

29,105

**Universidad Nacional Autónoma de México**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**MEDIDAS DE ABSORTANCIA Y EMITANCIA  
PARA SUBSTANCIAS QUE PUEDEN TRABAJAR  
A ALTAS TEMPERATURAS**



DEPARTAMENTO DE EXAMENES Y  
ESTADÍSTICAS PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA

**T E S I S**

Que para obtener el Título de  
**INGENIERO QUIMICO**  
P r e s e n t a

**JOSEFINA ADRIANA VERDEJO COSS Y LEON**

México, D. F.

**TESIS DONADA POR  
D. G. R. - UNAM**

1981



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.

## I N D I C E

|   | PAG. |
|---|------|
| <b>LISTA DE VARIABLES</b>   |      |
| <b>I ANTECEDENTES</b>   |      |
| 1.1 PANORAMA ACTUAL   | 4    |
| 1.2 CAPTADORES SOLARES PLANOS   | 5    |
| 1.3 SUPERFICIES SELECTIVAS  | 7    |
| 1.4 CARACTERISTICAS REQUERIDAS POR LOS MATERIALES                           | 8    |
| <b>II CLASIFICACION DE MUESTRAS</b>   |      |
| 2.1 SELECCION DE MATERIALES   | 12   |
| 2.2 DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DEL APARATO Y DE LAS -<br>MUESTRAS USADAS | 15   |
| 2.3 DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO   | 21   |
| <b>III DESCRIPCION DEL METODO DE MEDIDA</b>                                 |      |
| 3.1 DEFINICIONES DE ABSORTANCIA, EMITANCIA Y REFLECTANCIA                   | 29   |
| 3.2 RELACION ENTRE ABSORTANCIA, EMITANCIA Y REFLECTANCIA                    | 32   |
| 3.3 SUPERFICIES SELECTIVAS  | 33   |
| 3.4 ANTECEDENTES MATEMATICOS  | 36   |
| 3.5 DISCUSION DE RESULTADOS   | 44   |
| 3.6 FUENTES DE ERROR  | 44   |
| <b>IV RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSION</b>                                 |      |
| 4.1 RESULTADOS OBTENIDOS  | 46   |
| 4.2 CONCLUSIONES  | 50   |

|  | PAG. |
|--|------|
| <b>ANEXO I</b>                             |      |
| - LISTA DE VARIABLES                       | 52   |
| - DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA UTILIZADO | 53   |
| - LISTADO DEL PROGRAMA                     | 55   |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b>                        | 56   |

## LISTA DE VARIABLES

- $\alpha_{\lambda}(\mu, \phi), \alpha_{\lambda}, \alpha$  : Coeficiente de absorptancia  
 $\epsilon_{\lambda}(\mu, \phi), \epsilon_{\lambda}, \epsilon$  : Coeficiente de emitancia  
 $\rho_{\lambda}(\mu, \phi), \rho_{\lambda}, \rho$  : Coeficiente de reflectancia  
 $\mu$  : Coseno ángulo polar  
 $\phi$  : Ángulo azimutal  
 $I_{\lambda, a}; I_{\lambda}, i; I_{\lambda, t}$  : Intensidad de radiación absorbida, incidente, total de longitud de onda  
 $I$  : Intensidad de radiación que cae sobre la muestra  
 $I_b$  : Intensidad monocromática de radiación del cuerpo negro  
 $q$  : Energía radiante que llega a un cuerpo  
 $e_b$  : Energía radiante que emite un cuerpo  
 $m$  : Masa de la muestra  
 $A$  : Área total de la muestra  
 $C$  : Capacidad calorífica de la muestra  
 $a$  : Área proyectada de la muestra

- $Q$  : Calor absorbido ó cedido por la muestra  
 $t$  : Tiempo  
 $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzman  
 $T_1$  : Temperatura de la muestra durante el enfriamiento  
 $T_2$  : Temperatura de los alrededores  
 $T_3$  : Temperatura de la muestra durante el calentamiento  
 $P_{\text{cond}}(T)$  : Pérdidas de calor por conducción  
 $P_{\text{conv}}(T)$  : Pérdidas de calor por convección  
 $P_{\text{rad}}(T)$  : Pérdidas o ganancias de calor por radiación  
 $T_E$  : Temperatura de equilibrio para el calentamiento  
 $T_0$  : Temperatura de equilibrio para el enfriamiento  
 $T$  : Temperatura en el tiempo  $t$  para el calentamiento y en el tiempo  $t'$  para el enfriamiento

I

**ANTECEDENTE:**

## PANORAMA ACTUAL

Los balances energéticos mundiales que resultan de los escenarios contruídos para los próximos cincuenta años muestran un serio déficit en la oferta de petróleo y gas en relación con la demanda, la cual se fundamenta en indicadores económicos de crecimiento, razonables tanto para los países desarrollados como para los países en desarrollo. Esto implica un serio problema de posible estancamiento económico mundial.

Existen otras fuentes primarias de energía, y comerciales, como la energía hidroeléctrica, la geotérmica, el carbón y la energía nuclear, que pueden ayudar a resolver esta encrucijada. Sin embargo, estas fuentes presentan problemas ya sea de localización, de tamaño de las reservas en función de la tecnología de aprovechamiento, o de tipo político, lo que hace incierta la magnitud de su utilización.

El consenso general, que se demuestra por los esfuerzos que están haciendo principalmente los países desarrollados en la investigación y desarrollo experimental, es la necesidad de contar con nuevas fuentes de energía. Para que el desarrollo de la energía solar o de la fusión nuclear, por ejemplo, lleguen al punto de su utilización masiva, tendrán que pasar varias décadas ya que habrá que salvar varias etapas: planta piloto, planta de demostración, planta comercial,

integración al sistema y competencia con otras fuentes. Sin-  
descontar la tecnología de reactores nucleares de fisión rápi-  
da (cria) que podría ser comerciable en la década de los ochenta,  
la fusión nuclear y las tecnologías "solares" en su sentido  
mas amplio, es decir, abarcando la biomasa y la energía -  
eólica, son candidatos a ser esas nuevas fuentes para el próximo  
siglo.

Esto no invalida que ya en el presente las tecnologías "solares" puedan ser utilizadas en situaciones particulares para resolver problemas específicos como en el caso de -  
comunidades rurales aisladas. Además del beneficio obtenido  
al resolver algunos de estos problemas, éste parece ser un -  
camino adecuado para ir creando la infraestructura de recur-  
sos humanos y de grupos de investigación que permita la futura  
utilización masiva de estas importantes fuentes de energé-  
ticos primarios, sin entrar en competencia desigual (tanto en  
recursos humanos, tecnológicos como financieros), con los -  
países industrializados. Ejemplo de ello es la preparación -  
de personal especializado que se realiza a través de algunos-  
proyectos de investigación que se llevan a cabo en las insti-  
tuciones educativas.

#### LOS CAPTADORES SOLARES PLANOS

Conforme se ha ido avanzando en el estudio sobre la-  
energía solar se ha visto que puede ser de mucha utilidad ya-

que posee múltiples ventajas sobre otras fuentes de energía; algunas de estas son: que no necesita un modelo de transporte especial ya que sólo depende de que exista el sol, por esto mismo no es necesario construir costosas redes de distribución, ya que su aplicación para convertirla a otros tipos de energía es local, o sea, donde se encuentre el sol se colecta, se transforma y después se usa.

