

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



DETERMINACION DE PROPIEDADES OPTICAS DE MATERIALES

PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA

ENERGIA SOLAR

T E S I S

Que para obtener el Título de

INGENIERO QUIMICO

presenta

CARLOS TEJEDA GONZALEZ

MEXICO, D. F.

1978



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TESIS 1978
AS M.C. 416 L100
FECHA _____
PRGC _____



JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE:

PRESIDENTE: Prof. Julio García Stahl
VOCAL: Prof. Leopoldo Rodríguez Sánchez
SECRETARIO: Prof. Guillermo Alcayde Lacorte
1er. SUPLENTE: Prof. Roberto Andrade Cruz
2o. SUPLENTE: Prof. Carlos Sánchez Moreno

ASESOR DEL TEMA:

Ing. Guillermo Alcayde Lacorte

SUPERVISOR TECNICO:

Fis. Everardo Hernández

"La inteligencia humana es sólo un reflejo de la gran inteligencia divina, es un don concedido al hombre para alcanzar la meta, y la meta es encontrar la verdad de nosotros con nuestro Universo, y encontrar esta verdad es encontrar el Reino de Dios."

A MIS PADRES
CON CARINO Y AGRADECIMIENTO

A MIS HERMANOS

A TODA MI FAMILIA

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

A MIS MAESTROS

AL HONORABLE JURADO

I N D I C E

RESUMEN

INTRODUCCION

- I. OBJETIVOS
 - I.1 Elementos y organización funcional
 - I.2 Criterios para optimizar un diseño

- II. TEORIA Y ASPECTOS GENERALES
 - II.1 Descripción general del aprovechamiento de la energía solar y sus aplicaciones
 - II.2 Definición de propiedades ópticas
 - II.2.1 Espectro electromagnético
 - II.2.1.1 Rango de aplicación
 - II.2.2 Transmisión de la luz
 - II.2.3 Refracción e índice de refracción
 - II.2.4 Reflectancia
 - II.2.5 Absorción
 - II.2.6 Transmitancia
 - II.2.7 Teoría del cuerpo negro
 - II.2.8 Leyes fundamentales
 - II.2.9 Coeficiente de emisividad
 - II.2.10 Coeficiente de absorción

- III. MATERIALES TRANSPARENTES
 - III.1 Definición y clases de materiales
 - III.2 Determinación de propiedades
 - III.2.1 Propiedades físicas y químicas
 - III.2.2 Propiedades ópticas
 - III.2.2.1 Por antecedentes bibliográficos
 - III.2.2.2 Método de cálculo de transmisión, absorción y reflexión de radiación solar directa a través de un vidrio plano
 - III.2.2.3 Breve introducción a la descripción de la espectrofotometría
 - III.2.2.4 Determinación por métodos espectrofotométricos
- IV. CAPTADORES SOLARES
 - IV.1 Descripción general
 - IV.2 Propiedades de superficies
 - IV.3 Superficies selectivas
 - IV.3.1 Medición de propiedades ópticas
- V. ALMACENAMIENTO DE CALOR DERIVADO DE LA ENERGIA SOLAR
 - V.1 Clases de materiales y determinación de propiedades

- V.1.1 Almacenadores de energía solar por carga o descarga de calor
- V.1.2 Almacenadores de energía solar por fusión y congelamiento del material
 - V.1.2.1 Materiales de calor de fusión
 - V.1.2.2 Ceras
 - V.1.2.3 suspensiones
- V.1.3 Almacenaje por aislamiento térmico

VI. CRITERIOS DE SELECCION

VI.I MANEJO DE INFORMACION PARA UN DISEÑO OPTIMIZADO

CONCLUSIONES

RECONOCIMIENTOS

BIBLIOGRAFIA

RESUMEN

En el aprovechamiento de la energía solar, es de importancia vital, conocer tanto la utilidad óptica de la radiación solar como la eficiencia de ciertos materiales para aprovechar al máximo esta radiación, ya sea en forma de calentamiento o enfriamiento. Por lo que en este trabajo se desarrolla una especie de manual práctico con detallado énfasis en especificaciones teóricas y experimentales de propiedades ópticas y físicas de materiales que pueden ser utilizados en el aprovechamiento de la energía solar, enfocados principalmente a cantidad de paso de radiación a través de superficies transparentes, capacidad de ciertos cuerpos de absorber energía, superficies selectivas y materiales que pueden almacenar el calor o el frío generado. Dándose finalmente criterios de selección de un diseño optimizado de utilización práctica.

INTRODUCCION

La energía en los últimos tiempos ha sido primordial para la supervivencia de los habitantes de este planeta llamado tierra.

Desde que se conoció el petróleo, éste ha sido la principal fente de energía en el mundo y se puede decir casi con certeza, que estamos viviendo en la era del petróleo. Sin embargo esta energía que mueve máquinas, industrias enteras y que nos suministra energía eléctrica y que antes parecía no tener fin, algunos futurologos han determinado que si el crecimiento de uso de esta energía continua a este ritmo, aproximadamente dentro de 30 ó 40 años empezará a escasear, con la consecuencia lógica de una crisis mundial, ya que los grandes capitales, los alimentos, los transportes y casi todo nuestro modo de vida depende de la energía y transformaciones que obtenemos del petróleo.

Esto ha hecho que en los últimos tiempos, se busque con afán un sustituto a esta apreciada energía.

En los últimos años y a raíz de la segunda guerra mundial, se ha desarrollado un tipo de energía; llamada energía nuclear,

en los tiempos de paz se pensó que al fin vendría a sustituir a la energía generada por el petróleo cuando ésta empezara agotarse; de esta manera se desarrolló tremendamente hasta llegar a nuestro tiempo, sin embargo ha tenido algunos inconvenientes que han hecho buscar otro posible sustituto; así el hombre ha mirado hacia arriba y a visto que está como ha estado por muchísimo tiempo, un tipo de energía que parece ser una fuente inagotable, ésta energía, la que recibimos del sol, nos permite todas las funciones de supervivencia. Antes que se conociera el petróleo, el hombre primitivo gozó de todos sus bienes, como el hombre contemporáneo los goza hoy.

El sol es un gran horno nuclear que opera en forma similar a un reactor utilizado para generar energía eléctrica. Como el reactor nuclear, el sol irradia calor, luz y una completa variedad de otros rayos.

El sol ha estado al alcance del hombre por milenios y no ha sido hasta ahora que se ha pensado usar con otros fines.

En muchos países se ha comenzado hacer estudios enfocados a este tema, uno de los países más desarrollados en este aspecto es Francia.

En México, con algunos conocimientos adquiridos de otros países, y con desarrollo de tecnología propia se están realizando estudios para la aplicación de esta energía en nuestro territorio. Dichos estudios se enfocan principalmente a formas de calentamiento, enfriamiento y producción de energía eléctrica mediante la energía solar.

Con respecto a la distribución de energía solar, México es uno de los países privilegiados ya que nuestro nivel nacional de días despejados e insolación es de los más altos del mundo. Esto es importante, ya que en cualquier enfoque que se le dé a la energía proveniente del sol, se tienen que tomar en cuenta factores tales como su intermitancia y la adaptabilidad social a su aplicación.

I. OBJETIVOS

El plan general de este trabajo es presentar una especie de manual práctico en el que se puedan observar las propiedades de ciertos materiales en base a su utilización en equipos que aprovechen o transformen la energía solar.

Este plan se basa principalmente, en reconocer dos tipos genéricos de sistemas de aprovechamiento de la energía solar: el sistema de absorción de energía y el sistema de concentración de la energía. De acuerdo con estos sistemas se definen equipos típicos para cada uno y se enumeran sus partes principales. Con ésto se ven de qué materiales están compuestas estas partes principales, y se da un criterio de selección de materiales más adecuados de acuerdo a sus propiedades.

Con el objetivo de trazar una secuencia lógica de la presentación de las propiedades de estos materiales, en la fig 1.1 se da un diagrama de bloques para tener los elementos y la organización funcional de este trabajo.

I.1 Elementos y organización funcional

Para tener una organización funcional se debe de tener el exámen de las relaciones funcionales de un sistema, esto significa que la actividad de cualquier función o parte del sistema tiene algún efecto en la actividad de cualquier otra función o parte. A fin de evaluar cualquier decisión o acción de una organización es necesario idéntificar todas las interacciones importantes y determinar su efecto en toda la organización comparándolas con la función involucrada originalmente.

Las relaciones funcionales involucradas se pueden clasificar por zonas dentro del diagrama (fig 1).

Zona I. Sistemas de absorción

Zona II. Sistemas de concentración

dividido por subzonas que dan las partes funcionales de cada sistema, teniéndose los módulos principales de cada parte funcional y por último las partes de éstos módulos.

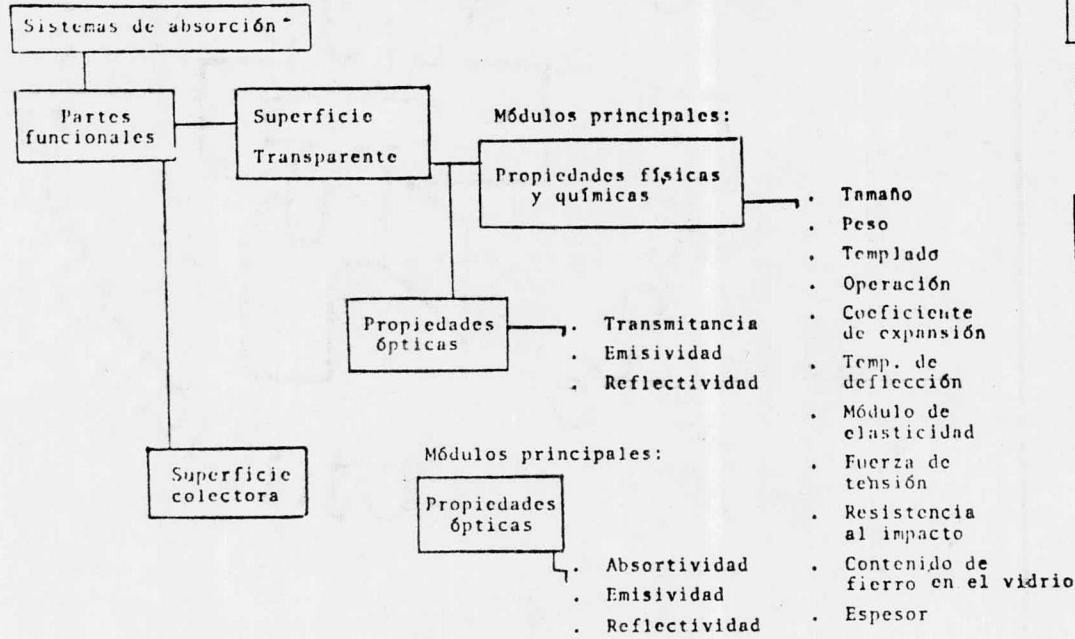
I.2 Criterios para óptimizar un diseño

Dentro de los cuadros básicos de cualquier sistema. Se debe de tener que el manejo de las relaciones funcionales se afine

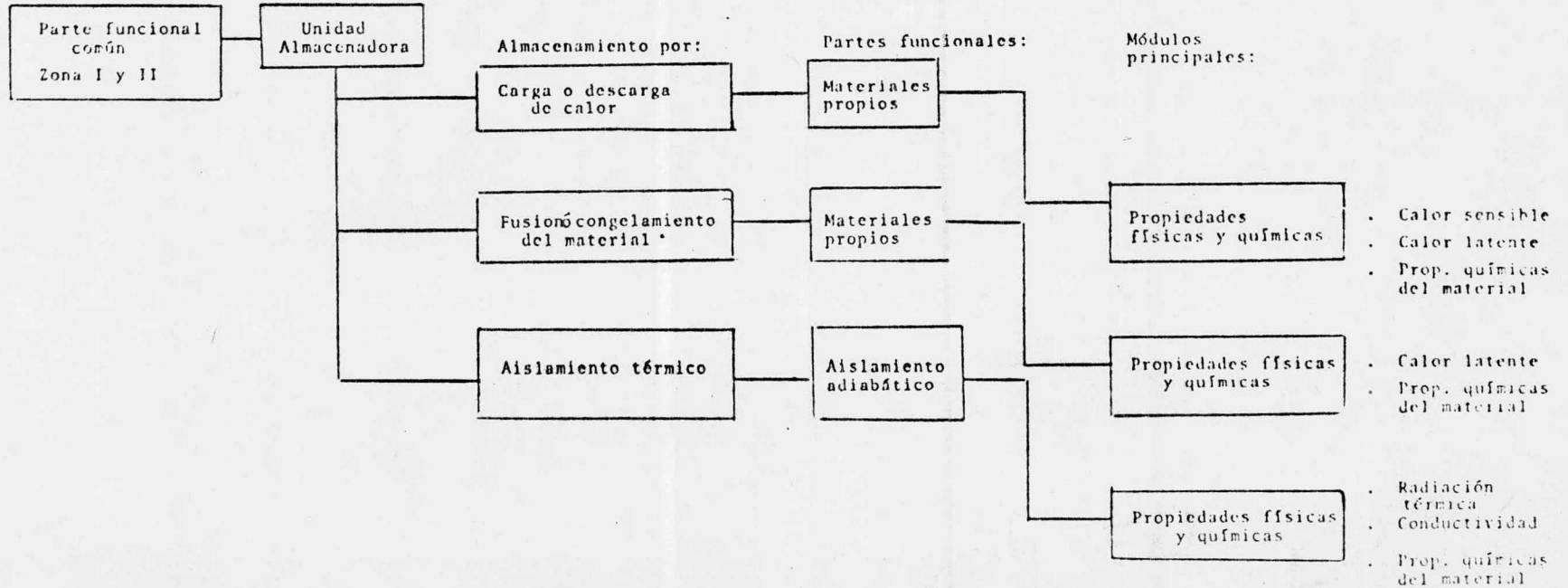
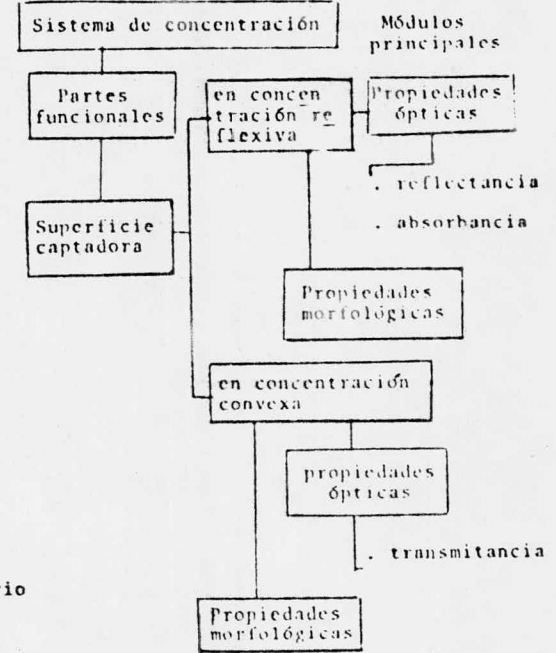
a un óptimo, ésto es, que el sistema tiende a funcionar de su mejor manera, para esto una observación detallada de los módulos principales, puede dar la clave.

El uso de modelos como estrategia de selección de sistemas óptimos es muy usado; en la fig 1.2, se dan los elementos y organización funcional de un modelo general de sistemas para la planeación del control y funcionamiento óptimo de acuerdo a los módulos principales.

Z O N A I



Z O N A II



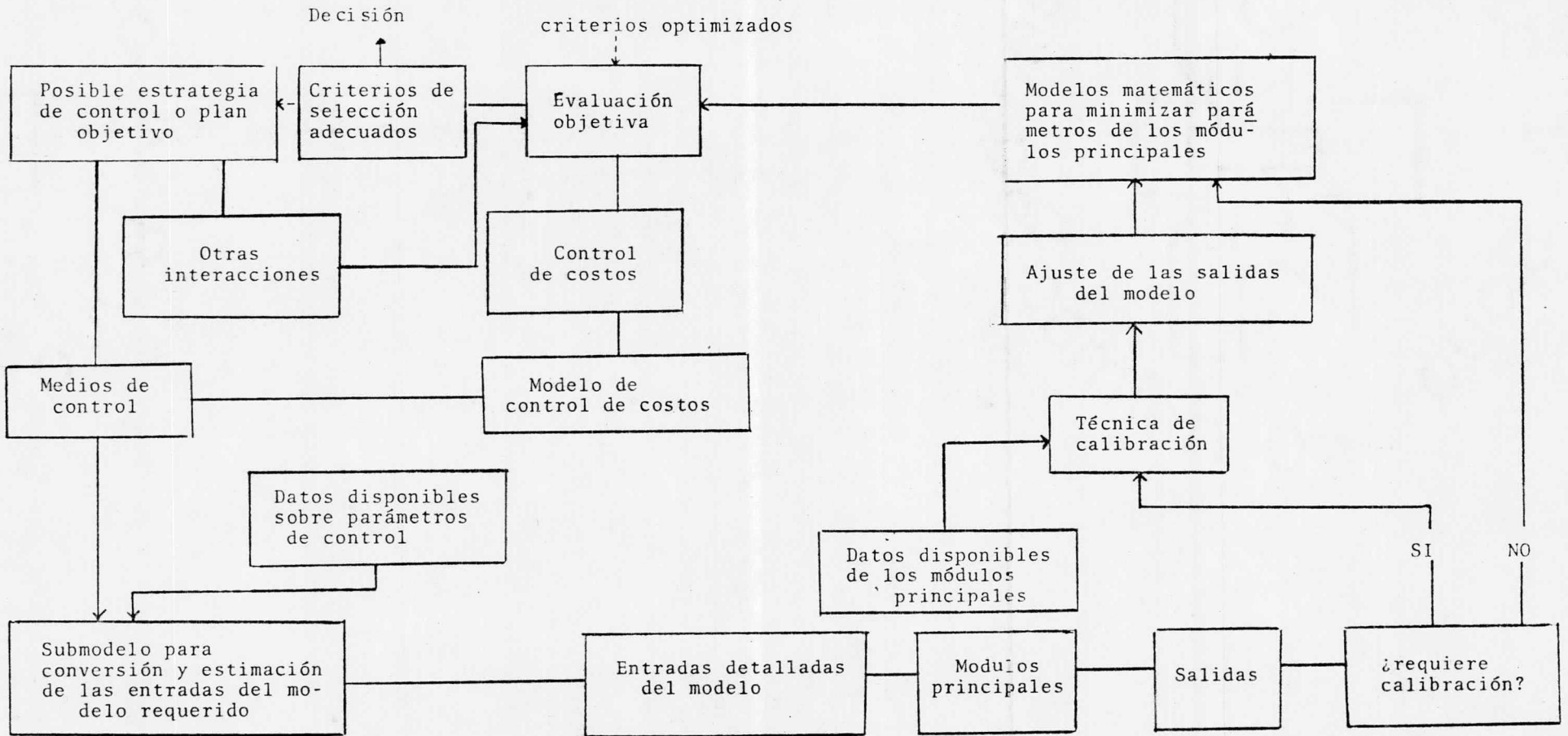


Fig. I.2 ELEMENTOS Y ORGANIZACION DE UN MODELO GENERAL DE SISTEMAS PARA PLANEACION DE CONTROL Y FUNCIONAMIENTO OPTIMO

II TEORIA Y ASPECTOS GENERALES

II.1 Descripción general del aprovechamiento de la energía solar y sus aplicaciones

El sol esta colocado a 1.5×10^{11} m de nuestro planeta, ha sido para el hombre una gran fuente de energía natural ya que le provee calentamiento y le permite desarrollar su sustento de vida.

El sol con su diámetro de 1,390,000 km, tiene un volumen mil veces mayor que el planeta más grande, y sus dos mil cuatrillo nes de tons. de gas. Aún bajo la aplastante presión en el núcleo, sus átomos se mantienen en estado gaseoso, conservando su capacidad de vagar libremente pese a la terrible presión a la que están sometidos.

Lo que impide que el núcleo del sol se condense en estado sólido es su energía: prodigiosos torrentes de energía que crean una temperatura interna de 14,000,000 °C, que no sólo calientan la enorme envoltura de gases, sino también el resto del sistema solar. La fuente de esta energía es la lenta y con tinua destrucción de la materia solar por fusión nuclear de los átomos de hidrógeno en átomos de helio.

Esta reacción transforma 657 millones de toneladas de hidrógeno solar en 652.5 millones de toneladas de cenizas de helio cada segundo.

Los 4.5 millones de toneladas faltantes se convierten en rayos gamma.

Esta energía se abre paso hasta la superficie del sol y luego irradia al espacio. Si no fuera así el sol se calentaría tanto que estallaría.

Principalmente moderada en su paso a través de las capas exteriores del sol, esta energía se atenúa aún más en la cromósfera o atmósfera inferior del sol.

Para nosotros la atmósfera terrestre es un escudo o filtro que sólo deja llegar una parte de la energía radiada.

Sin embargo, aunque debilitada, una radiación solar es tan intensa que no podemos verla o fotografiarla directamente como un planeta o una estrella lejana.

Esta energía así llegada a la superficie de nuestro planeta es capaz de desarrollar todas las funciones para hacerlo habitable.

El hombre antiguo aprovechaba esta energía para calentarse durante el día y también la aprovechaba para poder desarrollar sus medios de supervivencia.

Actualmente, se quiere aprovechar esta fuente de energía con un rango de aplicación mayor.

¿De qué manera puede darse mayor utilización a la energía solar?. Los estudios recientes se están dirigiendo a tres sectores principales:

Aplicaciones térmicas directas

Tales como la calefacción y la climatización de viviendas o de diversos usos industriales. Los equipos construidos actualmente para esas utilidades son un poco costosos, generalmente para calentamiento se han desarrollado dos tipos esenciales de equipo:

- Sistemas de absorción de energía solar
- Sistemas de concentración de energía solar

Los primeros funcionan a base de una superficie plana, que absorbe la energía solar y después la emite en forma de calor.

Esta superficie debe tender a lo que llamamos un cuerpo negro perfecto (que después explicaremos detalladamente), que es un cuerpo que absorbe toda la energía incidente sin reflejarla ni transmitirla.

Las características de calentamiento van a depender qué tanto se acerca o se aleja la superficie de ser cuerpo negro perfecto.

Los cuerpos que no son cuerpos negros perfectos, al recibir la radiación, parte de este se absorbe y parte se refleja, la proporción de estas depende de las características del cuerpo o superficie. Esta superficie es la que llamaremos superficie captadora de la radiación solar.

Dado que el calor se puede disipar debemos aislar el sistema. Aparte debemos tener una superficie transparente que deje pasar la radiación.

Muchos de los materiales transparentes (vidrios, plásticos, etc) tienen una gran propiedad para su utilización en la energía solar, esta propiedad es que son transparentes a la radiación entrante y opacos a la radiación infrarroja (térmica) que emite el cuerpo. Por lo tanto vamos a tener un proceso de calentamiento en el sistema.

Entonces, un sistema de calentamiento de este tipo consiste en tres partes principales:

- a) La superficie transparente
- b) La superficie captadora
- c) El aislamiento

En la fig 2.2 se muestran cuatro diseños de colectores de energía solar de superficie plana por absorción.

El ajuste es hecho en estos colectores para circulación de un fluido a través del colector de lámina o superficie plana, a remover el calor absorbido y distribuirlo por medio de un sistema de circulación en tubería para aplicaciones útiles.

La selección de equipos de este tipo debe verse desde el punto de vista de tener:

- a) Una transmisión mayor de energía solar a la superficie captadora, esto es que el cristal, vidrio o plástico presenta una superficie más transparente.
- b) Una menor pérdida de energía solar al exterior (emisividad).
- c) El uso de más hojas de cristal o plástico permitirían menos emisividad en forma infrarroja (térmica) hacia el exterior pero bajaría la transmisión de energía solar a la superficie captadora, una combinación adecuada aumentaría la eficiencia.
- d) Se deben minimizar las pérdidas del regreso al exterior del calor absorbido por el colector de superficie plana.
- e) Contra posible corrosión o deterioro del colector se recomienda un escudo o protector que dé directamente a los elementos.

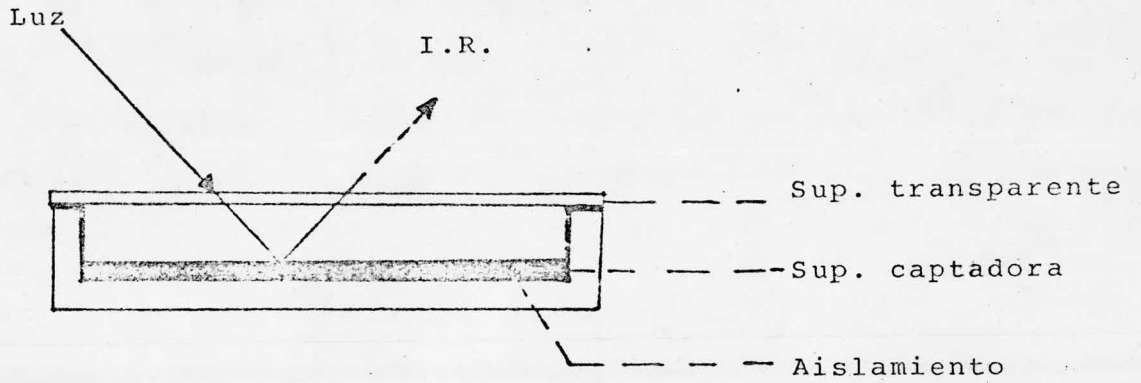


Fig. 2.1 ESQUEMA GENERAL DE UN COLECTOR DE SUPERFICIE PLANA

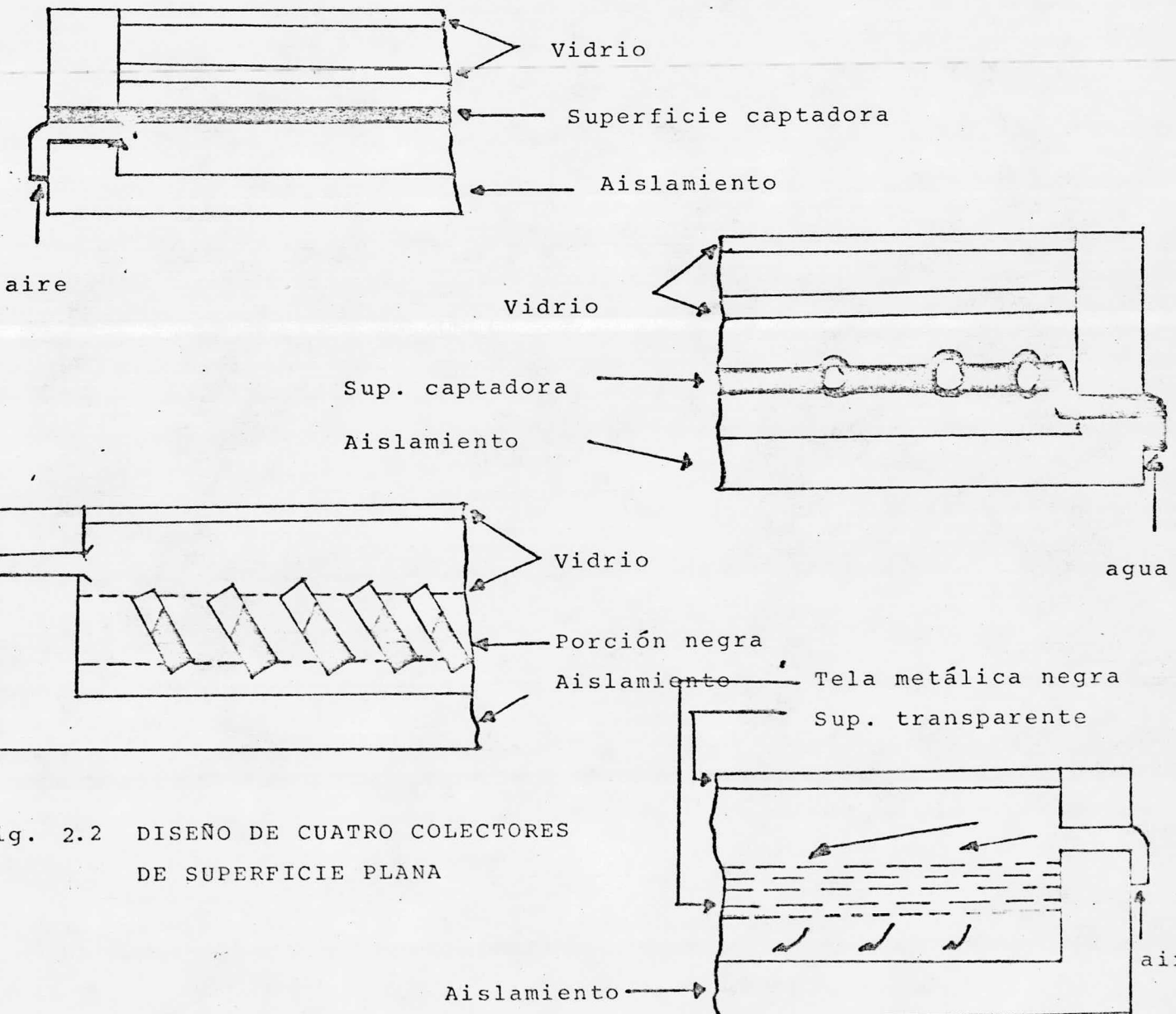


Fig. 2.2 DISEÑO DE CUATRO COLECTORES DE SUPERFICIE PLANA

Sistemas de concentración de energía solar

Estos sistemas consisten en concentrar la radiación recibida en un punto para obtener un supercalentamiento en ese punto; esto se puede lograr ya sea por medio de lentes convexos o por un sistema de espejos, este último consiste en colocar espejos en una morfología parecida a un paraguas, la radiación se va a concentrar en un punto que es aproximadamente en el centro del colector, esto se puede hacer en grandes proporciones y lograr altas temperaturas capaces de fundir el acero.

