

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA

APROVECHAMIENTO DE LA EMISIVIDAD  
DE LOS CUERPOS NEGROS

185

T E S I S  
QUE PARA OBTENER  
EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A  
MAGIN ENRIQUE JUAREZ VILLAR



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

CLAS. Tesis  
ADQ. 1975  
FECHA  
PROC. MT / 78



QUILMES

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

APROVECHAMIENTO DE LA EMISIVIDAD  
DE LOS CUERPOS NEGROS

MAGIN ENRIQUE JUAREZ VILLAR

INGENIERÍA QUÍMICA

1 9 7 5

Jurado asignado originalmente  
según el tema

PRESIDENTE: Julio García Stahl

VOCAL: Guillermo Alcayde Lacorte

SECRETARIO: Isaac Pilatowsky Figueroa

1er. SUPLENTE: Miguel A. Parrodi Arroyo

2do. SUPLENTE: Carlos Franco Ajuria

Sitio donde se desarrolló el tema: CENTRO DE INVESTIGACION DE MA-  
TERIALES, U.N.A.M.

Nombre completo y firma del sustentante: MAGIN ENRIQUE JUAREZ  
VILLAR

Nombre completo y firma del asesor del tema: ISAAC PILATOWSKY  
FIGUEROA

Nombre completo y firma del supervisor técnico  
(si lo hay)

A MIS PADRES.

INDICE

	PAG.
I. - INTRODUCCION	5
II. - TEORIA DE LA RADIACION SOLAR Y LA RADIACION TERRESTRE	10
III. - CLASIFICACION DE LAS SUPERFICIES PARA LA CAPTACION DE LA RADIACION SOLAR Y LA RADIACION TERRESTRE	20
IV. - MODELO MATEMATICO	37
V. - METODO EXPERIMENTAL	44
VI. - RESULTADOS	55
VII. - CONCLUSIONES	65
VIII. - BIBLIOGRAFIA	68

## I.- INTRODUCCION

Desde hace mucho tiempo se conoce que cuando el cielo está claro, los cuerpos sufren enfriamientos durante los períodos nocturnos, y aún, nosotros mismos lo podemos experimentar cuando estamos en la noche bajo un cielo raso.

En el siglo pasado, ya se habían hecho algunas observaciones de este fenómeno por varios investigadores tales como Wilson, Six, Wells, Povillet, Mellani, Arago, etc. Se encontró en una memoria de Arago que data de hace más de 130 años un resumen de observaciones de gran interés, donde se menciona en particular, que muchas substancias terrestres, como la hierba, las rocas, la madera, la arena, el algodón, etc., las cuales durante el período nocturno sufrían un enfriamiento que iba desde 2, 6, 8 y en condiciones excepcionales hasta 9 grados por abajo de la temperatura ambiente.

Se observó el mismo efecto para otras substancias como planchas recubiertas de herrumbre.

Por el contrario, dice Arago, el enfriamiento es mucho menor para las superficies metálicas e inexistente para ciertas superficies pulidas de cobre, estaño, oro y plata.



Otra observación hecha por estos investigadores, es que son los cuerpos terrestres los que se enfrían, y enfrían progresivamente al aire por intercambios con él. Hoy en día, sabemos que los cuerpos terrestres, según los estudios realizados por el Dr. Trombe, pierden energía por radiación al espacio y que estos enfrían por intercambios de energía, por radiación en particular, al aire de bajas alturas.

En años recientes, ante la amenaza de agotarse las reservas petrolíferas y la de la contaminación ambiental, se está llevando a efecto una ardua investigación sobre la radiación solar y la radiación terrestre con la finalidad de hacer una explotación racional en lugares áridos y secos que ofrecen un cielo claro durante la mayor parte del año.

La radiación terrestre es igual a la diferencia dada por la radiación emitida por la superficie terrestre y la radiación proveniente de la atmósfera. Cuando se encuentra nublado, la radiación terrestre es casi nula debido a que la capa de nubes envía hacia la Tierra tanta energía como ésta emite.

La radiación que emite la superficie terrestre puede ser representada en función de la longitud de onda por una curva continua parecida, en general, a la radiación de un cuerpo

negro a la misma temperatura.

La radiación de la atmósfera hacia la tierra se debe prácticamente en su totalidad al vapor de agua, al bióxido de carbono y al ozono. Esta radiación es discontinua y presenta, entre sus varias bandas de emisión, unas "ventanas", las cuales según su abertura determinarán la transparencia de la atmósfera para permitir o impedir la fuga de energía de la superficie terrestre.

La existencia de estas "ventanas", permite que los cuerpos terrestres pierdan energía que se traduce en un enfriamiento de estos.

El estudio de este fenómeno, nos ha conducido a considerar dos factores que influyen de una manera decisiva en la transparencia atmosférica, estos son: la humedad y la altitud.

A medida que aumenta la altura, la columna de agua precipitable se reduce y esto incrementa la transparencia de la atmósfera y disminuye la energía radiada por el vapor de agua. Por lo tanto a mayor altura, mayor será el enfriamiento relativo de un cuerpo expuesto a la intemperie.

Este fenómeno que se produce naturalmente en la parte baja de la atmósfera suele denominarse "efecto de invernadero negativo". Se le denomina así porque se pierde **energía**, a diferencia del efecto de invernadero comúnmente **conocido** que trata de captar la energía proveniente del sol.

En los lugares áridos, donde la altura de la columna de agua precipitable es reducida y las bandas de emisión del ozono muy estrechas, la influencia del bióxido de **carbono** llega a ser preponderante en los intercambios radiativos permitiendo así que las diferencias de temperatura entre los cuerpos radiadores y la atmósfera sean bastante mayores.

Los objetivos por desarrollar en nuestra investigación serán:

- 1.- Realizar un estudio del fenómeno **en que** consiste la radiación terrestre, y otro sobre las **características** de los materiales existentes que se pueden aprovechar tanto en radiación terrestre como en radiación solar.
- 2.- Determinar las emisividades o **coeficientes** de emisión de varias superficies **ennegrecidas con** diferentes recubrimientos en distintos materiales.
- 3.- Registrar los abatimientos de **temperatura** de un sistema

denominado a 4 efectos.

- 4.- Enfriar una cantidad de agua contenida en un recipiente en un sistema a un solo efecto.

El primer punto tiene como finalidad considerar la naturaleza del fenómeno así como los factores que intervienen en él, para poder aprovecharlos con fines prácticos en los materiales más adecuados.

En el segundo, la determinación de los coeficientes nos ayudará a seleccionar el recubrimiento apropiado así como el material en que estará depositado.

El tercer punto es considerar la magnitud de las diferencias de las temperaturas de los 4 efectos con respecto al ambiente.

Y en el cuarto punto determinaremos la cantidad de energía perdida por la masa de agua.

Al término de los experimentos contaremos con un estudio sobre superficies emisoras y las perspectivas que ofrece la radiación terrestre para poder aprovechar la fuga de energía al espacio que experimentan los cuerpos terrestres.

## II. - TEORIA DE LA RADIACION SOLAR Y LA RADIACION TERRESTRE

La radiación solar y la radiación terrestre son dos fenómenos que junto con el vapor de agua tienen una función muy importante en la maquinaria de la atmósfera para determinar la temperatura de la superficie terrestre.

Hemos de referirnos a la radiación solar de una manera no tan detallada, por ser un tema tan vasto, sino como una comparación con el fenómeno de la radiación terrestre que es el que tratamos de entender para nuestros fines experimentales.

La radiación solar varía de manera intermitente con el tiempo, las estaciones y la latitud del lugar. La radiación terrestre que la representa la diferencia entre la radiación emitida por la superficie terrestre y la radiación recibida de la atmósfera, es continua en aquellos lugares con cielo claro, ya que sólo depende de la transparencia de la atmósfera. Como ya ha sido mencionado, cuando el cielo está nublado la atmósfera emite tanta energía como la superficie terrestre.

La radiación solar está caracterizada en los confines de la atmósfera por una curva de emisión energética (Fig. 1) que se parece a la de

un cuerpo negro a  $6000^{\circ}\text{K}$ , sus límites se sitúan entre las longitudes de onda 0.3 a 3 micras con un máximo alrededor de 0.5 micras, mientras que la radiación terrestre se emite enteramente en el infrarrojo entre 4 y 50 micras (máximo de emisión variable con la temperatura de la superficie terrestre comprendida entre 9 y 12 micras).

La radiación solar directa incide en un ángulo sólido muy pequeño ( $7 \times 10^{-5}$  estereorradianes), mientras que la superficie terrestre emite en un ángulo sólido muy grande (alrededor de  $2 \uparrow$  estereorradianes).

A nivel de la tierra, la radiación solar directa está notablemente atenuada (Fig. 2) por la difusión molecular de la atmósfera, la difusión por las partículas en suspensión y las bandas de absorción del vapor de agua, del ozono y del anhídrido carbónico. En tiempo nublado, la radiación directa queda prácticamente suprimida, pues gran parte es reflejada por las nubes y sólo llega al suelo parte de la radiación difusa.

La energía proveniente del sol no puede ser absorbida por el aire directamente, pero las superficies de la tierra y los océanos sí la absorben. La tierra y los océanos se calientan y reemiten parte de esta energía en forma de radiación infrarroja menos intensa ha-

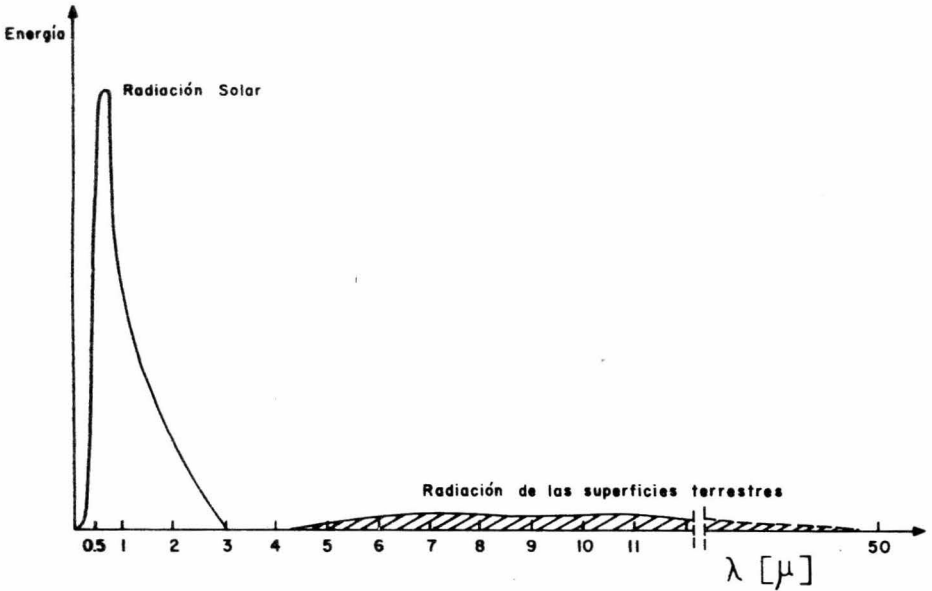


FIG. 1- POSICION DE LAS RADIACIONES SOLAR Y TERRESTRE EN LAS ESCALAS DE LAS LONGITUDES DE ONDA.