Para lograr un mayor aprovechamiento de la energía solar se requiere poseer captadores y concentradores de la misma con una alta eficiencia, o sea, desarrollar tipos de colectores que absorban la máxima cantidad de energía e irradian una mínima parte de la misma.

Con esto tenemos que se necesitan desarrollar ciertas superficies que posean las anteriores cualidades, a la vez que no se descompongan o deterioren con las altas temperaturas, ni con las condiciones ambientales extremas para que sea práctico y económico su uso.

La energía radiante proveniente del sol puede transformarse en energía térmica si se le hace incidir sobre una superficie capaz de absorber parte de ella. A mayor capacidad de absorción, o absorptividad, la transformación será más efectiva. De este modo, la superficie aumentará su temperatura en función de la cantidad de calor atrapado. Conforme la-

temperatura aumenta, la superficie empezará a perder calor por conducción, por convección al medio que la rodea y por radiación al ambiente. La capacidad para emitir calor radiante, - llamada emisividad, puede inhibirse para que esa superficie - alcance temperaturas mas elevadas. A superficies cuya emisividad no es igual a su absorptividad se les llama superficies-selectivas.

El calor atrapado por la superficie puede transferirse a un líquido o a un gas para calentarlos.

#### SUPERFICIES SELECTIVAS

Anteriores experimentos han demostrado que se necesita una base de metal como el cobre con un recubrimiento de - algún otro material que le permita concentrar la mayor cantidad posible de energía solar y emitir la mínima de ésta.

Este estudio analiza materiales que sean de fácil obtención o sea que existan en nuestro país y cuyo procesamiento no sea de un costo elevado.

Las cualidades que medimos de dicho material son: - su emitancia y su absorptancia, buscando los que reúnan el máximo de eficiencia o sea que la relación absorptividad/emitancia de dicho material sea lo mas grande posible, pues con -

esto aseguramos una máxima captación.

Así es que las superficies selectivas ocupan un lugar muy importante dentro del aprovechamiento de la energía solar, pues son el intermediario entre la radiación solar y el convertidor de energía.

La eficiencia de los captadores solares depende, entre otros parámetros, de las propiedades ópticas de la placa o tubo absorbedor de la radiación solar. Por lo tanto, es deseable que la superficie de absorción tenga propiedades de tipo selectivo, consistentes en altos valores de absorptividad en el rango visible ( $0.3-3\mu$ ) y baja emisividad en el infrarrojo. Uno de los medios de lograr este tipo de selectividad es recubrir la placa o tubo metálico con una película de elevado coeficiente de absorción para el intervalo de longitudes de onda del visible y con transparencia en el infrarrojo.

#### CARACTERISTICAS REQUERIDAS POR LOS MATERIALES

Existen materiales con estas propiedades, pero el problema principal radica en lograr su deposición sobre el receptor metálico de tal manera que se garantice su estabilidad y su costeabilidad. Para este efecto, se ha trabajado varios años sobre métodos de deposición química y electroquí-

mica de  $\text{CrO}_3$  sobre cobre y fierro. Asimismo, se ha depositado  $\text{CuO}$  y  $\text{CuS}$  sobre cobre y se han tratado el aluminio y el fierro para lograr capas selectivas de algunos óxidos.

El desarrollo experimental se ha enfocado en la preparación de muestras bajo un estricto control de diversos procedimientos de deposición y en la medición de las propiedades ópticas resultantes mediante el uso de un equipo construido expresamente para este propósito.

En este estudio tratamos de investigar las propiedades de nuevos materiales distintos a los antes nombrados. Las propiedades que medimos de estos materiales son su absorptividad y emisividad y de esto deducir si pueden funcionar como superficies selectivas y ser utilizados con buen éxito en los absorbedores solares.

Estos materiales se colocan sobre un soporte de cobre al igual que las anteriores muestras, aunque muchas veces no es necesaria la electrodeposición para fijarlos al soporte.

Las características que reúnen estos nuevos materiales son:

$$* \mu = 10^{-6} \text{ m}$$

- 1) Que son de fácil obtención ya que se encuentran en varios lugares del país.
- 2) Que el proceso al que se vean sometidos para poderlos utilizar sea de bajo costo.
- 3) Que no se descompongan al trabajar a altas temperaturas - (mayores de 80°C).
- 4) Que no se deterioren por permanecer a condiciones ambiente extremas.

**II**

**CLASIFICACION DE MUESTRAS**

## SELECCION DE MATERIALES

En el campo de la energía solar el absorbedor es - quien necesita estar compuesto por superficies selectivas. - Este puede sufrir variaciones muy grandes de temperatura. El absorbedor está construido generalmente de un material conductor de calor (metales) y recubierto en su parte exterior por una superficie selectiva.

El metal de base que se escogió es el cobre. El o - los elementos que forman la superficie selectiva son formados o depositados sobre la base de acuerdo a los siguientes procedimientos:

- Reacción química o electrolítica
- Depósito por evaporación a alto vacío
- Adherida

En este estudio se escogió adherir sobre la base metálica el o los elementos usados como superficie selectiva.

Los elementos que se usaron para formar las superficies selectivas fueron:

| <u>Nombre</u>         | <u>Fórmula</u>   | <u>Punto de fusión</u> |
|-----------------------|--|------------------------|
| Galena                | PbS  | 1000 °C                |
| Pirita                | FeS <sub>2</sub>   | 1171 °C                |
| Ilmenita              | FeTiO <sub>3</sub>   |                        |
| Cromita               | Fe·Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 2180 °C                |
| Galena con malaquita  | PbS-Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>          |                        |
| Corundum negro        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | 2980 °C                |
| Emeri (Corundum rojo) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 1538 °C                |

Todos estos elementos existen en estado natural en diferentes partes de la República Mexicana (Fig. 1).

La forma estructural de la superficie puede influenciar el valor de la relación absorptividad/emisividad.

Se utilizaron para cada elemento 7 dimensiones de grano: ( $\phi$  : diámetro del grano).

$$a) \phi > 0.074 \text{ mm}$$

$$b) 0.074 \text{ mm} < \phi < 0.25 \text{ mm}$$

$$c) 0.25 \text{ mm} < \phi < 0.47 \text{ mm}$$



DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DEL APARATO Y DE LAS MUESTRAS -  
USADAS.

Para poder determinar la absorción y emisión de las muestras es necesario conocer la variación de la temperatura de cada una de ellas con el tiempo mediante el calentamiento y enfriamiento de muestras que son iluminadas por una fuente de radiación cuyo espectro sea muy parecido al del sol. La muestra es colocada dentro de una "caja negra" que se mantiene a temperatura constante. Esta caja es de cobre con las paredes interiores pintadas de negro, tiene un orificio que permite el paso de la radiación hacia la muestra.

Para que la temperatura de la "caja negra" permanezca constante se pone esta en contacto con un recipiente que se encuentra lleno de un líquido que tiene una temperatura baja y que no varíe; esto permite reducir y poder calcular las pérdidas por radiación.