Estos sistemas son mucho más costosos que los anteriores, ya que como dijimos necesitan grandes instalaciones, para llegar a las temperaturas deseadas.

Además de calentar, se han desarrollado sistemas para enfriar por medio de la energía solar y cuyo funcionamiento no vamos a especificar aquí. Los aparatos diseñados para calentar y enfriar mediante la energía del sol, no son de un calentamiento o enfriamiento constante, por lo que es recomendable su uso en combinación con aparatos convencionales de combustible para periodos prolongados de mal tiempo. Sin embargo, se piensa en almacenar el frío o el calor generado para utilizarlo cuando se requiera; así, en los periodos de máxima recolección de energía solar durante el día se almacena calor para suministrarlo -

cuando se necesite, lo mismo en caso del enfriamiento, su uso generalmente se enfoca en conservación de alimentos, acondicionamiento de casas habitación y en diferentes procesos industriales.

Transformación de energía solar en electricidad

Existen sistemas capaces de transformar la energía del sol a energía eléctrica, hay dos sistemas fundamentales; uno a pequeña escala y el otro cuyo uso puede ser a gran escala, el primero se basa en el uso de células fotoeléctricas (celdas solares) cuyo funcionamiento está plenamente comprobado ya que este sistema se ha usado en las pruebas espaciales hechas por astronautas. Aparte se quiere usar para dar electricidad a pequeña escala, ya sea en casas-habitación dotadas con estos aditivos o para pequeñas funciones industriales. El segundo sistema se basa en generar vapor por medio de energía solar para accionar turbinas, este último es para aprovechamiento en grandes cantidades.

Los tipos antes vistos de calentamiento (por absorción y por concentración) pueden generar electricidad, el primer tipo involucra la colección del calentamiento solar para producir vapor y después circularlo a través de la tubería para llegar a la unidad turbina - generador y producir electricidad. El segundo tipo deberá usar espejos reflectores que den directamente la radiación solar concentrada a un calentador montado sobre la torre. El vapor colectado en el tope de la torre debe

ser llevado por la tubería al generador.

Ambos tipos potencialmente pueden producir electricidad en costos comparativos con las plantas convencionales, pero solamente por tiempos limitados durante el día.

II.2 Definición de propiedades ópticas

II.2.1 Espectro electromagnético

Alguien ha definido la luz como ondas electromagnéticas que no necesitan medio para propagarse, y de acuerdo con su longitud de onda, se difunden en un espectro llamado electromagnético que comprende las ondas de radio, los rayos infrarrojos, la luz (rango visible), los rayos ultravioletas, los rayos X y los rayos gamma (γ). Todas ellas atraviesan el aire y el vacío con la velocidad de la luz, pero se distinguen entre sí por su longitud de onda.

La magnitud de la longitud de onda determina la clase de radiación de acuerdo con esto tenemos:

Rayos X (1 \AA°), ultravioleta en vacío (30 a 2000 \AA°), ultravioleta (2000 a 4000 \AA°), visible (4000 a 8000 \AA°), infrarrojo muy cercano (8000 a $30,000 \text{ \AA}^\circ$), infrarrojo cercano ($30,000$ a $250,000 \text{ \AA}^\circ$), infrarrojo lejano hasta microondas ($250,000 \text{ \AA}^\circ$ a 1cm).

En nuestro estudio vamos a poner especial énfasis a las radiaciones visibles e infrarrojas ya que de éstas se desprenden grandes propiedades para su utilización dentro de la energía solar.

II.2.1.1 Rango de aplicación

Para una colección máxima de energía solar, es deseable tener la más alta transmitancia posible a través del espectro solar hasta longitudes de onda cerca de 2.5 micras, que incluyen el infrarrojo más allá la energía radiante del sol cae a proporciones negligibles; o sea, es adecuado trabajar en un rango que corresponde de entre 300 y 400 milimicras a cerca de 2.5 micras, que abarca al espectro visible y parte del espectro infrarrojo.

II.2.2 Transmisión de la luz

El sol y las estrellas nos resultan tan familiares que raramente pensamos en las vastas extensiones de espacio vacío que nos separan. Sin embargo, sabemos que el sol dista 1.5×10^{11} m de la tierra; entonces nos ponemos a pensar, del sol a la tierra cómo se propaga esa luz y cómo nos llega su energía radiante; la definición que vimos antes es que se propaga en el vacío y podemos añadir que va a una velocidad de 300,000 km/seg y antes de entrar a la tierra se topa con la atmósfera la cual hace que solo una parte del total de energía que llega a ella sea transmitida a la tierra, a pesar de toda esta energía es suficiente para satisfacer sus necesidades.

La radiación que se recibe arriba del nivel más alto de la atmósfera, se llama radiación solar directa y se caracteriza por una curva de emisión energética similar a la de un cuerpo negro a 6000 °K (fig 2.4) al pasar la atmósfera se ve atenuada por las moléculas del aire, las nubes de vapor de agua, los contaminantes atmosféricos y las condiciones climáticas. Esta radiación tiene un rango de longitud de onda entre 0.3 y 2.5 micras, encontrándose su máximo valor en 0.5 micras.

Los cuerpos al recibir la energía del sol, la absorben y después la emiten en forma térmica (radiación infrarroja); esto mismo pasa con las nubes, con el aire y con la tierra, que reirradian la energía solar recibida, en esta última se conoce con el nombre de radiación terrestre con longitudes de onda en el infrarrojo entre 4 a 50 micras, el máximo varia con la temperatura de las superficies terrestres y está situada entre 9 y 12 micras.

Aunque grandemente atenuada la radiación solar directa, es suficiente para dar temperaturas de 80 a 90°C en el suelo, de 50 a 70°C en el medio ambiente a cielo claro y libre de nubes, y de 18 a 25°C en condiciones medias de sombra y luz.

Dentro de la luz consideramos tres partes importantes para nuestro estudio; la radiación infrarroja, la visible y la ultravioleta. Todas estas radiaciones electromagnéticas transportan energía y al ser absorbidas por un cuerpo éste se calienta.

La energía recibida del sol cae en su mayoría dentro del rango infrarrojo y visible, y sólo en muy poca proporción en ultravioleta (aproximadamente 51% en el rango infrarrojo, 45% en el visible y sólo 4% en el ultravioleta).

Si esta energía radiante es recibida por un cuerpo parte de ella es absorbida primero y emitida después en forma de calor, la cantidad absorbida por el cuerpo depende de sus características físicas y químicas.

Estas radiaciones que llegan primero (absorción) y salen después (emisión), son las que se pueden llamar radiación luminosa y radiación térmica. Esto es fácil de demostrar, si ponemos una plancha común y corriente en un cuarto oscuro y hacemos pasar energía eléctrica dentro de ella, al calentarse veremos que aparentemente emite una luz, esa es la luz que está emitiendo en forma infrarroja, es decir, está por un parte recibiendo una energía (de tipo eléctrico, en este caso), esta es recibida, absorbida por el sistema y emitida en forma de calor (radiación infrarroja).

Lo mismo está sucediendo en un captador solar (cuya descripción veremos más tarde), recibe la energía radiante del sol, la absorbe y la emite en forma de calor, las relaciones entre estas cantidades de energía es lo que nos da un calentamiento más o menos óptimo.

En un pequeñísimo rango el sol transmite una radiación de tipo invisible para el ojo humano llamada radiación ultravioleta, esto se debe a que a temperaturas elevadas dentro de la atmósfera hay una perturbación atómica, la luz que se produce es de tipo invisible debido a su pequeña longitud de onda y es perjudicial al ojo humano; estas radiaciones las podemos repetir experimentalmente por ejemplo en una lámpara de mercurio, y si hacemos pasar su luz a través de una fotocelda que se sitúe próxima a la lámpara, la corriente que pasa a través de la célula crece con la intensidad de la luz incidente. Si un pedazo de vidrio ordinario que es casi perfectamente transparente a la luz visible, se interpone entre la lámpara y la fotocélula, la corriente eléctrica en ésta disminuye apreciablemente.

Esto se debe, a que cuando se interpone el vidrio a las radiaciones de la lámpara, éste actúa como un filtro selectivo de luz visible, no dejando pasar a otro tipo de radiaciones que acompañan a ésta, aparentemente el ojo humano no percibe la diferencia, pero la célula si la registra al recibir una cantidad menor de energía; éste tipo de radiación al cual es opaco el vidrio es la luz ultravioleta.

En una superficie rayada, como un disco de gramófono se refleja luz de distintos colores en diferentes direcciones. Así se forman espectros en que el rojo se refleja en una dirección, seguido del naranja, amarillo, verde, azul y violeta en direcciones sucesivas utilizando detectores apropiados, puede demostrarse que la luz invisible de la lámpara de mercurio se desvía siempre en la región que hay "más allá" del violeta y que la luz procedente de la plancha caliente se desvía al otro lado del espectro, "antes" que el rojo, los nombres ultravioleta e infrarrojo aluden precisamente a estos efectos.

El ojo humano percibe una parte del espectro; algunos animales parecen ver otros rangos, las películas fotográficas y otros instrumentos consiguen detectar radiaciones en amplias regiones del espectro que para nosotros son invisibles.

II.2.3 Refracción e índice de refracción

Cuando una radiación penetra a una superficie transparente, sufre una refracción, es decir un cambio de dirección por el cambio de densidades de un medio a otro (en este caso del aire al vidrio o superficie transparente).

Cuando la luz sufre una desviación como la que hemos descrito, se dice que pasa de un medio más refringente a otro medio

menos refringente. En breves palabras el fenómeno de refracción se enuncia así: al salir la luz de un medio más refringente a otro menos refringente se desvía acercandose a la normal (fig 2.3)

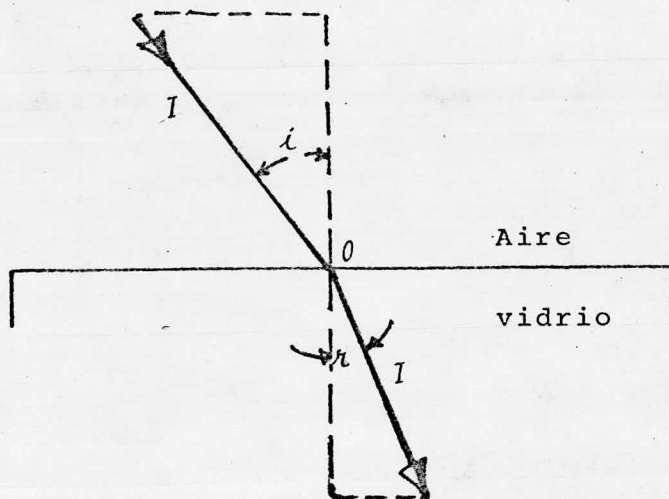


Fig 2.3 Fenómeno de la refracción

Índice de refracción

El índice de refracción es una medida de referencia y se expresa como el cociente del seno del ángulo de incidencia (i) y el seno del ángulo de refracción (r), (ver fig 2.3).

$$\frac{\text{Sen } i}{\text{Sen } r} = n \text{ (índice de refracción)}$$

Para aplicaciones prácticas

No

El índice de refracción causa aproximadamente un 5% de reflexión en una superficie transparente tipo (superficie perfectamente transparente y no absorbente) llegando menor energía a la superficie captadora. El índice de refracción de una superficie tipo es de 1.5, que puede producir una máxima transmitancia del 92%, una superficie ideal sería aquella que fuera perfectamente clara y con un índice de refracción cercano a la unidad.

II.2.4 Reflectancia

Propiamente podríamos definir la reflectancia como la energía que no absorbe un cuerpo y la refleja, entre más opaco sea un cuerpo menos reflexión tendrá; en energía solar, para una superficie transparente necesitamos que casi no haya reflexión para que llegue la mayor cantidad de energía a la superficie captadora, en la superficie captadora necesitamos también que haya muy poca reflexión y que casi toda la energía sea absorbida para tener un calentamiento mucho mayor. Para el caso de enfriadores se necesita lo contrario.

II.2.5 Absorción

La absorción de una energía radiante por un cuerpo, se debe a que el cuerpo absorbe parte de esta energía radiante con lo

No

que se efectúan en el interior de los átomos o de las moléculas del mismo, diversos cambios en sus niveles de energía. Estos cambios pueden consistir en una variación en las órbitas de los electrones o en una variación en la energía vibracional o rotacional de las moléculas. La posibilidad de que parte de la radiación sea absorbida por el cuerpo dependerá naturalmente tanto de su propia estructura como de la naturaleza de la radiación. Por esto al pasar la radiación a través del cuerpo una parte de aquella será absorbida y la radiación transmitida presentará características diferentes a la radiación incidente, con lo que se origina el espectro de absorción correspondiente al cuerpo. Si la radiación absorbida corresponde a un alto contenido de energía, se efectúa un cambio en los niveles de los electrones de las órbitas cercanas al núcleo. Tal es el caso de la absorción de los rayos X

Cuando la radiación absorbida tiene un contenido menor de energía, como en el caso de la radiación ultravioleta y la visible se efectúan cambios en los niveles de los electrones de las órbitas exteriores. La absorción de la radiación infrarroja ocasiona cambios en la energía vibracional de las moléculas. Y por último la absorción de la radiación del infrarrojo lejano o de las microondas produce cambios en la energía rotacional de las moléculas. Lo anterior aparece tabulado a continuación:

Zonas de radiación	Longitud de onda (angs-troms)	Energía absorbida en Kcal/mol	Cambios originados por la absorción
Rayos X	1	2.9×10^5	Nivel de los <u>elec</u> <u>trones</u> interiores id
Ultravioleta	30	9.5×10^3	
en vacío	2000	143	
Ultravioleta	2000	72	Nivel de los <u>elec</u> <u>trones</u> ext. id.
	4000		
Visible	4000	36	
Infrarrojo	8000		Energía vibracional id.
muy cercano	8000	9.5	
	30000		
Infrarrojo	30000		Energía rotacional
cercano	250000	1.1	
Infrarrojo	250000	0.0029	
lejano hasta microondas	1 cm		

Para la energía solar se comprende entonces que se necesitaría para su utilización que un cuerpo absorbiera la mayor cantidad de energía radiante.

II.2.6 Transmitancia

Primero veremos que es la luz incidente:

Luz incidente.- significa el rayo de luz que cae sobre un cuerpo, y que puede ser parcialmente reflejado. La luz que

penetra a través del cuerpo a su vez puede ser absorbido y en tonces se designa como luz absorbida y el resto de la luz pasa a través del cuerpo, por lo que se designa como luz transmitida. Generalmente la intensidad de luz incidente, se puede considerar como un valor fijo en todo el experimento y se representa como I_0 , la luz transmitida que será solo una fracción de la luz incidente se representa como I . En el caso de materiales transparentes la cantidad de luz reflejada se puede considerar como nula.

Transmitancia.- Es la relación que existe entre la cantidad de luz transmitida y la cantidad de luz incidente. Si se designa con T la transmitancia, se tiene la relación $T = I/I_0$.

Entre más claro es un cuerpo mayor, es su transmitancia y entre más opaco menor es su transmitancia. Para la utilización de un cuerpo o superficie en energía solar, es pecíficamente para una superficie transparente se necesita alta transmitancia de la radiación entrante (radiación solar), para que llegue la mayor cantidad de energía a la superficie captadora, después esta superficie dependiendo de sus propiedades, absorbe la mayor cantidad de esta energía y la emite en forma infrarroja (radiación térmica) por lo cual se necesita que la superficie transparente sea opaca a este tipo de radiación; en la presente tesis se presentan los materiales más

adecuados para ésto, de los que se pueden seleccionar el óptimo; generalmente son superficies transparentes plásticas o vidrios cuya función es dejar pasar la mayor cantidad de energía radiante a la superficie captadora, y evitar pérdidas de energía por el aire que circularía si no hubiera superficie transparente. El diseño básico se presenta en la fig 2.1.

Además se pueden combinar dos o más superficies transparentes con el objeto de disminuir las pérdidas de radiación térmica al exterior; ésto tendría el inconveniente de bajar la transmitancia. Sin embargo, una combinación adecuada daría un mejor aprovechamiento.

II.2.7 Teoría del cuerpo negro

Se denomina cuerpo negro a aquel cuerpo que absorbe totalmente la radiación que llega a su superficie, o sea que es un perfecto absorbedor de energía, esto es una absorbancia igual a la unidad y una reflectancia igual a cero.

La idea de un cuerpo negro se desprendeó principalmente de que el color negro absorbe toda la luz y no refleja nada, entonces se suponía que debería haber un cuerpo que fuera a -

absorber toda una energía radiante entrante y después emitirla en forma de calor sin reflejar nada, este cuerpo se suponía un cuerpo negro perfecto, para este cuerpo la transmitancia es igual a cero su reflectividad igual a cero y su absorbancia igual a 1.

Los cuerpos negros no existen en la naturaleza, aunque si bien muchos materiales se aproximan a este comportamiento. Se puede ver que el cuerpo negro emite radiación en la mayor proporción posible que cualquier otro cuerpo de igual tamaño y forma a la misma temperatura.

Aunque no existen en la naturaleza nos podemos ingeniar para realizar de una manera experimental un cuerpo negro; empleando una cavidad que sea rugosa, pintada de negro por dentro, enteramente cerrada y que sólo tiene una pequeña abertura en una de sus paredes, cualquier radiación que logra entrar a esa cavidad tiene una probabilidad pequeñísima de salir después, y por consiguiente ese dispositivo funge como un absorbente perfecto.

De tal manera que mientras un cuerpo se acerque a ser un cuerpo negro perfecto mejor es su utilización como captador de energía solar.

Los hechos experimentales efectuados sobre diferentes cuerpos dan valores de emisión a una temperatura dada. De acuerdo

con ésto se verá qué tanto se aproxima a cuerpo negro y como se puede aprovechar.

En un cuerpo real (radiador imperfecto, cuerpo natural, etc) mientras más se acerque a cuerpo negro perfecto su absorbancia tenderá a ser la unidad. En los cuerpos opacos la transmis tancia tenderá a cero, y tendrán una cierta absorción y una cierta reflexión de energía radiante, dependiendo que tan pul lida o que tan opaca esté dicha superficie; mientras más se tiende a cuerpo negro perfecto, la energía reflejada va siendo menor hasta llegar a cero y la energía absorbida será igual a la energía radiante incidente.

En la actualidad se están haciendo estudios para llegar a tener una superficie captadora que se comporte como un cuerpo negro perfecto; dichas superficies se les ha denominado "superficies selectivas". Estos estudios comprenden la parte de la química llamada electrodepósito y electroformación, en un capítulo posterior veremos más a fondo ésto, mientras diremos que el encontrar una superficie que tendiera a ser un cuerpo negro perfecto, daría a la utilización de la energía solar un gran avance.

II.2.8 Leyes fundamentales

II.2.8.1 La ley de Kirchhoff

Como vimos anteriormente, la radiación térmica que cae sobre un objeto será parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y parcialmente transmitida. Las proporciones de la energía incidente que son absorbidas, reflejadas y transmitidas, dependen primero de las características del receptor pero también, y en menor grado de la longitud de onda de la radiación y de la temperatura del receptor. Por ejemplo la mayor parte de los sólidos absorben o reflejan toda la energía radiante que les llega, pero el vidrio es transparente a la radiación de longitud de onda corta (ultravioleta y visible), en tanto que para la longitud de onda larga (infrarroja) es casi opaca. Esto se ve en las gráficas de transmisión de energía radiante para materiales transparentes (figs 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, y 3.6). Estas condiciones pueden establecerse en forma más concisa diciendo:

$$\rho + \alpha + t = 1$$

en donde:

- ρ reflectividad, la fracción de la radiación total incidente que es reflejada
- α absorptividad, la fracción de la radiación total incidente que es absorbida
- t transmitancia, la fracción de la radiación total incidente que es transmitida para pasar a través de un cuerpo

para un cuerpo opaco la transmitancia tenderá a cero y la ecuación anterior quedará reducida a:

$$\rho + \alpha = 1$$

Sin embargo, para materiales transparentes la situación es diferente. Para longitudes de onda que caigan dentro del visible y el infrarrojo cercano, la transmitancia se aproximará a uno y por lo tanto la absorptividad y reflectividad serán muy pequeñas. En cambio para el ultravioleta, la transmitancia será casi igual a cero y casi toda la radiación incidente será o bien absorbida o bien reflejada.

De tal manera la ley de Kirchhoff puede deducirse así:

Si una radiación llega a un cuerpo negro perfecto, podemos establecer un balance de energía.

$$e_{\bar{b}_n} = \text{radiación al cuerpo negro}$$

$$e_{\bar{b}_e} = \text{radiación del cuerpo negro al exterior (emisión)}$$

$$e_{\bar{b}_n} = e_{\bar{b}_e}$$

Si la radiación llega a un cuerpo que no es negro, el balance de energía quedaría así:

$e_{\bar{b}}$ = radiación que llega al cuerpo no negro

$\alpha e_{\bar{b}}$ = radiación absorbida por el cuerpo no negro

$(1-\alpha) e_{\bar{b}}$ = radiación reflejada por el cuerpo no negro

de tal manera:

$$e_{\bar{b}} = \alpha e_{\bar{b}} + (1 - \alpha) e_{\bar{b}}$$

Si "e" se define como la proporción real en la cual la energía radiante se absorbe y consecuentemente se emite por el cuerpo que no es negro, quedará como:

$$e = \alpha e_{\bar{b}} = \epsilon e_{\bar{b}}$$

que define ϵ , la emisividad, como la relación de la proporción a la cual se radia energía de una superficie unitaria, y aquella a la cual radiará de la superficie negra de área igual por lo que tenemos:

$$\epsilon = \alpha$$

Esta relación es conocida como la Ley de Kirchhoff.

Puesto que α es dependiente de la temperatura, ϵ debe serlo también. Así pues la Ley de Kirchhoff es válida solamente a temperatura constante o en otras palabras se requiere que exista equilibrio térmico entre emisor y receptor.

II.2.8.2 Ley de Stefan-Boltzmann

La relación existente entre la temperatura de emisión de un cuerpo negro y la proporción de la emisión radiante, fue deducida por vez primera en forma empírica por *Stefan*, y posteriormente probada por *Boltzmann*, considerando una analogía entre la radiación de un cuerpo negro y el comportamiento de un gas perfecto.

Se ha visto tanto experimentalmente como teóricamente que al elevar la temperatura de un cuerpo la cantidad de radiación emitida aumenta mucho más rápidamente que la temperatura. *Stefan* demostró que la radiación total de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, o sea:

$$E_t \text{ proporcional a } T^4$$

para establecer igualdades se introdujo una constante que se llama constante de *Stefan-Boltzmann*, cuyos valores son:

$$\begin{aligned} \sigma &= 5.7 \times 10^{-5} \text{ ergio/seg/cm}^2 / \text{ }^\circ\text{K}^4 \\ \sigma &= 5.7 \times 10^{-12} \text{ W cm}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4} \\ \sigma &= 5.7 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4} \\ \sigma &= 8.2 \times 10^{-11} \text{ cal cm}^{-2} \text{ mn}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-4} \\ \sigma &= 1.73 \times 10^{-9} \text{ BTU/pie}^2 \text{ h } \text{ }^\circ\text{K}^{-4} \end{aligned}$$

quedando la ecuación como:

$$E_t = \sigma T^4$$

Siendo E_t , la energía radiante total emitida por el área unidad de la superficie del cuerpo negro por unidad de tiempo. No se toma en cuenta aquí el hecho de que la energía radiante es absorbida, así como emitida o que toda la energía emitida puede muy bien no golpear a un receptor dado. La ecuación de *Stefan Boltzmann*, tampoco da información acerca de la distribución de longitud de onda de la radiación emitida.

II.2.8.3 Ley de desplazamiento de *Wien*

Si graficamos la energía de radiación emitida por un cuerpo negro contra longitud de onda veremos la distribución de ésta, (fig 2.4), a las curvas graficadas se les llama curvas de distribución de energía.

Es enormemente importante observar la forma que tiene una curva de distribución de energía, para cierta longitud de onda intermedia alcanza un máximo, mientras que para longitudes de onda muy pequeñas o muy grandes es pequeña. Además comparando la curva (I) que da la distribución de las energías a baja temperatura con la (II) que da la misma - -

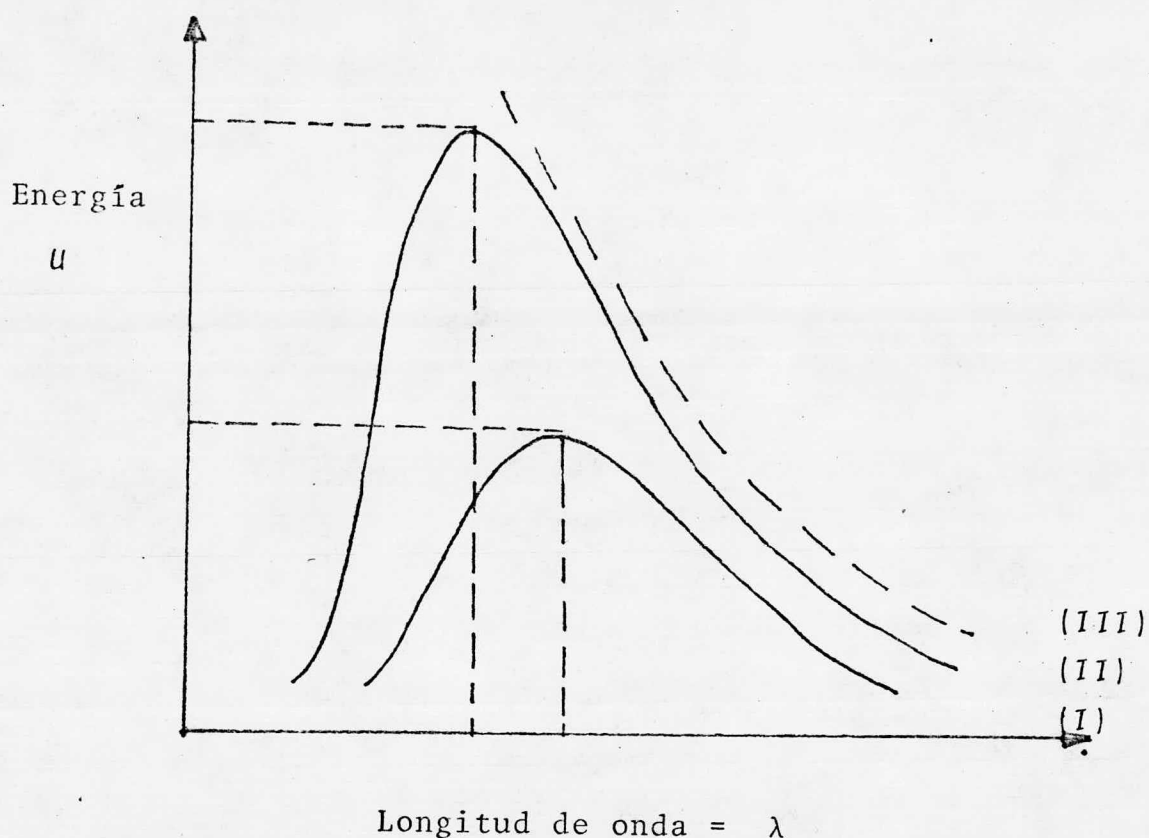


Fig 2.4 Distribución de la energía emitida por un cuerpo negro

distribución a una temperatura más elevada se observa que el máximo no corresponde a la misma longitud de onda, sino que al elevarse la temperatura al máximo de energía sufre un corrimiento hacia el violeta. A este principio se le llama la ley de *Wien*, ley que se puede expresar como sigue: "el producto de la longitud de onda que contiene máxima energía por la temperatura absoluta es una cantidad constante".

$$\lambda_{m\acute{a}x.} T_{m\acute{a}x.} = cte. = \beta$$

Donde β , es una constante encontrada experimentalmente como igual a 2880-2900 micras $^{\circ}K$ ó 5,193 micras $^{\circ}R$, así que a 290 $^{\circ}K$ ($17^{\circ}C$), $\lambda_{m\acute{a}x.} = 10$ micras, a 6000 $^{\circ}K$ (temp. del sol), $\lambda_{m\acute{a}x.} = 0.5$ micras. Se observa inmediatamente que la emisión correspondiente a esta radiación varía proporcionalmente a T^5 .

