r o la temperatura del fluido a la salida T_c
- 5.- Se calcula el calor útil en el colector y la eficiencia del mismo.
- 6.- Se verifica el valor de temperatura T_c supuesto. Esto último puede lograrse por el balance de energía:

$$Q = Wc(f_o - i_i) = \frac{\bar{T}_c - \bar{T}_m}{\frac{1}{n\pi D L h_f}} \dots (4.70)$$

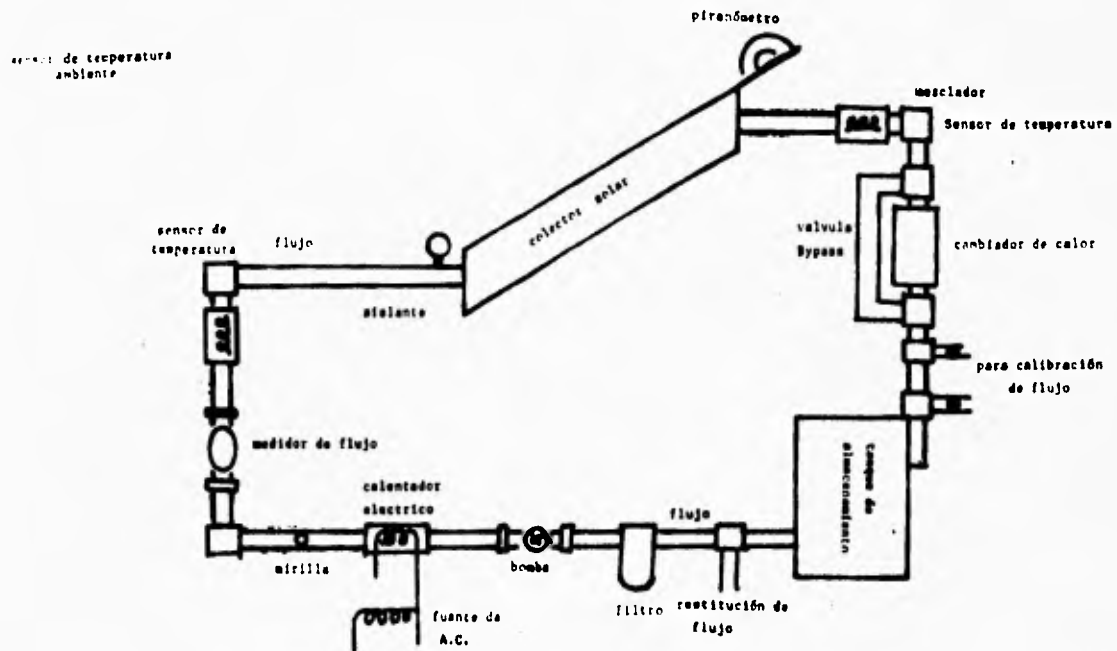
en donde n es el número de tubos en el colector y:

$$\bar{T}_r = \frac{1}{L} \int_0^L T_r dy \dots (4.71)$$

El proceso 1 a 6 se repite hasta que coincidan los valores supuesto y calculado de T_c . En algunos cálculos es necesario evaluar el coeficiente de transferencia de calor h_f a la temperatura \bar{T}_r . En estas circunstancias también se hace necesario suponer y verificar los valores de temperaturas \bar{T}_r . (manrique).

CAPÍTULO V

PRÁCTICA SOBRE COLECTORES SOLARES PLANOS



PROCEDIMIENTOS NORMALIZADOS PARA LA PRUEBA
DEL FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR

OBJETIVOS:

- 1.- Que el alumno conozca un uso práctico y factible de la Energía Solar.
- 2.- Que el alumno reconozca las partes que componen a los calentadores solares de agua o colectores solares planos (csp).
- 3.- Que el alumno conozca los principios del funcionamiento de un colector solar plano.
- 4.- Que el alumno evalúe el coeficiente global de pérdidas de calor (UL), la eficiencia óptica ($\tau\alpha$) y la eficiencia del colector solar plano (η).