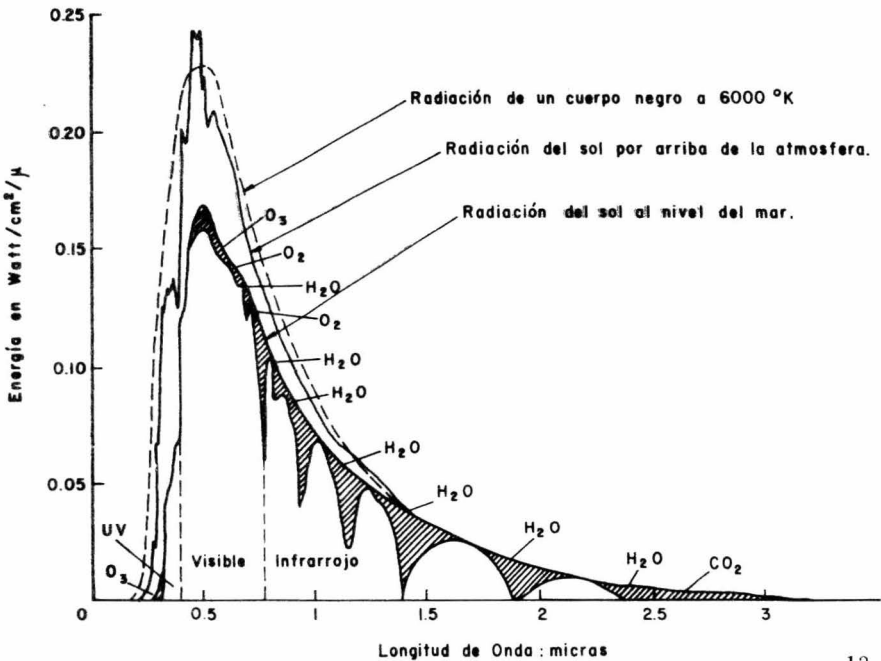


FIG. 2- REPARTICION ENERGETICA DE LA RADIACION SOLAR.

cia las capas inferiores de la tropósfera. Si bien el oxígeno y el nitrógeno son malos abosrbentes de energía, el anhídrido carbónico, el vapor de agua y las gotitas de las nubes sí absorben esta radiación que es nuevamente emitida hacia la tierra.

La atmósfera adquiere la mayor parte de su calor en la forma anteriormente señalada, o sea por radiación. Sin embargo, el aire se calienta por contacto directo con las superficies calientes o mediante la elevación de corrientes de aire caliente a las capas superiores de la atmósfera y el descenso de las capas frías hacia las superficies calientes.

De esta manera, la atmósfera actúa como una enorme pantalla, que conserva gran parte del calor recibido por la tierra y así impide que las variaciones de temperatura entre el día y la noche sean muy grandes.

Sin embargo, existen lugares con un cielo claro durante la mayor parte del año, que se caracterizan por tener una gran diferencia de temperatura entre el día y la noche. La máxima temperatura se sitúa entre las 15 y las 17 horas, mientras que la mínima nocturna se obtiene al fin de la noche antes de salir el sol. Se observan entonces grandes diferencias de temperatura entre los cuerpos expuestos



a la intemperie y el aire.

Examinemos con más detalle lo que sucede en estos casos y como podría explotarse este fenómeno natural que sucede en las zonas áridas.

Para examinar este fenómeno complejo utilizaremos las Figs. 3 y 4.

En la Fig. 3 se tiene una representación muy esquemática:

1.- El espectro de la atmósfera. Curva I

Zona A: Emisión principal del vapor de agua;

Zona B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub>: Ventanas de transparencia alrededor de la banda del ozono O<sub>3</sub>;

Zona C: Emisión principal del anhídrido carbónico CO<sub>2</sub>;

Zona D: Dominio de media transparencia, en general, tapada por el vapor de agua en gran parte.

2.- La radiación del cuerpo negro (hipotético) correspondiente a la energía total emitida por la atmósfera. Curva II.

3.- La radiación del cuerpo negro correspondiente a la temperatura de la atmósfera en la vecindad de la tierra. Curva III.

En la Fig. 4 están representadas las temperaturas del aire en función

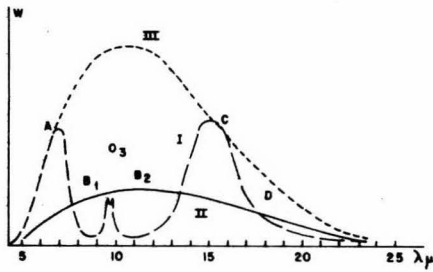


FIG. 3- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LAS ZONAS DE EMISION Y DE TRANSPARENCIA DE LA ATMOSFERA.

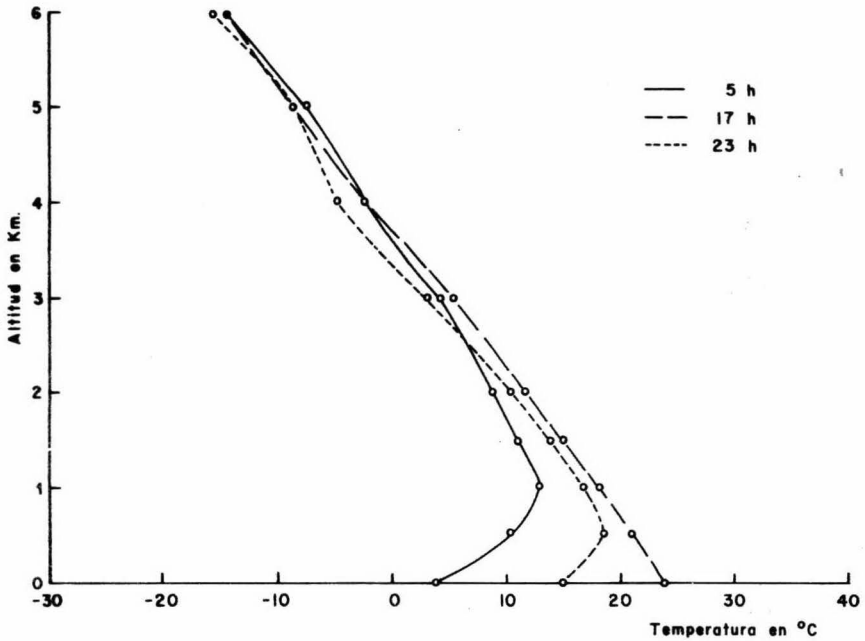


FIG. 4- PROGRESION DE LAS INVERSIONES DE TEMPERATURA DE LA ATMOSFERA DURANTE EL PERIODO NOCTURNO. EFECTO DE INVERNADERO NEGATIVO NATURAL.

de la altitud, y en función de las horas del día (17 h máximo calentamiento de la tierra; 23 y 5 horas de la mañana). Estas curvas son extraídas de un trabajo experimental muy importante establecido por M. Roulleau en Trappes, Francia en 1947.

No se han representado en la Fig. 4, medidas superiores a 6 Km., porque la experiencia muestra que se pueden prolongar estas curvas hasta la Tropopausa hacia 12 a 15 Km. donde la temperatura del aire estará entonces comprendida entre -70 y -90°C.

Fuera de las zonas de inversión por debajo de 1 Km. la variación de temperatura con la altitud es muy regular. Se tiene en general -0.6°C por cada 100 M de elevación. En estas condiciones la atmósfera es muy estable, la disminución de densidad debido a la variación de la altitud será más grande que el aumento de la densidad debido al enfriamiento del aire.

En la zona de inversión entre 0 y 1 Km. la atmósfera es igualmente perfectamente estable, la densidad del aire aumenta cuando la altitud decrece. Este sistema está entonces en equilibrio a partir de la puesta del sol y ningún intercambio por convección se produce. En los períodos diurnos el aire calentado por el sol produce las columnas ascendentes debido a la convección.

Ensayos realizados explican el proceso de enfriamiento de la superficie terrestre en el curso del período nocturno por un efecto denominado invernadero negativo.

Sabemos que el efecto de invernadero se aprovecha con el propósito de captar la radiación solar. La fuente caliente, el sol, está a una temperatura muy elevada y su reserva térmica inagotable. El receptor bajo el vidrio está a una baja temperatura y con una débil reserva térmica. Para que exista el efecto de invernadero positivo falta que el receptor tenga una reserva térmica limitada a fin de que las calorías aportadas por el sol lo calienten.

En el efecto de invernadero negativo se considera que la fuente caliente radiadora que será la tierra posea una reserva térmica limitada, así como las pantallas sucesivas que constituye la atmósfera terrestre. Por el contrario, el espacio que interviene en el balance energético del fenómeno gracias a las ventanas de la atmósfera y que constituye la fuente fría del sistema tiene una reserva térmica ilimitada.

La fuga de energía terrestre por las ventanas  $B_1$  y  $B_2$  y eventualmente D (Fig. 3) hacia el espacio cuya radiación propia es muy débil, crea un desequilibrio de temperatura entre la tierra y la atmósfera.

Las capas atmosféricas que pueden compararse a pantallas superpuestas por sus dominios de absorción, van por intercambios radiativos a enfriarse para ponerse en equilibrio con la tierra.

Las capas más próximas a la superficie terrestre van a proteger a ésta de la radiación de las capas superiores. Esto es lo que se traduce en la experiencia de Roulleau (Fig. 4). La atmósfera se enfría únicamente por intercambios radiativos y no por convección hasta más de un kilómetro.

La superficie terrestre protegida por las capas atmosféricas cada vez más frías tienden a enfriarse cada vez más gracias a su emisión hacia el espacio por las ventanas  $B_1$ ,  $B_2$  y D de la Fig. 3.

El efecto de invernadero negativo natural funciona en el intervalo de un día, pero las temperaturas más frías de la tierra y de la baja atmósfera serán siempre obtenidas antes de la salida del sol.

A menudo, el fenómeno está limitado por la condensación superficial (rocío o escarcha) o la formación de niebla en el suelo que impide que haya un abatimiento de temperatura muy grande.

La abertura de las ventanas atmosféricas depende de la columna de agua precipitable y ésta varía por muchos factores climatológicos. Por ejemplo, si la columna de agua es muy pequeña (1 mm. de agua), la ventana principal de 7.5 a 12.5 micras está verdaderamente abierta y la fuga de energía terrestre es considerable. La segunda ventana, más allá de 16 - 17 micras, interviene también de un modo no despreciable.

Entre el cierre total de las ventanas por el vapor de agua, la niebla y los polvos, y la abertura para tiempos muy secos y muy claros (y aún más, una gran altura), existen todos los intermedios .

En conclusión, este fenómeno natural de la radiación terrestre y el efecto de invernadero negativo en las capas atmosféricas permite dejar una importante oscilación de temperatura entre el día y la noche. El fenómeno tal cual, puede ser explotable en aquellas zonas áridas y semiáridas por la pequeña cantidad de agua en la atmósfera para producir sistemas de enfriamiento.

### III. - CLASIFICACION DE LAS SUPERFICIES PARA LA CAPTACION DE LA RADIACION SOLAR Y LA RA- DIACION TERRESTRE.

Sin entrar detalladamente en consideraciones teóricas, la captación de una radiación consiste en localizar las contribuciones o las partes térmicas que ella representa, de manera de obtener un cierto potencial térmico positivo o negativo (diferencia de temperatura  $\Delta t$  positivo o negativo con la del aire ambiente) con una cierta carga térmica  $Q$  (cantidad de calorías disponibles por unidad de superficie y por unidad de tiempo a la temperatura  $t \pm \Delta t$ ).

En el caso de la radiación solar, el potencial térmico es positivo y puede variar de algunos grados a algunos millares de grados; las contribuciones caloríficas del sol, en razón de la temperatura tan elevada de su superficie ( $6000^{\circ}\text{K}$ ), será prácticamente capaz de crear un  $\Delta t$  suplementario sobre un receptor terrestre.