II.2.4.8 La hipótesis de Max Planck

Planck supuso que los cuerpos no irradian, ni absorben energía continuamente, como el agua que sale en un chorro, sino en forma discontinua, como el agua que gotea por una llave mal cerrada. Supuso que una radiación de frecuencia ν , es emitida en paquetes o cuantos de magnitud $h\nu$, siendo h una constante que tiene el mismo valor para todas las frecuencias. Comenzando con esa hipótesis y aplicando las leyes de la probabilidad llegó a una ecuación que se ajusta exactamente a las curvas experimentales.

Hipótesis en contraposición con la teoría ondulatoria de la luz, ya que según ésta última, la energía es irradiada en forma continua. Sin embargo, la teoría ondulatoria y la cuántica no son sino dos aspectos del mismo proceso. En otras palabras al considerar el movimiento mediante el cual se efectúan el proceso de transmisión de energía, es útil tratar dicho proceso como un fenómeno ondulatorio, pero al tratar los valores de la energía irradiada por un cuerpo o recibida por otro, resulta que la energía está en forma de pequeñísimas cantidades discretas llamadas cuantos y que para calcular la cantidad de energía U , en un cuanto dado basta multiplicar la frecuencia de vibración por la constante de Planck, h , que vale:

$$h = 6.6.26 \times 10^{-34} \text{ J.s o sea}$$

$$U = h \nu$$

La fórmula de Planck, plantea la teoría cuántica, complementándose con resultados experimentales, en lo siguiente:

La relación entre la intensidad de la radiación I a una longitud de onda dada λ y la temperatura T , esta dada por:

$$I = \frac{A (8\pi hc) \lambda^{-5}}{e^{-hc/\lambda K T} - 1}$$

donde:

A	área del radiador
h	constante de <i>Planck</i> (6.6256×10^{-27} erg seg)
c	velocidad de la luz en el vacío (2.9979×10^{10} cm seg ⁻¹)
σ	constante de <i>Boltzmann</i> (1.3805×10^{-16} erg °K ⁻¹ mol ⁻¹)

para un cuerpo negro, la radiación dentro del intervalo (λ , $\lambda + d\lambda$), para la temperatura T

$$I_{\lambda, T} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

donde:

$$C_1 = 3.74 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2$$

$$C_2 = 14385, \text{ si se expresa } \lambda \text{ en micras}$$

y T siempre en °K

A partir de esta fórmula se puede calcular la repartición espectral de la energía radiada por el cuerpo negro a la temperatura absoluta T, designando $\lambda_{m\acute{a}x}$ la longitud de onda máxima y se ve que:

de $0.5 \lambda_{m\acute{a}x}$, relativamente no hay energía radiada (menos de 1% de M, M = emitancia energética o radiancia).

- Para longitudes de onda comprendidas entre $0.5 \lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{a}x}$ la energía radiada es del orden de 1/4 de M.
- Para longitudes de onda superiores a $8 \lambda_{m\acute{a}x}$ la energía radiada es aproximadamente de 1% de M.

Así, a una temperatura dada, el cuerpo negro emite prácticamente toda su energía dentro del rango: $0.5 \lambda_{m\acute{a}x}$ y $10 \lambda_{m\acute{a}x}$.

- Para la tierra a $300 \text{ }^\circ\text{K}$ ($27\text{- }^\circ\text{C}$), estos límites corresponden a 5 y 100 micras ($\lambda_{m\acute{a}x}$ cerca de 10 micras).
- Para el sol, suponiéndose a $6000 \text{ }^\circ\text{K}$, los límites están entre 0.25 y 5 micras ($\lambda_{m\acute{a}x}$ cerca de 0.5 micras).

II.2.8.5 El proceso de la emisión de las radiaciones

Los electrones que giran alrededor de los átomos ocupan unas ciertas órbitas con las cuales se considera asociado un cierto "nivel de energía" o sea cierta cantidad de energía correspondiente a cada estado en que se encuentran los electrones.

Como consecuencia de lo anterior, para remover un electrón de esos niveles se requiere una cierta cantidad de energía u_x , que debe provenir de la energía cinética de un electrón que venga del exterior o bien de la energía radiante de otra fuente emisora de ondas.

En las condiciones normales de un átomo los diversos niveles están ocupados por los electrones y si alguno de ellos es expelido o sea arrojado hacia una órbita exterior, queda un lugar vacío al cual puede regresar. Al caer en ese hueco el electrón emite la energía que le permitió pasar de la órbita interior a la exterior, y es esa energía la que es irradiada al espacio en forma de luz de longitud de onda λ , de frecuencia ν valor $h\nu$. La energía que contiene un cuanto de frecuencia determinada, no sufre alteración mientras la luz correspondiente se propaga en el vacío.

II.2.9 Coeficiente de emisividad

De acuerdo con todo lo anteriormente visto, para utilizar la energía solar necesitamos saber la medida de la emisividad en una superficie captadora; para ésto usamos lo que se denomina coeficiente de emisividad; que es la relación que existe entre la energía emitida por un cuerpo negro perfecto, y la energía de un cuerpo que tiende a serlo. De tal manera para un cuerpo negro:

$$E_e = \sigma T_p^4$$

y para un cuerpo no negro:

$$E_e = \epsilon \sigma T_p^4$$

donde:

T_p	temperatura de la superficie captadora
σ	constante de <i>Stefan-Boltzmann</i>
ϵ	coeficiente de emisividad
E_e	energía emitida o emisión de la superficie captadora

de tal manera:

$$\frac{\text{emisión de un cuerpo no negro}}{\text{emisión de un cuerpo negro}} = \text{coeficiente de emisividad } (\epsilon)$$

Para un cuerpo negro este coeficiente será igual a 1 y para los otros menor a uno, nunca será mayor que la unidad.

De acuerdo con ésto, el coeficiente nos da la medida de qué tan cerca estamos de tener un radiador perfecto.

II.2.10 Coeficiente de absorción

De una manera parecida al anterior se determina un coeficiente de absorción, sólo que aquí vamos a medir energías absorbidas y no emitidas. En una superficie captadora, parte de la energía que llega se absorbe y parte se refleja; $E = \sigma T_p^4$ es la energía que llega, entonces la energía absorbida A es igual:

$$A = E - R, \text{ donde } R = \text{energía reflejada}$$

para un cuerpo negro no habrá reflexión y $A = E$

de tal manera:

$$\frac{\text{energía absorbida por un cuerpo no negro}}{\text{energía absorbida por un cuerpo negro}} = \text{coeficiente de absorción } (\alpha)$$

para un cuerpo negro este coeficiente será igual a uno y para un cuerpo no negro el coeficiente será menor a la unidad, este coeficiente nunca será mayor a la unidad, de tal manera con esto vemos que:

$$\epsilon = \alpha$$

en equilibrio térmico entre emisor y receptor.

III. MATERIALES TRANSPARENTES

III.1 Definición y clases de materiales

Una de las partes principales de toda unidad de calentamiento mediante absorción de energía solar, es la cubierta transparente, que permite la mayor o menor transmisión de energía a la superficie captadora, por lo tanto es necesario conocer a fondo las propiedades de las cubiertas transparentes, así como las de sus diferentes combinaciones, para poder escoger con un criterio adecuado.

A las superficies transparentes usadas para utilizar la energía solar se pueden denominar también con el término de "Diathermanus", el cual es aplicado al material capaz de transmitir energía radiante.

Un diseño típico de un colector de energía solar, (fig 2.1) consiste en una unidad encerrada con uno o dos paneles de un medio transparente que es transmisor de la energía solar, y una superficie captadora de alta absorbancia, bajo los paneles; conteniendo medios para la circulación del fluido calentado, el cual es directamente utilizado o bombeado a un tanque de almacenamiento. Cuando se utilizan dos paneles o más del medio transmisor de la luz solar, deberán estar herméticamente sellados con un espacio al vacío entre ambos.

Las características del panel transmisor son:

- Transmitir a la superficie captadora una máxima cantidad de la energía solar incidente.
- Si se utilizan instalaciones de dos paneles, deben de tener una combinación óptima de propiedades para que den un rendimiento máximo.
- Esta combinación de propiedades permite una alta transmisión de energía solar radiante y un bajo coeficiente total de transferencia para la iniciación del sistema.

Los materiales transparentes más usados, son los plásticos y los vidrios.

En la presente tesis se han seleccionado varios materiales transparentes, que se creen más adecuados para utilizarlos en energía solar. Algunos investigados bibliográficamente, y otros usados en México analizados por técnicas espectrofotométricas.

Son adecuados los materiales de alta calidad y de resistencia al medio ambiente, que presenten poca tendencia al rayado y con propiedades utilizables dentro de este campo, entre estos materiales se encuentran los siguientes:

Vidrio

Primero empezaremos analizando el vidrio común de una ventana; este vidrio tiene un color ligeramente verdoso, es del tipo sílice-soda-cal y cuya fórmula típica es:

<u>Substancias</u>	<u>% de contenido</u>
SiO ₂	72.8 - 73.0
CaO	8.5 - 8.9
MgO	3.4 - 3.5
Na ₂ O + K ₂ O	13.1 - 13.3
Minor (Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , SO ₃)	1.2 - 1.4
Fe ₂ O ₃	0.15

de estos constituyentes el de mayor efecto sobre las propiedades ópticas útiles es el Fe₂O₃, ya que para una transmitancia solar máxima el contenido de Fe₂O₃, debe ser reducido y para máxima absorción de calor debe ser incrementado. De este modo, se pueden tener combinaciones, aumentando o disminuyendo el contenido de Fe₂O₃ para aumentar o disminuir la cantidad de calor absorbido por el vidrio, tratando de no afectar grandemente la transmitancia en el espectro visible.

Se tienen entonces fórmulas típicas para paneles de vidrio con contenido alto, medio y bajo de Fe_2O_3 .

<u>Substancias</u>	<u>Contenido, en %</u>
SiO_2	71.9 - 72.2
CaO	11.1 - 11.2
MgO	2.0 - 2.1
Na_2O	13.7 - 13.8
Minor ($\text{Al}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2,$ SO_3)	0.6 - 0.8
Fe_2O_3 bajo contenido	0.03
contenido medio	0.12
alto contenido	0.48

Las figs 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 muestran los efectos de 4 porcentajes de Fe_2O_3 , para diferentes espesores de vidrio, sobre el porcentaje de luz transmitida (radiación en incidencia normal). Para el porcentaje de bajo contenido (fig 3.3), la transmitancia sube a más de 90% en la región del ultravioleta (debajo de 400 milimicras), presentando picos altos y uniformes a través del visible y parte del infrarrojo, teniendo caídas repentinas en cerca de 2.7 micras más allá del cual disminuye hasta cero, en cerca de 4.5 micras en su región de nivel alto, la reducción de transmitancia es causada casi enteramente por la reflexión.

Cuando el contenido de Fe_2O_3 , está por su nivel medio (fig 3.1), se nota una variación bastante marcada entre los dos espesores cuando la longitud de onda se acerca al infrarrojo, esto se puede deber a que en el visible los dos espesores ab sorben proporcionalmente, pero al acercarse al infrarrojo el de mayor espesor absorbe radiación infrarroja en mayor can tidad, disminuyendo su capacidad de transmitancia. En el ca so de vidrio con alto contenido de Fe_2O_3 (fig 3.2), éste exhibe una disminución repentina en el visible y cerca del infrarrojo. El color azulado que presenta es causado por esta absor ción selectiva.

Para colección máxima de energía solar, es como dijimos deseable tener la más alta transmitancia posible a través del espectro solar, incluyendo infrarrojo a una longitud de onda cerca de 2.5 micras.

Para la radiación en longitudes de onda más allá del infrarrojo, el medio transparente del colector debe tender a ser opa co, así como tener barreras para evitar la radiación a las paredes externas (fugas térmicas).

Existen además vidrios con menor proporción de óxido de hierro, ellos son:

Vidrio-hoja-lima - que tiene un bajísimo contenido de Fe_2O_3 de (0.05 a 0.06 %).

Un vidrio más puro el llamado "agua blanca", que tiene el más bajo contenido de óxido de fierro, 0.01 % y que también se denomina vidrio No 76. Cuyas gráficas se presentan en las figs 3.5 y 3.6

Plásticos

Tienen una temperatura menor de operación a la de los vidrios, entre ellos tenemos:

- Polimetacrilato de metilo, que debe de tener como requisito: ser maleable, 100 % acrílico e incoloro, también se le llama: acrílico, acrilita, lucita o flexiglass.
- Policarbonato.- Uno de los plásticos que tienen la fama de ser el plástico más duro, tiene una temperatura de operación mayor al anterior y debe ser de tipo estable a la luz, también se le llama: Lexan o Merlon.
- Politerftalato de etileno o poliester (Mylar)
- Fluoruro de polivinilo (Tedlar)
- Etileno fluorinado - propileno o fluorocarbón (teflón FEP)
- Poli imida (Kepton)
- Polietileno
- Poliestireno

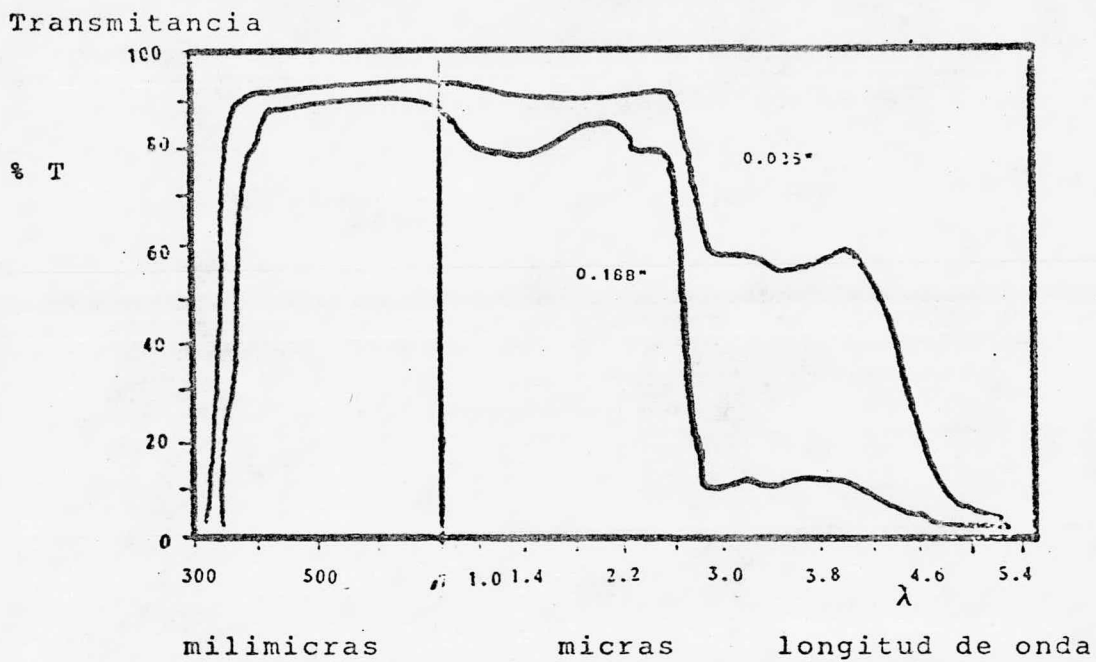


Fig 3.1 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL VIDRIO
CONTENIENDO 0.15 % de Fe_2O_3

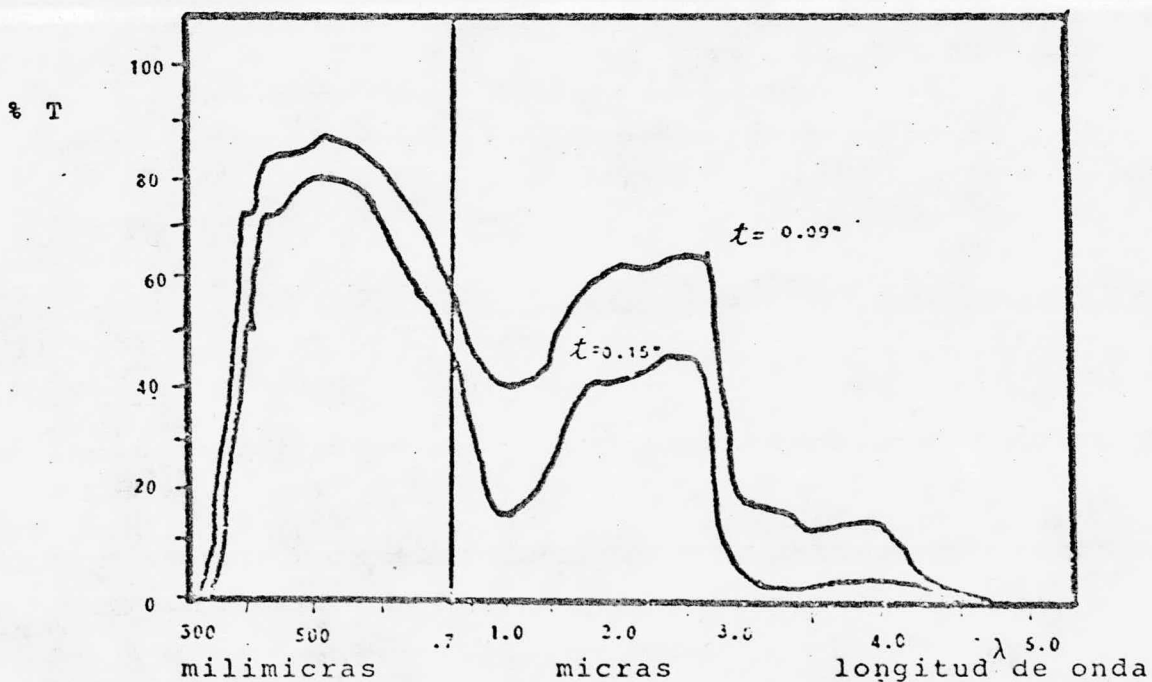


Fig 3.2 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DE VIDRIO
CONTENIENDO 0.48 % de Fe_2O_3 (cristal de
calor de absorción)

Transmitancia

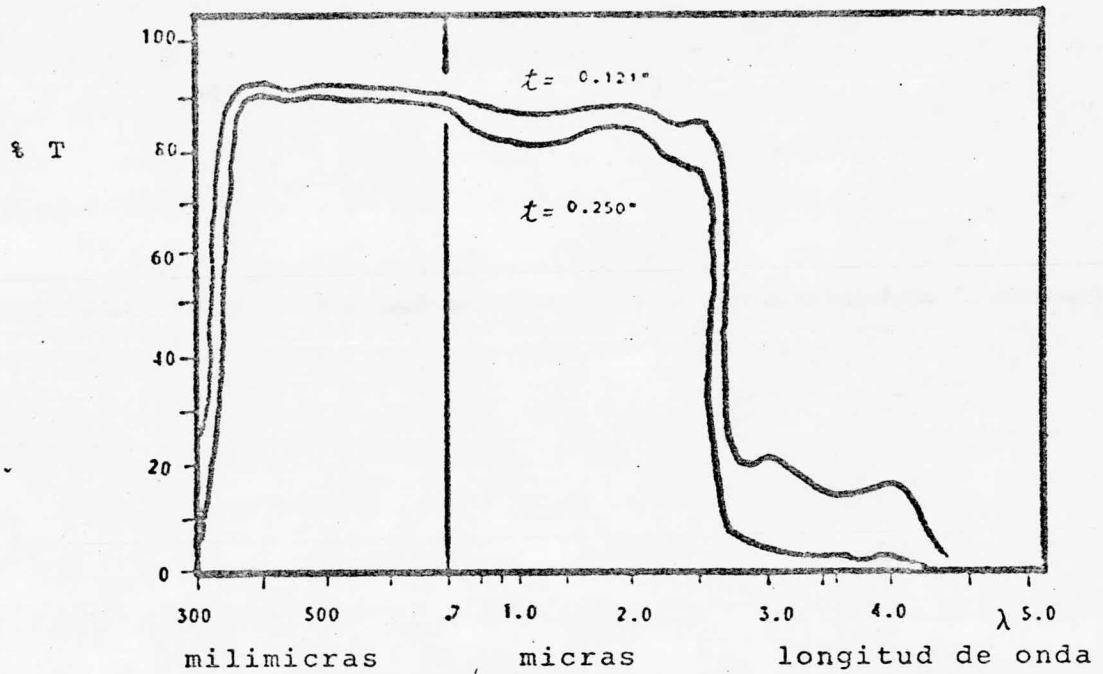


Fig 3.3 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL VIDRIO CONTENIENDO 0.035% de Fe_2O_3 (cristal de bajo contenido de Fe)

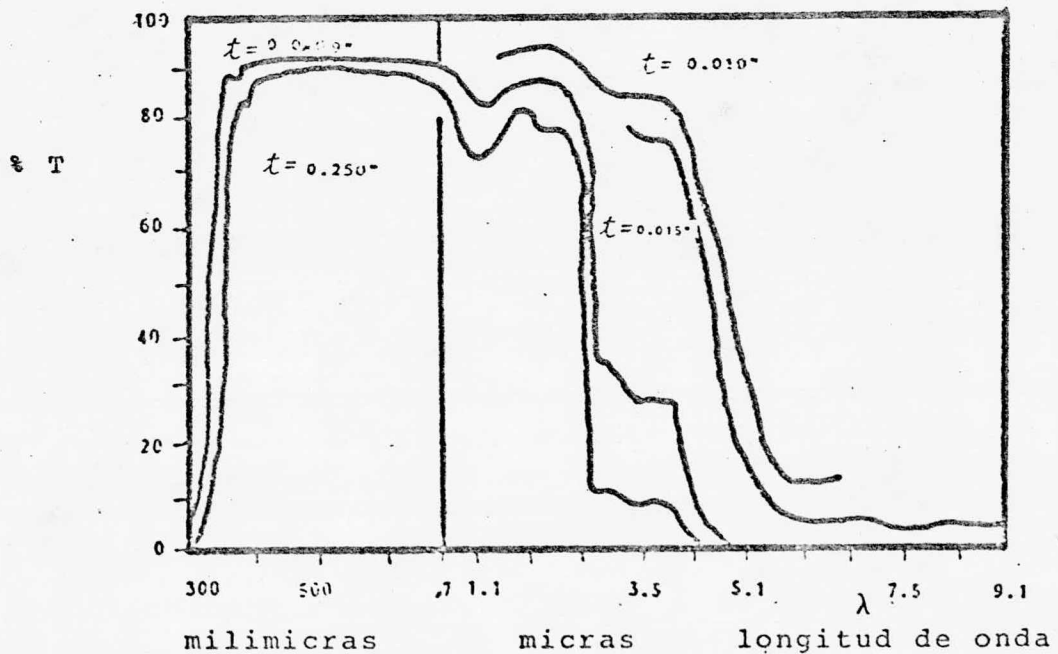


Fig 3.4 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DE VIDRIO CONTENIENDO 0.10 % de Fe_2O_3

Otros materiales

- Cristal templado
- Fibra de vidrio transparente - plásticos reforzados (Sun-Lite)
- Laminados plástico-plástico
- Laminados cristal-plástico

La selección de cubiertas transparentes debe verse desde el punto de vista que tengan mayor transmitancia en el visible y menor en el infrarrojo, o sea que deje pasar la mayor cantidad de energía solar y tratar de dejar escapar lo menos posible energía infrarroja; paneles de vidrio, acrílico y demás, todos tienen un índice de refracción en el orden de aproximadamente 1.5. Este índice de refracción causa aproximadamente 4% de reflexión de la luz total incidente en cada superficie de cada panel, produciendo una máxima transmitancia de 92% para un panel perfectamente transparente y no absorbivo. En una unidad de múltiples paneles la transmitancia total es virtualmente el producto del factor de transmitancia de cada panel.

III.2 Determinación de propiedades

III.2.1 Propiedades físicas y químicas

Para selección adecuada de la superficie transparente deben de considerarse las siguientes propiedades:

- a) Resistencia mecánica o resistencia al impacto. Adecuada para resistir por rompimiento o por impactos de intemperismo. (La resistencia mecánica es proporcional al cuadrado del espesor).
- b) Resistencia térmica (coeficiente de expansión). Adecuada para resistir expansión diferencial entre el área central calentada y los bordes protectores de enfriamiento (aún en condiciones de transferencia de fluido interrumpida en una instalación fuera de operación). La tensión térmica en los bordes se estima en 50 psi por °F, de diferencia entre el centro calentado y el borde enfriado. Entre más extensión y espesor tenga el vidrio, más baja es la probabilidad de resistencia moderada a altas diferencias térmicas, si no está templado.
- c) Flexibilidad (baja tensión mecánica). Es importante que el cristal sí esta ensamblado a una unidad de doble panel, tenga un sello hermético. La rigidez del cristal (resistencia a la flexión) es proporcional al cubo del espesor.
- d) Planalidad. Los requerimientos son más restrictivos para cristales aislados sellados, que para aquellos de un sólo

encristalado o encristalado múltiple no sellado, la planalidad de la superficie está en función de la reflexión causada, mientras menos planalidad presente la superficie más reflexión, y por tanto menos transmitancia.

- e) Contenido de F_e . Como se vió antes un cristal con más bajo contenido de F_e (óxido de fierro) tiene mayor transmitancia de la radiación entrante y mayor transparencia al infrarrojo.
- f) Espesor. El mayor o menor espesor nos dará una mayor o menor utilización, a mayor espesor hay menor transmisión de energía radiante a la superficie captadora, pero hay menor fuga de energía infrarroja al exterior, para menor espesor hay mayor transmitancia, pero también mayor escape térmico.

A continuación daremos algunas propiedades físicas importantes de cinco materiales vistos antes:

1. Vidrio común (contenido de un 0.10 a 0.13% de óxido de fierro).
2. Vidrio hoja lima (contenido de óxido de fierro de 0.05 a 0.06%).
3. Cristal agua blanca vidrio No 76 (contenido de óxido de fierro 0.01%)
4. Metacrilato de metilo (maleable, 100% acrílico, incoloro)
5. Panel de policarbonato transparente del tipo estable a la luz.