INTRODUCCIÓN:

El uso de la energía está íntimamente relacionado con el grado de progreso de la sociedad. En la antigüedad la única fuente de energía del hombre era el fuego, para lo cual se valía del uso de la leña. Más adelante esta fuente de energía se reemplazó por el uso de animales. En la revolución industrial el uso del carbón fue primordial pero fue desde aquí que empezaron los problemas de contaminación y el uso indiscriminado de un recurso natural no renovable. El posterior descubrimiento del petróleo y su uso como energético sustituyó al carbón pero desde entonces la demanda de energía se ha incrementado a gran velocidad, además los energéticos se han vuelto estratégicos y las naciones fuertes buscan su control o bien su independencia respecto de las fuentes de abastecimiento.

En un tiempo se pensó que la energía nuclear sería la panacea que aliviaría al mundo de su avidez de energéticos, pero los accidentes que han tenido las plantas nucleares han hecho ver que

esta fuente energética no es muy confiable, además de que no es limpia, pues los desechos radioactivos son difíciles de eliminar.

Si exceptuamos a la energía nuclear el resto de las fuentes de energía que usamos, en realidad podemos pensarlas como un almacén más que como una fuente (la leña y el carbón son producto de la fotosíntesis, aun el petróleo se supone que es producto de la acción de la presión y la temperatura de capas de tierra que cubrieron vegetales y animales). Entonces es el sol la verdadera fuente energética del planeta además de que es un reactor nuclear limpio, que no requiere de mantenimiento, que estará en su lugar por varios millones de años todavía y que probablemente ninguna nación podrá acapararlo.

Hay algunos problemas por resolver como el hecho de que la energía solar es intermitente y nos llega diluida. En diciembre de 1991 la capacidad instalada de generación de energía eléctrica en México era de 28.787 MW. Por otro lado según la Organización Meteorológica Mundial a la tierra llegan $1\ 370 \pm 6\ \text{W m}^{-2}$, si multiplicamos este último valor por la superficie del territorio nacional que es de dos millones de kilómetros cuadrados ($2 \times 10^{12}\ \text{m}^2$), veremos que al territorio nacional llegan 2.740.000 MW que representan algo así como cien mil veces más de la capacidad instalada por la CFE para la generación de energía eléctrica. En otras palabras, si pudiésemos usar la energía solar con una eficiencia del cien por ciento necesitaríamos una cien milésima parte del territorio nacional (algo así como $20\ \text{km}^2$) para suplir nuestras necesidades de energía. Si la eficiencia fuera del 30%, que es más real, el área aumentaría a $65\ \text{km}^2$.

El uso de la energía solar para el calentamiento de espacios,

calentamiento de agua doméstica y enfriamiento ha recibido considerable atención en los últimos años debido al incremento de la información pública sobre el tema y al problema de contaminación que generan los combustibles fósiles. Como resultado de esto ha surgido una incipiente industria de calentamiento y enfriamiento solar, y con ella la necesidad de estándares tanto para prueba como para funcionamiento y diseño del equipo y las instalaciones.

DESCRIPCIÓN DEL CALENTADOR SOLAR DE AGUA.

El calentador solar típico consta de las siguientes partes (ver figura 1):