Con el fin de eliminar las pérdidas debidas a la convección producida por el aire, las medidas se hacen en un vacío de  $10^{-3}$  mm de Hg. La fig. 2 muestra la importancia del vacío sobre los valores de  $n/c$  que se han de calcular. La caja de cobre unida al recipiente se coloca dentro de un cilindro metálico de diámetro mas importante el cual tiene un orificio con una ventana de cuarzo que permite que el haz luminoso creado en el exterior llegue hasta la muestra. En la-

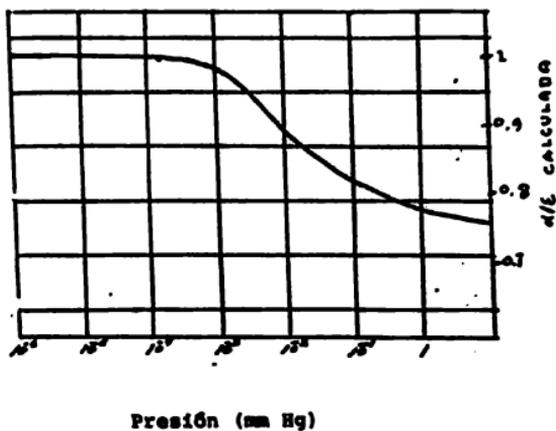


Fig. 2 Dependencia de las medidas del vacío que rodea a la - muestras.

figura 3 se muestra el diagrama del aparato usado. Las fotos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 muestran los detalles del mismo aparato.

Se usó una lámpara de Xenón OSRAMXBO de 150 watts - con arco corto, el espectro obtenido con esta lámpara es muy parecido al espectro solar, (Figura 4). Se hicieron diferentes pruebas fotográficas para obtener una colimación del haz luminoso y que este cayera sobre la muestra a medir. Las fotos 7 y 8 muestran en detalle una amplificación de las líneas usadas.

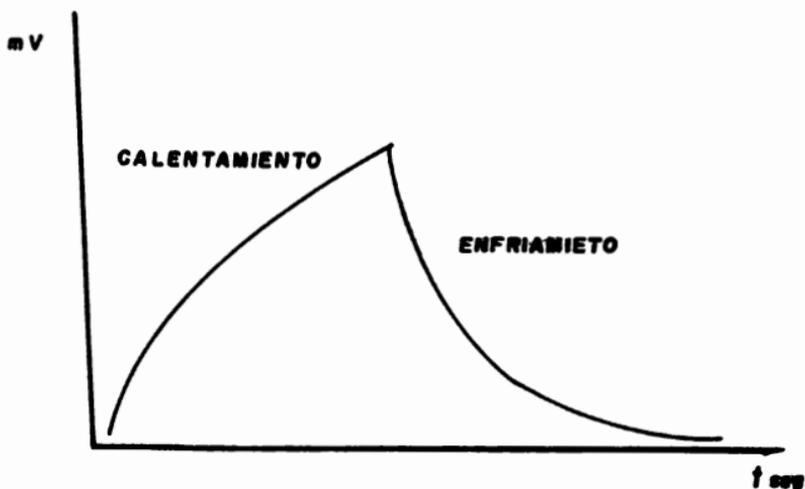
El material en estudio se colocó en platillos de cobre (material soporte) como ya se había mencionado anteriormente y se fijó en el interior del aparato mediante 7 finísimos tornillos hechos de un material no conductor. Una vez - fijo se ponía en contacto con un termopar el cual registraba las variaciones de temperatura y las transmitía a un aparato graficador con el cual se obtenían las gráficas de cada muestra sometida a observación.

Una vez fija la muestra se introducía al cilindro de cobre y se cerraba; este a su vez se introducía a la caja - mayor y se cerraba perfectamente. Se hacía el vacío hasta -  $10^{-3}$  mm de Hg y mientras este se alcanzaba se ponía en contac<sup>o</sup> al cilindro menor con la substancia de temperatura baja -

hasta que se lograba el equilibrio entre la temperatura de la muestra y la de la substancia, en este caso hielo fundente, - esto era registrado en el graficador que fijaba la temperatura inicial.

Llegando la muestra a este punto se procedía a encender la lámpara y vigilar los cambios de pendiente que se iban teniendo en la gráfica; una vez que dicha pendiente no tenía variación se apagaba la lámpara y ahora se obtenían los puntos de la curva de enfriamiento.

El tipo de gráfica que se obtuvo es el siguiente:



Para poder tener registro de temperatura en las ordenadas se acudió a una tabla de conversiones de acuerdo al termopar usado que nos llevaba de lecturas de mV a °C.

De estas curvas se determinaron 5 puntos para cada muestra: 2 de calentamiento, 2 de enfriamiento y el máximo.

A continuación se muestra un diagrama del aparato usado mostrando sus principales partes.

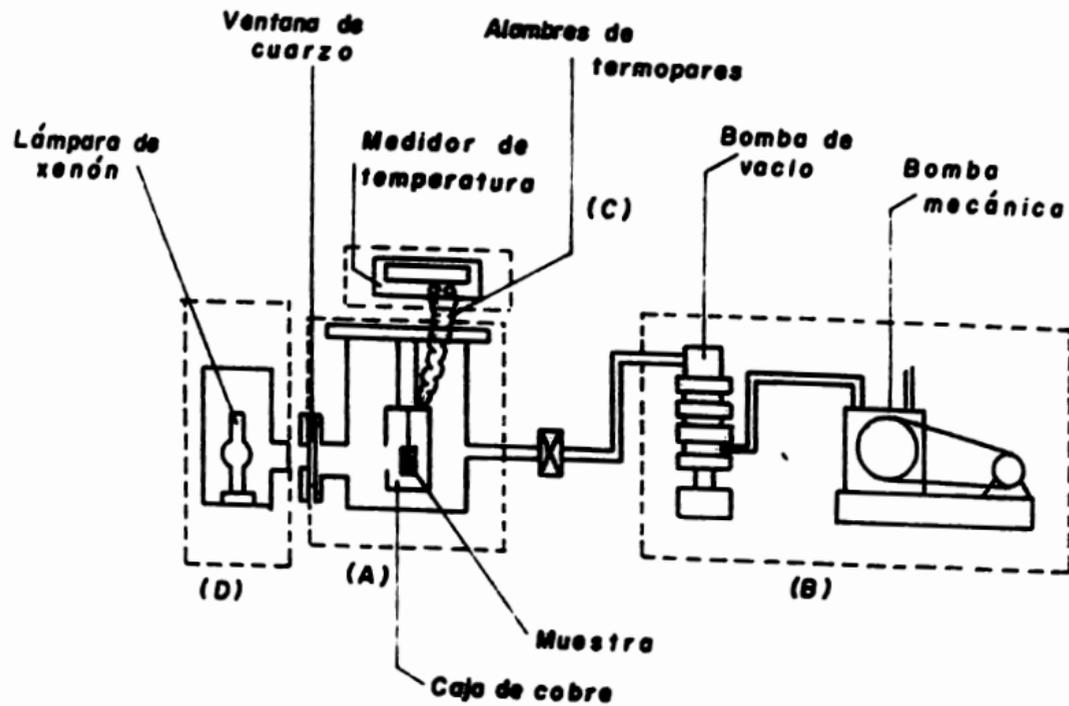


Fig. 3 Diagrama del aparato.

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO

- 1ro. Se coloca el platillo soporte con la substancia problema en el arillo donde se encuentran los tres tornillos por-medio de los que se sostendrá la muestra y a los que se-soldó el termopar.  
El arillo va unido a la tapa de la caja negra.
- 2do. Se coloca el arillo dentro de la caja negra y se atornilla cerrando.
- 3ro. La caja negra se introduce en el cilindro de diámetro - mayor y se atornilla.
- 4to. Se pone a funcionar la bomba mecánica de vacío.
- 5to. Una vez alcanzado un vacío de  $10^{-1}$  mm de Hg. se pone en-marcha la bomba de difusión y se coloca el hielo en el - orificio cuyas paredes comunican la temperatura exterior hacia la caja negra.
- 6to. Ya que se tiene una temperatura cercana a  $0^{\circ}\text{C}$  que se re-gistra por medio del termopar y ya que el vacío es de -  $10^{-2}$  mm de Hg. se enciende la lámpara de Xenón y se pone en marcha el graficador.
- 7mo. Se comienza a obtener la gráfica de calentamiento y se - continua calentando con la luz de la lámpara hasta lle--

gar al máximo de la curva, esto se observa cuando hay un cambio en la pendiente de la curva, o sea que no sigue creciendo a la misma velocidad sino muy lentamente.