Tabla 3.1 PROPIEDADES FISICAS DE 5 MATERIALES TRANSPARENTES

Materiales	Tamaño Nominal (pulg) (mm)		Transmisión de energía solar por panel, en (%) (1)	Índice de refracción (1)	Tamaño nominal máximo recomendado pulgadas (cm)	Peso (lb/ft ²) (kg/cm ²)		Temperatura máxima de operación (°F) (°C)		Coeficiente de expansión (por °F) (por °C)	
1	1/8	3.2	85	1.52	34 x 76 (86.4 x 193)	1.63	7.96	400	204	8 x 10 ⁻⁷	87 x 10 ⁻⁷
	3/16	4.8	81		36 x 96 (91.3 x 244)	2.51	12.25				
	1/4	6.0	78		48 x 120	3.02	14.74				
2	DS	3.2	87	1.51	34 x 76 (86.4 x 193)	1.63	7.95	400	204	50 x 10 ⁻⁷	90 x 10 ⁻⁷
	3/16	4.8	85		36 x 96 (91.4 x 244)	2.51	12.25				
3	5/32	4.0	91	1.50	34 x 76 (86.4 x 193)	2.03	9.91	400	204	47 x 10 ⁻⁷	85 x 10 ⁻⁷
	3/16	4.7	90.5		36 x 96 (91.4 x 244)	2.41	11.77				
	7/32	5.5	90		48 x 96 (122 x 244)	2.80	13.67				
4	1/8	3.2	89	1.49	<u>Diámetro corto</u> 24 (61)	0.75	3.66	180 a 190	82 a 93	410 x 10 ⁻⁷	738 x 10 ⁻⁷
	3/16	4.7	87		36 (91.4)	1.10	5.37				
	1/4	6.2	85		48 (122)	1.50	7.32				
5	1/8	3.2	81	1.586	<u>Diámetro corto</u> 24 (61)	0.78	3.81	250 a 270	121 a 132	375 x 10 ⁻⁷	675 x 10 ⁻⁷
	3/16	4.7	78		36 (91.4)	1.17	5.71				
	1/4	6.2	74		48 (122)	1.56	7.62				

(1) Para evitar una posible repetición posterior de materiales enumeramos arriba dos propiedades ópticas

Tabla 3.1 (continuación)

Propiedades

Materiales	Módulo de elasticidad		Fuerza de tensión				Temperatura a la cual se deflecta en exceso de:		Resistencia al impacto	
	(psi) (10 ⁶)	(kg/cm ²) (10 ⁶)	Recocido (psi)	(kg/cm ²)	Templado (psi)	(kg/cm ²)	(°F)	(°C)		
1	10.5	.738	1 600	112.5	6 400	450	1100	600	3.2 mm de vidrio completamente templado y compacto en pruebas de 30.5 cm x 30.5 cm, resistirá en 3.05 m, la caída de una bola de acero de 0.227 kg (0.69 kg m de impacto), también deberá resistir suavemente el impacto de un cuerpo de 4.99 kg dejado caer de 2.44 m (12.2 kg-m de impacto). El nivel de la temperatura tiene pequeños efectos sobre esta acción.	
2	10.5	.738	1 600	112.5	6 400	450	1100	600		
3	10.5	.738	1 600	112.5	6 400	450	1600	600		
			<u>Promedio última fuerza tensil</u>							Haciendo pasar el impacto de una bola de acero: 3.2 mm (1.36 kg-m) 4.7 mm (2.38 kg-m) 6.2 mm (4.08 kg-m)
			(psi)		(kg/cm ²)		215	119.0		
4	.45	0.032	10,500		738		a	a		
							264 psi	18.6 kg/cm ²)		
5	.45	0.032	9,500		668		270	130	No hay datos disponibles, sin embargo debe resistir más altura de impacto que el acrílico.	
							a	a		
							264 psi	18.6 kg/cm ²)		

Tabla 3.1 (continuación)

Materiales	Propiedades
	(1) Energía Solar perdida por panel
1	<p style="text-align: center;">15 % (6.8 % A + 8.2 % R)</p> <p style="text-align: center;">19 % (11.0 % A + 8.0 % R)</p> <p style="text-align: center;">22 % (14.1 % A + 7.9 % R)</p>
2	<p style="text-align: center;">13 % (4.9 % A + 8.1 % R)</p> <p style="text-align: center;">15 % (7.0 % A + 8.0 % R)</p>
3	<p style="text-align: center;">9.0 % (1.0 % A + 8.0 % R)</p> <p style="text-align: center;">9.4 % (1.5 % A + 8.0 % R)</p> <p style="text-align: center;">10.0 % (2.0 % A + 8.0 % R)</p>
4	<p style="text-align: center;">11 % (7.6 % A + 3.4 % A)</p> <p style="text-align: center;">13.0 % (5.5 % A + 7.5 % R)</p> <p style="text-align: center;">15.0 % (7.6 % A + 7.4 % R)</p>
5	<p style="text-align: center;">19.0 % (9.2 % A + 9.8 % R)</p> <p style="text-align: center;">22.0 % (12.4 % A + 9.6 % R)</p> <p style="text-align: center;">26.0 % (16.0 % A + 9.4 % R)</p>

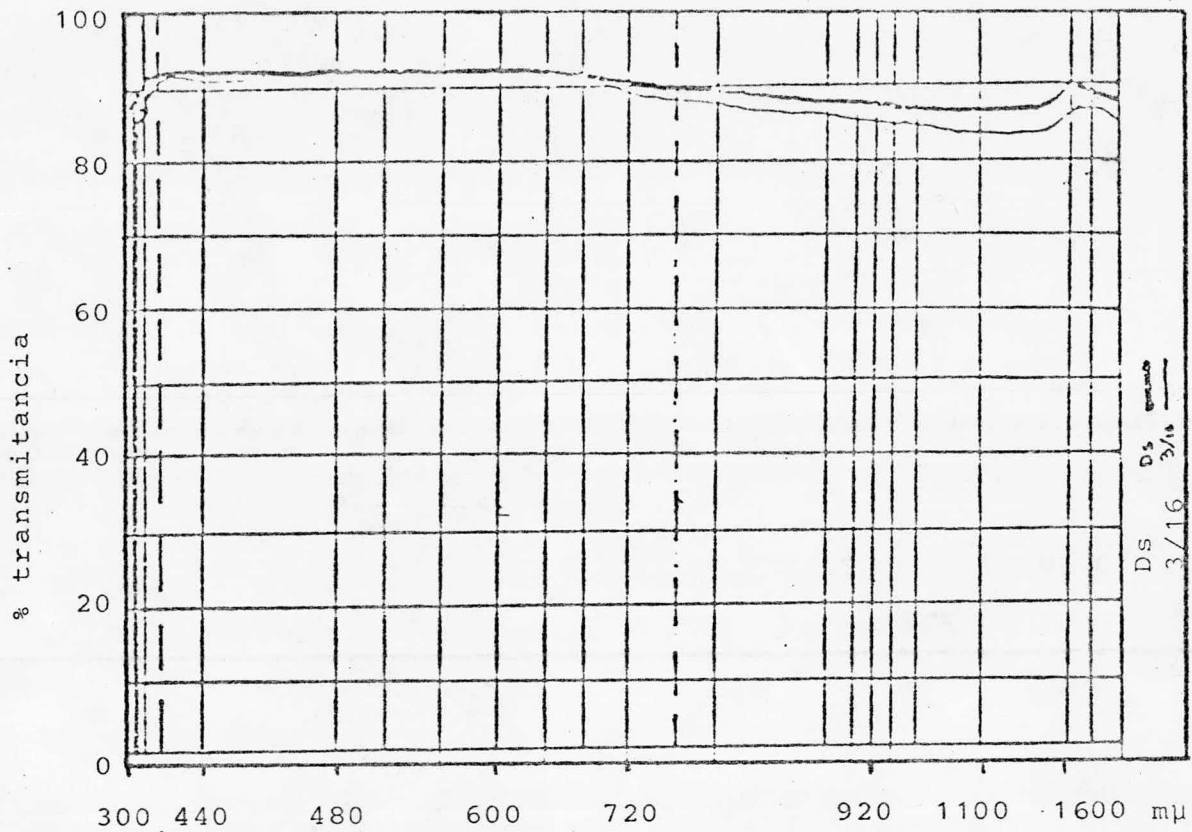


Fig. 3.5 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL VIDRIO
HOJA - LIMA

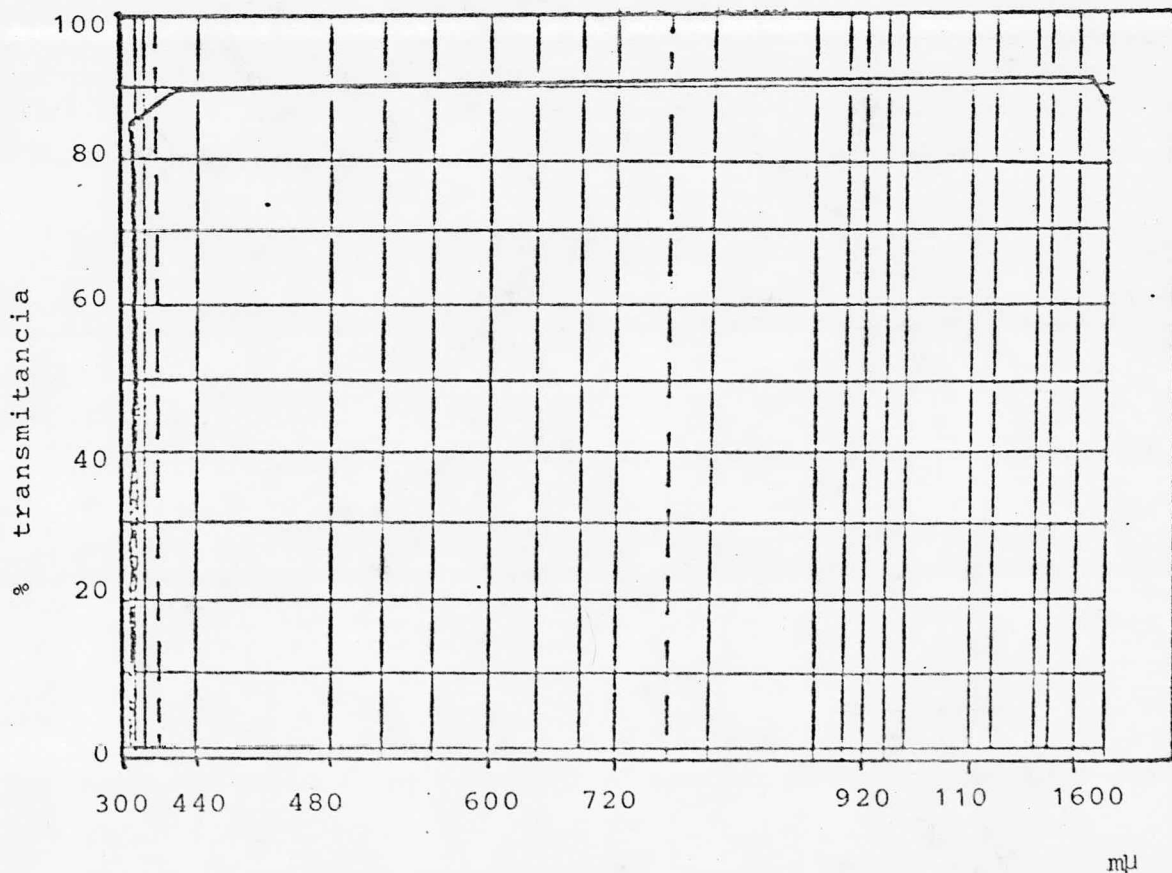


Fig 3.6 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL VIDRIO
AGUA-BLANCA

Otros materiales

Peso de material para cubiertas.-

Material	Peso (lb/ft ² para 1/8" de espesor)
Vidrio	1.69
Etilen-propileno-fluorinado (Teflon FEP)	1.39
Plástico fibra de vidrio reforzado	0.94
Politereftalato de etileno	0.30 para .040" de espesor
o poliester (Mylar)	0.88
Fluoruro de polivinilo (PVF)	0.86
Policarbonato	0.77
Polimetacrilato de metilo	0.75
Polietileno	0.62

Comparación de propiedades.-

Material	Intemperismo (resistencia UV)	Limite de temperatura (°C)	Resistencia a fractura
Polietileno	P	65	R
Polimetacrilato			
Film biaxialmente orientado	B	90	B
Lámina moldeada	B	90	R
Policarbonato	B	115	E
Mylar	E	105	E
Poli-imida	E	210	B
Teflón FEP	E	120	R
Plástico reforzado	B	50 (oscurece)	E
Vidrio templado	E	290	B

Comparación de materiales.- (continuación)

Fluoruro de polivinilo	E	107°C	B
------------------------	---	-------	---

CLAVES: E - excelente
 B - bueno
 R - regular
 P - pobre

III.2.2 Propiedades ópticas

III.2.2.1 Por antecedentes bibliográficos

Las propiedades ópticas a considerar son: índice de refracción, absorptividad del vidrio o plástico para la radiación de diferentes fuentes y temperaturas, además se debe considerar la transmitancia de energía solar a través del panel. Estas características son función de la longitud de onda de la radiación incidente. La longitud de onda considerada, está entre 0.20 micras y 3.0 micras, que incluye el espectro solar. En esta banda incluye el ultravioleta, el visible y parte del infrarrojo. El segundo rango considera sólo la longitud invisible del infrarrojo entre 4 micras y 100 micras. Este rango es característico de cuerpos radiantes teniendo temperaturas entre 32° y 212°C. El vidrio ordinario transmite en longitudes de onda más cortas con relativa facilidad, siendo opaco a rangos más grandes de longitud de onda. Sólo este último rango necesita ser considerado para la absorción y el índice de refracción.

Para propósitos prácticos estas propiedades pueden ser consideradas constantes a través de la longitud de onda del espectro solar.

La definición de las propiedades anteriores fueron vistas en un capítulo anterior.

Las características de absorción dependen de los constituyentes del vidrio. Los óxidos férrico y ferroso se utilizan para aumentar la absorción. El primero es altamente absorbente en la porción ultravioleta del espectro, y el segundo en la porción infrarroja, y varios grados de absorción son obtenidos por el control de las cantidades de esos dos compuestos. El espesor de la lámina transparente es también un factor importante ya que reduce la transmisión de la energía radiante. Por otra parte, entre más grueso sea el material hay menor fuga de energía térmica al exterior, hay que saber combinar adecuadamente lo anterior. Teóricamente el 56% de la energía total podría ser eliminado por un cristal absorbente de calor sin alterar las cualidades transmisoras de la luz.

El calor específico y la densidad del cristal son relacionadas con efecto de almacenaje. En las instalaciones con vidrio ordinario, este efecto no importa.

La conductividad térmica específica no es de gran importancia en transferencia de calor porque aunque el valor es bajo comparado con los metales, es alto comparado a la conductancia del aire a los lados de la lámina transparente. También las láminas de cristal comunes son delgadas comparadas con el espesor de otros materiales de construcción los cuales tienen conductividades mucho más bajas.

Para simplificar el análisis del problema, los efectos de la radiación solar y de la diferencia de temperatura fueron considerados separadamente. La radiación directa y la del cielo son tratados también de esta forma. La radiación directa se refiere a la energía radiante del rayo del sol directamente a la tierra. La radiación del cielo se refiere a la radiación de longitud de onda corta del sol que ha sido dispersada por la atmósfera y viene a la tierra en todas direcciones; no incluye la longitud de onda larga absorbida por el vapor de agua atmosférica.

Transmisión de energía solar de vidrios diferentes.-

Vidrio	Espesor	Transmisión de energía solar, (por lámina %)
No 76	5/32"	91
Blanco-agua	3/16"	90.05
	7/32"	90.0
Hoja-lima	DE	87
	3/16"	85
Starlux	1/8"	85
	1/4"	78

Transmitancia de energía solar en por ciento para varios materiales:

Material	Por ciento de transmitancia solar	Longitud de onda
Polietileno (film 2mm)	92	86
Polimetacrilato de metilo	92	-
Policarbonato	85-91	Baja
Politereftalato de etileno (2mm)	84	-
Floururo de polivinilo (4mm)	92	30
Etilen propileno fluorinado (2mm)	97	73
Plástico-fibra de vidrio reforzado (0.25" -.040")	86-93	-
Vidrio	88-95	--

III.2.2.2 Método de cálculo de transmisión, absorción y reflexión de radiación solar directa a través de un vidrio plano

Las siguientes fórmulas expresan la energía transmitida, absorbida y reflejada como fracciones de la energía incidente.

T_1 , A_1 y R_1 , representan esas fracciones, respectivamente:

$$T_1 = (1-\kappa)^2 \frac{g}{1-\kappa^2 g^2} \text{-----} 1$$

$$A_1 = 1-\kappa - (1-\kappa)^2 \frac{g}{1-\kappa g} \text{-----} 2$$

$$R_1 = \kappa + \kappa g^2 \frac{(1-\kappa)^2}{1-\kappa^2 g^2} \text{-----} 3$$

La evaluación del término derecho de cada ecuación, requirió de dos cálculos separados, uno para cada valor de κ de acuerdo a las leyes de reflexión de *Fresnel*, T_1 , A_1 y R_1 , se encontraron por promedio aritmético de esos resultados. El término g expresa el agotamiento de la energía solar por absorción, g y κ son funciones del ángulo de incidencia.

Las figs 3.7 y 3.8 muestran la absorción y la transmisión expresadas en porcentajes como función del ángulo de incidencia y la característica de absorción KL del cristal, KL es el producto de extinción o coeficiente de absorción K , con el espesor del cristal, L . El término es adimensional ya que K se expresa en absorción por pulgada y L esta en pulgadas.

Si se consideran dos láminas de vidrio. El subíndice 1 se refiere a las fracciones transmitidas, absorbidas o reflejadas por la lámina exterior, como si fuera una sola lámina. De igual manera el subíndice 2 se refiere a la lámina interna, el subíndice 1, 2 se refiere a la combinación.

$$T_{1,2} = T_1 T_2 / (1 - R_1 R_2) \quad (4)$$

$$A_1 = (1 - R_2 (R_1 - T_1)) \times \frac{(1 - (R_1 + T_1))}{1 - R_1 R_2} \quad (5)$$

$$A_2 = (T_1) (1 - (T_2 + R_2)) / (1 - R_1 R_2) \quad (6)$$

$$R_{1,2} = R_1 + \frac{T_1^2 R_2}{(1 - R_1 R_2)} \quad (7)$$

La fracción absorbida por cada lámina se tiene en la absorción total. La absorción total es la suma de (5) y (6). La fig 3.9 muestra la transmisión de dos vidrios expresado como función del ángulo de incidencia y la suma KL de las dos láminas. El orden en el cual las dos láminas son colocadas, si tienen características similares, no tiene influencia en la absorción o transmisión. Sin embargo, la fracción absorbida por cada lámina y, por tanto el promedio de transferencia de calor de la lámina interior si dependen del orden. La fig 3.10 da las fracciones para un caso particular en el cual el vidrio interno tiene un $KL = 0.054$. El vidrio exterior puede tener cualquier característica.

- Transmisión, absorción y reflexión de radiaciones cósmicas

Aunque la intensidad de la longitud de onda corta del cielo es relativamente baja comparada con la intensidad directamente

del sol, su efecto en ganancias de calor puede ser considerable. Por ejemplo; si los edificios se arreglan con amplias áreas de ventanas expuestas al cielo septentrional (norte). El flujo de calor en tales casos puede representar una fracción medible de la carga total de enfriamiento.

Debido a que las radiaciones del cielo vienen en todas direcciones es necesario calcular las fracciones transmitidas, absorbidas y reflejadas por método gráficos de integración.

Puede considerarse la radiación venir en un ángulo de 60° , medidos de la perpendicular a el vidrio. Los resultados de ciertos tipos y combinaciones son dados en la siguiente tabla. Tabla 3.2.- fracciones de radiación cósmica transmitida (T) absorbida (A_1 y A_2) y reflejada por uno y doble cristal ($I.R. = 1.526$).

vidrio	T	A_1	A_2	R
Vidrio simple ($KL=0.024$)	0.778	0.060	-----	0.162
Vidrio simple ($KL=0.419$)	0.510	0.365	-----	0.125
Vidrio doble ($KL=0.054$)	0.631	0.067	0.048	0.254
Vidrio doble (interno $KL=0.054$) (externo $KL=0.419$)	0.411	0.393	0.032	0.164
Vidrio doble (ambas $KL=0.419$)	0.269	0.387	0.190	0.154

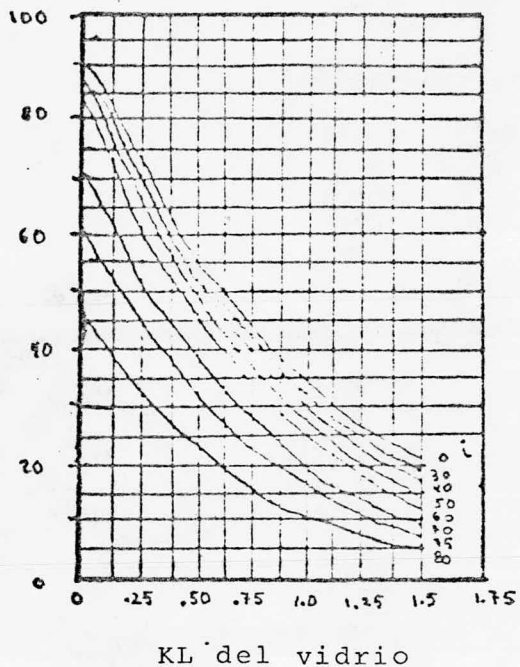


Fig 3.7 TRANSMISION DE RADIACION SOLAR DIRECTA POR UN PANEL DE VIDRIO

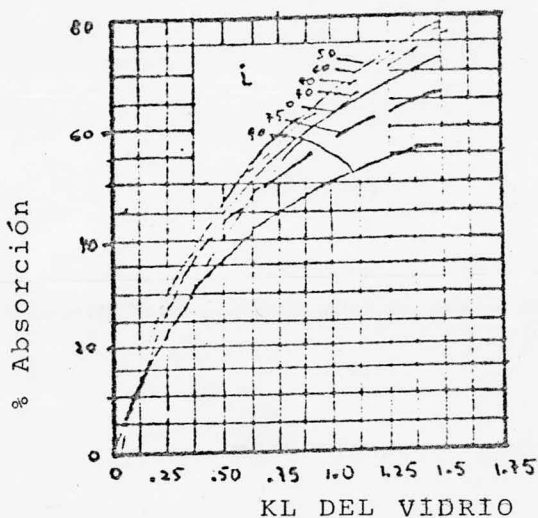
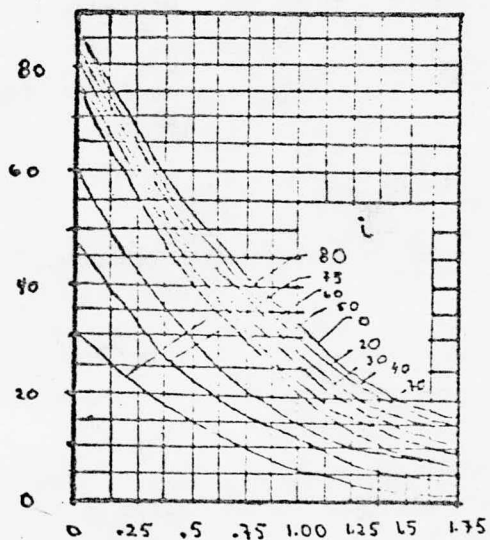


Fig. 3.8 ABSORCION DE RADIACION SOLAR DIRECTA POR UN PANEL DE VIDRIO



SUMA DE KL POR COMBINACION

Fig. 3.9 TRANSMISION DE RADIACION SOLAR DIRECTA POR DOS PANELES DE VIDRIO vs LA SUMA DE EL KL DE CADA HOJA

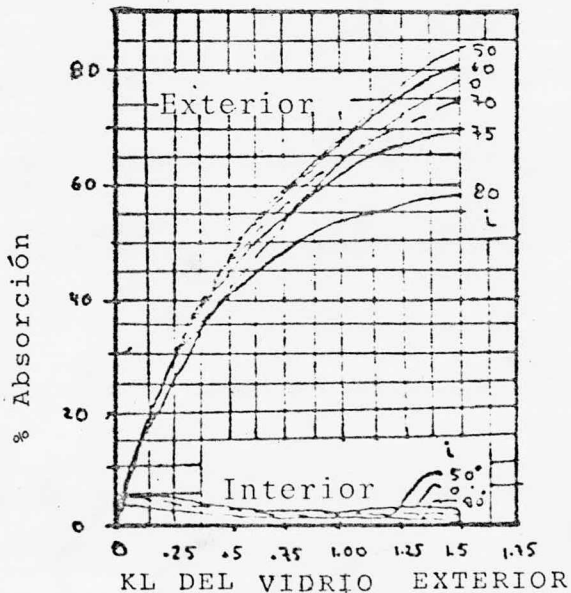


Fig. 3.10 ABSORCION DE RADIACION SOLAR DIRECTA POR DOS PANELES DE VIDRIO, CUANDO EL KL DE LA HOJA INTERIOR ES IGUAL A 0.054

- Flujo de calor debido al calor absorbido y a la diferencia de temperatura

En la fig 3.11 se muestra el promedio de calor transferido de una lámina simple de vidrio al interior (o al exterior, dependiendo de la temperatura). Este flujo de calor depende de tres factores: la diferencia de temperatura dentro y fuera, las fracciones de energía directa y cósmica absorbidas y del coeficiente de película exterior (h_o), también depende de la temperatura promedio, ya que los cambios de temperatura del cristal afectan a los alrededores internos. La fig 3.9 y la tabla 3.2 son usadas para estimar el calor absorbido. En la fig 3.11 se dibujan cuatro curvas para varias temperaturas externas y un coeficiente externo, $h_o = 4.0$. La convección y la radiación a bajas temperaturas son combinadas en el coeficiente por que no hay datos suficientes para considerarlas separadas. Se supone además que los alrededores internos están a la misma temperatura del aire interno, los datos de la fig 3.11 no se aplicarían a una estructura.

- Cálculo de transmisión, absorción y reflexión de energía solar por un panel de vidrio

Vidrio simple.-

Si se mira a través de una ventana por la noche desde un cuarto iluminado, se miran dos imágenes reflejadas de objetos en el cuarto. Las dos imágenes son reflexiones de la primera y segunda superficie del vidrio.

La reflexión de cualquier vidrio simple depende del plano en el cual vibre la onda electromagnética. La energía radiante se considerará que tiene componentes iguales en todos los planos cada uno de los cuales puede ser descompuesto en dos, uno que vibre en un plano perpendicular a la lámina del vidrio y el otro en un plano paralelo al vidrio. Si esos dos subcomponentes se suman la radiación total puede ser considerada como dos componentes, uno en cada plano. *Fresnel* lo expresó como la reflexión especular de cada superficie sola por las siguientes ecuaciones:

$$r_{pl} = \frac{\text{sen}^2 (i - i')}{\text{sen}^2 (i + i')} \quad (8)$$

$$r_{pd} = \frac{\text{tan}^2 (i - i')}{\text{tan}^2 (i + i')} \quad (9)$$

donde:

i	ángulo de incidencia
i'	ángulo de refracción
r_{pl}	fracción reflejada del componente paralelo al plano de incidencia
r_{pd}	fracción reflejada del componente perpendicular al plano de incidencia

En una incidencia normal, la cantidad de cada componente reflejado es el mismo, y si el aire y el vidrio son los medios, la fracción reflejada es:

$$r = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 \quad (10)$$

donde n es el índice de refracción del cristal. La fig 3.13 muestra el porcentaje de cada componente reflejado de una sola superficie y también el promedio. La fig 3.14 representa la primera, la segunda y varias sucesiones de reflexiones internas de un rayo chocando sobre la superficie de una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia i . La intensidad de radiación se designa con la letra I_0 .