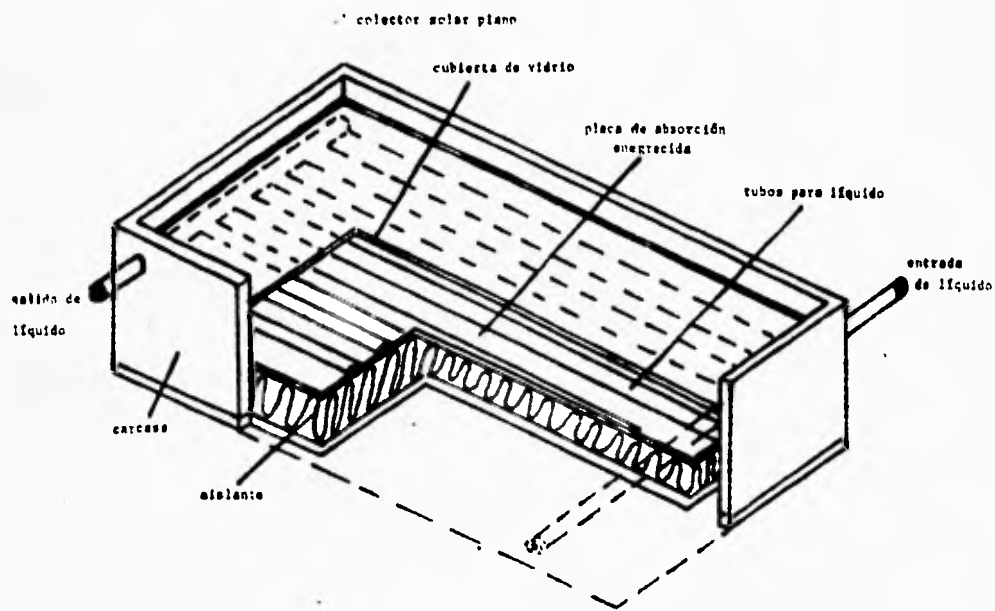


Figura 5. a: Partes de un colector solar plano.

a) Placa absorbente. De color negro que se calienta al recibir

la radiación solar.

- b) **Tubos colectores.** Por su interior circula el fluido recolector del calor de la placa absorbente a la cual van unidos.
- c) **Cubierta transparente.** Normalmente vidrio, el cual permite el paso de la luz visible pero impide la salida del calor creando el efecto invernadero.
- d) **Aislante.** Una capa de 2.5 a 5 cm de espesor de material aislante que disminuyen las pérdidas de calor por conducción al fondo y a los lados del colector.
- e) **Carcasa.** Protege al conjunto de la intemperie. Hecha de aluminio, es más cara pero disminuye el mantenimiento.

ECUACIONES DE TRABAJO.

El análisis del funcionamiento de un colector solar plano parte (como todo equipo de ingeniería química) de un balance de materia y energía. En régimen estable, la energía que entra se reparte a la salida en dos partes, el calor que se pierde al medio ambiente (y que por lo tanto no se aprovecha) y el calor que se transfiere al fluido de trabajo, llamado calor útil.

$$Q_a = Q_u + Q_l \dots (1)$$

donde:

Q_a = Calor absorbido o calor que entra al csp.

Q_u = Calor útil o calor transferido al fluido de trabajo.

Q_l = Calor perdido por el csp hacia el medio ambiente.

El calor que entra al csp va a depender de la cantidad de radiación solar que llegue en ese momento al colector por unidad de

área, esto es I_c , también del área del colector A_c y por último de un factor conjugado que involucra la transmisividad de la cubierta de vidrio y la absorptividad de la placa colectora, es decir, $\tau\alpha$. En forma de ecuación tenemos:

$$Q_a = \tau\alpha I_c A_c \dots (2)$$

En cuanto al calor perdido por el csp, aunque la pérdida de energía se lleva a cabo por los tres mecanismos conocidos (conducción, convección y radiación), y a través de toda la superficie del colector (adelante, atrás y a los lados), dadas las características de construcción, de diseño y de materiales empleados, se pueden hacer las siguientes simplificaciones:

- 1.- Las pérdidas por conducción por la parte trasera y por los lados son despreciables.
- 2.- Las mayores pérdidas se dan en el frente del colector por los mecanismos de convección y por radiación, teniendo como gradiente a la temperatura del colector y a la temperatura ambiente.
- 3.- El gradiente que impulsa estas pérdidas se da entre la temperatura representativa promedio de la placa colectora, T_c y la temperatura del medio ambiente, T_a .
- 4.- Dados los puntos anteriores, se puede definir un coeficiente global de pérdidas de calor del colector, U_L que abarque todos los mecanismos anteriores, sea que contribuyan poco o mucho a las pérdidas.

Los puntos anteriores, sobre todo 3 y 4 pueden expresarse en forma de ecuación como sigue:

$$Q_u = ULA_c(T_c - T_a) \dots (3)$$

El calor útil o ganado por el colector está dado por la cantidad de calor que un cierto gasto del fluido de trabajo puede retirar y esta representado por la ganancia neta de temperatura, es decir, la diferencia entre la temperatura de entrada y de salida de este fluido. Se calcula de la manera usual, esto es:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_e - T_s) \dots (4)$$

Combinando todos estos términos tendremos el balance global de calor del colector que es:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_e - T_s) = \tau \dot{I} A_c - ULA_c(T_c - T_a) \dots (5)$$

En la ecuación anterior Q_u es la velocidad a la que el colector gana calor en toda su área mientras que I es el flujo de energía por unidad de área. Si dividimos toda la ecuación anterior entre el área del colector y definimos $q_u = \frac{Q_u}{A_c}$ como el flujo de calor en la unidad de área, entonces:

$$q_u = \tau \dot{I} - U_c(T_c - T_a) \dots (6)$$

en donde todas las variables son flujos en la unidad de área. Esta ecuación fue desarrollada primero por Hottel y Whillier y suele ser el punto de partida para el análisis de muchas situaciones de funcionamiento del colector.