8vo. Al llegar a este punto se apaga la lámpara y la curva comienza a descender rápidamente dándonos la parte que corresponde al enfriamiento; esta parte se sigue graficando hasta que es muy lenta la velocidad de descenso, lo cual ocurre cuando nos encontramos cercanos a la temperatura inicial.

9no. Se apagan graficador, bomba de difusión y bomba de vacío y se procede a igualar la presión del cilindro con la exterior por medio de una válvula que se va abriendo muy lentamente hasta que el registro de presión de vacío es nulo.

10mo. Se puede retirar la muestra y colocar una nueva.

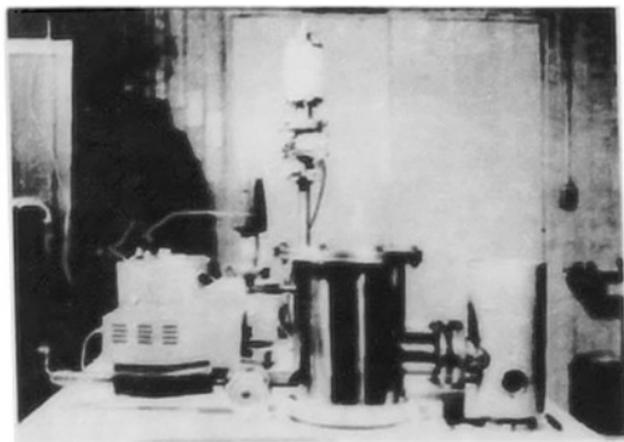
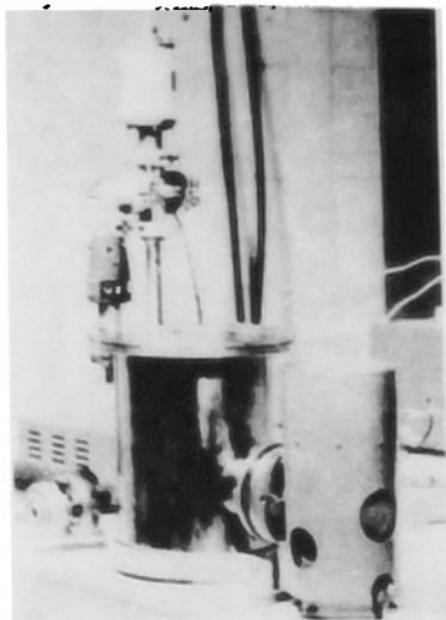


Foto # 1



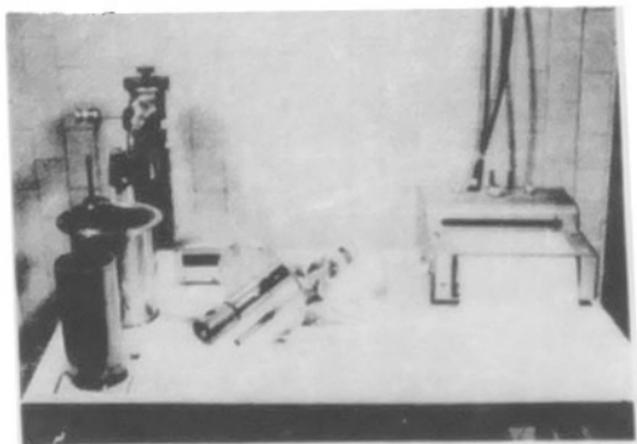
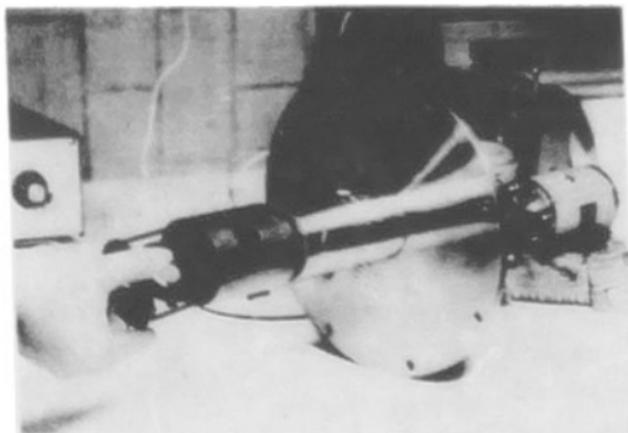
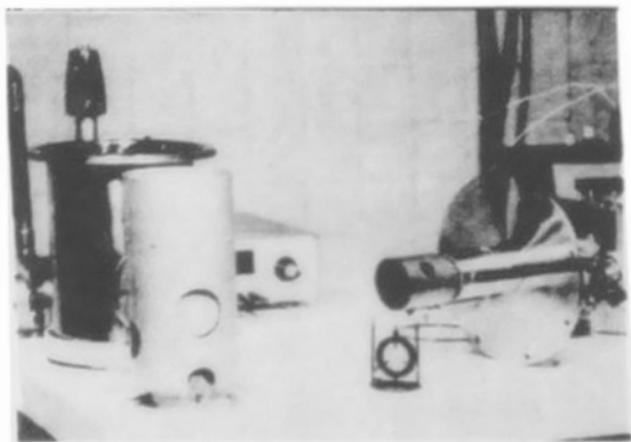
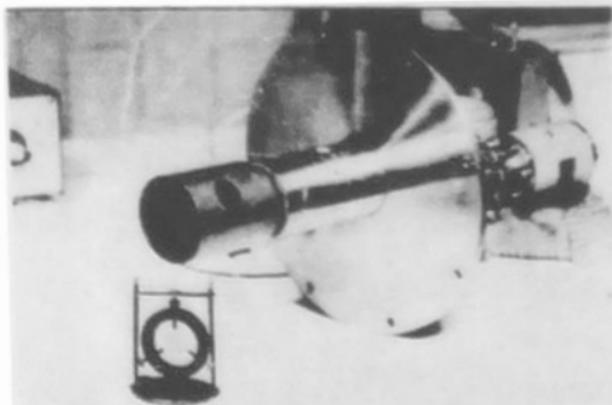


Figure 1





• • •



1 cm

A<sub>31</sub>Galena-ma  
laquita  $\bar{2}$ 

FOTO 7

1 cm

A<sub>32</sub>Galena-ma  
laquita  $\bar{2}$ 

FOTO 8

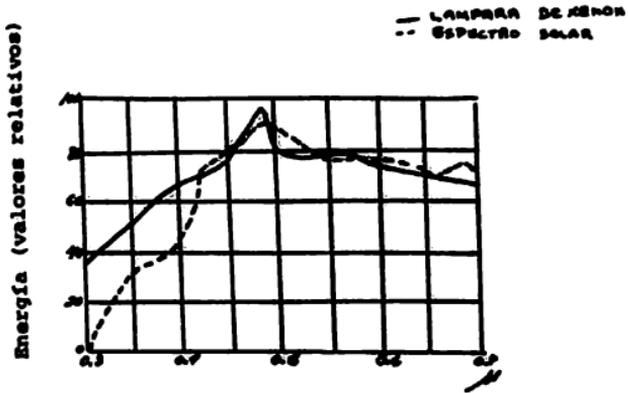


Fig. 4 Comparación de los espectros de la lámpara de Xenón y solar.