La expresión general para la transmisión de cualquier componente, para un sólo vidrio es:

$$T_1 = (1-r)^2 g / 1 - r^2 g^2 \quad (1)$$

y para la reflexión tal como se dió en la ec. 3 y para la fracción absorbida como en la fórmula 2.

La transmisión total, reflexión y absorción se encontró al evaluar las ecuaciones 1, 2 y 3 para cada componente y promediando.

De la fig 3.14 si se desprecian las reflexiones de segundo orden, la transmisión puede expresarse como:

$$T_1 = g (1-\kappa)^2 \quad (1a) \quad \text{ó} \quad T_1 = g(1-\kappa)/(1+\kappa) \quad (1b)$$

Solamente si el ángulo de incidencia se expresa de acuerdo a la tabla 3.3

Tabla 3.3 COMPARACION DE LA TRANSMISION DE UN SOLO VIDRIO CALCULADO POR TRES METODOS - ($n = 1.526$)

Angulo de incidencia	KL = 0.054			KL = 0.837		
	ec 1	ec 1a	ec 1b	ec 1	ec 1a	ec 1b
0 grados	0.868	0.833	0.877	0.396	0.404	0.401
40 grados	0.854	0.851	0.854	0.359	0.359	0.360
80 grados	0.415	0.362	0.426	0.134	0.130	0.153

Como se ve el error es pequeño. Aumenta para vidrios de alto valor de transmisión y en ángulos de incidencia mayores.

Similares expresiones pueden hacerse para la fracción de radiación solar absorbida por un solo vidrio.

$$A_1 = (1-\kappa)^2 - g(1-\kappa)^2 = (1-\kappa)/(1+\kappa) - g(1-\kappa)/(1+\kappa) = (1-g)$$

2a

2b

2c

El grado de aproximación de estas tres expresiones se muestra en la tabla 3.4, donde el error puede ser considerable. Sin embargo, en vidrios de alta transmisión hay tan pequeña absorción que el error es despreciable, excepto en altos ángulos de incidencia.

Tabla 3.4 COMPARACION DE LA ABSORCION DE UN SOLO VIDRIO CALCULADA POR CUATRO METODOS. ($n = 1.526$ $KL=0.837$)

Angulo de incidencia	ec 2	ec 2a	ec 2b	ec 2c
0 grados	0.553	0.529	0.515	0.567
40 grados	0.584	0.544	0.547	0.603
80 grados	0.461	0.258	0.304	0.666

Método para vidrio doble

El método anterior puede ser utilizado para calcular la transmisión y absorción de dos láminas espaciadas. El subíndice 1 designa el vidrio exterior, el subíndice 2 el interior. El subíndice 1, 2 indica la combinación. La segunda lámina transmite T_2 veces lo que transmite la primera lámina o $T_1 T_2$. La energía reflejada por la segunda lámina seguida de una reflexión de la primera lámina y una transmisión de la segunda lámina es: $T_1 R_2 R_1 R_2$ de manera que:

$$T_{12} = T_1 T_2 / (1 - R_1 R_2) \quad (4)$$

R , T y A son calculada para láminas simples antes de ser sustituidas en las ecuaciones. El análisis de la ecuación muestra que T_{12} se expresa aproximadamente como:

$$T_{12} = T_1 T_2 \quad (11)$$

Esta simplificación falla cuando R_1 y R_2 son grandes y también los ángulos según se ve en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 COMPARACION DE LA TRANSMISION DE UN DOBLE VIDRIO CALCULADO POR DOS METODOS.

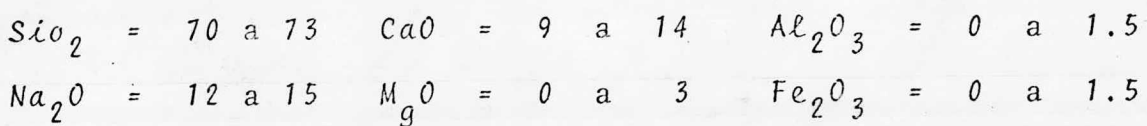
($n = 0.054$ en ambas láminas)

Angulo de incidencia	$K\ell = 0.054$		$K\ell = 0.419$	
	ec 4	ec 11	ec 4	ec 11
0 grados	0.756	0.754	0.365	0.362
40 grados	0.740	0.729	0.305	0.297
80 grados	0.250	0.172	0.141	0.117

De nuevo el error es mas grande para vidrios con alta transparencia y para radiación incidente en ángulos grandes, donde el término $R_1 R_2$ en la ecuación (4) se convierte en apreciable. Se pueden hacer aproximaciones similares para la lámina exterior o interior.

Transmisión y absorción de un cristal típico

para vidrio de ventana, se tienen los siguientes porcentajes:



Morey (13) da para este tipo de vidrios, un índice de refracción en la línea D del sodio entre 1.502 a 1.549. La mayor parte de las compañías comerciales utilizan el valor de 1.526.

Los valores de KL se calculan a partir de los datos de transmisión y absorbancia para una serie de vidrios. De esos datos se sacaron curvas espectrales de transmisión para radiación normal.

La tabla 3.6 da la transmisión y absorción de algunos vidrios

Tabla 3.6 CARACTERISTICAS DE ALGUNAS MUESTRAS DE VIDRIO PARA RADIACION INCIDENTE NORMAL

Tipo de vidrio	Espesor L (pulg)	% T	g	KL	Coef. absorción K
Simple grado A	0.071	88.8	0.971	0.030	0.411
Doble grado A	0.127	89.2	0.976	0.025	0.194
Lámina transp.	0.270	87.2	0.954	0.047	0.174

Tabla 3.6 (continuación)

Tipo de vidrio	Espesor L (pulg)	% T	g	KL	Coef. ab- sorción K
Grado A	----	----	----	----	0.432
Agua blanca	----	----	----	----	0.107
Agua blanca	0.259	88.4	0.967	0.033	0.129
Calor abs. H ₁	0.254	39.5	0.432	0.840	3.3
Calor abs. H ₂	0.129	43.5	0.476	0.742	5.75
Calor abs. H ₃	0.111	51.0	0.558	0.584	5.26
Calor abs. H ₄	0.247	34.0	0.373	0.986	3.99
Calor abs. H ₅	0.232	18.5	0.202	1.598	6.89

Los valores de g fueron calculados de datos de transmisión e incidencia normal, K se determinó por medir la transmisión normal de uno o más paneles del mismo vidrio, pegados juntos para evitar reflexión en las interfases. El valor g puede ser obtenido de la ecuación:

$$g = 1/2T(- (1-\kappa^2/\kappa)^2 + (1-\kappa/\kappa)^4 + 4T^2/\kappa^2) \quad (12)$$

Si el segundo término dentro de los paréntesis cuadrados se expande por el teorema del binomio y con una seguridad del 0.1% para incidencia normal, la ecuación es:

$$g = T \left(\frac{1}{1-\kappa} \right)^2 \quad (13)$$

Para un ángulo diferente al de incidencia normal, el término $(1/1-\kappa)$ debe ser evaluado para cada componente de polarización y el promedio aritmético determinado para incidencia normal y un índice de refracción de 1.526.

$$g = 1.094 \quad (14)$$

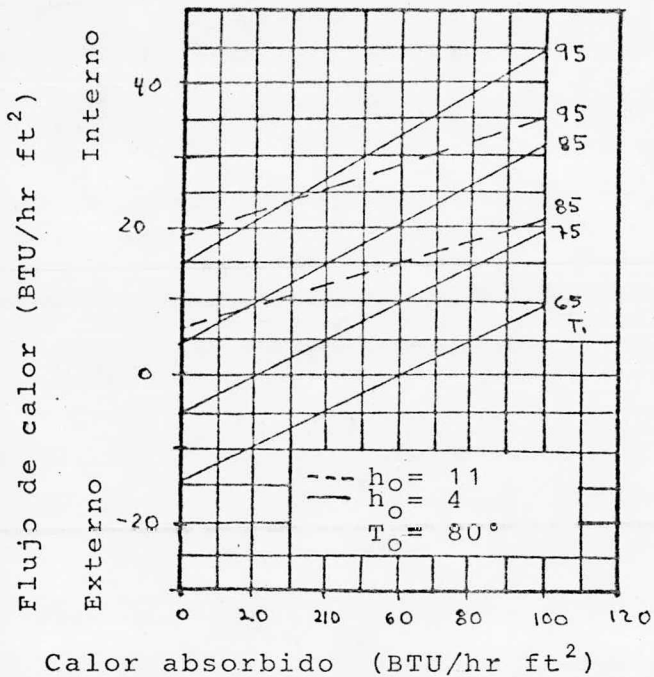


Fig. 3.11 FLUJO DE CALOR EN LA SUPERFICIE INTERIOR DE UN PANEL DE VIDRIO

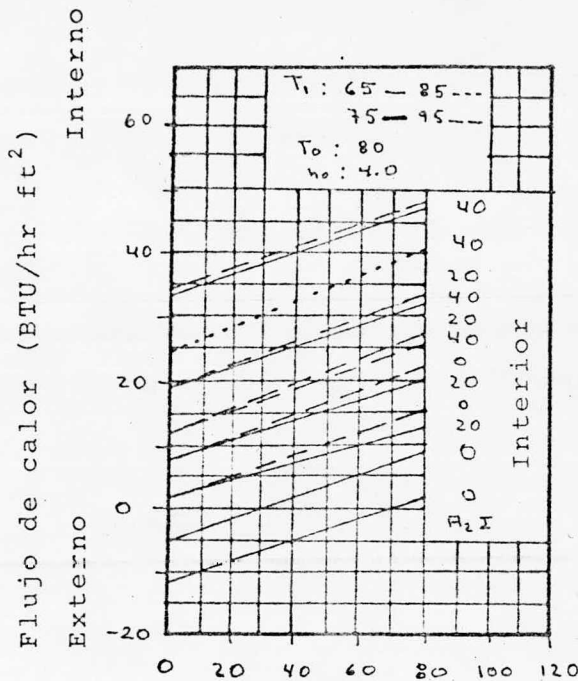


Fig. 3.12 FLUJO DE CALOR EN LA SUPERFICIE INTERIOR DE DOS PANELES

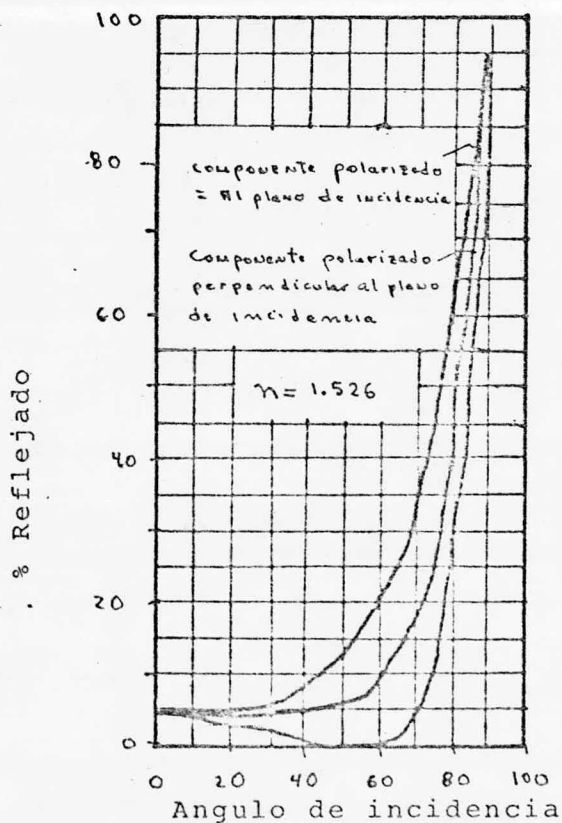


Fig. 3.13 REFLEXION DE LA RADIACION SOLAR DIRECTA DE UNA SUPERFICIE

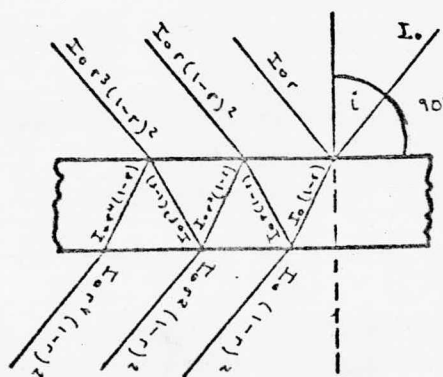


Fig. 3.14 REFLEXION MULTIPLE DE LA RADIACION SOLAR DIRECTA EN UN PANEL DE VIDRIO

III.2.2.3 Breve introducción a la descripción de la espectrofotometría

La luz blanca está formada por diversos colores, esto se puede comprobar usando un prisma óptico que es un sólido de vidrio de forma triangular.

Si se hace llegar a un prisma óptico la luz solar que entra por una rendija de un salón oscurecido y al otro lado del prisma se pone una pantalla blanca, se notará que aparecerá la sucesión de los colores del arco iris: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta.

Esta banda de colores ha recibido el nombre de "espectro de luz blanca" y al fenómeno descrito se llama descomposición o dispersión de la luz.

Si antes de que llegue la luz blanca al prisma se interpone un filtro, por ejemplo un vidrio de color, es un solo rayo luminoso de ese color el que atraviesa el prisma y sigue una trayectoria como la que representa la figura 3.15. En esta figura se ve que la luz se refracta dos veces, la primera al entrar por la primera cara del prisma y la segunda al salir por la segunda cara; en el primer sitio se acerca a la normal y en el segundo sitio se aleja de la normal.

El resultado final es que el haz luminoso se desvía hacia la base del prisma.

Si en vez de dirigir al prisma la luz blanca del sol, se dirige la luz de una lámpara incandescente y si se usa en dispositivo menos rudimentario que el prisma óptico, se tendrá el principio fundamental de un espectrómetro óptico.

El espectrómetro óptico es un instrumento con una rendija de entrada, un aparato dispersante, y una o más rendijas de salida, con el cual se hacen mediciones a longitudes de onda seleccionadas dentro del rango espectral, o por exploración dentro del rango. La cantidad detectada es una función de la potencia radiante.

El espectrofotómetro es un espectrómetro con equipo accesorio, de tal manera que proporciona la relación, o una función de la relación de la potencia radiante de dos haces como una función del espectro de longitud de onda. Estos dos haces pueden separarse en tiempo, espacio o en ambos.

Los componentes principales de un espectrómetro se muestran en la figura 3.16.

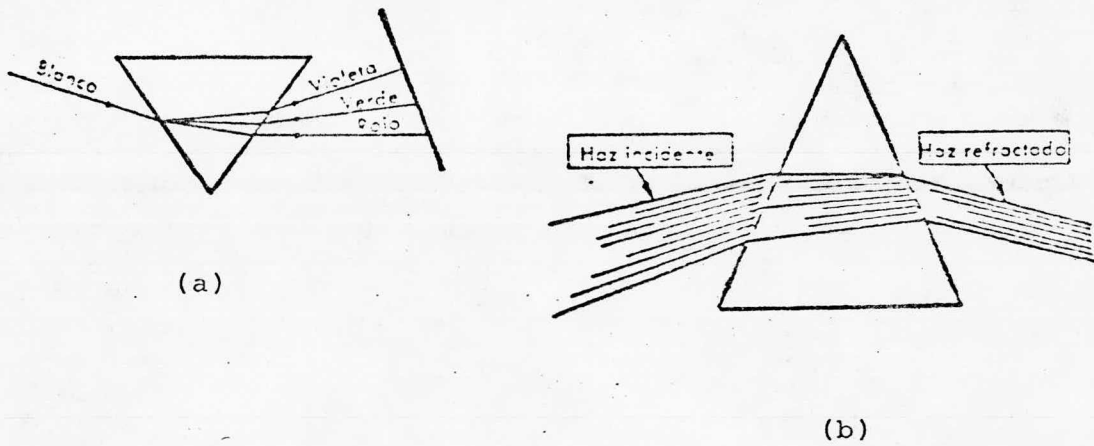
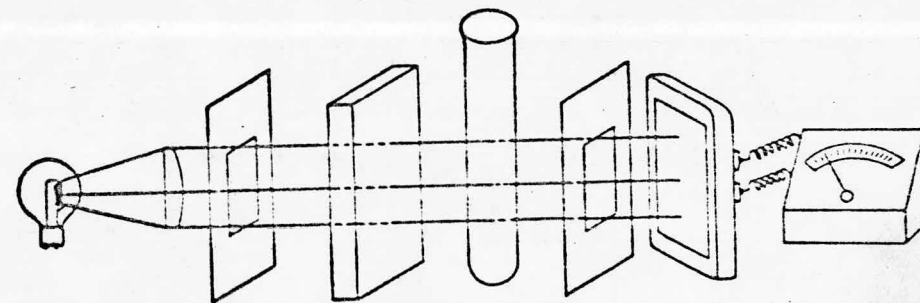


Fig. 3.15 (a) DISPERSION DE LA LUZ BLANCA POR UN PRISMA
 (b) HAZ DE LUZ DIVERGENTE



Fuentes de energía radiante	Ópticos asociados	Elementos dispersantes	Receptores
Lámpara-W	Lentes	Filtro de absorción	Ojo
Arco Xe-Hg	Especios	Filtro de interferencia	Barrera —capas de celidas
Lámpara de descarga	Redes y diafragmas	Prismas	Fototubos
H ₂ o D ₂	Cubetas	Esparrillados	Tubos fotomultiplicadores
Abertura			

Fig. 3.16 COMPONENTES PRINCIPALES DE UN ESPECTROMETRO

III.2.2.4 Determinación por métodos espectrofotométricos

Las determinaciones se hicieron en un espectrofotómetro *Perkin-Elmer*, modelo EPS-3T con un rango de longitud de onda de:

Ultravioleta lejano	170	a	220	m μ
Ultravioleta	210	a	360	m μ
Visible	340	a	700	m μ
Infrarrojo cercano	2600	a	2000	m μ

- Teoría de operación del espectrofotómetro *Perkin-Elmer* EPS-3T

De acuerdo con el diagrama de la fig (3.17), el compartamiento de luz contiene dos lámparas, una de Deuterio (190 a 340 m μ) y otra de Tugsteno (360 a 2500 m μ), las cuales una u otra manda un rayo de luz al monocromador. El monocromador dispersa el rayo de luz produciendo un espectro y dirige una pequeña porción del espectro al espejo del primer sector. Este espejo divide el rayo de luz dentro de dos canales sobre un tiempo base, o sea, el rayo de luz viaja a través del canal de prueba, en el comportamiento de la celda por un intervalo corto de tiempo, entonces el rayo de luz viaja a través del canal de referencia también por un intervalo corto de tiempo, los pulsos del rayo de luz de prueba y referencia son generados alternadamente.

El espejo del segundo sector combina los dos rayos de luz dentro de uno solo, el cual es dirigido al fotomultiplicador o a la celda detector de PbS. Estos rayos combinados inducen al detector a producir una señal eléctrica proporcional al rayo de prueba y referencia alternadamente. La señal eléctrica es amplificada por el circuito amplificador en el aparato y mandada al decifrador de señales. El decifrador de señales mecánicamente clasifica la señal de pruebas de la señal de referencia, utilizando interruptores operados magnéticamente. Cada señal separada es dirigida a su circuito de retención apropiado. Los circuitos de retención transforman las señales de pulso en señales continuas.

La señal continua de prueba es aplicada directamente al amplificador, y la señal continua de referencia es mandada al reóstato (Slide-Wire). Dependiendo de la posición del reóstato, alguna parte de esta señal de referencia será mandada al servo amplificador. El servo amplificador utiliza la diferencia entre la señal de prueba y la porción de la señal de referencia para producir una señal al servo motor. Entonces el servo motor gira a mover la posición del reostato y cambia la porción de la señal de referencia siendo llevada al servo amplificador.

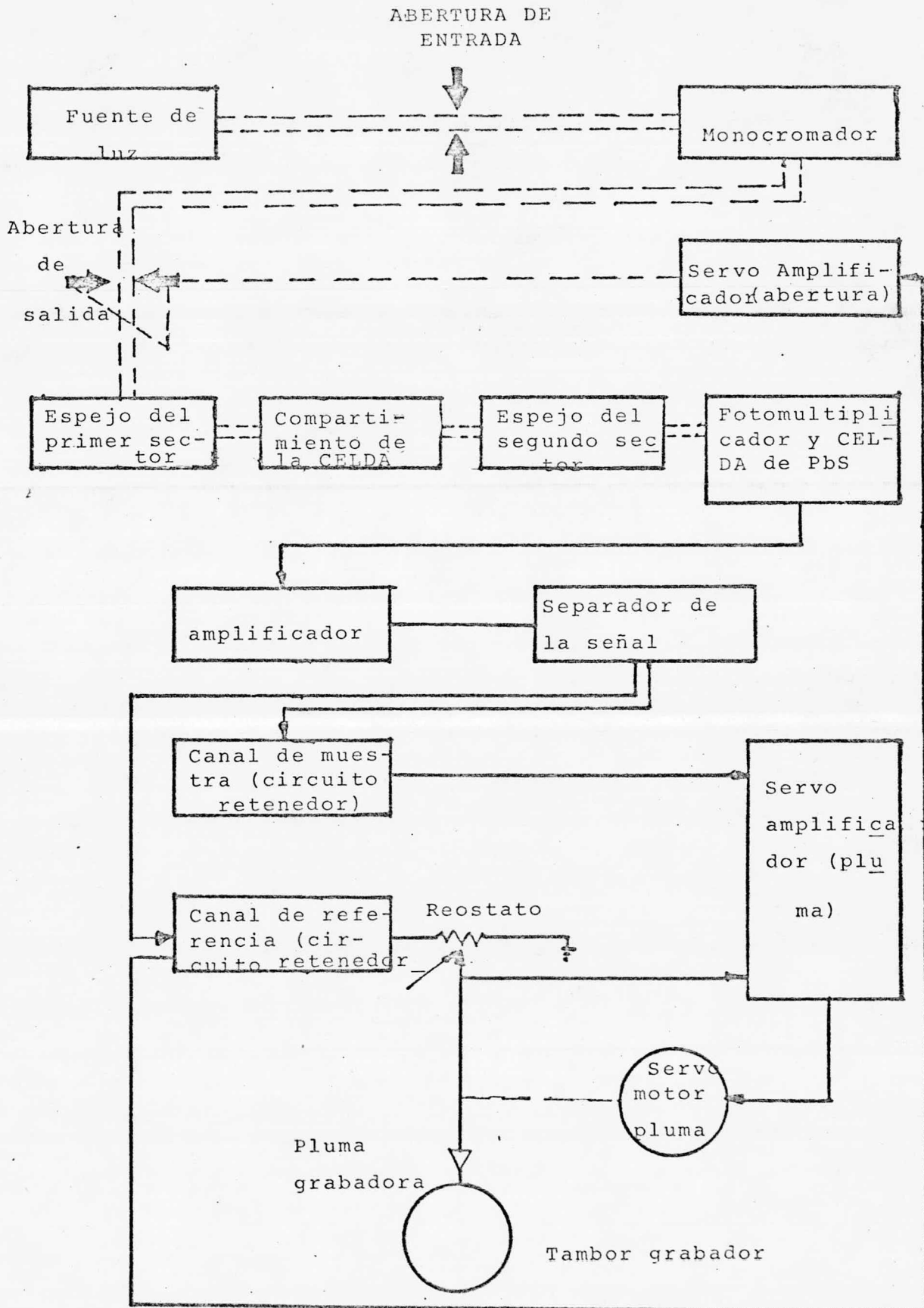


Fig. 3.17 DIAGRAMA DEL SISTEMA BASICO DEL ESPECTRO FOTOMETRO PERKIN-ELMER MODELO EPS-3T

Cuando la porción de la señal de referencia iguala a la señal de prueba, el servo amplificador cesa de manejar el servo motor; todo ésto ocurre en un lapso de tiempo rápido, posibilitando a la pluma a alcanzar una posición correcta rápidamente.