Podemos definir la eficiencia del colector como la relación existente entre el calor útil recogido por el fluido refrigerante y la energía disponible que llega al colector, o sea:

$$\eta = \frac{q_u}{I_c} \dots (7)$$

Habiendo suficiente radiación disponible el colector ganará calor y el intervalo de valores de η será de entre 0 y 1 pero en el atardecer o en un nublado repentino, cuando el valor de I disminuye considerablemente, entonces el colector en lugar de ganar calor lo va a perder, pudiendo η tener valores negativos.

Haciendo un poco de álgebra con las ecuaciones, tomemos la ecuación 6 y dividiendola entre I_c queda:

$$\eta = \tau\alpha - U_L \frac{(T_c - T_a)}{I_c} \dots (8)$$

Aunque U_L formalmente no es constante según los trabajos de investigadores como Hottel y Woertz, o Duffie y Beckman, si se escoge una U_L promedio representativa, no es muy grande el error que se comete por la variabilidad de este coeficiente. Considerando lo anterior entonces la ecuación (8) será la ecuación de una recta en donde la ordenada al origen está dada por el factor de eficiencia óptica $\tau\alpha$, la pendiente negativa por U_L y la abscisa al origen será $\tau\alpha / U_L$. Luego entonces la gráfica de η en la ordenada contra el punto de operación, definido por:

$$f_c = \frac{(T_c - T_a)}{I_c} \dots (9)$$

en la abscisa, dará una línea recta.

Un análisis sobre este punto de operación del colector nos indica que de las tres variables involucradas, dos de ellas, T_a e T_c son variables fuertemente dependientes de las condiciones meteorológicas y por lo tanto fuera del control del experimentador. Sin embargo el caso de T_c (la temperatura de la placa colectora) es especial en el sentido que depende tanto de condiciones meteorológicas como de variables como T_e (la temperatura a la que entra el fluido de trabajo), siendo ésta (T_e) la única variable que podemos manejar libremente y que al cambiar, el punto de operación del colector cambiará permitiéndonos contar con diferentes puntos para la gráfica mencionada arriba.

DESARROLLO DE LA PRÁCTICA.

Esta práctica consiste en ajustar un flujo de 2 litros/min de agua (el fluido refrigerante), utilizando una probeta y un cronómetro, y mantenerla a una temperatura constante de entrada y medir el incremento de temperatura a la salida del colector, durante periodos de 15 minutos.

Simultáneamente se registran cada minuto los siguientes parámetros:

- a) Temperatura de entrada de agua T_e y temperatura de salida de agua T_c con los termómetros que están a la entrada y salida del colector.
- b) Temperatura ambiente T_a con un termómetro de mercurio que este a la sombra para que no reciba los rayos directos del sol y pueda tomar la temperatura del aire.
- c) Flujo de agua \dot{m} con la probeta y el cronómetro, para cerciorarse que el flujo se mantiene en 2 l/min.

d) Radiación global incidente sobre el plano del colector I_c usando el pyranometro electrónico construido para tal efecto.

Una vez que a terminado el periodo de 15 minutos, se introduce al colector una mezcla de agua fría de la línea de alimentación y agua caliente proveniente del tinaco de los colectores con el fin de incrementar la temperatura de entrada del agua, y se repiten las mismas mediciones. Se requiere tener por lo menos tres grupos de datos de 15 min cada uno.