En el caso de la radiación terrestre, el potencial térmico  $\Delta t$  es negativo y relativamente pequeño. La contribución térmica  $Q$  de un radiador terrestre disminuye a medida que la diferencia de temperaturas se va incrementando. Las caídas de temperatura pueden ser notables, pero la energía radiada por el cuerpo a esa temperatura es relativamente más pequeña, por ejemplo: un cuerpo que esté a

10°C radiará con una potencia por unidad de superficie 367.02 Watts/M<sup>2</sup> mientras cuando tenga una temperatura de - 40°C radiará 168.72 Watts/M<sup>2</sup>.

Recordemos brevemente que la radiación solar directa y difusa interviene prácticamente entre 0.3 y 3 micras y el de las superficies terrestres es enteramente en el infrarrojo, arriba de 3 micras. La longitud de onda correspondiente al máximo de emisión energética, suponiendo que el sol fuera un cuerpo negro a 6000°K, es 0.48 micras mientras que para un cuerpo terrestre, la longitud de onda máxima está comprendida entre 7.7 micras (+ 100°C) y 16.7 micras (-100°C).

Considerando lo mencionado anteriormente, examinaremos los diversos tipos de superficies que intervienen en el aprovechamiento de las radiaciones solares y terrestres, según sus propiedades: cuerpos negros, reflectores y transparentes. En adelante abreviaremos radiación solar y radiación terrestre mediante las siglas R. S. y R. T.

Tipo I.- Cuerpo negro integral (para R. S. y R. T.)

Es muy difícil de realizar un cuerpo negro perfecto para todas las longitudes de onda consideradas. El principio de la "cavidad isotérmica" propuesta por la Física, como un verdadero cuerpo negro no existe en la naturaleza, no obstante, muchas superficies reves-



tidas de pinturas fuertemente cargadas de carbón negro, negro de acetileno o superficies constituidas por ciertos óxidos (óxido negro de fierro, de níquel, de cobre), son buenos cuerpos negros para la R. S. y la R. T. (95 - 98%).

Las superficies del tipo I, se calientan al sol (40 - 80°C) arriba de la temperatura ambiente, y radían constantemente hacia el cielo el máximo de energía infrarroja a la temperatura a la cual se encuentran.

Si la radiación directa del sol es enmascarada por un dispositivo conveniente (por ejemplo, usando una pantalla reflectora), las superficies del tipo I no reciben más que las radiaciones indirectas: radiación del cielo azul (difusión molecular) y las radiaciones difusas por los aerosoles. Estas dos radiaciones solares indirectas compensan en general la pérdida de energía infrarroja y las superficies del tipo I no se enfrían en pleno día por debajo de la temperatura ambiente. Para tiempos nublados o bastante turbios, éstas se enfrían. Durante las noches, las superficies del tipo I se enfrían por debajo de la temperatura del aire ambiente. El fenómeno nocturno está limitado por los intercambios con el aire y a menudo por las condensaciones superficiales de vapor de agua.

Tipo II. - Cuerpos Reflectores para R. S. y cuerpo negro para la

R.T. (Cuerpo selectivo frío).

Es una clase de cuerpos muy difundido. La mayoría de los cuerpos blancos, en particular los óxidos blancos, reflejan y dispersan la radiación solar y se comportan como cuerpos negros para su propia radiación infrarroja. La reflexión de la radiación solar depende del índice de refracción, del estado de división del óxido y de su proporción en la base de la pintura. Por ejemplo, las pinturas con óxido de zinc dan una reflexión alrededor del 70 al 75% mientras que las pinturas con óxido de titanio son excelentes pinturas saharianas que son estables químicamente y fotoquímicamente.

Buenos resultados son obtenidos también con las pinturas a base de cal, de un empleo tradicional en los países áridos. Pero, las pinturas de la cal se carbonatan y se deshacen. Numerosos procesos artesanales son empleados para fijarlas.

Entre los cuerpos del tipo II, deben ser clasificados también los óxidos anódicos de metales reflectores. Es bien conocido que el aluminio, naturalmente protegido por una capa de aluminio hidratado cuyo espesor no rebasa varios centésimos de micras, es un buen reflector, tanto para la radiación solar como para el dominio infrarrojo: 80 a 90% para la radiación solar y más de 99% para el infrarrojo (entre 4 y 25 micras).

Las propiedades ópticas de este metal están profundamente modificadas por una oxidación anódica, que desarrolla en su superficie una capa de aluminio hidratado.

La siguiente tabla muestra la transformación progresiva del aluminio en cuerpo negro en el infrarrojo a medida que se desarrolla la capa de aluminio hidratado en su superficie.

Cuando la capa de aluminio alcanza 20 micras, la emisión propia (infrarroja) puede ser del orden del 95% de la de un cuerpo negro. Resultados, aún superiores, son obtenidos con las aleaciones ricas en aluminio; por ejemplo, el brillalumag (AL 97%, Mg 3%) oxidado es un excelente cuerpo negro en el infrarrojo.

TABLA I

Espesor de la capa de aluminio formado electrolíticamente	Absorción de la radiación solar	Emisión propia hacia la atmósfera
0 (no tratado)	14%	5%
0 (brillante)	14%	10%
0.9 micras (oxidación anódica)	15%	40%
1.5 micras (oxidación anódica)	15%	60%
3 micras (oxidación anódica)	15%	75%
6 micras (oxidación anódica)	15%	90%

Todas estas superficies selectivas (pinturas y metales revestidos de una delgada capa de óxido transparente) permanece en el día, en pleno sol, a temperaturas cercanas de la temperatura ambiente.

Si el sol es enmascarado por una pantalla apropiada, el radiador puede, en pleno día, ser enfriado por abajo de la temperatura ambiente, pues por una parte, radía al cielo una energía  $r = M - W$  y por otra parte, capta sólo una débil fracción, del orden de 15%, de la energía  $r'$  del conjunto de radiaciones de longitudes de onda corta, provenientes indirectamente del sol (cielo azul y aerosoles). Esta clase de cuerpos . - tipo II - son los que serán utilizados con mayor frecuencia en los radiadores terrestres.

En la noche, una superficie del tipo II no absorbe energía infrarroja de la atmósfera pero emite tanta energía como un cuerpo negro tipo I.

Tipo III. - Cuerpos transparentes para la R.S. y cuerpos negros para la R.T. (Cuerpos selectivos fríos).

El caso más típico es el del agua o el del vidrio. Una capa de 10 a 20 micras de agua o de vidrio presenta una excelente transparencia a la radiación solar hasta algunas micras. Luego, para lon-

gitudes de onda superiores, el agua se **comporta como un buen cuerpo negro**. Una superficie de agua, reposando **encima** de un reflector de radiación solar (oro o aluminio no oxidado) **se calienta muy poco** en el sol; la radiación solar será reflejada y **el agua emitirá, como un cuerpo negro, su propia radiación**.

Una aproximación de este resultado, es el que **da la nieve y que puede ser clasificada en las superficies del Tipo II**.

El albedo (factor de **reflexión para la radiación solar**) de la nieve fresca es muy elevado: **90%**, entonces la nieve se **comporta como un cuerpo negro para el rango infrarrojo y se enfría mucho por su propia radiación**.

Las propiedades del agua sólida o líquida son **muy diferentes de las del vapor de agua, para el dominio infrarrojo**. **Por ejemplo, el equivalente en agua líquida del vapor de agua contenido en una columna atmosférica puede ser del orden de un centímetro, sin que por ello la transparencia del cielo (las ventanas) sea suprimida**. Por el contrario, una decena de micrones de agua líquida **detiene toda la radiación infrarroja**.

En los cuerpos transparentes Tipo III, también **están clasificados los**

vidrios y muchos plásticos. Ellos dejan pasar los rayos solares hasta 3 ó 4 micrones y son cuerpos negros más o menos perfectos para la infrarroja. El vidrio ordinario, el pyrex, el plexiglass con algunos milímetros son excelentes cuerpos selectivos por su transparencia.

Falta señalar que los cuerpos selectivos fríos, por su transparencia Tipo III, tienen una superioridad por encima de los cuerpos selectivos fríos por reflexión Tipo II. Ellos retienen menos energía solar, ésta será muy poco absorbida y la parte reflejada (reflexión vítrea) será eliminada al exterior. Se pueden tener con los selectivos fríos por transparencia, enfriamientos notables en pleno día.

**Tipo IV.** - Cuerpo negro para la R. S. y reflector para la R. T.  
(Cuerpo selectivo caliente).

Tales superficies no se enfrían por su propia radiación, que es débil, pero la radiación solar la captan mejor. Se calientan más al sol que los cuerpos negros integrales que la radían en el infrarrojo (Tipo I). En la noche, como no radían, permanecen a la temperatura ambiente.

Este género de superficies no existe naturalmente, pero numerosos procesos existen para ser preparadas.

De una manera general, el poder reflector de los metales y las aleaciou

nes aumenta con la longitud de onda y tiende **hacia un** valor muy elevado (de 95 a 98%) para el infrarrojo, **promedio que** corresponde a la radiación propia de los cuerpos a la **temperatura ambiente**.

Por ejemplo, un acero inoxidable normal tiene **un factor** de absorción de 45% para la radiación solar y una **emisión propia** muy débil en el infrarrojo, es decir, tiene un buen factor de **reflexión** en ese dominio.

Tal carácter selectivo puede ser todavía **acrecentado** mediante una oxidación o un calentamiento. Esto será **valedero para** numerosas aleaciones. La capa de óxido tiene un espesor **inferior al micrón**.

A 400°C, se tiene una capa de óxido de **apariciencia rugosa** y el factor de absorción para los rayos solares pasa de **45 a 60%**.

Un tratamiento a 600°C, superficie azulada, **da un factor** de absorción solar de 75%. Este tratamiento no afecta **prácticamente** el factor de reflexión infrarroja que es muy elevada.

La yuxtaposición de técnicas: plegar para **obtener las** reflexiones múltiples y oxidar para aumentar el factor de **absorción** de la radiación solar, da un **resultado total excelente**: 80 a 85% de absorción de radiación solar y una **débil** emisión propia.

Otro procedimiento consiste en rayar la superficie, antes de la oxidación, de manera que se verifique, a pequeña escala, las reflexiones múltiples.

Superficies selectivas por tratamiento electrolítico o químico.

Numerosos trabajos en U.S.A., en Israel y Francia han sido hechos en estas cuestiones.

Se tienen depósitos de películas delgadas de  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuS}$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{NiS}$ ,  $\text{Fe}_x\text{O}_y$  sobre los metales pulidos tales como la plata, el cobre, el latón, el níquel, el acero inoxidable y el aluminio.

Es muy fácil obtener una absorción de radiación solar de 90% y una emisividad (infrarroja) inferior al 10%. Los métodos empleados son numerosos, la prueba principal será siempre la adherencia del revestimiento sobre el metal pulido que sirve de soporte.

Mencionaremos aquí la técnica empleada en el laboratorio de Montlouis y aplicada al aluminio puro.

El aluminio pulido laminado es tratado con tricloroetileno para disolver las grasas superficiales, luego se sumerge en un baño llevado cerca de la ebullición, luego secado y recocido a  $100^\circ\text{C}$ . La composición del



baño es la siguiente:  $\text{KMnO}_4$  de 5 a 20 g por litro,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - débil cantidad, para obtener un pH comprendido entre 0.5 y 6. El tiempo de tratamiento no tiene mucha influencia (10 minutos son generalmente suficientes) y tampoco la cantidad de  $\text{KMnO}_4$  dentro de los límites indicados.

El factor más importante es el pH. El depósito de óxido de manganeso es amarillo claro para un pH de 6 y casi negro para un pH inferior a 1. Se tiene interés por efectuar un depósito de espesor inferior a un micrón para conservar una buena reflectividad infrarroja del metal de base.

En resumen, el tratamiento químico precedente permite obtener una absorción solar de 70 a 75% con una emisividad infrarroja a un 10%.