- Medición

En rangos de medición de:

210 a 340 $m\mu$

340 a 600 $m\mu$

600 a 2500 $m\mu$

Se determinó la transmitancia de los siguientes materiales:

Material	Tipo	Espesor ($\pm .005$ mm)	
		Pulgadas	mm
Tedlar	A	0.001	(0.0254)
	B	0.0005	(0.0127)
	C	0.001	(0.0254)
Vidrio	A	.145	(3.7)
	B	.0826	(2.1)
Mylar	A	.00196	(.05)
	B	26.000836	(.021)
Polietileno	A	.00028	(.0072)
Flexiglass	-	.177	(.45)

Clasificación de los tipos.-

Tedlar	A	color verde, transparente, baja densidad, clasificación 100 B G 15UG
Tedlar	B	semi-transparente, clasificación 50 AM 20TR
Tedlar	C	transparente, clasificación 100 B G 15 UT
Vidrio	A	vidrio común para ventanas de espesor sencillo
Vidrio	B	vidrio común para ventanas de espesor medio
Mylar	A	tipo espejo, cromado
Mylar	B	transparente
Polietileno	A	de baja densidad y tipo comercial, espesor medio.
Flexiglass		Acrílico transparente comercial

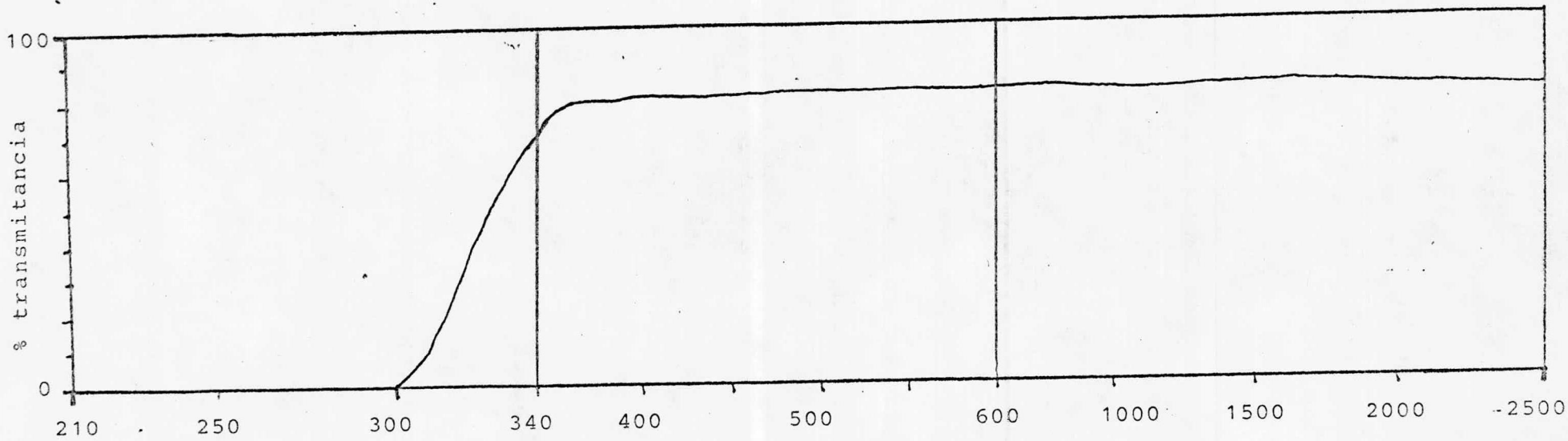


Fig 3.18 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL VIDRIO A

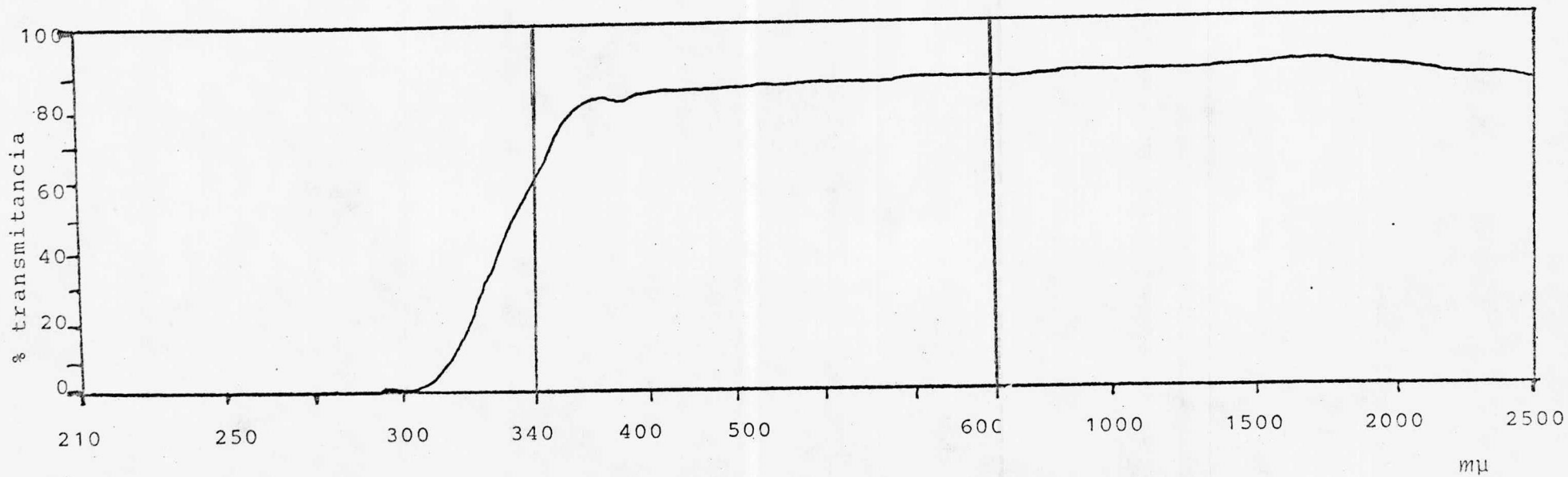


Fig 3.19 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL VIDRIO B

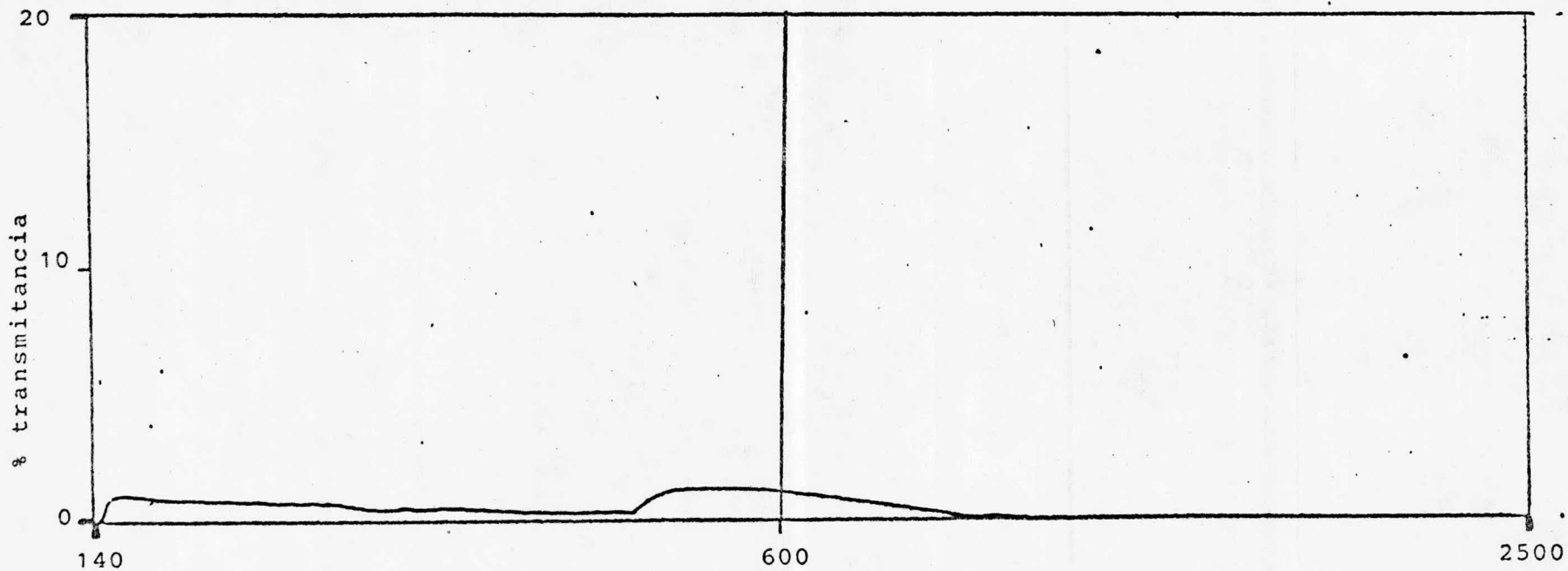


Fig 3.20 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL MYLAR A

mμ

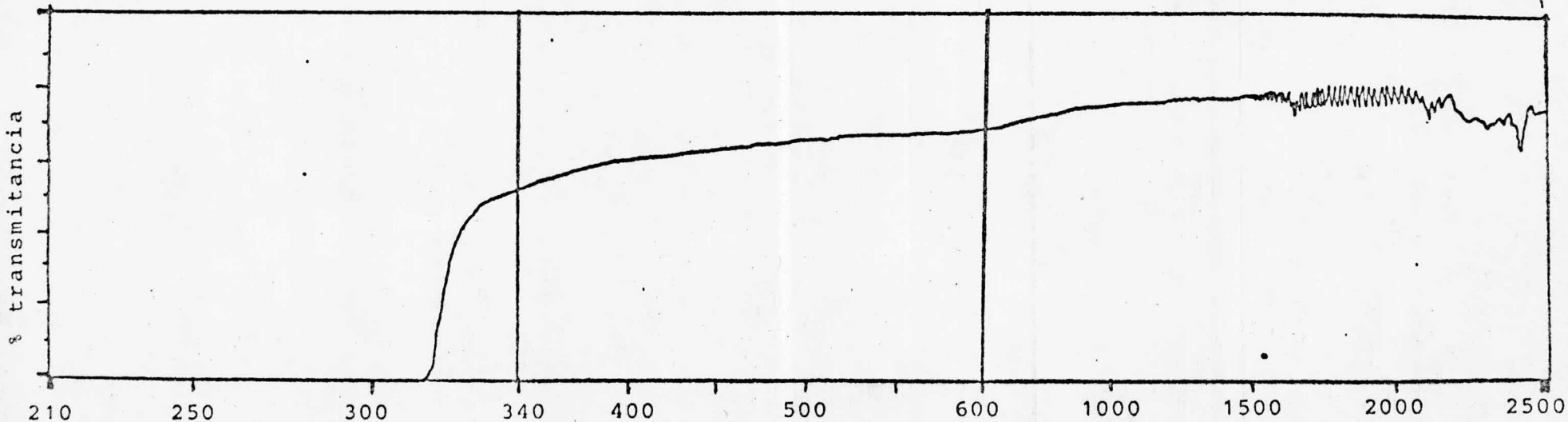


Fig 3.21 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL MYLAR B

mμ

Fig 3.23 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL TEDLAR B

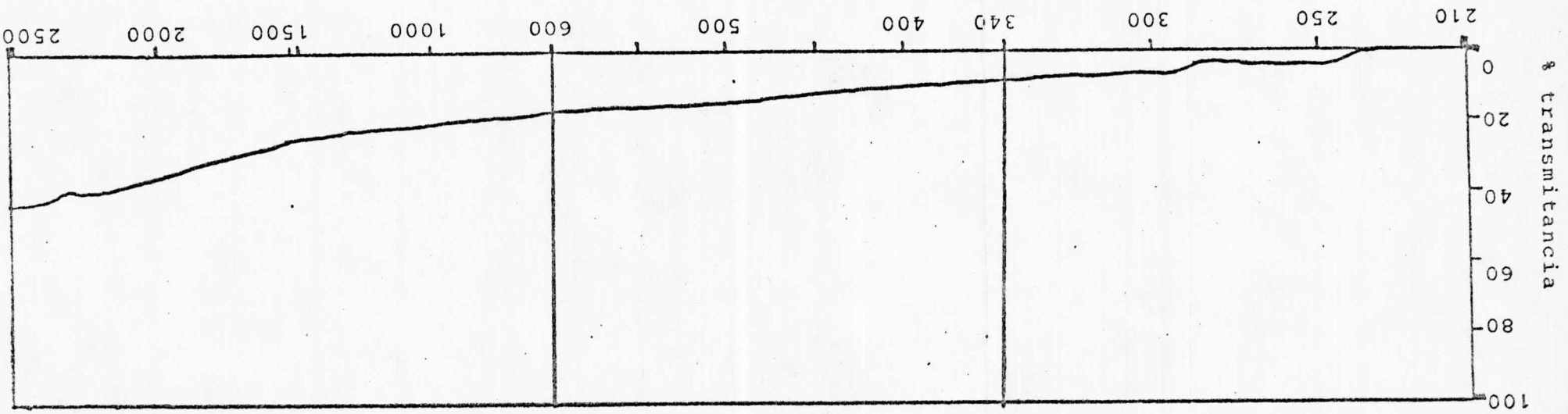
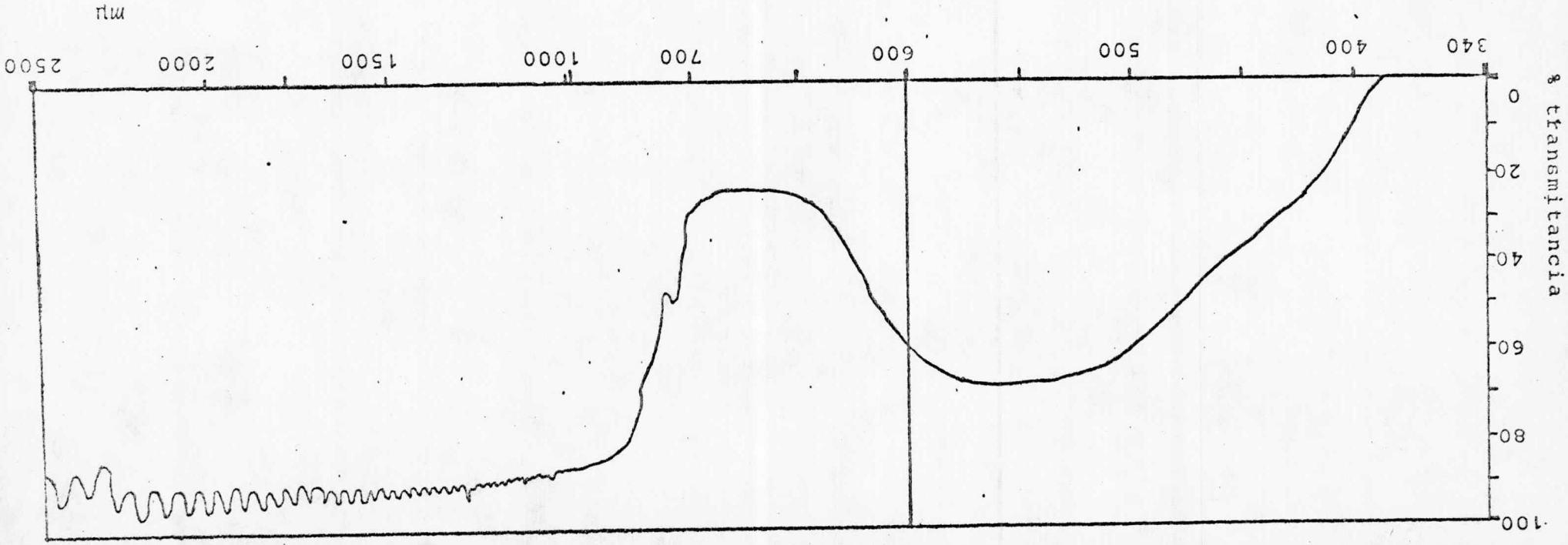


Fig 3.22 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL TEDLAR A



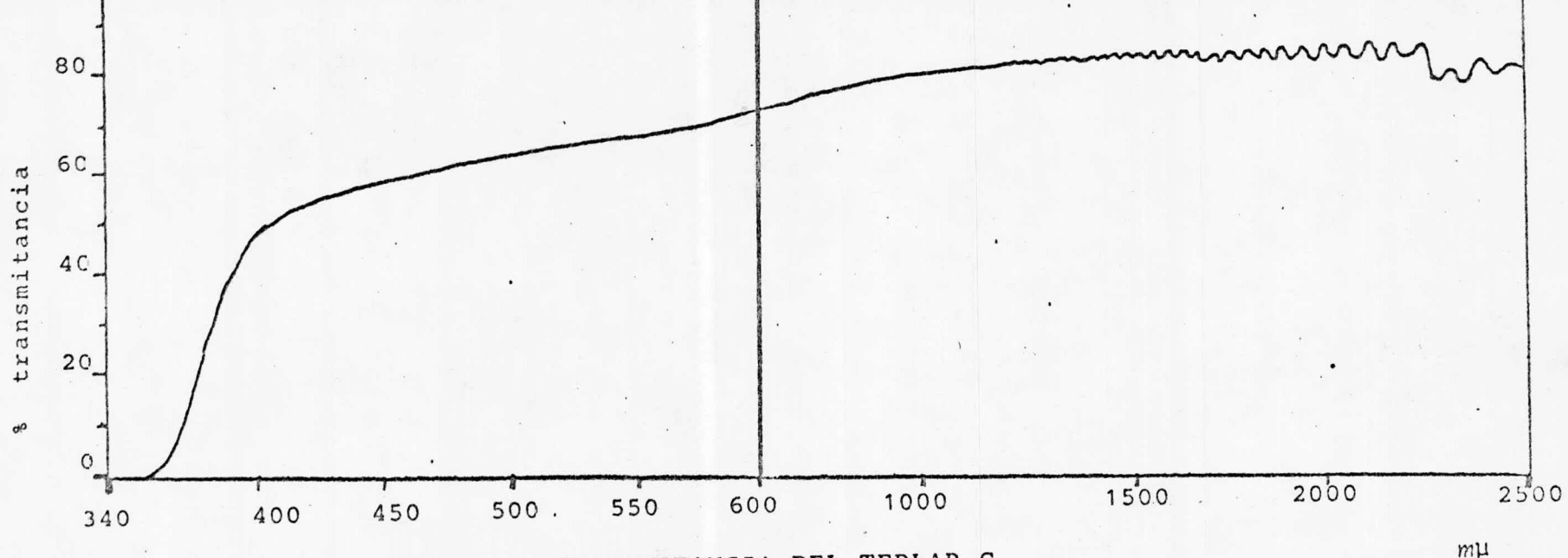


Fig 3.24 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL TEDLAR C

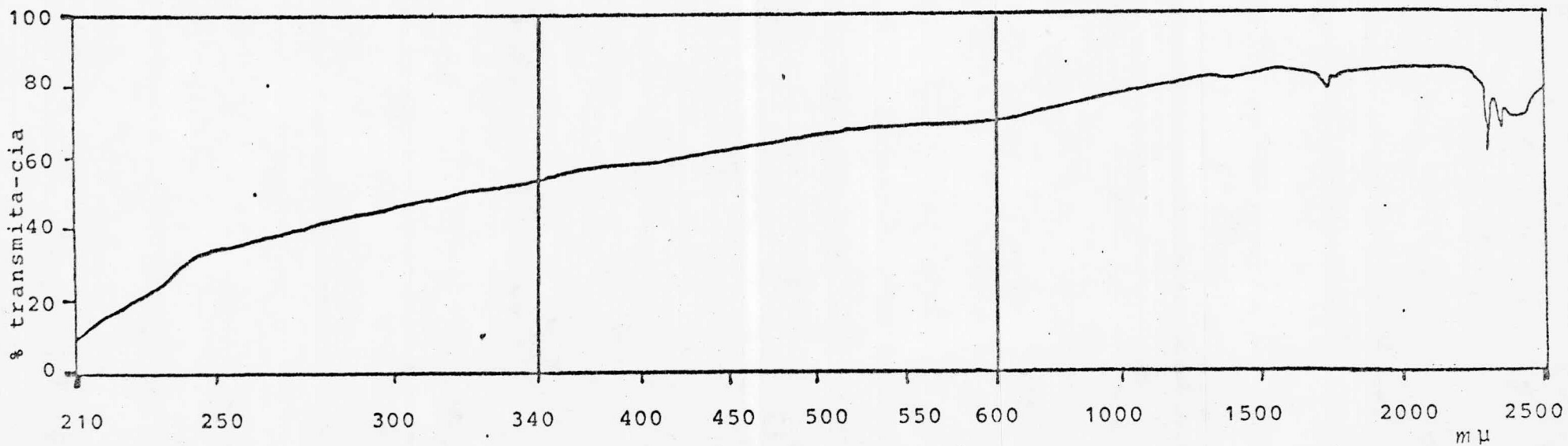


Fig 3.25 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL POLIETILENO

Flexiglass

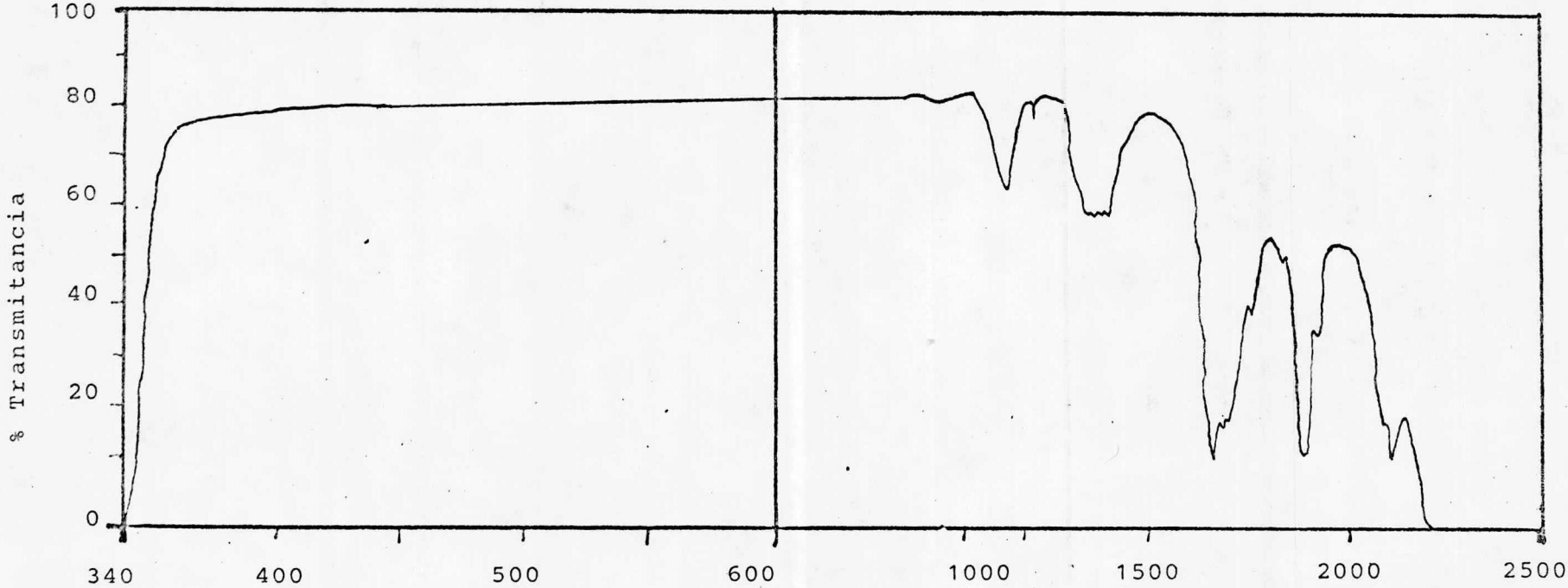


Fig. 3.26 ESPECTRO DE TRANSMITANCIA DEL FLEXIGLASS

IV. CAPTADORES SOLARES

IV.1 Descripción general

Después de la superficie transparente, la parte más importante de un colector por sistema de absorción es la superficie captadora, la cual tiene que presentar alta absorptividad a la radiación entrante y baja emitancia del infrarrojo (espectro solar).

Desde las primeras investigaciones de la energía solar se han probado dos tipos de superficies para captadores solares.

- Superficies propias
- Superficies selectivas

La diferencia entre estos dos es que en las primeras se aprovecha la propiedad intrínseca del material para su utilización y en la segunda se recurre a métodos y sistemas para tratar la superficie a que adquiriera propiedades ópticas, en lo que se llama un cuerpo negro espectralmente selectivo (esto se trata en el inciso subsecuente).

Una aclaración pertinente dentro de este tema, es que existen dos tipos de cuerpos; propiamente así llamados en el aprovechamiento de la energía solar, el cuerpo negro perfecto,

aquel que absorbe toda la energía radiante entrante y después la emite en forma de calor sin reflejar nada (como lo vimos anteriormente) y el cuerpo blanco perfecto, aquel que refleja toda la radiación incidente, dentro de estos puede haber diferentes combinaciones; si consideramos la energía entrante como la radiación solar directa, la energía caliente, como la radiación térmica o infrarroja, y la radiación de la tierra, se tiene la siguiente clasificación:

- a) Cuerpos negros íntegros para radiación solar (0.3 - 2.5 micras) y para radiación terrestre (arriba de 3.5 micras) ejem: pintura negra, óxido de fierro, etc.
- b) Cuerpos blancos para radiación solar y negro para la radiación terrestre
ejem: pintura blanca, óxido de titanio, óxido de zinc y en general óxidos blancos.
- c) Cuerpos transparentes para radiación solar y cuerpos negros para la radiación infrarroja
ejem: agua, hielo, vidrio
- d) Cuerpos negros para la radiación solar y blancos para el infrarrojo.

No existen en la naturaleza, pero se puede obtener por varios procedimientos tales como: corrugado de las superficies, oxidación, tratamiento electro-químico, depósitos de películas delgadas, etc.

e) Cuerpos blancos para la radiación solar y la radiación infrarroja.

ejem : espejos, superficies pulidas, mylar reflectivo, etc.

Se toma en cuenta la radiación terrestre, encasos de enfriamiento por energía solar (en un sistema de absorción), ya que en ausencia de radiación solar la energía absorbida por la tierra es emitida en lo que se llama ventana atmosférica produciendo un enfriamiento de la superficie que irradia, de tal manera se tiene:

f) Cuerpos transparentes a la radiación solar y al infrarrojo, ejem : polietileno, polipropileno, mylar transparente y en general películas plásticas.

g) Cuerpos selectivos en el infrarrojo, ejem : PVC, magnesia.

En estos cuerpos su utilización es dentro de formas de calentamiento y enfriamiento.

- Para máximo calentamiento; en sistemas de absorción se necesita que la superficie tenga la más alta absorbancia de la energía entrante y poca emitancia de energía térmica del cuerpo, de tal manera que no se enfrie, aún después de haber recibido radiación solar.

- Para máximo calentamiento; en sistemas de concentración se necesita, la mayor reflexión de la radiación solar e infrarroja.
- En los sistemas por concentración de energía solar no se puede hacer enfriamiento.
- Para máximo enfriamiento (en sistemas de absorción); se necesita la máxima transparencia a la energía solar e infrarroja de la superficie transparente y máxima reflectividad para la superficie captadora.

IV.2 Propiedades de superficies

De acuerdo con lo anteriormente visto se tiene que las propiedades ópticas útiles, son en general: absorbanza solar α (.3 a 2.5 micras), emitancia del infrarrojo, ϵ (arriba de 2.5 micras), reflectividad y transmitancia (medida de la transparencia).

Se presentan a continuación α y ϵ para varias superficies propias, (tabla 4.1) y ϵ para superficies propias y selectivas (tabla 4.2)

Tabla 4.1 ABSORBANCIA Y EMITANCIA DE VARIAS SUPERFICIES

Material	Absorbancia solar α (.3 a 2.5 micras)	Emitancia ϵ (longitud de onda arriba de 2.5 micras)
"Hohlraum" cuerpo negro perfecto	1.00	.99
Carbonato de magnesio $MgCO_3$ (sólido blanco)	0.04	0.79
Agua superficial particular de reflectancia 1.0, $i = 60^\circ$	0.94	0.95 - 0.96
Hielo (con un poco de nieve de cubierta; hoja).	0.31	0.96 - 0.97
Nieve (gránulos de hielo de aproximadamente 1/32in de diámetro)	0.33	0.89
Nieve (finas partículas como escarcha fresca, brillante)	0.13	0.82
Tierra congelada	-	0.93 - 0.94
Arena de playa	0.45	0.84
Superficie de desierto	0.75	aprox. .9
Arena seca	0.82	aprox. .9
Arena húmeda	0.91	aprox. .95

Tabla 4.1 (continuación)

Material	Absorbancia solar (.3 a 2.5micras)	Emitancia (longitud de onda arriba de 2.5 micras)
Tierra de arado seca	0.75 - .80	aprox. .9
Sembradío de vegetales y arbustos	0.72 - .76	aprox. 0.9
Sembradio de vegetales marchitos	0.70	aprox. 0.9
Hojas de roble (I.0 reflectancia, en 0.6 y 3 micras)	0.71 - 0.78	0.91 - 0.95
Alfalfa (verde oscuro)	0.97	0.95
Bosque de roble (madera)	0.82	aprox. .9 aprox. 0.9
Bosque de pinos	0.86	
Papel blanco	0.25 - 0.28	0.95
Yeso blanco	0.07	0.91
Tierra húmeda (70-95% vacío)	0.88 - 0.91	aprox. 0.95
Hierba alta seca	0.67 - 0.69	aprox. 0.9
Ladrillo rojo	0.55	0.92
Concreto	0.60	0.88
Pizarra de asbesto	0.81	0.96
Linóleo, rojo-cafe	0.84	0.92

Tabla 4.1 (continuación)

Material	Absorbancia solar α (.3 a 2.5micras)	Emitancia ϵ (longitud de onda arriba de 2.5 micras)
Hojas planas del bosque	--	0.90
cristal o vidrio (índice de refracción = 1.5 y ángulo de incidencia = 35°)	0.90	0.94
Pintura blanca (0.017 in. sobre aluminio)	0.20	0.91
Pintura negra (0.017 in. sobre aluminio)	0.94 - 0.98	0.88
Pintura de aluminio brillante, nueva	0.20	0.43
Laminita de aluminio	0.15	0.01 - 0.05
Aluminio pulido	0.32	0.10
Hierro galvanizado, limpio y nuevo	0.65	0.13
Hoja de hierro galvanizado gris oxidado	0.8	0.28

Tabla 4.2 EMISIVIDAD NORMAL TOTAL DE VARIAS SUPERFICIES

A.- METALES Y SUS OXIDOS

Superficie	T °F	Emisividad .
Aluminio:		
Oxidado a 1110 °F	390-1110	0.11-0.19
Lámina altamente pulida, 98.3 % pura	440-1070	0.039-0.057
Lámina pulida	73	0.040
Superficie techada	100	0.216
Cobre:		
Cobre electrolítico cuida- dosamente pulido	176	0.018
Comercial, raspado brillan te, pero no como espejo	72	0.072
Lámina, calentada largo tiempo, cubierto con una capa delgada de óxido	77	0.78
Placa calentada a 1110 °F	390-1110	0.57
Hierro y acero:		
Hierro electrolítico, alta mente pulido	350-440	0.052-0.064
Hierro nuevo	68	0.242
Completamente oxidado	67	0.685
Hoja enrollada de acero	70	0.657
Lámina de acero áspero	100-700	0.94-0.97
Acero inoxidable 304	420-914	0.44-0.36
Zinc:		
Comercial, 99.1 % puro pulido	440-620	0.045-0.053

Superficie	T °F	Emisividad
Hoja galvanizada con fierro, brillante	82	0.228
Hoja galvanizada con hierro gris y oxidada	75	0.276
Bronce:		
Con gran pulimiento	476-674	0.028-0.031
Pulido	100-600	0.10
Placa opaca	120-660	0.22
Otros metales:		
Mercurio	32-212	0.09-0.12
Plata pulida	100-700	0.022-0.031
Filamento de Tungsteno	6000	0.39

B.- REFRACTARIOS; MATERIALES DE CONSTRUCCION; PINTURAS
Y MISCELANEOS

Superficie	T °F	Emisividad
Asbesto:		
Cartón	74	0.96
Papel	100-700	0.93-0.945
Ladrillos:		
Rojo, áspero, pero no con gruesos irregulares	70	0.93
Para construcción	1832	0.45

Superficie	T °F	Emisividad
Refractario	1832	0.75
Carbón:		
Tizne de vela, bujía	206-520	0.952
Lámpara negra-agua-cristal cubierto	206-362	0.959-0.947
Idéntico	260-440	0.957-0.952
Capa delgada sobre lámina de hierro	69	0.927
Capa densa	68	0.967
Esmalte blanco sobre hierro	66	0.897
Carbón lámpara oscura 0.003 in. o grueso	100-700	0.945
yeso, 0.02 in. grueso, liso o lámina oscurecida	.70	0.903
Tejas de concreto	1832	0.63
Mármol, gris luminoso, pulido	72	0.931
Madera de roble alisado	70	0.895
Vidrio, Pyrex, al plomo, y al sodio	500-1000	0.95-0.85
Aceite sobre una superficie de acero pulida:		
Muy delgado	100	0.06
0.001-0.008 in. de grueso	100	0.22-0.81
grueso	100	0.83

Superficie	T °F	Emisividad
Hule suave, gris y rugoso	76	0.86
Pinturas, lacas y barnices: Barniz esmalte nieve -blanca sobre lámina áspera de hierro	73	0.906
Laca negra brillante espreada sobre hierro	76	0.875
Laca negra brillante sobre Una hoja de hierro delgada	70	0.91
Laca negra	100-200	0.80-0.95
Hoja cubierta con laca negra (hoja plana)	100-200	0.96-0.98
Laca blanca	100-200	0.80-0.95
Pintura de aluminio	100	0.27-0.69
Pinturas de aceite (16 colores diferentes)	212	0.92-0.96
Yeso	100	0.93
vidrio áspero	50-190	0.91
Porcelana, vidriada	72	0.924
Papel tapiz	69	0.91
Agua	32-212	0.95-0.963
Vidrio pulido	100	0.90-0.95
Nieve	-	0.1
Hielo sólido	-	0.63

EFFECTO DEL COLOR COMO MUESTRA PARA LA REFLECTIVIDAD DE
 PIGMENTOS

Sustancia	Reflectividad	
	8.8μ 125°F	0.60μ Solar
Pintura negra luminosa	0.04	0.08
Tizne de acetileno	0.01	0.01
Azul (Co_2O_3)	0.13	0.03
Rojo (Fe_2O_3)	0.04	0.26
Amarillo (PbO)	0.26	0.52
($PbCrO_4$)	0.05	0.70
Blanco (alúmina)	0.02	0.84
(ZnO)	0.03	0.82
($PbCO_3$)	0.11	0.88

IV.3 Superficies selectivas

Como vimos son aquellas en las que se recurre a un método para tratar la superficie a que adquiera propiedades ópticas útiles. Para máximo calentamiento, las propiedades ópticas de la superficie deben de ser, una alta absorción en la banda de emisión solar y baja emitancia en el intervalo de emisión de un cuerpo negro.