Los valores de las propiedades del agua son las siguientes:

$$C_p = 4178 \text{ Joules/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1 \text{ Kg/l}$$

ACTIVIDADES

- a) Reportar los siguientes parámetros en la tabla que se anexa.
 - temperatura de entrada del agua al colector (T_e).
 - temperatura de salida del agua del colector (T_s).
 - flujo másico de agua (\dot{m}).
 - temperatura ambiente (T_a).
 - radiación solar global incidente sobre el plano del colector (I_c).
- b) En hojas de papel milimétrico, graficar tiempo (min) vs. $(T_s - T_e)$ para cada periodo de 15 minutos y calcular en cada una de ellas el área bajo la curva. Esto será: $\int_{t_2}^{t_1} (T_s - T_e) dt$.
- c) En hojas de papel milimétrico, graficar tiempo (min) vs. I_c para cada periodo de 15 minutos y calcular en cada una de ellas el área bajo la curva. Esto será: $\int_{t_2}^{t_1} I_c dt$.
- d) Evaluar para cada periodo de 15 minutos las siguientes cantidades a partir de los datos obtenidos.

$$Q_u = mC_p \int_{t_2}^{t_1} (T_s - T_o) dt$$

$$I_{cs} = A_c \int_{t_2}^{t_1} I_c dt$$

$$f_c = \frac{T_s - T_o}{I_c}$$

$$\eta = \frac{Q_u}{I_{cs}}$$

e) Graficar f_c vs. η y a partir de la gráfica estimar la ordenada al origen (este valor será τ_o) y la pendiente (este valor será UL).

QUESTIONARIO.

- 1.- ¿Considera al sol una fuente renovable de energía?
- 2.- Mencione dos dificultades que presenta el uso de la energía solar.
- 3.- ¿Cuáles son los componentes de un colector solar plano para el calentamiento de agua y cual es la función de cada uno de ellos?
- 4.- ¿Cuál es la ecuación para calcular la cantidad de calor útil que gana el agua al pasar por el colector solar?
- 5.- El término τ_o se conoce también como la eficiencia óptica del colector ya que involucra la transmisividad y la absortividad de la radiación solar, ¿a través de que partes del colector se lleva a cabo esta transmisividad y absortividad?
- 6.- ¿Cuál es el gradiente que induce las pérdidas de calor del colector hacia el medio ambiente?
- 7.- ¿Qué es el término UL ?
- 8.- ¿En la gráfica de f_c vs η que parametro es la pendiente de la recta y cual la ordenada?

CONCLUSIONES:

Aunque el uso de la energía solar para el calentamiento de agua presenta problemas como la falta de continuidad en la disponibilidad del recurso, su uso es ya una realidad. El objetivo de calcular el factor de eficiencia óptica τ_0 y el coeficiente global de pérdidas de calor U_L , es caracterizar el funcionamiento del colector solar en cuanto a su eficiencia. Estos parámetros pueden ser usados también en el diseño de otros colectores solares con características de funcionamiento semejantes a la del colector solar del que se toman los datos.

BIBLIOGRAFÍA:

Duffie, J.A., and W.A. Beckman. Solar engineering of thermal processes. segunda edición, Wiley-Interscience, New York (1991).

Lunde, P.J., Solar thermal engineering: Space heating and hot water systems, New York, Wiley (1980).

Manrique, J.A., Energía solar: Fundamentos y aplicaciones fototérmicas, Haria S.A., México (1984).

Fernandez, M.A., Colectores solares planos, Notas del curso de actualización en energía solar, Sede: Laboratorio de Energía Solar del Instituto de Investigación en Materiales, Temixco Morelos, (1987).

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL CALENTADOR SOLAR DE AGUA
 EN LA PRACTICA DE COLECTORES SOLARES PLANOS.

HOJA DE DATOS:

H	T _e °C	T _s °C	m kg/min	T _a °C	I _c W/m ²	T _e °C	T _s °C	m kg/min	T _a °C	I _c W/m ²	T _e °C	T _s °C	m kg/min	T _a °C	I _c W/m ²
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															

GLOSARIO DE TERMINOS.

ABSORCIÓN. Es la cantidad de radiación que se acumula en un cuerpo.

ABSORTANCIA. Es la fracción de radiación que se acumula en un cuerpo respecto del total que éste recibe.

ACIMUT. Ángulo formado por un cuerpo celeste y el sur terrestre verdadero.

AFELIO. Es la distancia máxima entre el sol y la tierra. Se tiene a fines de junio.

ALTURA SOLAR α . Es el ángulo que forma la visual al sol con el horizonte.