Tipo V.- Cuerpo reflector para la R.S. y reflector para la R.T.

Sólo los metales pulidos o depósitos por vía térmica sobre las superficies lisas o pulidas (vidrio por ejemplo) presentan una reflectividad infrarroja importante a la radiación solar.

Valores representativos de la reflectividad de algunos materiales aparecen a continuación:

Ag (0.97); Al (0.91); Au (0.83); Pt (0.75); Pd (0.65); Cu (0.65); NiCr (0.58); Ti (0.50); Cr (0.49); Fe (0.48).

El aluminio es el metal común que permite la realización de grandes superficies reflectoras infrarrojas. Estando laminado en forma de hojas muy delgadas, 1/10 de milímetro, o incluso todavía más delgado: 25 a 30 micras (aluminio para uso alimenticio), es muy barato y puede obtenerse suficientemente puro. Se puede pegar sobre las placas de aislante o placas de poliestireno expandido o de poliuretano. El factor de reflexión para radiación solar es del orden de 85%, mientras que para la radiación infrarroja es de 98% o incluso más.

El mejor reflector infrarrojo, además de la plata, que se deteriora superficialmente, es el oro.

El oro se deposita, por vaporización térmica, sobre las hojas de vidrio de 1 mm. más o menos de espesor. La capa de oro, que da la opacidad óptica, es de algunas décimas de micrón. El factor de reflexión infrarroja es prácticamente de 100% en un intervalo de longitud de onda muy grande (5 a 100 micras).

Existen otros metales pulidos que pueden ser utilizados pero son menos prácticos que el aluminio o menos perfectos que el oro.

Las superficies del Tipo V se comportan, en ausencia de la radiación solar (período nocturno), como las superficies del tipo IV. Ellas no se enfrían por debajo de la temperatura del aire ambiente, pero en el

día, su comportamiento es distinto. Ellas reflejan la mayor parte (85%) de la radiación solar directa o indirecta, pero como prácticamente no tienen ninguna radiación infrarroja propia, la proporción de energía solar retenida (15%) provoca su calentamiento de 10 a 20°C arriba de la temperatura del aire ambiente.

Tipo VI. - Cuerpos transparentes para la R. S. y transparentes para la R. T.

Esta clase de cuerpos tiene una gran importancia para la captación de la radiación terrestre.

Existe un gran número de sustancias cuya transparencia se extiende en el infrarrojo lo suficiente como para poder cubrir el dominio de las "ventanas" de la atmósfera. Es por esto, que la emisión de los cuerpos terrestres cuando se encuentran cubiertos por estos se realiza convenientemente.

Cuando se quieren grandes superficies transparentes, son excluidos los materiales sólidos como el cloruro de sodio o el bromuro de cesio, etc., entonces son utilizadas las películas plásticas que presentan una resistencia mecánica suficiente. El polietileno (alta presión), con espesores entre 12 a 200 micras, es el plástico que da el espectro más

adaptado a una buena transparencia en las "ventanas" de la atmósfera.

Damos, a título de ejemplo (Figs. 5 y 6), el espectro de transmisión de un polietileno (T: % de transparencia) de 100 micras de espesor, entre las longitudes de onda de 0 a 30 micras. Con un espesor de 100 micras, y aún de 50 micras, la película es mecánicamente muy sólida. El sólo inconveniente es su dureza de vida en las condiciones de utilización que presentan ciertas zonas áridas. Debido al intemperismo es probable que se deban cambiar las películas transparentes todos los años o 2 veces al año, pero su precio por metro cuadrado es bajo.

Otros plásticos como el polipropileno, el poliestireno, el nylon, el teflón, etc., presentan sus bandas más o menos importantes en la ventana principal de 8 a 13 micras. El cloruro de polivinilo tiene un espectro de transmisión entre 0 y 30 micras, que tapa prácticamente la ventana principal (Figs. 7 y 8).

Se puede utilizar como radiador más o menos selectivo, funcionando al abrigo de una pantalla de polietileno. Tiene una apariencia semejante a las superficies del Tipo III.

Tipo VII.- Cuerpos selectivos en el infrarrojo.

La existencia de un espectro discontinuo en la emisión energética de

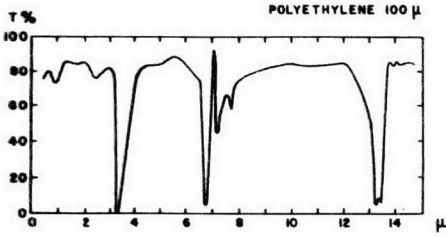


FIG. 5- TRANSPARENCIA DEL POLIETILENO CON UN ESPESOR DE 100 μ (INTERVALO DE LONGITUD DE ONDA.  $0 < \lambda < 15 \mu$ )

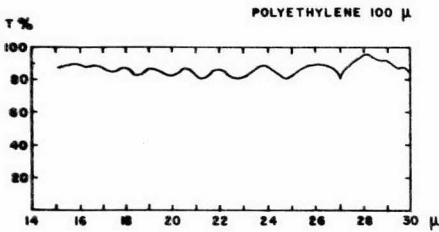


FIG. 6- TRANSPARENCIA DEL POLIETILENO CON UN ESPESOR DE 100 μ (INTERVALO DE LONGITUD DE ONDA.  $14 < \lambda \leq 30 \mu$ )

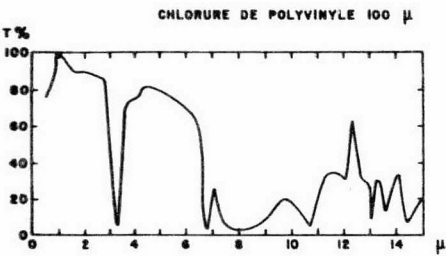


FIG. 7- TRANSPARENCIA DEL PVC (CLORURO DE POLIVINILO) CON UN ESPESOR DE 100 μ (INTERVALO DE LONGITUD DE ONDA.  $0 < \lambda \leq 15 \mu$ )

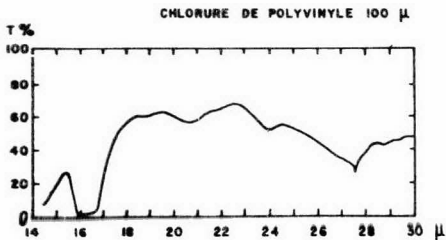


FIG. 8- TRANSPARENCIA DEL PVC CON UN ESPESOR DE 100 μ (INTERVALO DE ONDA.  $14 < \lambda \leq 30 \mu$ )

la atmósfera hacia la tierra nos conduce a la perspectiva de utilizar cuerpos con emisión selectiva, ya sea para realizar la eliminación de la radiación de la atmósfera hacia fuera de los dominios de las ventanas, o bien para realizar un efecto de invernadero negativo en las principales bandas de emisión del espectro atmosférico.

Para los plásticos, las posibilidades no aparecen muy marcadas en lo concerniente a una emisión verdaderamente selectiva de energía en el dominio de las "ventanas". Ciertos plásticos, como el P.V.C. (cloruro de polivinilo) se aproximan a los cuerpos negros por su emisión en la ventana de 7 a 13 micras pero son solamente semitransparentes en otros dominios (Figs. 7 y 8).

En los cuerpos sólidos, se puede citar la magnesia. La magnesia es transparente hasta alrededor de 7 micras, es un cuerpo negro en el dominio de la ventana principal de la atmósfera y presenta luego un dominio importante de reflexión.

El efecto de invernadero negativo, del cual ya hemos hablado, puede ser realizado, en una forma semejante como se produce naturalmente en la atmósfera, aprovechando las bandas de absorción y por consecuencia de emisión que presenta el bióxido de carbono fuera de las "ventanas". El vapor de agua interviene a escala atmosférica principalmente hasta 7 micras y adelante de 16 micras; pero su contenido

en la atmósfera varía mucho en función de la temperatura, de la altitud, de la dirección de los vientos, etc.; además, en forma de rocío o escarcha es muy absorbente de la radiación infrarroja e impide la explotación racional de estas posibilidades.

El anhídrido carbónico  $\text{CO}_2$ , por el contrario, representa el 0.03% en peso, y este valor varía muy poco con la altitud. La presión absoluta del  $\text{CO}_2$  varía solamente con la presión atmosférica total.

El breve estudio presentado, nos bosqueja la variedad de superficies disponibles para explotar la radiación solar y la radiación terrestre.

Sirviéndonos de base el estudio anterior, nuestra investigación fue enfocada al estudio de los cuerpos negros para aprovecharlos como emisores de energía.

Para determinar la emisividad de los cuerpos negros decidimos aprovechar la radiación terrestre como un estudio y comprobación experimental del fenómeno. Se realizó también el estudio del abatimiento de temperaturas en un sistema a cuatro efectos y del enfriamiento de una masa de agua.

## IV.- MODELO MATEMATICO

La Ley de Stefan - Boltzmann nos permite calcular la potencia radiada por una superficie unitaria del cuerpo negro en el ángulo sólido  $2\pi$  :

$$R_o = \sigma T^4 \text{ -----(1)}$$

$$T = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ Watts/m}^2 \text{ } ^\circ \text{K}^4$$

A temperatura ambiente,  $T = 290^\circ\text{K}$  ( $17^\circ\text{C}$ ) tenemos:

$$R_o = 400 \text{ Watts/m}^2$$

Este valor es considerable, si pensamos que la radiación solar medida perpendicularmente, a sus rayos es de  $1000 \text{ Watts/m}^2$ .

Esta comparación entre ambos valores es la que nos ha inclinado a estudiar el fenómeno natural de la radiación terrestre en forma más detallada, en especial durante los periodos nocturnos, para aprovechar el enfriamiento que causa en los cuerpos naturales.

El método experimental, consiste en enfriar una placa ennegrecida y antes de que pueda alcanzar el equilibrio radiativo, interponer una pantalla entre ésta y la atmósfera, para provocar el recalentamiento de la placa. Así, la placa va a tener un periodo de enfriamiento y otro de calentamiento. Estos 2 periodos se reportan



en la gráfica de la Fig. 9 en la cual se presenta la evolución de la diferencia de temperaturas  $T_a - T_p$  donde  $T_a$  es la temperatura ambiente y  $T_p$ , la temperatura de la placa.

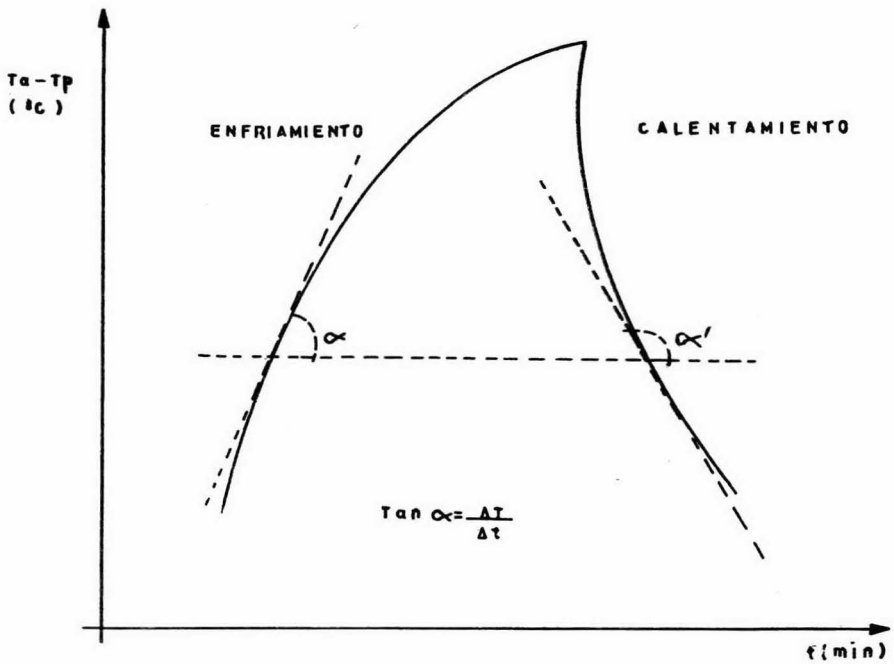


Fig. 9.- Diferencia entre la temperatura de la placa y la temperatura ambiente en función del tiempo.