Para máximo enfriamiento, una baja absorción de la radiación solar y alta emitancia de la radiación térmica.

Esta superficie de máximo calentamiento se le conoce con el nombre de cuerpo negro espectralmente selectivo.

Los métodos más usados para preparar superficies selectivas son los que se llaman de depósito o de electrodeposito, que consisten en tratar metales por medio de baños de sustancias químicas, principalmente: fierro, aluminio, cobre, níquel y acero inoxidable.

El requerimiento básico para que una superficie sea espectralmente selectiva, es que sea una delgada película negra de un semiconductor sobre un sustrato de metal pulido; éste último deberá ser altamente reflectivo a la radiación de longitudes de onda mayores de 3 micras.

La eficiencia para máximo calentamiento, de las superficies selectivas depende de tres factores principalmente: la débil emisividad térmica del metal subyacente, la naturaleza específica de revestimiento negro y del espesor de ese revestimiento.

La capa de revestimiento absorbe la luz solar pero como es casi transparente para el infrarrojo más lejano, no emite mucho la radiación cuando esta caliente. La naturaleza del calor emitido por radiación es determinado por la superficie del metal subyacente, esta afirmación es apoyada por el hecho de que para un mismo revestimiento del mismo espesor aplicado sobre una superficie de cobre pulida muy brillante, la emisividad es solamente alrededor de la mitad de la que existe cuando se aplica sobre una superficie no pulida de cobre o sobre una superficie pulida de cobre que está sometida a un chorro de arena.



El espesor del revestimiento negro es un factor importante en la emisividad débil del mismo en el infrarrojo más lejano.

La delgada película negra que se depósita sobre el metal base debe ser de un material semiconductor o sea que deje penetrar gran cantidad de energía incidente, sin que tenga escape de energía térmica, para esto se requiere una alta absorción en

el espectro solar y una baja emitancia de energía de longitud de onda larga, por lo que es de gran importancia la estructura física del semiconductor, ya que de ésta depende la mayor variación en la absorción.

La naturaleza física del revestimiento es también un factor, un metal finamente dividido, por ejemplo, absorbe más luz en el visible que una capa lisa depositada electróliticamente.

IV.3.1 Medición de propiedades ópticas

Métodos directos

Son aquellos que nos dan directamente las propiedades ópticas, las más importantes para nuestro estudio son el coeficiente de emisividad y el coeficiente de absorptividad

Se determinan los factores de absorción y de emisión de numerosos revestimientos diferentes para un gran número de espesores diferentes. Los valores son indicados en la siguiente tabla (tabla 4.3), para un revestimiento de 0.2 mg/cm^2 . Los coeficientes de absorción representan la absorción de la radiación solar comparado con un cuerpo negro que absorbe perfectamente y los poderes emisivos representan la radiación emitida a 110°C comparada con un radiador perfecto.

Tabla 4.3

Revestimiento	α	ϵ
CuO sobre latón pulido	0.93	0.20
CuS sobre cobre pulido	0.72	0.18
Oxidos de fierro sobre acero pulido	0.93	0.21
NiS sobre níquel pulido	0.92	0.42
MoO_3 sobre aluminio pulido	-	-
MoO_2 sobre acero inoxidable	0.85	0.20
Déposito de cobre sobre depósito de níquel des- pués oxidación	0.87	0.21

Para determinación experimental de los coeficientes de absorción y emisión trasladarse a las referencias 8 y 9

Métodos indirectos

Además de estas medidas directas de los coeficientes de absorción y de emisión, se hacen estudios suplementarios de radiación selectiva empleando películas negras sobre cobre producidas por la acción del ebanol C.

La luz de una lámpara de 300 Watts es reflejada por un disco de cobre pulido y por los discos de cobre recubiertos con diferentes espesores de película negra. La intensidad de la luz reflejada (reflectividad especular) es medida con un espectrofotómetro Beckman entre $0.3\mu\text{m}$ y $2\mu\text{m}$. Se efectúan las experiencias análogas con una barra incandescente y un espectrofotómetro Perkin-Elmer, para la radiación comprendida entre 2.5 y 15 micras.

La reflectividad decrece de manera marcada cuando se aplica el revestimiento y la disminución depende del espesor del revestimiento. Para las grandes longitudes de onda (10 a 15 micras), sin embargo, la reflectividad no es más que ligeramente disminuida por los revestimientos delgados de óxido de cobre. Estas experiencias muestran que los revestimientos con un poder reflector débil tienen por consecuencia un fuerte coeficiente de absorción para la luz visible y el infrarrojo cercano y una reflectividad elevada y emisividad débil para el infrarrojo lejano.

Las medidas de emisividad de la parte precedente, son obtenidas al calentar un tubo de ensayo de cobre pulido recubierto por una película delgada del semiconductor en cuestión a una temperatura de 250°C y registrando la emisión común en -

un espectrofotómetro infrarrojo *Perkin-Elmer* empleando la abertura amplia (2 mm).

Determinación experimental

Se usa un espectrofotómetro *Perkin-Elmer* infrarrojo con un ac accesorio de reflectancia especular (parte No 457-5133), te- niéndose como muestra una placa de cobre recubierta a partir de un depósito electroquímico de una solución de ácido cró- mico y ácido acético con una densidad de corriente de 4 a 9 amp/dm², la capa negra tiene $\alpha \approx .90$ y $\epsilon \approx .10$

Se determinó la absortividad de esa placa.

Resultados

Al aumentar la reflectancia disminuye la absortividad; esto quiere decir que disminuye el espesor del revestimiento, por lo que entre más espesor de revestimiento tenga, menor será la reflectividad.

En la fig 4.1 se muestra el comportamiento de la absorptividad en el cercano y lejano infrarrojo, donde se nota que la absorptividad para el límite del visible (2.5 micras) es mayor a 0.5 (siendo esta una escala logarítmica inversa), en el infrarrojo la máxima absorptividad es de aproximadamente .35, la comparación de estas mediciones con la de otras placas y con las de otros métodos nos dará el revestimiento óptimo.

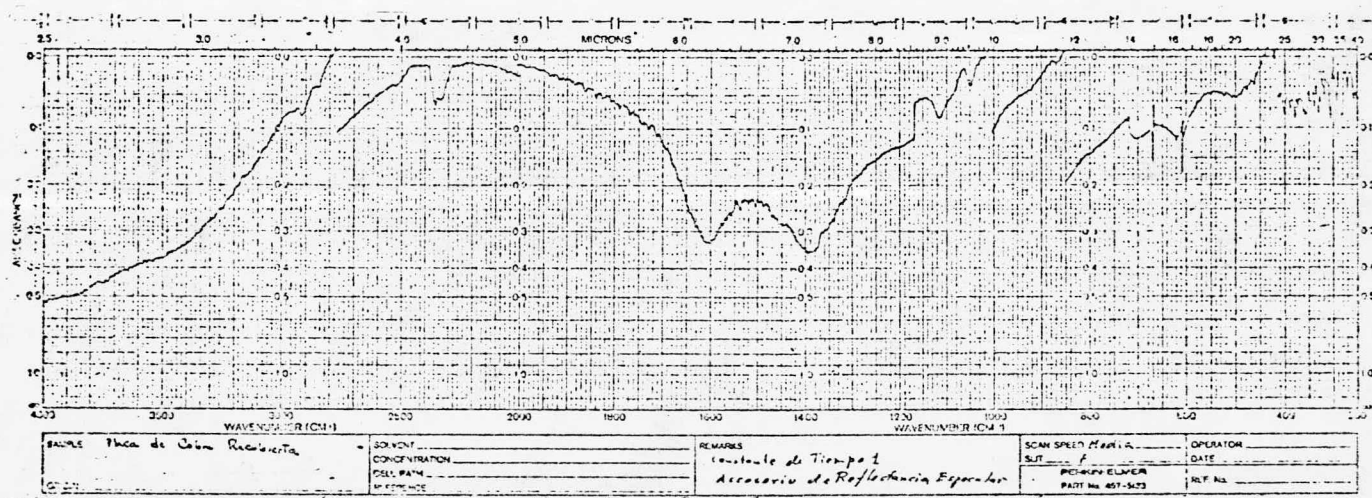


Fig. 4.1 ESPECTRO DE ABSORBANCIA DE UNA PLACA DE COBRE RECUBIERTA

V. ALMACENAMIENTO DE CALOR DERIVADO DE LA ENERGIA SOLAR

Después de la unidad transparente y de la superficie captadora, en un diseño típico de un colector por sistema de absorción, se han desarrollado medios para poder almacenar la energía solar, esto es lo que vamos a llamar la unidad almacenadora, todos los sistemas de almacenamiento de energía solar a la fecha trabajan ya sea por un simple calentamiento o enfriamiento de materiales a carga o descarga de calor, es decir transfiere el calor o enfriamiento generado a un material que lo almacena por fusión o congelamiento de materiales con punto de fusión o crioscópico sensibles (ligera-mente por encima o por abajo de la temperatura ambiental).

La tercera manera más adecuada sería poner adiabático el sistema, mediante medios de aislamiento adecuados, como: vidrio, espuma de poliuretano, polipropileno, polietileno, fibra de vidrio, vacío, etc.

V.1 Clases de materiales y determinación de propiedades

V.1.1 Almacenadores de energía solar por carga o descarga de calor

Entre los materiales más comunes están el agua, el aire, sólidos rocosos y metales altamente conductivos con sistemas

de aislamiento adecuados (este último bien puede caer dentro de la tercera manera de clasificación).

Los materiales almacenados pueden acumular energía térmica como calor específico (sensible) o como calor de fusión (latente) incluyendo sus efectos combinados.

La tabla 5.1. compara datos de almacenamiento térmico y muestra el peso y volumen de sólidos rocosos, agua y el calor de fusión del material para almacenar 1×10^6 BTU usando un límite de 20°F

Tabla 5.1. ALMACENAMIENTO TERMICO DE 1×10^6 BTU con 20°F

Calor específico	Rocas	Aguas	Calor de fusión del material (por cambio de fase)
BTU / lb°F	0.2	1.0	0.5 (promedio)
Calor de fusión BTU / lb	-	na	100 (promedio)
Densidad lb / ft^3	140	62	100
Almacenamiento de 10^6 BTU :			
Peso (lb)	250 000	50 000	10 000
densidad	25	5	1
Volumen:			
$\text{ft}^3 + 25\%$	2 150	1 000	125
Volumen relativo	17	8	1
Situación	Base	Base	5ft del cubo
	$6\text{ft} \times 360\text{ft}^2$	6000gal	o equivalente

na - no aplicable

V.1.2 Almacenadores de energía solar por fusión y congelamiento del material

Existen tres tipos generales de materiales para este tipo de almacenaje:

- Materiales de calor de fusión
- Ceras
- Medios de suspensión

V.1.2.1 Materiales de calor de fusión

Se basa en la capacidad que tienen ciertas sustancias químicas de fundir a una temperatura ligeramente mayor de la temperatura ambiente (aproximadamente 90°F), almacenando así el calor colectado.

El tipo más común de material que ha sido considerado para este sistema de almacenamiento son las sales hidratadas.

Estas consisten en una combinación de iones positivos como son Ca^{++} , Na^{+} y iones negativos como: Cl^{-} , PO_4^{-} , SO_4^{-} y H_2O .

Un alto grado de hidratación, aproximadamente un 50% por peso de agua baja el punto de ebullición del material a la temperatura ambiente.

En la tabla 5.2 se resume el punto de fusión y el calor de fusión por libra de las sales hidratadas más adecuadas.

Tabla 5.2 SALES HIDRATADAS

Sales	Fórmula	Punto de fusión (°F)	Calor de fusión (BTU/lb)	Densidad lb/ft ³
Cloruro de calcio hexahidratado	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	84-102	75	102
Carbonato de sodio decahidratado	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	90- 97	106	90
Fosfato disódico dodecahidratado	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	97	114	95
Nitrato de calcio tetrahidratado	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	102-108	60	114
Sulfato de sodio decahidratado (sal de Glauber)	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	88- 90	108	97
Tiosulfato de sodio pentahidratado	$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	118-120	90	104

Una característica de las sales hidratadas es su alto grado de exposición a sobre saturación; esto es, la sal líquida puede enfriarse 20-30°F debajo de su punto de congelación sin que el congelamiento ocurra, esto hace que la remoción del calor sea un problema. Para solucionar esto se le agrega agentes nucleantes; un agente nucleante es un material

con una estructura cristalina similar en espacio enrejado y distribución de carga, a la de una sal hidratada, el agente nucleante debe ser difundido a través del material; así este cristal crece y de este modo su velocidad de remoción de calor es limitada por la conductividad térmica del material sólido, más que por la velocidad de crecimiento de la superficie cristalina, la cual usualmente es mucho más pequeña.

Comparaciones

- a) Para un volumen dado el agua almacena cerca de 3 veces tanto calor como arena tenga, y las sales de Glauber al macenan cerca de 6 veces tanto calor como agua tengan.
- b) Comparando las sales de Glauber con el agua se puede de de cir que el calor debe ser almacenado por encima de 90°F a descargar en un cuarto a una temperatura de 70°F. Visto que entre colector y almacenador tendrán una caída eficiente por encima de 120°F, una unidad que trabaja con agua deberá operar sobre unos 30° de cambio de temperatura.
- c) Por igual capacidad la unidad que trabaja con sal de Glauber deberá ocupar 1/6 del espacio y 1/4 del peso tanto como la unidad que trabaja con agua.

Ventajas

- a) Una ventaja cualitativa de las sales de calor de fusión es su capacidad de almacenar calor ligeramente por encima de la temperatura ambiente.

Desventajas

- a) El tener un alto grado de exposición a sobre saturación es una desventaja pues hace problemática la remoción de calor; para esto se agregan los agentes nucleantes.

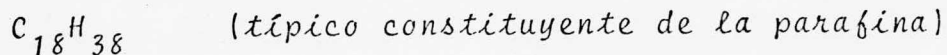
V.1.2.2 Ceras

Las ceras son otra clase de materiales almacenadores de calor por el segundo método mencionado, su funcionamiento es análogo al de las sales de calor de fusión.

Propiedades

- a) La cera debe experimentar cerca de 200 ciclos de fusión antes de que esta pueda liberar tanto calor como si fuera quemada.
- b) Son combustibles y se pueden inflamar con facilidad, por lo que al diseñar una unidad almacenadora por este medio deben tomarse ciertas precauciones, como son el aislamiento del sistema.

c) Algunas de las ceras más usadas son:



Actualmente se están estudiando las propiedades de la cera de Candelilla extraída de una palma que florece en los desiertos de México, esta podría ser utilizada también en este proceso.

d) El punto de fusión de la parafina es de 82°F.

Comparaciones

- a) Las ceras almacenan cerca de la misma cantidad de energía por libra como las sales de calor de fusión pero tienen aproximadamente la mitad de densidad y así ocupan dos veces más espacio.
- b) A comparación de las sales de calor de fusión las ceras tienen poca exposición a sobre saturación.

Ventajas

- a) Una gran ventaja de las ceras, como dijimos es su poca exposición a sobre saturación, debido a esto desde una temperatura de solamente unos pocos grados producen una nucleación espontánea sin necesidad de agente nucleante.

- b) Solamente un componente sólido es formado al enfriarse y no hay competencia con otras reacciones, de este modo las ceras son muy confiables y tienen indefinidamente ciclos grandes de vida de fusión.

Desventajas

- a) Debido a su alta inflamabilidad presentan una desventaja con respecto a los otros materiales, de esta manera sus recipientes deben estar diseñados con la misma precaución que los tanques de combustible.
- b) Su costo por el calentamiento que dan es mayor al de las sales de calor de fusión.

V.1.2.3 Suspensiones

Para términos del calentamiento por energía solar y tomando en cuenta algunas de las desventajas de los materiales antes vistos se presenta la posibilidad de hacer una suspensión, para que ésta suspenda los precipitados encimados y agentes nucleantes como partículas pequeñas.

Una suspensión es el estado de un cuerpo muy dividido que se mezcla con la masa del fluido sin disolverse en él. La gran área de superficie entre las fases líquida y sólida asegura a la suspensión el equilibrio prevaleciente.

Varias sales de calor de fusión (vistas antes) y medios de suspensión fueron estudiados.

Medios de suspensión:

Etilhidroxi-celulosa

Alcohol polivinílico

Acido poliacrílico

Oxido de polietileno

Almidón

Pulpa de madera

Arcilla (bentonita)

Tierra de diatomaces

Con el fluido de suspensión y las sales de calor de fusión bien divididas se hacen las suspensiones de las cuales enumeramos tres que fueron estudiadas:

1) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, 5% de pulpa de madera y 2% de $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$

2) $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ y 2% de almidón

3) $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ y 2% de alcohol polivinílico

(alguna de sus propiedades y punto de fusión fueron descritos en materiales de calor de fusión y ceras).

Propiedades

El $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ con 2% de almidón, es una solución muy viscosa, esto no debe dificultar el enlace transversal de las moléculas

de el almidón a formar una gel irreversible.

El almidón es agregado para tener un punto de fusión inmutable, y también para favorecer el crecimiento del cristal en la fusión y es incorporado al cristal como un precipitado dando a este un color obscuro, sin embargo como el material debe estar cierto tiempo almacenado estará sujeto a degradación con subsecuentes pérdidas de viscosidad y fuerza coloidal, esto puede ser prevenido con materiales fungicidas.

El $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ y 2% de alcohol polivinílico, tercer material, tiene fases similares al anterior. El alcohol polivinílico disuelto es más estable que el almidón, sin embargo éste es muy costoso. La sal tiene de preferencia un alto punto de fusión.

Cuando es fundido el material número 1 se convierte en una masa esponjosa, el líquido es fácilmente exprimido por la compresión de esta masa, pero no tiene tendencia a fijarse. La fase sólida es una masa seca fundida de pequeños cristales y fibras, parecido al cemento. Las fibras de madera son preparadas por cocimiento de periódico con un pequeño porcentaje de NaOH , la cual es después neutralizada con ácido sulfúrico.

y son comercialmente aprovechables, su tamaño es del orden de de 1 mm. a .01 mm y ellas ordinariamente son celulosa la cual es insoluble, pero absorbe su propio peso de agua, $Na_2B_2O_7 \cdot 12 H_2O$ es adicionado como un agente nucleante.

Comparaciones

La suspensión se hace con una combinación de sales de calor de fusión y un medio de suspensión adecuado, por lo tanto se podría decir que la suspensión es un material perfeccionado de las sales de calor de fusión; presentan sus propiedades y algunas de sus desventajas. Sin embargo en algunos casos se prefiere usar las sales de calor de fusión.

Ventajas

- a) Las suspensiones presentan la ventaja de quitar algunos defectos a las sales de calor de fusión como son los precipitados encimados y agentes nucleantes como partículas pequeñas.
- b) Al quitarle estos defectos un almacenador de energía solar a base de estos materiales trabaja más eficiente.

Desventajas

- a) En el estudio de las suspensiones no se ha logrado llevar hasta lo máximo la combinación ideal y también no se han estudiado muy a fondo.

- b) Las combinaciones que se han estudiado a la fecha son pocas.
- c) En el tiempo que duran almacenadas pueden presentar degradación, pérdida de viscosidad y fuerza coloidal, esto se puede remediar usando agentes fungicidas que no permitirán la creación de microorganismos dentro de la suspensión y por lo tanto que nos duren más sin romperse el equilibrio prevaleciente. Sin embargo, con respecto a costos todos los materiales agregados de más nos van a producir un costo más elevado al de los otros materiales. En sí el uso de estos almacenadores de energía solar nos presentan una forma de usar más eficientemente el calor generado por los colectores.

Son mayores las ventajas que presentan estos almacenadores, con respecto a los de agua.

Las nuevas técnicas descubiertas y procedimientos nuevos también nos pueden llevar a un uso más eficiente de estos almacenadores.

V.1.3 Almacenaje por aislamiento térmico

Esto se refiere a recipientes con aislamiento adiabático, de acuerdo con la emisión o radiación de energía térmica por el

material que soporta el fluido, deberá ser el aislamiento; en la tabla 4.2, se presentan las emisividades (pérdidas de calor por radiación) de varios materiales.

La pérdida total de calor se deberá a radiación y a convección. Estos mecanismos operan en paralelo e independientemente transmitiendo energía de la superficie del recipiente al exterior.

Para calcular la pérdida de calor por un recipiente se usa la siguiente ecuación teórica:

$$q_h = \epsilon \sigma A (T_2^4 - T_1^4)$$

donde:

q_h	pérdida de calor por radiación
ϵ	emisividad
σ	constante de <i>Stefan-Boltzmann</i>
T_2, T_1	temperatura de la superficie externa del recipiente y temperatura del medio
A	área de la superficie externa del recipiente

para calcular el aislamiento se puede usar la siguiente ecuación:

$$q_h = \frac{KA (T_2 - T_1)}{t}$$

donde:

K	conductividad térmica
t	espesor del aislante

$$q_t = q_c + q_r; \text{ p\u00e9rdida total de calor, BTU/h}$$

c convección
 r radiaci\u00f3n

A continuaci\u00f3n se reporta la conductividad t\u00e9rmica de varios materiales aislantes:

Tablá 5.3 CONDUCTIVIDAD TERMICA PROMEDIO DE VARIOS MATERIALES AISLANTES

Material	Densidad lb/ft ³	Presi\u00f3n del gas, en mm de H _g	gas intersticial	Conductividad BTU/hr ft °R
S\u00edlica aerogel	6.2	628	Nitr\u00f3geno	12x10 ⁻⁴
	6.2	628	Helio	113x10 ⁻⁴
	6.2	628	Hidr\u00f3geno	358x10 ⁻⁴
S\u00edlica	3.7	10 ⁻⁴		12x10 ⁻⁴
Tierra de diatomaceas (1-100 micras)	15	10 ⁻⁴		9x10 ⁻⁴
	18	10 ⁻⁴		5.8x10 ⁻⁴
Al\u00famina fundida	125	10 ⁻⁴		10.5x10 ⁻⁴
Al\u00famina laminar (0.1-10 micras)	4.4	10 ⁻⁴		13.3x10 ⁻⁴
Mica expandida	9.4	628	Helio	867x10 ⁻⁴
	9.4	628	Nitr\u00f3geno	290x10 ⁻⁴
Polvo de caracol	30	10 ⁻⁴		10.5x10 ⁻⁴
Carb\u00f3n + 7% de ceniza(30%,44 micras)	12.5	10 ⁻⁴		3.5x10 ⁻⁴

Silicato de calcio (sintético) (0.02-0.07 micras)	22.5	10^{-5}		3.2×10^{-4}
	22.5	628	Nitrógeno	263×10^{-4}
Espuma de poliuretano	2.4	540-137	1 atm.	1.9×10^{-2}
	2.9	540-137	1 atm.	1.5×10^{-2}
	2.9	137-36	(10^{-5} mm de Hg)	0.47×10^{-2}
Resina epóxica	5.0	540-137	1 atm	1.9×10^{-2}
	5.0	540-137	10^{-2} mm de Hg	0.97×10^{-2}
	5.0	540-137	4×10^{-3}	0.75×10^{-2}
Poliuretano	5.0-8.5	540-137	1 atm	1.9×10^{-2}
		540-137	10^{-3} mm de	0.7×10^{-2}
Caucho	5.0	540-137	1 atm	2.1×10^{-2}
Sílica	10	540-137	1 atm	3.2×10^{-2}
Vidrio	9	540-137	1 atm	2.2×10^{-2}

Material	Reflector	Espesor (pulgadas)	No. de hojas por pulgadas	Densidad lb/ft	Pared fría °R	K (BTU/hr ft °R)
A	2	1.3	55	7.5	137	3.2×10^{-3}
					36	2.3×10^{-3}
B	1	1.5	50	7.0	137	3.0×10^{-3}
					36	2.4×10^{-3}
B	1	1.0	50	7.0	137	4.1×10^{-3}
					36	3.5×10^{-3}
A	1	1.2	52		137	7.5×10^{-3}
A	3	1.5		3.8	137	18.5×10^{-3}
					36	13.9×10^{-3}
A	1	1.4	37	6.9	137	4.3×10^{-3}
					36	3.0×10^{-3}
A	1	1.5	23	6.9	137	4.9×10^{-3}
C	1	1.2	29	6.9	137	4.1×10^{-3}
					36	2.9×10^{-3}
A	2	2.0	48	7.5	137	6.4×10^{-3}

Material	Reflector	espesor (pulgadas)	No.de hojas por pul gadas	Densidad lb/ft ³	Pared fría °R	K (BTU/ hr ft°R)
D	1	1.2	52	7.5	137	13.3×10^{-3}
A	2	1.5	52	5.9	137	8.7×10^{-3}

NOTACION:

- A Papel fibra de vidrio de 0.008 pulgadas de espesor,
90 % fibra
- B Papel fibra de vidrio de 0.0048 pulgadas de espesor,
90 % fibra
- C Estera de fibra de vidrio con unión de estireno, de
0.008 pulgadas de espesor
- D Nylon de 0.006 pulgadas de espesor, 90% vacío
- 1 Hoja de aluminio de 0.005 pulgadas de espesor
- 2 Hoja de aluminio de 0.00023 pulgadas de espesor
- 3 Mylar, aluminizado por ambos lados, 1.5 a 2.0 ohms/ft²

La pérdida de calor por convección puede ser calculada por:

$$q_c = h_c A (t_2 - t_1)$$

donde:

- q_c pérdida de calor por convección, BTU/hr
- h_c coeficiente individual o coeficiente de
superficie

VI. CRITERIOS DE SELECCION

VI.I Manejo de información para un diseño optimizado.