**DESCRIPCION DEL METODO DE MEDIDA**

DEFINICIONES DE ABSORTANCIA, EMITANCIA Y REFLECTANCIA.

## ABSORTANCIA

La absorptancia monocromática direccional ( $\alpha_\lambda(u, \phi)$ ) es una propiedad de la superficie y es definida como la fracción de la radiación incidente de longitud y dirección constantes ( $I_\lambda i(u, \phi)$ ) que es absorbida por la superficie ( $I_\lambda a(u, \phi)$ ).

$$\alpha_\lambda(u, \phi) = \frac{I_\lambda a(u, \phi)}{I_\lambda i(u, \phi)}$$

$u, \phi$ : representan las direcciones

$u$ :  $\cos$  (ángulo polar)

$\phi$ : ángulo azimutal

Si integramos sobre todo el espectro encontramos lo que definimos como absorptancia direccional

$$\alpha(u, \theta) = \frac{1}{I_i(u, \theta)} \int_0^\infty \alpha_\lambda(u, \phi) I_\lambda i(u, \phi) d\lambda$$

y si integramos sobre un hemisferio encontramos lo que definimos simplemente como absorptancia.

## EMITANCIA

La emitancia direccional monocromática de una superficie ( $\epsilon_\lambda(\nu, \phi)$ ) se define como la razón de la intensidad monocromática emitida en una dirección ( $I_\lambda(\nu, \phi)$ ) a la intensidad monocromática que un cuerpo negro debería emitir a la misma temperatura  $I_b\lambda$ .

$$\epsilon_\lambda(\nu, \phi) = \frac{I_\lambda(\nu, \phi)}{I_b\lambda}$$

La emitancia direccional es la integral sobre todas las longitudes de onda.

Y si integramos sobre todo un hemisferio encontramos lo que llamamos emitancia hemisférica o simplemente emitancia.

## LEY DE KIRCHOFF

Consideremos un cuerpo aislado que se encuentra a una temperatura  $T$  uniforme. La radiación del cuerpo aislado en el recinto es homogénea e isotrópica. Este cuerpo absorbe y emitirá la misma cantidad de energía.

Un balance de energía sobre un elemento arbitrario de superficie sería

$$a q = c e_b$$

Si ahora colocamos dentro del recinto un segundo cuerpo con diferentes propiedades superficiales tendremos

$$a'q = c' e_b$$

Así para un cuerpo en equilibrio térmico  $q/e_b = 1$

$$a = c$$

Hay que recordar que esto es válido si la radiación proveniente de otra fuente se encuentra a la misma temperatura que el cuerpo, el cual esta absorbiendo la radiación.

Esta ley puede ser expresada la forma mas general:

$$a_\lambda (u, \phi) = c_\lambda (u, \phi)$$

esta propiedad es cierta para cualquier condición y no solo - para cuerpos en equilibrio térmico.

#### REFLEXION

La reflectancia monocromática angular hemisférica es designada por  $\rho_\lambda(u_i, \phi_i)$  y es definida como la razón de la energía radiante monocromática reflejada en todas direcciones al flujo radiante incidente dentro de un pequeño ángulo sólido.

$$\rho_\lambda(u_i, \phi_i) = \frac{\text{intensidad reflejada}}{\text{energía incidente}}$$

La reflectancia así definida es una propiedad de la superficie.

Si integramos sobre todas las longitudes de onda obtenemos  $\rho(\nu_i, \phi_i)$  que no es una propiedad de la superficie.

### RELACION ENTRE ABSORTANCIA, EMITANCIA Y REFLECTANCIA.

Vamos a mostrar ahora que solo es necesario conocer una propiedad: la reflectancia monocromática angular hemisférica y todas las otras propiedades ópticas de los cuerpos opacos pueden ser calculadas.

$$I_{t\lambda} = I_{\lambda}(\nu, \phi) \text{ emitida} + I_{\lambda}(\nu, \phi) \text{ reflejada}$$

$$I_{\lambda}(\nu, \phi) \text{ emitida} = c_{\lambda}(\nu, \phi) \cdot I_{t\lambda}$$

$$I_{\lambda}(\nu, \phi) \text{ reflejada} = I_{b\lambda} \cdot \rho_{\lambda}(\nu, \phi)$$

$$c_{\lambda}(\nu, \phi) = 1 - \rho_{\lambda}(\nu, \phi)$$

de la ley de Kirchoff:

$$c_{\lambda}(\nu, \phi) = a_{\lambda}(\nu, \phi)$$

o

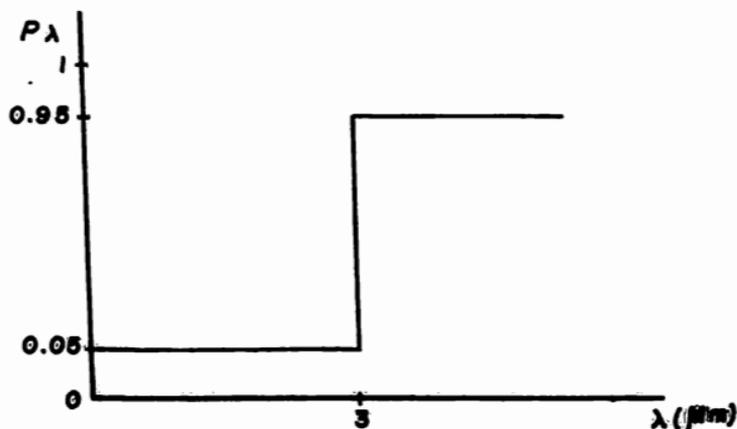
$$c_{\lambda}(\nu, \phi) = a_{\lambda}(\nu, \phi) = 1 - \rho_{\lambda}(\nu, \phi)$$

### SUPERFICIES SELECTIVAS

El examen de colectores solares muestra el deseo de obtener superficies con una combinación de alta selectividad para la radiación solar, baja emisividad para las longitudes de onda grande.

Esto es posible ya que los dominios se sobreponen ligeramente. El 99% de las radiaciones solares tienen un espectro comprendido entre 0.3 y  $3\mu\text{m}$ , mientras que el espectro que presenta una superficie negra con  $T=400^\circ\text{K}$  es a  $3\mu\text{m}$ .

El concepto de selectividad se muestra de acuerdo a la reflectancia monocromática como se puede observar en la siguiente figura.



Esto constituiría una superficie ideal:

$$\alpha_{\lambda} = (1 - \rho_{\lambda}) = 0.95 \quad 0 < \lambda < 3 \mu\text{m}$$

$$\epsilon_{\lambda} = (1 - \rho_{\lambda}) = 0.95 \quad 3 \mu\text{m} < \lambda$$

$\mu\text{m}$  : micrometros.

Hay un número de mecanismos para producir tales condiciones sobre una superficie:

1. Una capa de alta absorbancia en la longitud de onda de la radiación solar y alta transmitancia para longitudes de onda grande.

La capa puede ser homogénea o tener una estructura óptica propicia, su material óxidos metálicos tiene en general estas propiedades, sulfatos de ciertos elementos finamente divididos fueron estudiados por diferentes autores con buenos resultados y también se comprobó la posibilidad de usar pinturas con alta transmitancia.