CALOR ÚTIL. En un dispositivo fototérmico, es la cantidad de calor que se dirige hacia el fluido de trabajo.

CARCASA. Es la envoltura del colector solar plano que le protege del medio ambiente.

COLECTOR SOLAR PLANO (CSP). Dispositivo fototérmico que consta de cubierta transparente, placa absorbente con o sin superficie selectiva, aislante y carcasa.

CONSTANTE SOLAR (I_{cs}). Es la densidad de flujo, es decir, la cantidad de energía por unidad de tiempo y unidad de área perpendicular a la radiación, que recibe la tierra en el espacio desde el Sol.

CONSTANTE SOLAR METEOROLÓGICA. Es la radiación solar comprendida entre 0.346 y 2.4 μm , es decir, excluye aquella radiación que no llega a la tropósfera.

CUBIERTA TRANSPARENTE. En un CSP es la parte por donde entra la radiación solar pero no sale la radiación de la placa absorbente de mayor longitud de onda.

CUERPO NEGRO. Se dice del cuerpo ideal que absorbe todas las longitudes de onda del espectro electromagnético y de igual manera las emite (absorbedor ideal; emisor ideal).

DECLINACIÓN. Es el ángulo con respecto al zenit con el que un observador situado en el ecuador vería al sol.

ECLIPTICA. Es el plano imaginario que se forma con la órbita terrestre.

EFICIENCIA DEL COLECTOR. Se define como la relación existente entre el calor útil y la energía disponible.

EMISIÓN. Todo cuerpo que absorbe calor, emite a su vez el exceso de energía a una longitud de onda correspondiente a la temperatura del cuerpo, hasta alcanzar un equilibrio energético.

FOTOTÉRMICO. Conversión de calor en un material por acción de la luz.

FOTOVOLTAICO. Producción de una FEM por acción de la luz sobre algunos materiales.

IRRADIANZA (I). Es la cantidad de energía que llega en un haz luminoso proveniente del sol.

IRRADIANZA EXTRATERRESTRE INSTANTÁNEA (I_0). Es la variación de la constante solar debido a la variación de la distancia tierra-sol.

MASA DE AIRE. Es la longitud de la trayectoria que siguen los rayos solares al pasar por la atmósfera. Con el sol en el zenit y a nivel del mar la masa de aire es uno.

MERIDIANO. Cualquiera de los círculos máximos de la esfera terrestre que pasa por los polos.

PERIHELIO. Es la distancia mínima entre el sol y la tierra. Se alcanza alrededor del 10 de enero.

PISANOMETRO. Instrumento que mide la irradianza hemisférica global.

PIRHELÍOMETRO. Instrumento que mide la irradianza directa para lo cual debe contar con un mecanismo de seguimiento del sol.

PLANO EQUATORIAL. Plano imaginario que pasa por el ecuador terrestre y no coincide con el plano de la eclíptica. Existe un ángulo de 23.45° entre estos dos planos.

RADIACIÓN DIFUSA. Es la radiación solar que choca con las partículas atmosféricas y que por lo tanto sufre desviaciones.

RADIACIÓN DIRECTA. Es la radiación solar que no choca con las partículas atmosféricas y que por lo tanto no sufre desviaciones.

RADIACIÓN GLOBAL. Es la suma de la radiación directa y la radiación difusa.

REFLECTANCIA. Es la fracción de radiación que se refleja en un cuerpo respecto del total que este recibe.

SUPERFICIE SELECTIVA. Se le llama a los recubrimientos en la placa absorbadora que le permiten tener alta absorción a la luz solar y baja emisividad a la radiación infrarroja de la placa.

TERMOSIFÓN. Se le llama así al proceso de autobombear de un CSP que venciendo la caída de presión del fluido en su paso por la placa absorbadora, circula por diferencia de densidades debido al calentamiento.

TIEMPO LOCAL. Es el tiempo tomando un meridiano como referencia.

TIEMPO SOLAR VERDADERO. Es el tiempo tomando como referencia el meridiano local.

TRANSMITANCIA. Es la fracción de radiación que se transmite en un cuerpo respecto del total que este recibe.

TROPICO DE CANCER. Es el punto más al norte que logra llegar el sol, está a 23.45° de latitud norte y la fecha en que esto ocurre es el 21 de junio en el

solsticio de verano.