La pendiente de la curva,  $\tan \alpha$ , mide el gradiente de tempe-

ratura:  $dT/dt$  y el flujo térmico se encuentra dado por:

$$dQ/dt = m C_p dT/dt \quad \text{-----} \quad (2)$$

y puede expresarse por:

$$dQ/dt = m C_p \tan \alpha \quad \text{-----} \quad (3)$$

Este flujo térmico, que en el caso de la Fig. 9 corresponde a un enfriamiento de la placa que resulta de:

a. - La radiación de la placa hacia la atmósfera  $E_{p,a}$

$$E_{p,a} = S_p F_{p,a} e_t R_o \quad \text{-----} \quad (4)$$

con  $S_p$ : Superficie de la placa

$F_{p,a}$ : Factor de forma o de visibilidad de la atmósfera vista por la placa.

$R_o$ : Está definido

$e_t$ : La emisividad

La emisividad o coeficiente de emisión de un cuerpo se define como la relación entre el poder emisor total de dicho cuerpo y el cuerpo negro a la misma temperatura:  $e_t = R/R_o$ .

b. - La radiación de la atmósfera hacia la placa  $E_{a,p}$  que se opone a la precedente

$$E_{a,p} = S_b \quad F_{a,p} \quad W \text{ ----- (5)}$$

con  $S_b$ : Superficie de la abertura de la caja.

$F_{a,p}$ : Factor de forma de la atmósfera a la placa.

$W$ : La radiación de la atmósfera hacia la placa.

Antes de continuar nuestro desarrollo matemático, es pertinente aclarar la naturaleza de los factores de forma.

Para el cálculo cuantitativo de la radiación entre superficies puede tratarse planteando una ecuación diferencial para la radiación neta entre dos áreas elementales e integrando la ecuación para una disposición definida de las superficies. La ecuación diferencial para las dos áreas planas  $dA_1$  y  $dA_2$  es

$$dq_{1,2} = \frac{\mathcal{T} \cos \phi_1 \cos \phi_2 \, dA_1 \, dA_2 \, (T_1^4 - T_2^4)}{r^2} \text{ ---- (6)}$$

siendo  $q_{1,2}$  = intercambio neto de radiación entre dos superficies elementales de áreas  $dA_1$  y  $dA_2$ .

$T_1, T_2$  = Temperaturas absolutas de las superficies  $dA_1$  y  $dA_2$ .

$\phi_1, \phi_2$  = ángulos formados entre las normales a cada una de las superficies y la línea recta que une las áreas.

$r$  = longitud del segmento que une las áreas.

$\mathcal{T}$  = constante de Stefan - Boltzmann

La integración de la Ec. (6) para una determinada combinación de superficies finitas conduce generalmente a una laboriosa integración múltiple basada en la geometría de los dos planos y su mutua relación. La ecuación que resulta para una cualquiera de estas situaciones puede expresarse en esta forma

$$q_{1,2} = \sigma A F (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{----- (7)}$$

siendo  $q_{1,2}$  = radiación neta entre las 2 superficies

A = área de una cualquiera de las dos superficies, elegida arbitrariamente.

F = Factor geométrico adimensional.

El factor F se denomina factor de forma, de visión o de ángulo y depende de la geometría de las dos superficies, de su mutua relación espacial y de la superficie elegida para A.

Si para la superficie A se elige  $A_1$ , la Ec. (7) se puede escribir en esta forma

$$q_{1,2} = \sigma A_1 F_{1,2} (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{----- (8)}$$

Si se elige la superficie  $A_2$

$$q_{1,2} = \sigma A_2 F_{2,1} (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{----- (9)}$$

Comparando las Ecs. (8) y (9)

$$A_1 F_{1,2} = A_2 F_{2,1} \quad \text{----- (10)}$$

El factor  $F_{1,2}$  se puede considerar como la **fracción** de la radiación que sale del área  $A_1$  que es interceptada **por el área**  $A_2$ . Si la superficie  $A_1$  solamente ve la superficie  $A_2$ , el **factor** de visión es igual a la unidad.

El factor de forma para nuestro caso fue **calculado** en base al método propuesto por A. Foust.

c.- El conjunto de intercambios térmicos **por conducción**, convección y radiación por el aire y las paredes de **los paneles**:  $Z$ . El flujo térmico  $Z$  es complejo, pero es razonable **admitir** que en las condiciones determinadas de una experiencia (**geometría** de los dispositivos, temperatura ambiente, presión, etc.) **será** una función biunívoca de la temperatura de la placa. Entonces **podemos** escribir:

$$m C_p \tan \alpha = E_{p,a} - E_{a,p} - Z (T) \quad \text{-----} \quad (11)$$

En consecuencia, si nos colocamos en el **punto** de la curva de recalentamiento correspondiente a la misma temperatura de la placa, debemos encontrar el mismo valor de  $Z$ . Por **otro** lado, como la atmósfera ha sido reemplazada por un cuerpo **llevado** a la temperatura ambiente, un poco diferente de la temperatura **de** la placa, el intercambio radiativo **entre** la placa y la pantalla **está** sensiblemente equilibrado y en ese nuevo punto;

$$m \cdot C_p \tan \alpha' = -Z(T) \quad \text{-----} \quad (12)$$

Efectuando la diferencia algebraica de los flujos definidos por las ecuaciones (11) y (12), desaparece el término  $Z(T)$  y

$$\begin{aligned} m C_p (\tan \alpha - \tan \alpha') &= E_{p,a} - E_{a,p} \\ &= S_p \cdot F_{p,a} \cdot e_T \quad R_o - S_b \cdot F_{a,p} \cdot W \quad \text{----} \quad (13) \end{aligned}$$

Luego nosotros tenemos según la Ec. (10)

$$S_p F_{p,a} = S_b F_{a,p}$$

lo que permite escribir finalmente:

$$e_T R_o - W = \frac{m C_p (\tan \alpha - \tan \alpha')}{S_p F_{p,a}} \quad \text{-----} \quad (14)$$

En la expresión (14), todos los términos del segundo miembro pueden ser medidos o calculados lo que proporciona la radiación neta de la placa hacia la atmósfera.

## V. - METODO EXPERIMENTAL

En una caja de poliestireno expandido de dimensiones internas  $39.2 \times 32.2 \times 11.2 \text{ cm}^3$  con 1.27 cm. de espesor, se colocó una placa emisora de cobre recubierta con negro de humo con una superficie de  $34 \times 25.5 \text{ cm}^2$  a una distancia de 2.2 cm. del fondo.

La caja sellada con una película de polietileno de calibre 100, deja una ventana transparente a la radiación infrarroja. Esta película tuvo como finalidad aislar la masa de aire contenida en la caja.

La temperatura de la placa fue medida en el centro mediante un termopar conectado a un Multímetro Digital.

La caja preparada, se colocó en el techo del laboratorio de manera que la placa ennegrecida intercambie energía radiativa, únicamente con el cielo. El experimento se realiza después que se haya ocultado el sol. La temperatura de la placa  $T_p$  comienza a descender y antes de que la temperatura se estabilice, se interpone una pantalla entre la placa y el cielo, la temperatura de la placa comienza a ascender y llegaría al equilibrio si no recomenzáramos el ciclo de medición. La duración de cada ciclo es del orden de 35 a 40 minutos, con lo cual es factible reproducir el experimento.

Se utilizó un termopar de Cobre-Constantan tipo T con referencia a 0°C.

Este primer ensayo permitió comprobar el método y el modelo matemático propuesto con un valor aproximado de 0.98 del coeficiente de emisión.

En base a este resultado se inició la preparación de 15 cajas con diferentes radiadores.

En las primeras 10 cajas se colocaron 5 placas de aluminio y 5 de cobre, las cuales se recubrieron con diferentes materiales.

Estos recubrimientos fueron:

- a. - Pintura (negro mate)
- b. - Pintura más una capa de negro de humo
- c. - Un anodizado del aluminio con un ennegrecimiento químico posterior a la oxidación con un tono mate, y un anodizado para el cobre únicamente.
- d. - Un revestimiento similar al anterior para ambos con una capa de negro de humo.
- e. - Una capa de negro de humo.

Otras 3 cajas fueron ocupadas con placas de acero inoxidable recubiertas de la forma siguiente:



- a. - Pintura
- b. - Pintura y encima una capa de negro de humo.
- c. - Una capa de negro de humo.

Una caja más, fue utilizada para poner una placa de lámina galvanizada solamente pintada de negro.

Y finalmente se ocupó una caja con una placa de cobre pintada de color blanco con el objeto de comparar su emisividad con las placas ennegrecidas.

Después se añadieron 3 cajas con placas de aluminio, cobre y acero sin ennegrecer con el fin de comparar sus descensos de temperaturas con las otras.

El objetivo de lo anterior, fue encontrar materiales eficientes y razonablemente económicos, cuya emisividad infrarroja permitiría desarrollar aplicaciones tanto de la energía solar como de la radiación solar.

La pintura y la anodización fueron recubrimientos seleccionados en base a su resistencia a la intemperie.

El aluminio anodizado y ennegrecido lo encontramos existente en el mercado.

El anodizado del cobre fue realizado con la siguiente técnica experimental:

La superficie por anodizar se somete a un enjuague ácido (solución ácida de  $H_2SO_4$  o  $HNO_3$ ) y un enjuague con agua.

La placa ya limpia se sumerge en un recipiente que contiene una solución de sosa con una concentración de 9.5% (en peso).

El baño se mantiene a  $70^\circ C$ , la densidad de corriente utilizada fue  $0.35 \text{ Amperes/dm}^2$ , como cátodo se usó una placa de acero inoxidable con una relación de áreas de 1 a 1 y la tensión entre cátodo y ánodo fue 1.95 volts. El tiempo consumido en el anodizado fue de 10 minutos.

El depósito del negro de humo fue obtenido con un soplete de acetileno a una baja temperatura.

Las cubiertas de las cajas fueron seleccionadas entre 2 productos comerciales: el polietileno y el P.V.C. (cloruro de polivinilo). Para escoger el polietileno se tomó en cuenta su transparencia a la radiación infrarroja en base a las figuras 5 y 6.

La razón por la cual no se haya incluido al vidrio es debido a su

opacidad en el infrarrojo.

La figura 10 muestra un corte longitudinal y una vista en planta de una de las cajas preparadas para estas experiencias.

En la figura 10 se indican los 5 puntos característicos de la placa para el cálculo del factor de forma, utilizando el método aproximado descrito por Foust.

Hasta aquí, los datos necesarios para calcular el segundo miembro de la Ec. (14) los podemos obtener de los experimentos.

La cantidad de energía radiada por la atmósfera  $W$ , puede ser calculada a partir de la temperatura y la humedad relativa registradas en el curso de la experiencia, utilizando el procedimiento indicado por R. W. Bliss.

En la figura 11 sacada de esta obra, viene dado el valor de  $W$  expresado en  $\text{cal/cm}^2 \text{ min.}$  en función de la temperatura del aire y la humedad relativa a nivel de la tierra.

Con el cálculo de la radiación neta y la radiación de la atmósfera obtenemos el valor de la radiación bruta  $e_T R_o$  y por ende la emisividad total  $e_T$ .