2. Filtros, depósitos, alternativas de metales y dieléctricos.  
Ejemplo:  $\text{SiO}_2\text{-Al-SiO}_2$ .

3. Una estructura apropiada para absorber casi todas las radiaciones que les lleguen, figura 5.

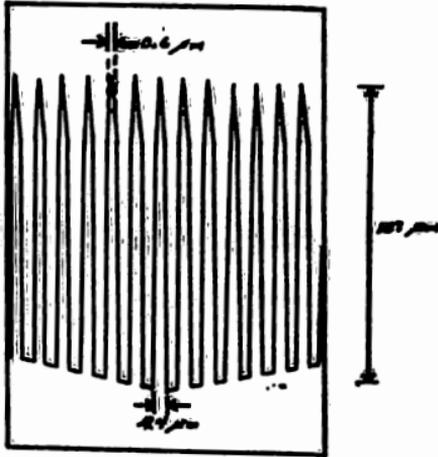


Fig. 5 Simulación de un cuerpo negro con rejillas de difracción.

Dos cosas que se exigen a las superficies selectivas:

Alta selectividad, buena durabilidad a altas temperaturas e intemperismo.

### ANTECEDENTES MATEMATICOS

#### DURANTE EL ENFRIAMIENTO

La pérdida de energía con el tiempo durante el enfriamiento está dada por

$$\frac{dQ}{dt} = m C \frac{dT_1}{dt}$$

en donde:

$m$  masa de la muestra

$C$  capacidad calorífica de la muestra

$\frac{dT_1}{dt}$  variación de la temperatura de la muestra con respecto al tiempo durante el enfriamiento.

Pero también tenemos que

$$\frac{dQ}{dt} = A\sigma(T_1^4 - T_2^4) + P_{\text{cond}}(T) + P_{\text{conv}}(T) + P_{\text{rad}}(T)$$

en donde:

|               |                                   |
|---------------|-----------------------------------|
| $T_2$         | temperatura de los alrededores    |
| $A$           | área total de la muestra          |
| $E$           | coeficiente de emisividad         |
| $P_{rad}(T)$  | pérdidas de calor por reradiación |
| $P_{cond}(T)$ | pérdidas de calor por conducción  |
| $P_{conv}(T)$ | pérdidas de calor por convección  |
| $\sigma$      | constante de Stefan-Boltzman      |

igualando las ecuaciones 1 y 2 y despejando obtenemos

$$c = - \frac{mCT_1}{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)} - \frac{P_{cond}(T) + P_{conv}(T) + P_{rad}(T)}{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}$$

lo que puede ser escrito como

$$c = c_1 + c_2$$

las pérdidas por convección disminuyen a bajas temperaturas y las de conducción son minimizadas al utilizar tornillos de araldita para sujetar la muestra, con una superficie de contacto inferior a  $1 \text{ mm}^2$ . De modo que podemos considerar

$$c = c_T = \frac{mCT_1}{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)} \quad (3)$$

$$c_2 \rightarrow 0$$

Los valores de  $m$ ,  $C$ ,  $A$ , son conocidos,  $T_2$  se mantiene constante y se mide con la ayuda de un termistor.

Una curva típica de calentamiento y enfriamiento es mostrada por la figura 6.

#### CALENTAMIENTO

Durante el calentamiento la energía captada será igual a la cantidad de energía que recibe la superficie menos la que emite al mismo tiempo.

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha I a - \epsilon A \sigma (T_3^4 - T_2^4) \quad (4)$$

en donde:

- $\alpha$  coeficiente de absorción de la superficie
- $I$  intensidad de radiación que cae sobre la muestra
- $a$  área que recibe la radiación
- $T_3$  temperatura de la muestra durante el calentamiento

pero también podemos escribir

$$\frac{dQ}{dt} = m C \frac{dT_3}{dt} \quad (5)$$

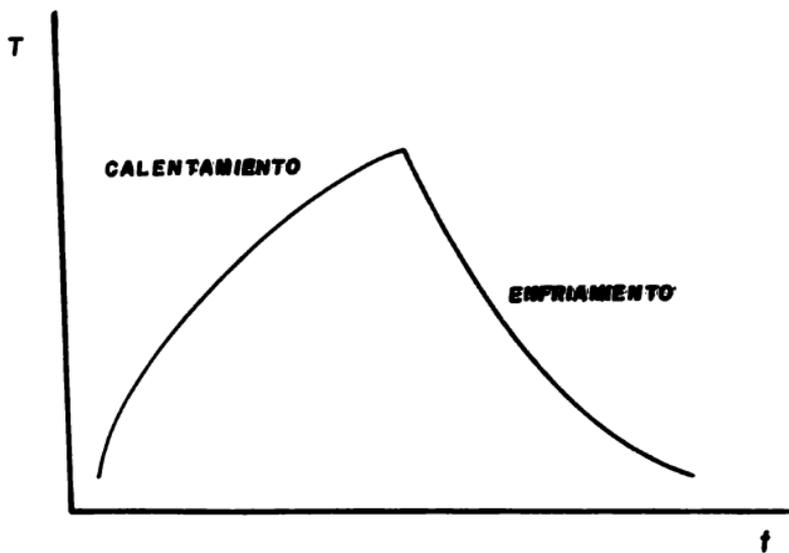


Fig. 6 Curvas de calentamiento y enfriamiento

Substituyendo 5 y 3 en 4 y despejando para  $\alpha$  obtenemos

$$\alpha = \frac{m C}{I a} (T_3 - T_1 \left[ \frac{T_3^4 - T_2^4}{T_1^4 - T_2^4} \right]) \quad (6)$$

aquí de nuevo  $m$ ,  $C$  son conocidas,  $I$  es calculada a partir de un cuerpo negro,  $a = A/2$ ,  $T_2$  es medida y se mantiene constante.

De la figura 7 podemos calcular  $T_3$  y  $T_1$ , el paréntesis que acompaña a  $T_1$  puede ser eliminado si trabajamos a la misma temperatura de enfriamiento y calentamiento. Así a partir de la ecuación 6 el valor de  $\alpha$  puede ser conocido.

La temperatura registrada para cada muestra se consideró la misma sobre las 2 caras, para que esta hipótesis se acercara a la realidad las muestras fueron realizadas con lámina de cobre de 0.03 cm de espesor.

De las gráficas de calentamiento y enfriamiento obtenidas para cada muestra podemos determinar:

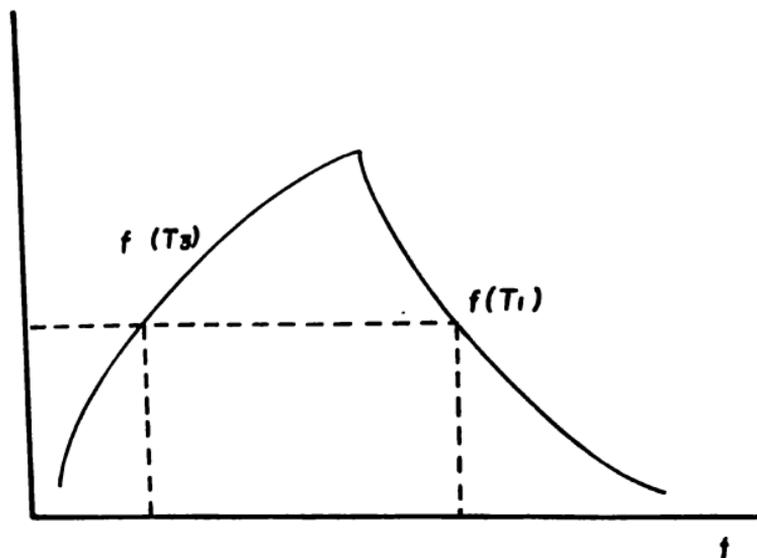
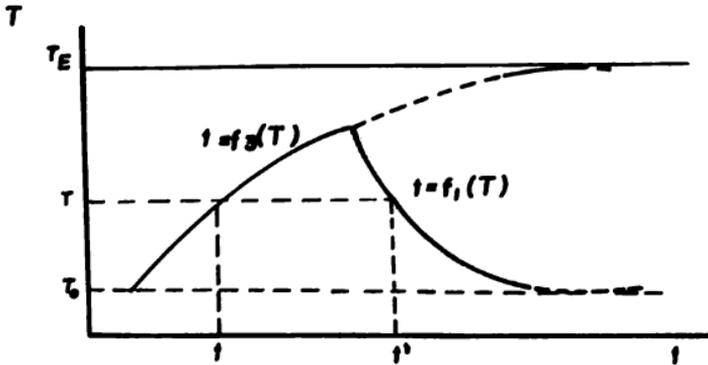