TRÓPICO DE CAPRICORNIO. Es el punto más al sur que logra llegar el sol, está a 23.45° de latitud sur y la fecha en que esto ocurre es el 23 de diciembre en el solsticio de invierno.

ZENIT. Ángulo que se forma entre un cuerpo celeste y la perpendicular a un plano horizontal sobre la superficie terrestre.

ZONAS POLARES. Se encuentran entre los 60° y 90° de latitud norte y sur respectivamente y tiene la característica de que son iluminadas solo seis meses alternadamente.

ZONAS TEMPLADAS. Son las zonas comprendidas entre los trópicos y los 60° de latitud norte y sur respectivamente y tiene la característica de que en ninguna época del año reciben la luz en ángulo recto.

ZONA TÓRRIDA. Zona de la tierra comprendida entre los dos trópicos. Tiene la característica de recibir los rayos del sol en el zenit, dos veces al año.

BIBLIOGRAFIA:

- 1.- Lunde. P.J., "Solar thermal engineering: Space heating and hot water systems", New York, Wiley (1980).
- 2.- Manrique, J.A., "Energía solar: Fundamentos y aplicaciones fototérmicas", Harla S.A., México (1984).
- 3.- Manrique, J.A., "Transferencia de Calor", Harla S.A., México (1976).
- 4.- Fernández, M.A., Colectores solares planos, "Notas del curso de actualización en energía solar", Sede: Laboratorio de Energía Solar del Instituto de Investigación en Materiales, Temixco Morelos, (1987).
- 5.- Duffie. J.A., and W.A. Beckman. "Solar Engineering of Thermal Processes", segunda edición, Wiley-Interscience, New York (1991).
- 6.- Duffie. J.A., and W.A. Beckman. "Solar Energy Thermal Processes" primera edición, New York: Wiley, (1974).
- 7.- Kreider, J.F., and f.Kreith. "Solar Heating and Cooling", McGraw-Hill, (1975).
- 8.- Kreider. J.F., and f.Kreith. "Principles of Solar Engineering", Hemisphere Publishing Corporation. (1978).

- 9.- Willis A., "Prediction of Performance of Solar Collectors, Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings", ASHRAE GRD 170, (1977).
- 10.- Perry R.H., and C.H. Chilton, "Chemical Engineer' Handbook", Fifth Edition, New York: McGraw Hill, (1973), p. 10-14.
- 11.- Beckman, W.A., S.A. Klein, and J.A. Duffie, "Solar Heating Design by the f-Chrt Method", Wiley, New York, (1977).
- 12.- Thekaekara, M.P., "Solar Radiation Techniques and Instrumentation", Solar Energy 18, 309-325, (1976).
- 13.- Stanhill, G., "Diffuse Sky and Cloud Radiation in Israel", Solar Energy 10, (2), 96-101, (1966).
- 14.- Norris, D.J., "Solar Radiation on Inclined Surfaces", Solar Energy 10, 72-77, (1966).
- 15.- Liu, B.Y.H., and R.C. Jordan, "A Rational Procedure for Predicting the Long Term Average Performance of Flat Plate Solar Energy Collector", Solar Energy 4, 1-19, (1960).
- 16.- Walraven, R., "Calculating the Position of the Sun", Solar Energy 20, 393-397, (1978).
- 17.- Klein S.A., W.A. Beckman, and J.A. Duffie, "A Design Procedure for Solar Heating Systems", Solar Energy 18, 113-127, (1976).

- 18.- Lampert, C.M., and J. Washburn. "Microstructure of a Black Chrome Solar Selective Surface", Solar Energy Materials 1, 81, (1979).
- 19.- Whillier, A., "Plastic Covers for Solar Collectors", Solar Energy, 7, 148, (1963).
- 20.- Bliss, R.W., "The Derivations of Several Plate Efficiency Factors Useful in the Design of Flat-Plate Solar-Heat Collectors", Solar Energy 3(4), 55, (1959).
- 21.- Garg, H.P., "Effect of Dirt on Transparent Covers in Flat-Plate Solar Energy Collectors", Solar Energy 15, 299, (1974).
- 22.- Klein, S.A., "Calculation of Flat-Plate Loss Coefficients", Solar Energy 17, 79, (1975).