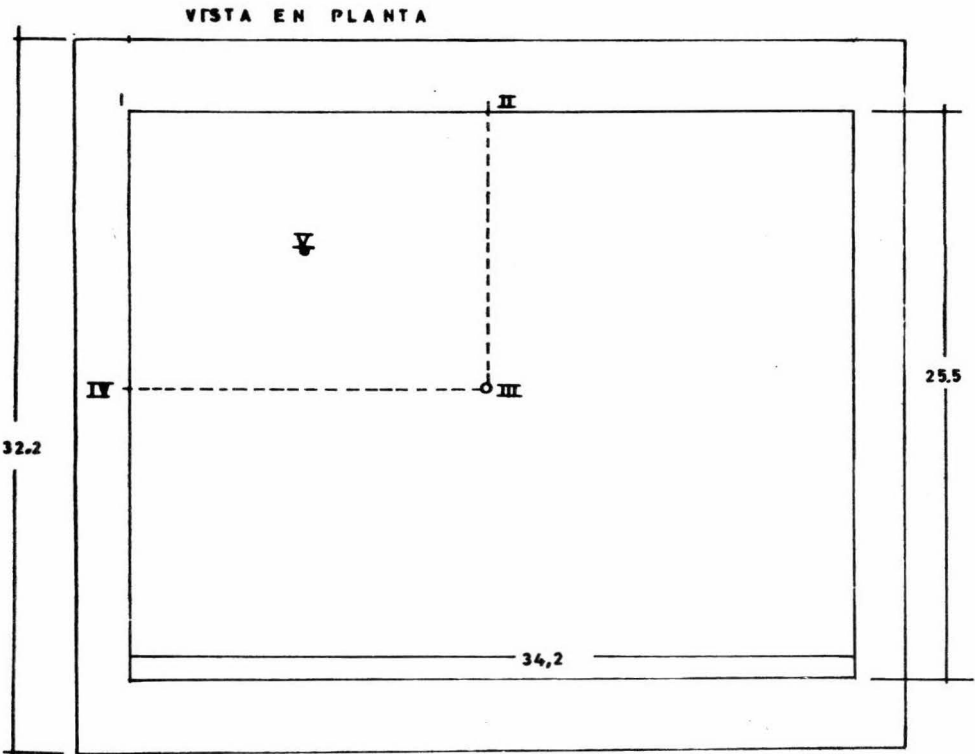
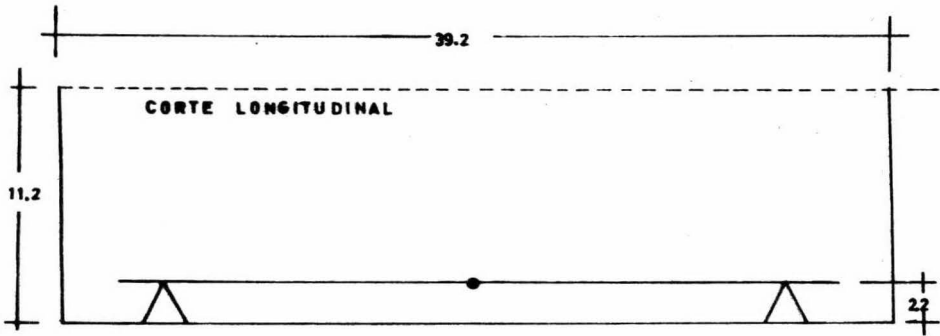


fig 10.- CORTE LONGITUDINAL Y VISTA EN PLANTA DE UNA CAJA PREPARADA.

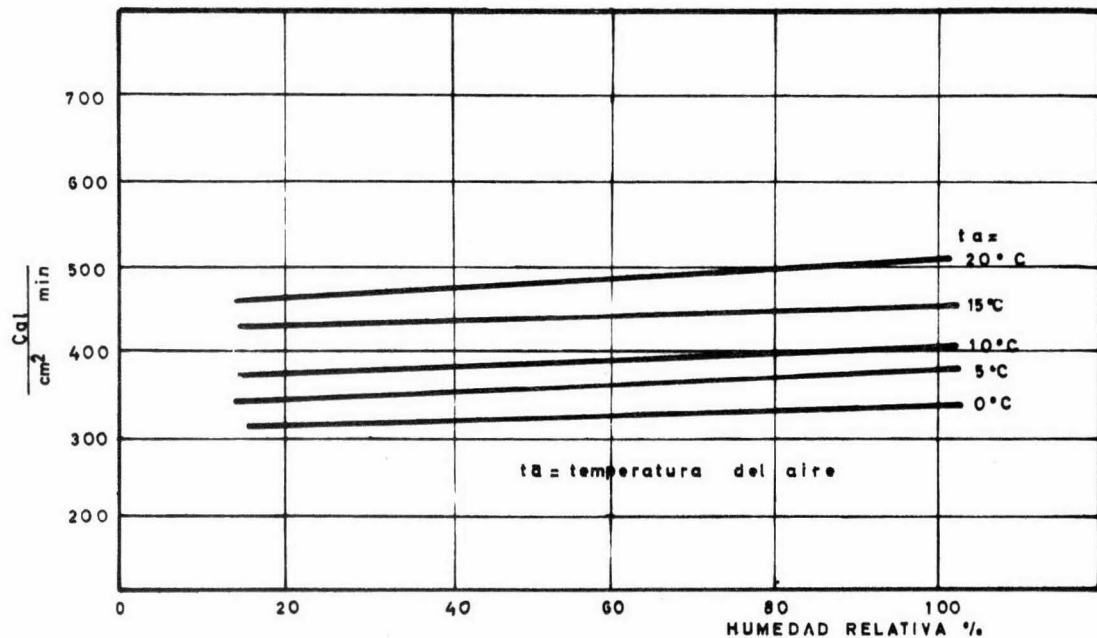


fig. 11 .- RADIACION DE LA ATMOSFERA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DE LA HUMEDAD RELATIVA EN EL SUELO.

Los primeros experimentos fueron realizados en el CIM. Todas las experiencias fueron realizadas al mismo tiempo con el objeto de tener las mismas condiciones de humedad y temperatura.

Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios debido a la existencia de un ciclo parcialmente cubierto por nubes y turbio. No obstante, fue una buena experiencia porque nos fue posible notar la influencia o su efecto de pantalla que las nubes ejercen sobre la superficie terrestre impidiendo el enfriamiento nocturno.

Pruebas experimentales fueron llevadas a cabo en Mixquiahuala, Edo. de Hidalgo, en donde se cuenta con un cielo transparente pero con una humedad relativa entre 90 y 100%. Este exceso de humedad produjo la formación de escarcha en las cubiertas de las cajas, disminuyendo la potencia emisiva. Por consiguiente, estos datos no se tomaron en cuenta.

Otra zona en donde se hicieron determinaciones fue en Santiago Tultaltepec, Edo. de Hidalgo, un lugar seco durante los meses de diciembre, enero y febrero. En este lugar se obtuvieron resultados satisfactorios.

Bajo estas condiciones, se trabajó con un radiador terrestre a cuatro efectos, (Fig. 12), tal objetivo fue el de realizar pruebas de abatimiento de temperaturas, para estudiar qué temperaturas y qué

# RADIADOR TERRESTRE A CUATRO EFECTOS

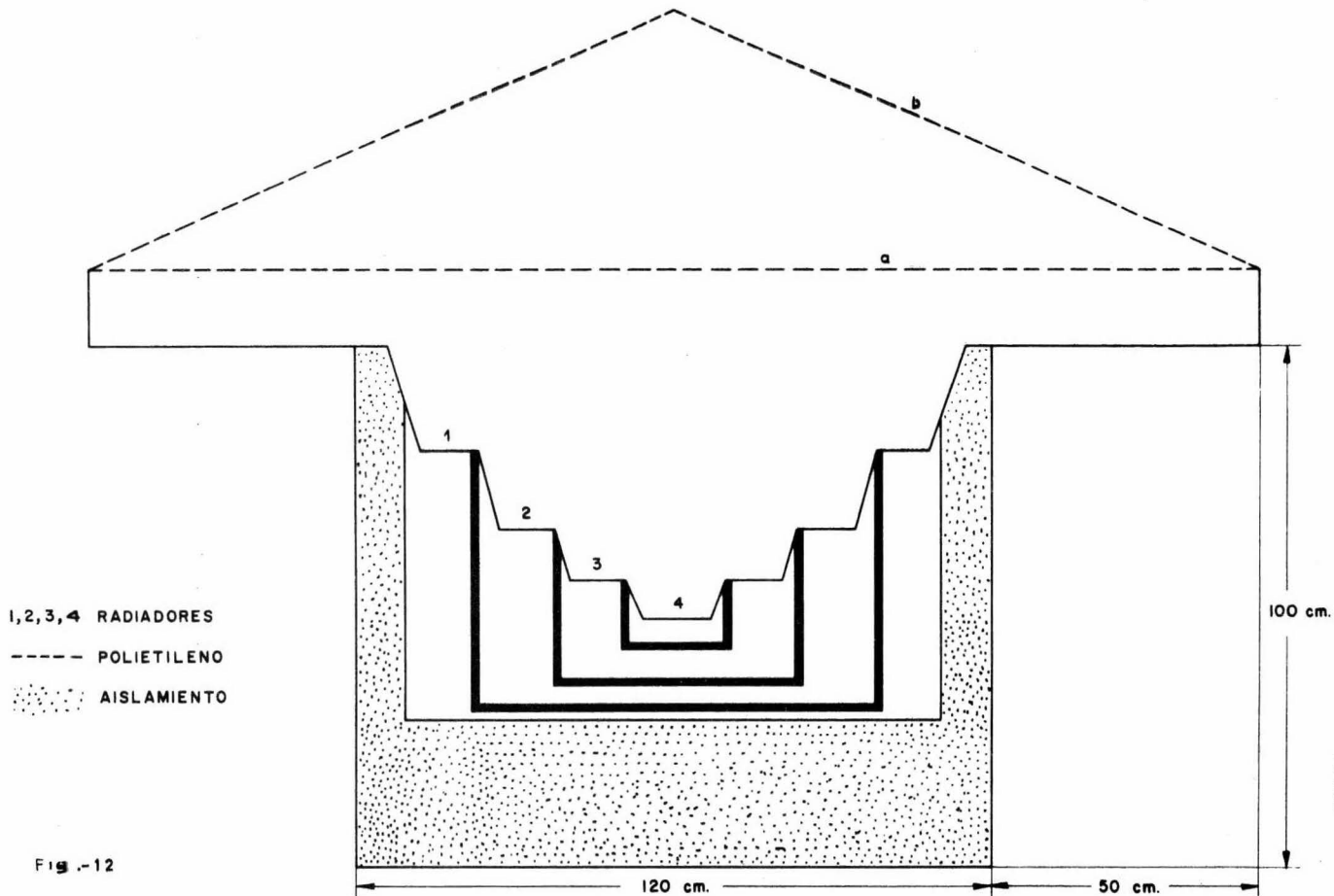


Fig. -12

diferencias entre las temperaturas de las 4 placas de los efectos y de la temperatura ambiente pueden alcanzarse.

El mecanismo de este sistema consiste en que la primera placa radia y a su vez enfría progresivamente la masa de aire contenida en la caja. Esta masa de aire sirve como aislante y mantiene las paredes de la segunda caja a una baja temperatura. Mediante este funcionamiento en las cuatro cajas se impide que haya un flujo de calor del exterior hacia la placa interior.

Entre las paredes del cajón de madera y la primera caja se colocó un aislante y las paredes exteriores fueron pintadas de blanco.