Fig. 7 Obtención de  $T_3$  y  $T_1$  a partir de las curvas.



en donde:

$T_E$  temperatura de equilibrio para el calentamiento

$T_0$  temperatura de equilibrio para el enfriamiento

$T$  temperatura en el tiempo  $t$  para el calentamiento  
y en el tiempo  $t'$  para el enfriamiento

Si introducimos el concepto de temperatura de equilibrio en la ecuación de partida obtenemos

$$m C \frac{dT}{dt} = a a I + P - A c \sigma T^4$$

En  $P$  agrupamos todas las pérdidas.

La ecuación anterior puede escribirse:

$$\frac{dT}{dt} = (\sigma T_E^4 - \sigma T^4) c A / m C$$

con

$$\sigma T_E^4 = (a a I + P) / c A$$

Integrando para  $t$  y considerando la zona de enfriamiento tenemos:

$$t = \int dt = \frac{m C dT}{cA\sigma - T_E^4 + T^4} = f(T)$$

$$t \Big|_0^t = f(T) = - \left[ \frac{1}{2T_E^3} \arctan \frac{T}{T_E} + \frac{1}{4T_E^3} \ln \left| \frac{T + T_E}{-T + T_E} \right| \right] \Big|_{T_i}^T \frac{m C}{\sigma A c}$$

de aquí obtenemos para  $c$

$$c = - \left[ \arctan \frac{T}{T_E} + \ln \left| \frac{T + T_E}{-T + T_E} \right| \right] \frac{m C}{\sigma A 4T_E^3 \cdot t}$$

así para obtener  $c$  alimentamos en el programa  $m, C, \sigma, A$  que son constantes para cada muestra y  $T_E$ ,  $t = f(T)$  que corresponden a la temperatura de equilibrio y las coordenadas de puntos sobre la curva de calentamiento.

Si ahora apagamos la fuente de calor y llegamos a la temperatura de equilibrio  $T_0$ , obtenemos:

$$\sigma T_0^4 = P/cA$$

$$c = c(\sigma T_E^4 - \sigma T_0^4) A/a I$$

$c$  ya ha sido obtenido a,  $I, \sigma, A$  son constantes de la muestra,  $T_E$  fue leída sobre la gráfica de calentamiento y  $T_0$  sobre la de enfriamiento.

## DISCUSION DE RESULTADOS

En este momento se introducen los puntos de las curvas obtenidas para la determinación de  $\alpha y c$ .

### FUENTES DE ERROR

#### VARIACION EN LA INTENSIDAD DE LA LUZ

El mayor error estadístico en las medidas fue el que se cometía debido a las variaciones de la intensidad de la luz del arco luminoso, este error se estima en un 2%.

#### GRADIENTE TERMICO

Sensiblemente disminuido al utilizar cobre de 0.03cm de espesor.

#### UNION DEL TERMOPAR A LA MUESTRA

Para disminuir la variación en las lecturas y el error que podría causar la soldadura que une al termopar con los tornillos, se usó una resina especial que no alterara la sensibilidad del termopar para detectar el cambio de temperatura.

**IV**

**RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSION**

RESULTADOS OBTENIDOS

Para poder determinar resultados de cada muestra se utilizó un programa de computadora elaborado con las ecuaciones y relaciones matemáticas que se plantearon anteriormente, alimentándose en estas los datos de temperaturas y tiempos - que se obtuvieron de las gráficas de cada una de las muestras, así como de datos referentes a cada material (capacidad calorífica, etc.). Se utilizaron también características de los platillos soporte como son su diámetro y la cantidad de material colocado en cada uno de ellos.

Este programa y sus variables se encuentran en el - Anexo I.

Los primeros resultados obtenidos fueron:

|                      | a    | c    | a/c  |
|----------------------|------|------|------|
| Galena 1             | 0.96 | 0.2  | 4.8  |
| Galena 2             | 0.90 | 0.2  | 4.5  |
| Cromita 1            | 0.18 | 0.02 | 9.7  |
| Galena + malaquita 1 | 0.99 | 0.15 | 6.6  |
| Galena + malaquita 2 | 0.76 | 0.13 | 5.85 |
| Cromita 3            | 0.72 | 0.13 | 5.5  |
| Corundum 2           | 0.63 | 0.08 | 7.8  |
| Oxido de Cu          | 0.91 | 0.2  | 4.55 |
| MgSO <sub>4</sub>    | 0.77 | 0.28 | 2.75 |
| Oro sobre Cu         | 0.36 | 0.06 | 6    |
| Esmalte blanco       | 0.07 | 0.05 | 1.4  |

Después de estos ensayos se hicieron pruebas sobre la localización de la mancha luminosa así como su focalización sobre la muestra.

Al efectuar algunas pruebas fotográficas sobre la mancha luminosa se observó que esta no focalizaba completamente a la muestra sino que era mayor que ella, por lo que el haz se hacía más difuso al llegar a la muestra.

Al efectuar algunas pruebas fotográficas sobre la mancha luminosa se observó que esta no focalizaba completamente a la muestra, sino que caía más arriba y más grande que el platillo que contenía a la muestra lo que debía de afectar a las lecturas obtenidas.

Se decidió corregir este error pero fue necesario hacer un compromiso entre la focalización y el tamaño que la mancha debería tener una vez focalizada sobre la muestra, ya que debería cubrirla totalmente.

Pero se encontró que dado que tanto la lámpara como la muestra se encontraban fijas en el espacio resultaba extremadamente difícil poder jugar con el parámetro distancia y asegurar que la mancha focalizada caía plenamente sobre la muestra. Por lo que se procedió a corregir lo que más se pudiera por medio del parámetro distancia y mediante el uso de colimadores para hacer la mancha del tamaño deseado.

Habiendo hecho estas correcciones se procedió a -  
 efectuar medidas de un segundo juego de muestras, pero dado -  
 los resultados obtenidos se considera que es necesario deter-  
 minar de manera rigurosa el área que cubre la mancha focaliza-  
 da sobre la muestra, dada la importancia de este parámetro -  
 para obtener correctamente los valores de  $\alpha$  y  $\epsilon$ .