Resumiendo, los sistemas vistos en esta tesis para calentamiento y enfriamiento por energía solar, se tiene:

1. Sistemas de absorción de energía solar

Diseño básico:

a) Superficie transparente. La selección debe verse de acuerdo con:

- Para calentamiento.- un mayor paso de la energía solar entrante (transparencia a la radiación visible) y menor pérdidas de radiación térmica (opacidad a la radiación infrarroja).

Medios de control.- Esto puede lograrse variando los siguientes parámetros:

- Contenido de fierro en el vidrio, la transparencia a la radiación visible e infrarroja es inversamente proporcional al contenido de óxido férrico del vidrio. Como se ve si se logrará bajar el contenido de óxido férrico a niveles muy bajos, la transmitancia que se lograría a la superficie captadora tendería a ser máxima, pero no se podría evitar la salida de radiación térmica en gran cantidad debido a que el vidrio también es transparente a la radiación infrarroja (arriba de 2.5 micras). Si usáramos un vidrio que tuviera un contenido alto de óxido férrico los escapes por radiación térmica serían muy pequeños, pero la

Transmisión de energía solar a la superficie captadora, sería mínima.

El espesor de la superficie transparente es un factor de diseño importante pues la transparencia va a ser inversamente proporcional al espesor, de tal manera que se tiene el mismo problema que para el parámetro anterior.

Se pueden combinar varios paneles de la superficie transparente, evitando así escape térmico, pero disminuyendo la transmitancia en el visible.

De acuerdo con esto en caso de vidrios se recomienda usar una combinación de dos vidrios de bajo contenido de óxido férrico o un vidrio solo con un espesor adecuado; para otras superficies transparentes, el espesor es el único medio de control.

Para enfriamiento.- Se necesita que la superficie sea transparente a la radiación solar y a la térmica.

Existe un número bastante grande de sustancias, cuya transparencia se extiende en el infrarrojo lo suficiente para cubrir el rango de las ventanas de la atmósfera. A este tipo de superficies pertenecen las películas plásticas de: polietileno (alta presión), polipropileno, poliestireno, nylon, teflón, y cristal con bajo contenido de Fe_2O_3 , y poco espesor.

Las ventajas que presentan los plásticos con referencia a los vidrios es que tienen mayor resistencia a la fractura (para un mismo espesor), mayor transmitancia de la energía solar en películas delgadas, baja densidad y económicos (películas delgadas) y las desventajas, para el mismo espesor son más caros, son menos resistentes al intemperismo (degradación con radiaciones ultravioleta), tienen una transparencia parcial al infrarrojo, son inestables en altas temperaturas y tienen baja resistencia al rayado.

En general para hacer una selección adecuada de una superficie transparente se debe tener en cuenta los siguientes requerimientos:

- Alta transmitancia solar (.3-2.5 micras)
- Baja transmitancia al infrarrojo (3-100 micras)
- Bajo costo
- Alta resistencia al rayado
- Buena estabilidad térmica
- Bajo costo de mantenimiento
- Buena producción en masa (proceso)
- Alta resistencia a la fractura
- Resistencia a fenómenos de intemperismo (UV, agua, etc.)
- Altamente disponibles

De acuerdo con esto los materiales seleccionados son:

- Vidrio
- Polimetacrilato de metilo (acrílico)

- Policarbonato
- Plásticos reforzados con fibra de vidrio (si la temperatura se mantiene baja)

Películas delgadas:

- Polietileno terftalato (poliester)
- Fluoruro de polietileno
- Policarbonato

b) Superficie captadora.-

En caso de calentamiento.- La selección debe de verse desde el punto de vista de tener mayor absorción de energía solar (.3-2.5 micras) y una baja emitancia en el infrarrojo (más de 2.5 micras)

Para superficies propias, se toma en cuenta lo anterior y además que tiene que ser económicas, altamente disponibles y fáciles de manejar.

Para superficies selectivas, las características de absorbanancia y de emitancia dependen de tres factores.

- La naturaleza específica del revestimiento que es una capa depositada sobre el metal por medio de un baño químico o electroquímico, o metal finamente dividido.

Este revestimiento debe tener una selectividad espectral, como dijimos el requerimiento básico es que sea una delga-

da película negra de un semiconductor de energía, sobre una base de metal pulido, donde este último deberá tener alta reflexión en la radiación infrarroja, o sea una débil emisividad térmica.

- El revestimiento deberá tener un espesor del mismo orden de longitud de onda que la radiación que absorbe. Además de tener un espesor suficiente para dar una protección efectiva al material base contra la corrosión atmosférica o a la oxidación térmica.
- El revestimiento debe presentar alta resistencia física, así como junto con el metal base debe presentar gran estabilidad química y térmica.

De acuerdo con esto, en el caso de superficies selectivas se recomienda usar como metal base aquellos que tenga resistencia a corrosión, a cambios térmicos y atmosféricos, así como que presente una superficie altamente pulida con la mayor reflexión posible.

Estos pueden ser: Aluminio, cobre, acero inoxidable, acero tratado, níquel.

El revestimiento debe de tener un espesor óptimo de acuerdo con las premisas antes dichas.

El rango de espesor óptimo esta entre .2 micras y 4 micras, dentro de este rango se toma en cuenta que para espesores de película muy pequeños, no dan una protección efectiva al material base contra los cambios de temperatura y corrosión, aunque la selectividad es mayor para películas delgadas; en películas gruesas la selectividad disminuye demasiado.

Además la película debe presentar homogenidad, pureza y continuidad. Las superficies negras espectralmente selectivas pueden ser producidas por:

- Depósito de algún material negro sobre un metal pulido base (electrodepósito, depósito al vacío).
- Una delgada capa de metal finamente dividido sobre una base negra.
- La superficie de una placa metálica tratada a convertirse en capa negra (baños químicos, cámara de gas).

Para enfriamiento.- Debe tomarse en cuenta superficies con alta reflectividad, y tener una emisión selectiva, ya que existe un espectro discontinuo en la emisión energética de la atmósfera. Además se debe de tomar en cuenta lo anteriormente tratado para calentamiento.

c) Unidad de almacenaje.- La selección debe verse desde el punto de vista de tener mayor tiempo guardado el calor o frío generado, para esto existen materiales que pueden absorber o aislar las fuentes de calor o frío, estos materiales fueron tratados en un capítulo anterior junto con sus ventajas y desventajas, solamente se puede añadir que aparte de estos materiales pueden existir muchos otros utilizables a este fin, y que pueden ser ampliamente desarrollados.

2. Sistemas de concentración de energía solar

Son aquellos que concentran la energía solar en un punto óptimo confiriéndole calentamiento, existen dos procesos básicos de este sistema.

- a) Reflexión total de la energía a un punto o puntos
- b) Concentración mediante lentes convexos de la energía a un punto óptimo.

El primero se basa en la propiedad que tienen algunos cuerpos de reflejar la radiación incidente, tales como los espejos, los metales pulidos, los metales cromados etc, absorbiendo muy poca luz visible.

Un espejo ordinario consta de una capa delgada de plata depositada sobre una lámina de vidrio.

Para concentrar la luz en un punto, no se puede usar un espejo plano pues la luz siempre diverge apareciendo como si procediese de una imagen virtual situada detrás del espejo.

La forma adecuada es un espejo parabólico, donde éste se puede construir a partir de espejos planos, (fig 6.1)

La selección de equipo debe verse desde el punto de vista de tener

- La mayor transmisión de energía solar al espejo
- Que el espejo tienda a un paraboloides perfecto
- Cuando el número de espejos crece la luz converge en una región más pequeña

En el límite, los espejos serán infinitamente pequeños.

Subdividiendo y reorientando planos en el espacio, nos aproximamos cada vez más a un espejo formado por una superficie continuamente curva; siguiendo indefinidamente el proceso resulta un espejo continuo que enfoca la luz que incide en forma paralela.

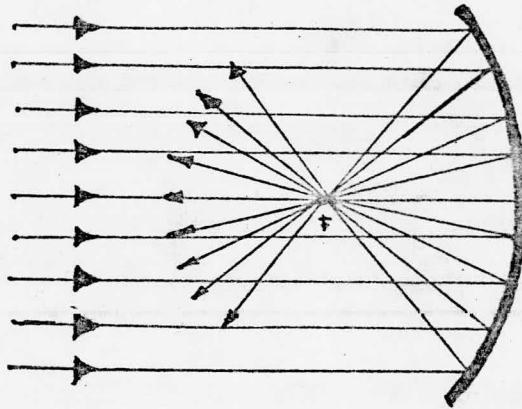


Fig. 6.1 CONVERGENCIA DE LA LUZ POR UN ESPEJO
CURVO

El punto F en el que converge toda la luz reflejada se denomina foco principal del espejo parabólico.

Al construir espejos parabólicos, generalmente, se parte de una superficie aproximadamente parabólica, que se va perfeccionando por esmerinado o pulido, hasta conseguir que la luz que incide paralelamente al eje de revolución se refleja por un foco bien definido.

- El tamaño del espejo es un factor importante pues entre más grande sea, mayor va a ser la energía colectada y transmitida al foco.

- El ángulo de orientación del espejo hacia el sol, es importante pues el espejo debe estar en posición óptima para recibir más de los rayos solares.

Los materiales seleccionados como superficies reflejantes son:

- Porciones de espejo (vidrio con superficie plateada), que tiende a ser pequeños
- Superficies de metales pulidos (acero inoxidable)
- Mylar reflectivo sobre una superficie
- Otros plásticos y superficies cromadas

b) Concentración mediante lentes convexas

Son lentes que convergen la luz paralela que incide sobre ellos en un punto; un ejemplo clásico de estos lentes son las lupas, que puestas a los rayos solares pueden converger esta radiación y quemar una superficie o calentarla.

Estas superficies se obtienen incrementando indefinidamente el número de secciones prismáticas utilizadas para converger la luz, del mismo modo que el espejo parabólico era el límite a que nos aproximábamos cuando utilizábamos una serie creciente de espejos planos para converger un haz paralelo de luz.

Las superficies de los lentes son aproximadamente convexas es decir, las líneas que representan las superficies en la fig 6.2, son arcos de circunferencia.

Las diferencias que pueden existir entre las superficies ideales y las usadas son despreciables, si se satisfacen dos condiciones:

- El espesor de la lente debe ser considerablemente menor que su longitud
- Su anchura debe ser mucho menor que la distancia de la lente a la línea sobre la que convergen los rayos.

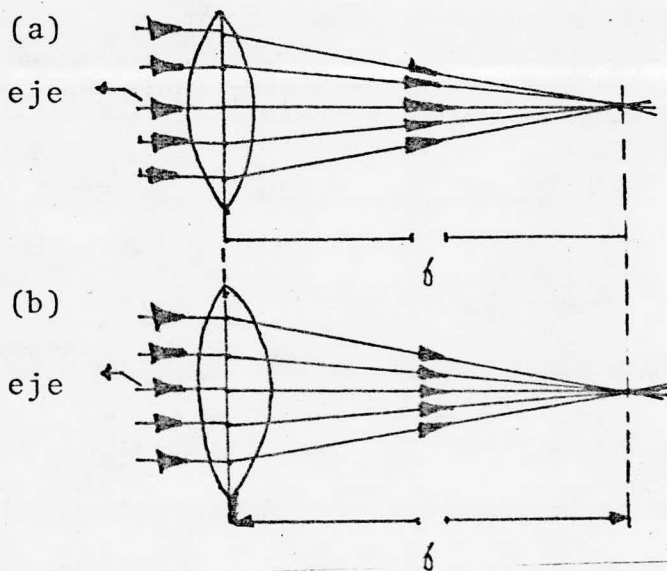


Fig. 6.2 Lente convexa, en las lentes delgadas al distancia focal es la misma, cualquiera que sea el lado por donde incide la luz paralela; el resultado es el mismo al incidir por el lado de menor radio (a) o por el lado de mayor radio

Casi todas las lentes se construyen mediante dos superficies esféricas.

La línea que pasa por el centro de la lente y contiene el centro de las dos esferas, se denomina eje de la lente. El punto de este eje donde convergen los rayos paralelos incidentes se denomina foco principal, F , y la distancia del foco principal al centro de la lente se llama distancia focal, f .

Para cálculos hay una relación que se conoce como la "fórmula del óptico".

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

donde:

f distancia focal

n índice de refracción

R_1 y R_2 radios de las superficies esféricas opuestas

de esta ecuación se deduce que cuando los valores R_1 y R_2 son pequeños la lente tiene una distancia focal más corta.

En caso de calentamiento, con radios pequeños hay menos distancia focal y por tanto más concentración de rayos solares.

Por esta razón no se pueden hacer sistemas demasiado grandes con este método, pues se harían las distancias focales muy grandes, y resultarían demasiado costosos.

El radio de una superficie se toma como una superficie esférica perfecta.

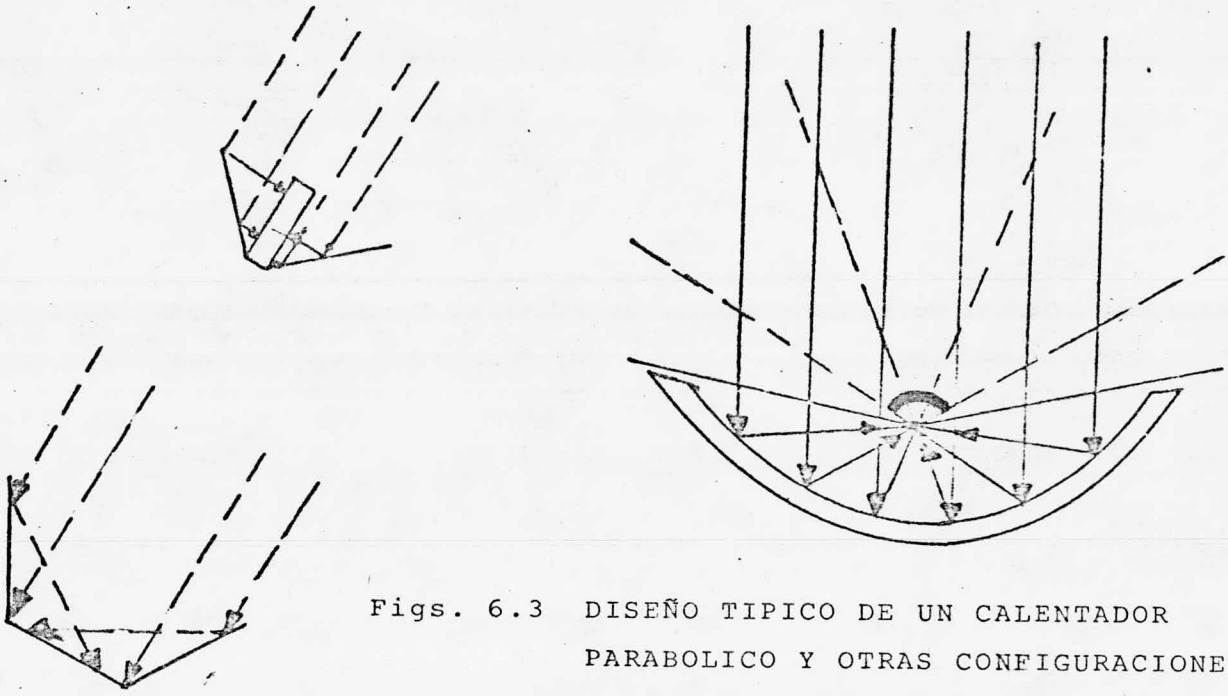
Para un diseño adecuado de calentamiento por este tipo de sistema, se debe de tomar en cuenta.

- Su orientación al sol
- Cuanto más corto el radio de la superficie de una lente, más corta su distancia focal
- El costo es proporcional a la distancia focal

Los lentes convexos están en desventaja con los espejos parabólicos por su costo, pues estos generalmente son de vidrio que se debe pulir para dar la esfericidad adecuada.

Fuera de esto, un sistema por concentración de energía por lente, es muy eficiente.

En la fig 6.3 y 6.4 se muestran los diseños típicos de calentadores por ambos sistemas.



Figs. 6.3 DISEÑO TIPICO DE UN CALENTADOR PARABOLICO Y OTRAS CONFIGURACIONES

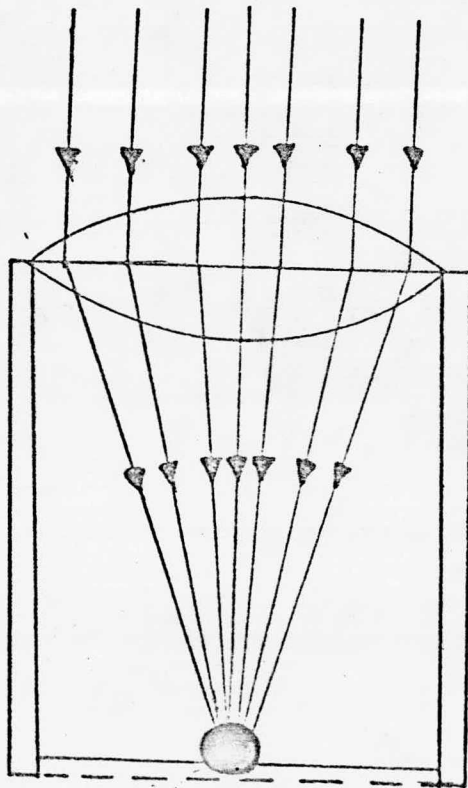


Fig. 6.4 DISEÑO TIPICO DE UN CALENTADOR CONVERGENTE

CONCLUSIONES

La presentación de propiedades de materiales para el aprovechamiento de la energía solar en base a diseños básicos, nos permite enfocar esta tesis como una especie de manual práctico, cuando se quiera consultar para la construcción de un determinado equipo; como por ejemplo, en la selección de la superficie transparente, se toman en cuenta su transparencia a la energía radiante entrante y su opacidad a la energía térmica saliente, entonces el criterio de diseño se obtendrá del análisis de la transmitancia de la superficie, y así para las diversas partes del equipo.

Los materiales útiles, se han enfocado a los más accesibles que pueden ser de menor costo. Sin embargo, el camino para el desarrollo de más materiales o para conocer sus propiedades útiles está abierto.

De acuerdo a las partes funcionales de un diseño básico se puede seleccionar un material, no obstante que este pueda caer en dos partes funcionales, su requerimiento será en base --

a las propiedades que presente en cada parte funcional. Así por ejemplo, el desarrollo de un nuevo polímero podría ser útil en la parte funcional de la superficie transparente o en la unidad almacenadora de acuerdo a sus propiedades ópticas (Módulos principales).

Para un mejor criterio de selección se pueden usar las Figs 1.1 y 1.2, los criterios para optimizar los dos diseños básicos son dados a lo largo de esta tesis.

T A B L A S

- Tabla 3.1 Propiedades físicas de 5 materiales transparentes
- Tabla 3.2 Fracciones de radiación cósmica transmitida (t) absorbida (A_1 y A_2) y reflejada por uno y doble vidrio ($I.R = 1.526$)
- Tabla 3.3 Comparación de la transmisión de un solo vidrio calculado por tres métodos ($n = 1.526$)
- Tabla 3.4 Comparación de la absorción de un solo vidrio calculado por cuatro métodos ($n = 1.526$
 $K\ell = 0.837$)
- Tabla 3.5 Comparación de la transmisión de un doble vidrio calculado por dos métodos ($n = 0.054$ en ambas láminas)
- Tabla 3.6 Características de algunas muestras de vidrio para radiación incidente normal
- Tabla 4.1 Absorbancia y emitancia de varias superficies
- Tabla 4.2 Emisividad normal de varias superficies
- Tabla 5.1 Almacenamiento térmico de 1×10^6 BTU con 20°F
- Tabla 5.2 Sales hidratadas
- Tabla 5.3 Conductividad térmica promedio de varios materiales aislantes

FIGURAS

- Figura 1.1 Diagrama de bloques de los elementos y organización funcional de la presente tesis
- Figura 1.2 Elementos y organización funcional de un modelo general de sistemas para la planeación de control y funcionamiento óptimo
- Figura 2.1 Diseño básico de un colector de energía solar por sistema de absorción
- Figura 2.2 Cuatro diseños de colectores de energía solar de superficie plana por absorción
- Figura 2.3 Fenómeno de la refracción
- Figura 2.4 Distribución de la energía emitida por un cuerpo negro
- Figura 3.1 Espectro de transmitancia del vidrio conteniendo 0.15% Fe_2O_3
- Figura 3.2 Espectro de transmitancia del vidrio conteniendo 0.48 Fe_2O_3 (vidrio de calor de absorción)
- Figura 3.3 Espectro de transmitancia del vidrio conteniendo 0.035% de Fe_2O_3 (vidrio de bajo contenido de Fe)
- Figura 3.4 Espectro de transmitancia del vidrio conteniendo 0.10% de Fe_2O_3
- Figura 3.5 Espectro de transmitancia del vidrio hojalima (para espesor estandar y de 3/16")
- Figura 3.6 Espectro de transmitancia del vidrio "agua blanca" (para espesores de 5/32", 3/16" y 7/32")

- Figura 3.7 Transmisión de radiación solar directa por un panel de vidrio
- Figura 3.8 Absorción de radiación solar directa por un panel de vidrio
- Figura 3.9 Transmisión de radiación solar directa por dos paneles de vidrio vs la suma de el KL de cada hoja
- Figura 3.10 Absorción de radiación solar directa por dos paneles de vidrio , cuando el KL de la hoja interior es igual a 0.054
- Figura 3.11 Flujo de calor en la superficie interior de un panel de vidrio
- Figura 3.12 Flujo de calor en la superficie interior de dos paneles
- Figura 3.13 Reflexión de la radiación solar directa de una superficie
- Figura 3.14 Reflexión múltiple de la radiación solar directa en un panel de vidrio
- Figura 3.15 a) Dispersión de luz blanca por un prisma
b) Haz de luz divergente
- Figura 3.16 Componentes principales de un espectrómetro
- Figura 3.17 Diagrama del sistema básico del espectrómetro Perkin-Elmer modelo EPS-3T

- Figura 3.18 Espectro de transmitancia del vidrio A
- Figura 3.19 Espectro de transmitancia del vidrio B
- Figura 3.20 Espectro de transmitancia del Mylar A
- Figura 3.21 Espectro de transmitancia del Mylar B
- Figura 3.22 Espectro de transmitancia del Tedlar A
- Figura 3.23 Espectro de transmitancia del Tedlar B
- Figura 3.24 Espectro de transmitancia del Teldar C
- Figura 3.25 Espectro de transmitancia del polietileno
- Figura 3.26 Espectro de transmitancia del flexiglass
- Figura 4.1 Espectro de absorbancia de una placa de cobre recubierta
- Figura 6.1 Convergencia de la luz por un espejo curvo
- Figura 6.2 Lente convexa
- Figura 6.3 Diseño típico de un calentador parabólico y otras configuraciones
- Figura 6.4 Diseño típico de un calentador convergente

B I B L I O G R A F I A

1. Physics (2a Ed.) P.S.S.C, D.C. Heath & Company
Boston, Massachusetts, 1965
2. "Physics for students of science and engineering",
Part two, D. Halliday & R. Resnick,
Wiley International Edition
3. "Física general y experimental, II", E. Perucca,
Ed. Labor S.A.
4. "Métodos instrumentales de análisis", H.H. Wilard,
L. L. Merritt, Jr., & J. B. Dean, C.E.C.S.A.
5. Principles unit operations, A. S. Foust, J. Wiley &
Sons, Inc. New York, 1972
6. Infrarouge et applications thecniqhs, Ma la Toison,
Editions Contner, France. Eicodhoven
7. Rayonnement solaire Et E'changes radiatifs natureles,
Ch. PERRIN DE BRICHAMBAUT CAUTHIER/VILARS EDITEUR,
France
8. Estudio y desarrollo de superficies selectivas para el
aprovechamiento de la energía solar, Julia Quintana
Llanas, Tesis, 1976

9. Utilización de las superficies selectivas en la energía solar, R. Almanza y S. López, UNAM, Instituto de Ingeniería, Septiembre de 1976, reporte No. 378
10. News Buletin ASG Industries Inc. "Glazing for solar energy collectors"
11. "Standard solar radiation curve for engineering calculations", Parry Moon, Journal of Franklin Institute, 1947
12. Transparent glazing media for solar energy collector. por Clarence W. Clarkson & James S. Herbert, Art. sin dato de origen del Centro de Investigación de Materiales, UNAM
13. Transactions American Society of Heating and Ventilating Engineers No. 1281 P. 317 a 340. "Transmisión de radiación solar a través de un cristal plano bajo condiciones de verano", George V. Par-Melae
14. American Nautical Almanac, Bulletin 71, Hydrographic Office, "Ephemeris of the sun and the azimuths of the sun"
15. "Heat insulation", G.B. Wilkes, J. Wiley & Sons Inc N. York, 1950

16. "Heating-Cooling Solar Storage", Maria Talkes, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
17. "Suspensión media for heat storage materials", Day Chahrudi, Artículo sin dato de origen, Centro de Investigación de Materiales, UNAM
18. "Solar heating and cooling, Engineering practical design, and economics", J.F. Kreider y F. Kreith. Mc Graw-Hill, Book Company, N. York, 1975
19. "Radiación solar global en la República Mexicana mediante datos de insolación ", R. Almanza y S. López, Instituto de Ingeniería, UNAM, No. 357, oct 1975
20. "Earth, Sea, and Air", a Survey of Geophysical Sciences , J. Spar, Addison-Wesley Publishing Company Inc. U.S.A, 1967
21. "Resistance Revision Materials for Solar Collectors (flat plate)", Takao Kobayashi & Stephen L. Sargen, Department of Mechanical Engineering, University of Maryland
22. Chemical engineering handbook, John H. Perry, Fourth Ed., Mc. Graw-Hill - Kogakusha, New York-Tokio, 1963, (p -10-35)
23. International critical tables. Mc Graw-Hill, Book Co. New York, 1929

24. "La distribución de la radiación global en México evaluada mediante la fotointerpretación de la nubosidad observada por Satélites Meteorológicos."

Tesis de Maestría en Ciencias

Everardo Hernández H.

Fac. de Ciencias, UNAM, 1976

25. "Toma de decisiones por medio de INVESTIGACION DE OPERACIONES".

R. J. thierauf y R. H. Brosse

Ed. Limusa-Wiley, S.A., 1972

RECONOCIMIENTO

Se agradece a las siguientes instituciones y personal la colaboración que se prestó para hacer factible la elaboración de esta tesis.

- Centro de Investigación de Materiales, UNAM, en especial al *Dr. Eric Mayer B., Fis. Everardo Hernández, Ing. Guillermo Alcayde e Ing. Isaac Pilatowski*
- Instituto de Física, UNAM, en especial al *Fis. Enrique Camarillo y Dr. Eduardo Muñoz Picone*
- Instituto de Ingeniería, UNAM, Coordinación de Fluidos y Térmica
- Comisión del Fomento Minero, en especial al *Ing. Federico Loperena*
- Instituto Mexicano del Petróleo, Depto. de Refinación y Petroquímica, en especial al *Ing. Felipe Ocampo Torres*
- Universidad Autónoma Metropolitana, Depto. de Ingeniería Ambiental