El segundo, tercero y cuarto efecto fueron contenidos en cajas de cartón forradas con poliestireno y su funcionamiento era semejante al primero.

Las paredes interiores de cada uno de los efectos estaban inclinados con el ángulo de  $15^\circ$  y forradas con un plástico aluminizado que nos servía como reflector de la radiación infrarroja. La inclinación y el forro de las paredes permite que los cuerpos radiadores consistentes en placas de aluminio ennegrecidas con pintura, radien con un ángulo sólido alrededor de  $2\pi$ .

Todo el sistema del radiador terrestre a cuatro efectos fue cubier-



to con una película de polietileno de 2 formas que son señaladas en la figura 12.

La forma (b) aislaba una cantidad mayor de aire e impedía que la temperatura de las placas variara cuando ocurrían vientos de poca intensidad mientras que en la forma (a) si eran perceptibles esos movimientos del aire produciendo un ligero calentamiento de las placas.

Como una explotación práctica del fenómeno se realizó el enfriamiento de una masa de agua de 5.7 Kg. contenidos en un recipiente de lámina galvanizada de dimensiones 34 X 25.5 X 5 cm<sup>3</sup>. Una sola superficie fue ennegrecida con pintura.

## VI. - RESULTADOS

Los resultados presentados a continuación fueron obtenidos en las pruebas realizadas en Santiago Tulantepec, Edo. de Hidalgo, localidad situada a 130 Km. de la Ciudad de México.

El primer experimento, determinación de emisividades fue realizado varias veces trazando las curvas respectivas con los datos registrados y obteniendo diferencias despreciables entre los valores de  $\tan \alpha - \tan \alpha'$  para varios puntos de la misma curva. Los valores de las emisividades calculados en estas experiencias para una sola placa tuvieron una variación mínima con los datos reportados en la Tabla de Emisividades.

A título de ejemplo, calcularemos la emisividad de la placa de aluminio ennegrecida con pintura. (datos obtenidos en la corrida experimental del 6-XII-74).

$T_p$ (mV)	$T_p$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$(T_a - T_p)$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t$ (min)
0.255	6.537	11.800	5.263	0
0.143	3.680	11.800	8.120	4
0.069	1.750	11.800	10.050	8
0.023	0.587	11.800	11.213	12
-0.006	-0.150	11.800	11.950	16
-0.019	-0.500	11.800	12.300	20
-0.007	-0.175	11.800	11.975	22
0.086	2.200	11.800	9.600	26
0.147	3.775	11.800	8.025	30
0.183	4.700	11.800	7.100	34
0.203	5.200	11.800	6.600	38
0.210	5.363	11.800	6.437	42
0.215	5.500	11.800	6.300	46

Las pendientes en los puntos señalados en la Fig. 13 fueron:

$$\begin{array}{lll}
 \tan \alpha_1 = 0.599 & \tan \alpha'_1 = -0.298 & \tan \alpha_1 - \tan \alpha'_1 = 0.897 \\
 \tan \alpha_2 = 0.485 & \tan \alpha'_2 = -0.416 & \tan \alpha_2 - \tan \alpha'_2 = 0.901 \\
 \tan \alpha_3 = 0.378 & \tan \alpha'_3 = -0.523 & \tan \alpha_3 - \tan \alpha'_3 = 0.901 \\
 \tan \alpha_4 = 0.254 & \tan \alpha'_4 = -0.629 & \tan \alpha_4 - \tan \alpha'_4 = 0.898
 \end{array}$$

La diferencia dada por  $\tan \alpha - \tan \alpha'$  de la curva en la Fig. 13, nos muestra que nuestra suposición -Z (T) es razonable.

Substituyendo los valores del segundo miembro de la ecuación:

$$\begin{aligned} e_T Ro - W &= \frac{m Cp (\tan \alpha - \tan \alpha')}{Sp Fp, a} \\ &= \frac{(221 \text{ g}) (0.215 \text{ cal/g}^\circ\text{C}) (0.901 \text{ }^\circ\text{C/min})}{(34 \times 25.5 \text{ cm}^2)(0.5942)} \end{aligned}$$

$$e_T Ro - W = 0.0831 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$$

El valor de W, obtenido de la Fig. 11 con una humedad relativa de 70% y una temperatura ambiente de 11.8°C es

$$W = 0.415 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$$

Por lo tanto:

$$e_T Ro = (0.0831 + 0.415) \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$$

$$e_T Ro = 0.4981 \text{ cal cm}^2/\text{min}$$

$$e_T Ro = 348 \text{ Watts/m}^2$$

$$\begin{aligned} Ro = \sigma T^4 &= (5.669 \times 10^{-8} \text{ Watts/m}^2\text{K}^4) (284.8^\circ\text{K})^4 \\ &= 372.9 \text{ Watts/m}^2 \end{aligned}$$

Despejando el valor de  $e_T$ , obtenemos:

$$e_T = (348 \text{ Watts/m}^2) / (372.9 \text{ Watts/m}^2)$$

$$e_T = 0.93$$

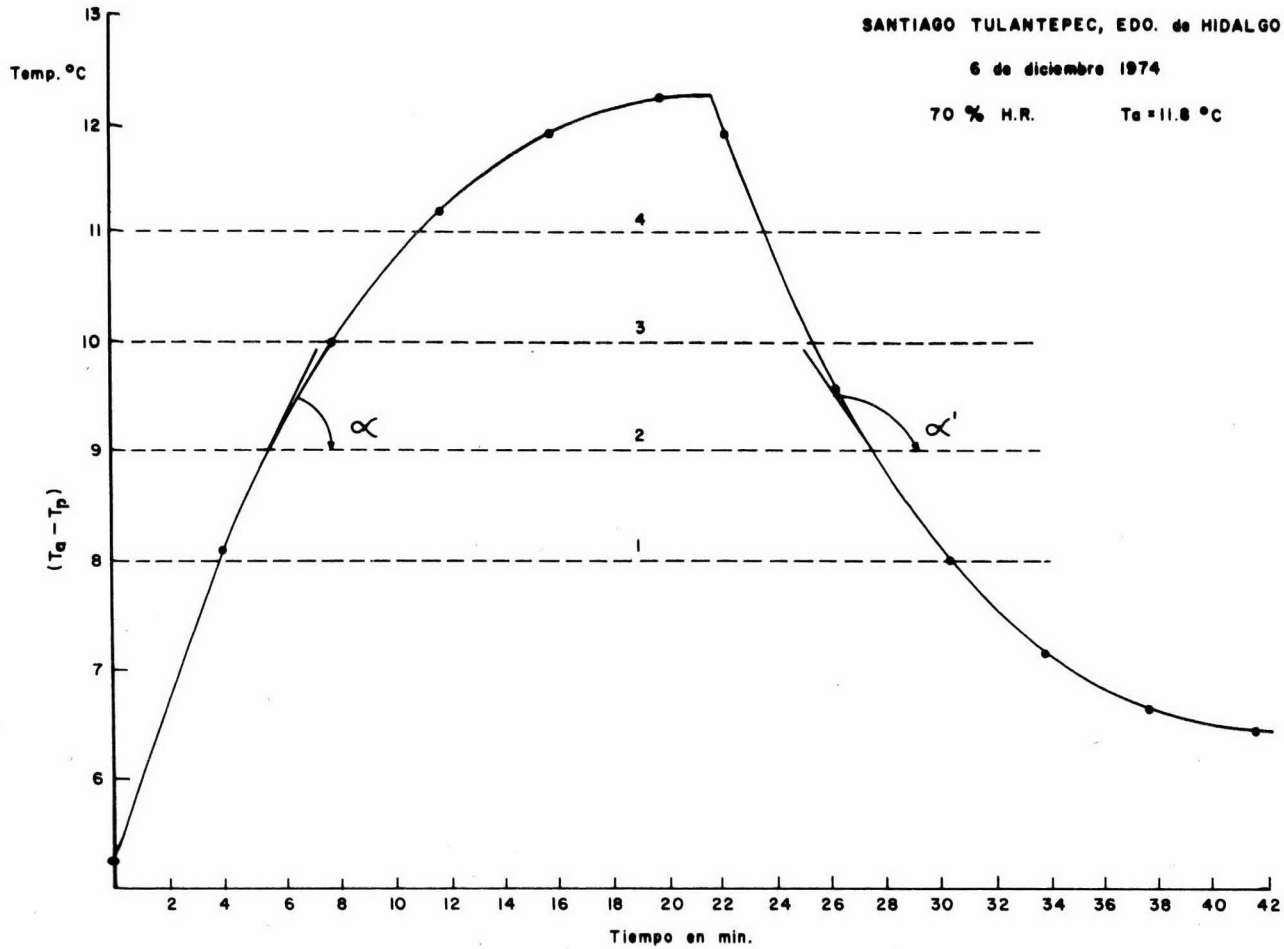


FIGURA 13

A continuación damos una Tabla de Emisividades obtenidas de nuestros experimentos y otra comparativa según los recubrimientos empleados.

TABLA DE EMISIVIDADES

Aluminio	$\epsilon_T$
1. - Pintura	0.93
2. - Pintura y negro de humo	0.94
3. - Anodizado ennegrecido	0.91
4. - Anodizado ennegrecido y negro de humo	0.90
5. - Negro de humo	0.95
Cobre	
1. - Pintura	0.96
2. - Pintura y negro de humo	0.97
3. - Anodizado	0.86
4. - Anodizado y negro de humo	0.96
5. - Negro de humo	0.98
6. - Pintura blanca	0.92
Acero Inoxidable	
1. - Pintura	0.87
2. - Pintura y negro de humo	0.87
3. - Negro de humo	0.89
Lámina Galvanizada	
1. - Pintura	0.96

TABLA COMPARATIVA DE EMISIVIDADES

Pintura	$\epsilon_T$
1. - Aluminio	0.93
2. - Cobre	0.96
3. - Acero inoxidable	0.87
4. - Lámina Galvanizada	0.96

Pintura y negro de humo

1. - Aluminio	0.94
2. - Cobre	0.97
3. - Acero Inoxidable	0.87

Anodizado

1. - Aluminio	0.91
2. - Cobre	0.86

Anodizado y negro de humo

1. - Aluminio	0.90
2. - Cobre	0.96

Negro de humo

1. - Aluminio	0.95
2. - Cobre	0.98
3. - Acero Inoxidable	0.89

El abatimiento de temperaturas en el sistema a 4 efectos fue el segundo de los experimentos efectuados. Con este sistema se hicieron pruebas alternativas, utilizando las 2 maneras de sellarlo con polietileno como se muestra en la Fig. 12.

En la forma (b) se obtuvieron diferencias de temperaturas que eran de 20°C aproximadamente entre el último efecto (placa central) y la ambiente, mientras que en la forma (a) las diferencias eran de 17°C.

En la Fig. 14 se encuentran graficadas las temperaturas registradas en la prueba realizada del 30 al 31 de diciembre de 1974 en la que se registró en el último efecto una temperatura de -15.5°C y una diferencia con respecto a la ambiente de 19.9°C.

En estas experiencias se encontró que las temperaturas mínimas se alcanzaban siempre antes de la salida del sol, entre las 7 y 7:15 horas.

El tercer experimento, abatimiento de la temperatura del agua contenida en una caja metálica es mostrada en la Fig. 15.



La cantidad de energía perdida durante el período de prueba fue:

$$Q = m_1 C_{p1} t \text{ máx} + m_2 C_{p2} t \text{ máx}$$

$$m_1 = 5.7 \text{ Kg. de agua}$$

$$C_{p1} = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$m_2 = 1.7 \text{ Kg. de la caja metálica}$$

$$C_{p2} = 0.116 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$t \text{ máx.} = 12.55^\circ\text{C}$$

$$Q = (5700 \text{ g}) (1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}) (12.55^\circ\text{C}) + (1700 \text{ g}) (0.116 \text{ cal/g}^\circ\text{C}) (12.55^\circ\text{C})$$

$$Q = 74009.86 \text{ cal}$$

$$Q = 74.009 \text{ K cal}$$

La cantidad de energía perdida por unidad de área fue de 85.36 cal/cm<sup>2</sup>.

Los resultados referentes a las placas **sin ennegrecer**, éstas tuvieron una diferencia de temperatura **entre 2 y 3°C** con respecto al ambiente mientras que las **ennegrecidas** **lograban** una diferencia entre 9 y 12°C.

ABATIMIENTO DE TEMPERATURAS A 4 EFECTOS

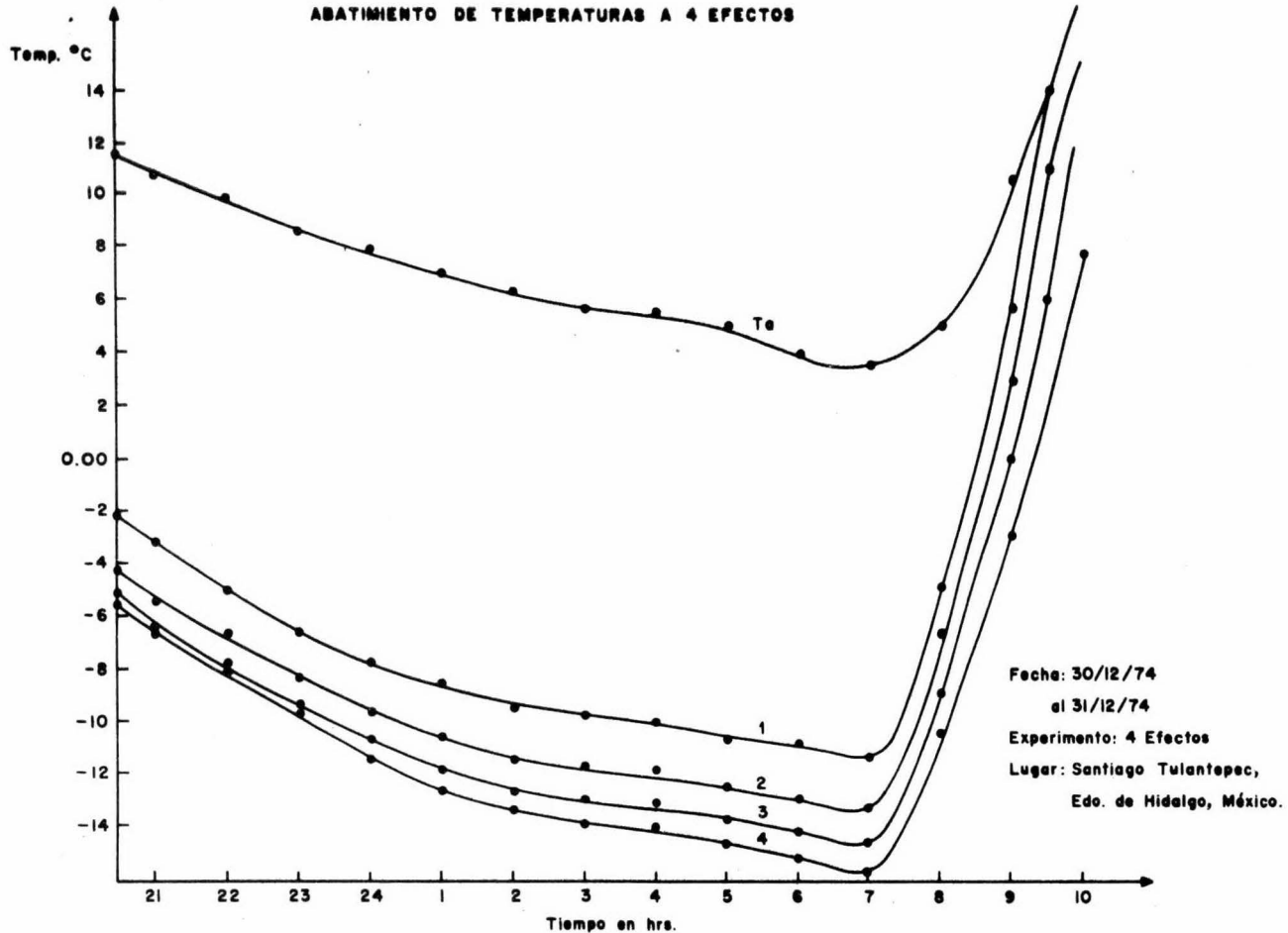


Fig.- 14

### ENFRIAMIENTO NOCTURNO DE AGUA

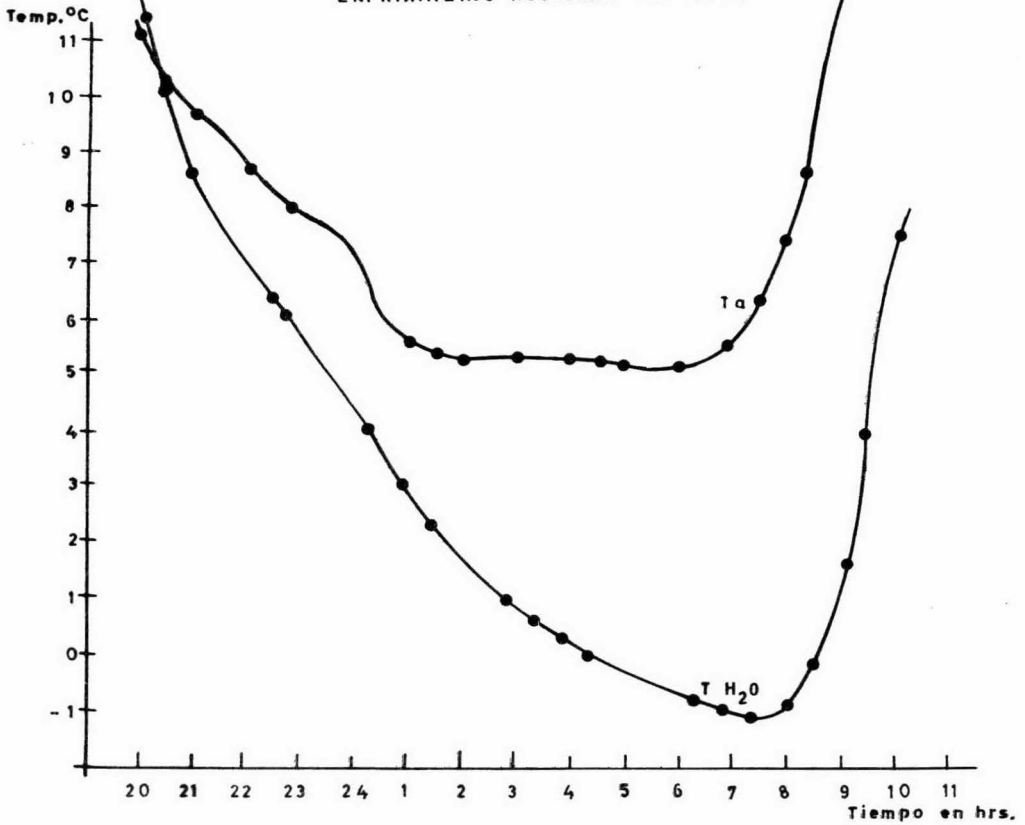
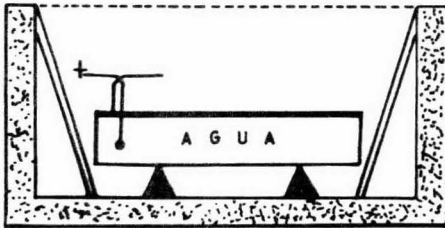


Fig 15.- ABATIMIENTO DE TEMPERATURA DE UN RECIPIENTE CONTENIENDO AGUA



- POLIURETANO
- RECUBRIMIENTO
- AISLANTE
- + ——— TERMOPAR

SISTEMA USADO PARA EL ENFRIAMIENTO DE AGUA A UN SOLO EFECTO

## VII. - CONCLUSIONES

La radiación terrestre es un fenómeno perenne que puede ser aprovechable durante los períodos nocturnos especialmente en lugares áridos o semiáridos que presentan una atmósfera transparente y una baja humedad.

La pérdida de energía de los cuerpos expuestos a la intemperie mediante este fenómeno, es factible utilizarla en el desarrollo de nuevos sistemas en enfriamiento para aplicarlos en la conservación de alimentos perecederos o en la climatización de habitaciones.

El estudio hecho relacionado con las características de las superficies existentes nos señala que las superficies ennegrecidas no son las más adecuadas para cubrir las 24 horas de operación en los sistemas de enfriamiento sino que las más convenientes que resultan son las denominadas selectivas frías que se mantienen siempre por abajo de la temperatura ambiente, tales como las pinturas blancas y el aluminio anodizado.

Los coeficientes de emisión más elevados para las diversas placas fueron obtenidos para las superficies ennegrecidas con negro

de humo, pintura con negro de humo y pintura. Estos mismos recubrimientos también pueden ser utilizados para la captación de la energía solar, pues teóricamente las emisividades y absorbitividades son iguales para los cuerpos negros.

Los abatimientos de temperatura registrados en el experimento denominado a cuatro efectos con temperaturas del orden de  $-15^{\circ}\text{C}$  en el último efecto nos permiten predecir la posibilidad de construir cámaras frigoríficas que se mantengan cuando menos a  $-6^{\circ}\text{C}$ . A esta temperatura, la actividad bacteriana y en general la de todas las clases de hongos y fermentos se detiene prácticamente.

Las temperaturas registradas en este experimento pueden ser abatidas aún más, si aprovechamos el efecto de invernadero negativo colocando encima de las placas una atmósfera de bióxido de carbono y sellándola con una película de polietileno.

La energía perdida por la caja con agua nos permite asegurar que la construcción de una cámara frigorífica puede funcionar para la conservación de productos perecederos dada la magnitud de calorías emitidas al espacio por la superficie ennegrecida de la caja.

El futuro de estos estudios y experimentos es halagador debido a que las condiciones que ofrece nuestro país son muy favorables para aprovechar la radiación terrestre por la extensión tan grande de zonas áridas con que cuenta.

VIII.- BIBLIOGRAFIA

- BLISS Raymond W. - "Atmospheric radiation near the surface of the ground. A summary for engineers" Solar Energy, vol. V, No. 3, juillet-septembre, 1961.
- FOUST Alan S., Leonard A. Wenzel, Curtir W. Clump, Louis Maus, L. Bryce Andersen. - "Principios de Operaciones Unitarias" Compañía Editorial Continental, S.A.
- KERN Donald Q.. - "Procesos de Transferencia de Calor" Compañía Editorial Continental, S.A.
- McCABE Warren L. y Julián C. Smith. - "Operaciones básicas de Ingeniería Química" Tomo I, Editorial Reverté.
- METALS HANDBOOK.- Preparado bajo la dirección de los Metals Handbook Committee. Traducción. vol. I y II, 8a. Edición, Editor Taylor Lyman.
- PERRY John H. - "Chemical Engineers' Handbook" Fourth Edition, McGraw Hill Engineering Series.
- ROBERT Marcelo et Sergio Alvarado. - "Le rayonnement terrestre au Chili" Revue Générale de Thermique, nos. 79, 80 juillet-aout, 1968.
- TROMBE Félix. - "Perspectives sur l'utilisation des rayonnements solaires et terrestres dans certaines régions du monde", Revue Générale de Thermique, No. 70 octobre, 1967.