Los valores obtenidos del segundo juego de muestras -  
 son:

|                      | $\alpha$ | $\epsilon$ | $\alpha/\epsilon$ |
|----------------------|----------|------------|-------------------|
| Cromita 2            | 0.94     | 0.78       | 1.2               |
| Cromita 3            | 0.91     | 0.79       | 1.15              |
| Corundum 1           | 0.57     | 0.3        | 1.95              |
| Corundum 2           | 0.99     | 0.52       | 1.9               |
| Corundum 3           | 0.65     | 0.34       | 1.9               |
| Galena 1             | 0.79     | 0.44       | 1.46              |
| Galena 2             | 0.76     | 0.47       | 1.62              |
| Galena 3             | 0.65     | 0.59       | 1.1               |
| Galena + malaquita 1 | 0.6      | 0.38       | 1.57              |
| Galena + malaquita 2 | 0.66     | 0.41       | 1.61              |
| Galena + malaquita 3 | 0.71     | 0.44       | 1.63              |

Se observa un crecimiento en los valores de  $\epsilon$  por lo -  
 que las razones de  $\alpha/\epsilon$  se ven reducidas en comparación con los  
 del primer juego de resultados.

Esto nos lleva a pensar que se focalizó mal la man--  
cha luminosa o que interfirieron los colimadores entre la lím  
para y la muestra alterando el proceso.

**CONCLUSIONES**

De acuerdo con los resultados obtenidos se considera que la focalización es mejor durante el primer juego de muestras y que de acuerdo a esto, los resultados que se encuentran mas atractivos son:

GALENA

CROHITA

GALENA + MALAQUITA

CORUNDUM

OXIDO DE COBRE

ORO SOBRE COBRE

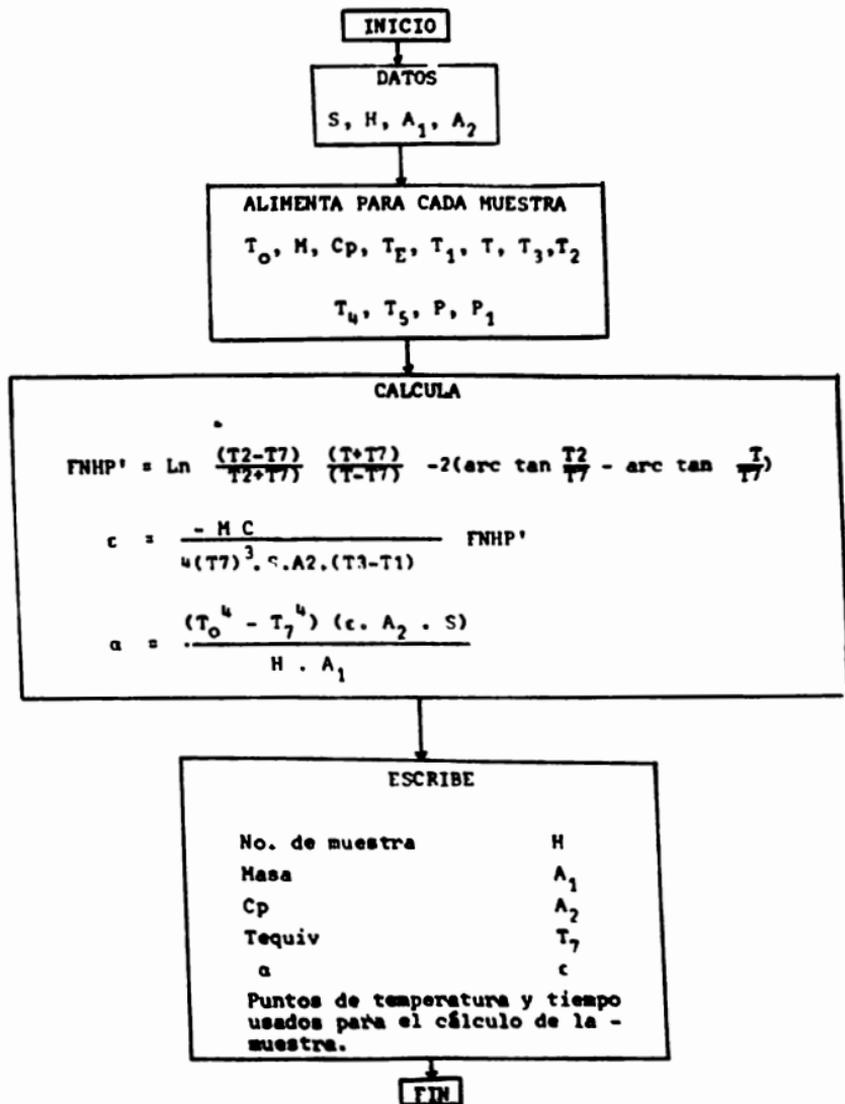
Todos ellos en su presentación de grano mas fino.

**ANEXO I**

## LISTA DE VARIABLES

|                    |   |  |                                      |   |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| S                  | = | cte. de Stefan-Boltzman                  | watt/cm <sup>2</sup> °K <sup>4</sup> |   |
| H                  | = | intensidad de la lámpara                 | watt/cm <sup>2</sup>                 |   |
| A <sub>1</sub>     | = | área proyectada                          | cm <sup>2</sup>                      |   |
| A <sub>2</sub>     | = | área total de la muestra                 | cm <sup>2</sup>                      |   |
| T <sub>7</sub>     | = | temp. límite superior                    | °K                                   |   |
| M                  | = | masa de la muestra                       | g                                    |   |
| C                  | = | Cp = capacidad calorífica del material   | J/g                                  |   |
| T <sub>0</sub>     | = | temp. inicial = T <sub>f</sub> del hielo | °K                                   |   |
| Tiempo 1           | = | T <sub>1</sub>                           | seg                                  | } puntos de calentamiento de la gráfica |
| Temp 1             | = | T  | °K                                   |   |
| Tiempo 2           | = | T <sub>3</sub>                           | seg                                  |   |
| Temp 2             | = | T <sub>2</sub>                           | °K                                   |   |
| Tiempo 3           | = | P <sub>1</sub>                           | seg                                  | } puntos de enfriamiento de la gráfica  |
| Temp 3             | = | P  | °K                                   |   |
| T max              | = | T <sub>6</sub>                           | °K                                   | temp del máximo de la gráfica           |
| Tiempo             | = | T <sub>5</sub>                           | seg                                  | tiempo del máximo de la gráfica         |
| E = ε              | = | emisividad                               |                                      |   |
| A <sub>3</sub> = α | = | absortancia                              |                                      |   |

## DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA UTILIZADO.



El programa que se usó ya existía y había sido desarrollado por la misma persona que armó el aparato que se encuentra en el Centro de Materiales y a la fecha en que se hizo el experimento descrito ya se encontraba fuera de México por lo que los datos, manejo y descripción del programa fueron proporcionados por su ayudante, el cual no conocía a fondo el desarrollo del programa mencionado.

El lenguaje en que esta escrito es BASIC y muchas relaciones no estaban definidas, sólo se tenía una idea general para lo que servían pero no en detalle.

Por ejemplo antes del cálculo del FNHP' da definiciones para el límite de iteración y que la máquina no entre a un círculo sin salida y corrige los valores por errores en el manejo como pueden ser variaciones en el intervalo de temperaturas.

```

10  FIXED 6
20  RAD
30  DIM B9(3),N6(2)
40  READ S,H,A1,A2
50  DATA 5.72E-12,5.46E-02,1.005,2.011
60  DISP "TO(K),M(GR),CP(J/GRC),TE(K)"
70  INPUT T7,H,C,TO
80  DISP "NUMERO DE MUESTRA"
90  INPUT B
100 DISP "TIEMPO1(SEG),TEMP1(K),TIEMPO2(SEG),TEMP2(K)"
110 INPUT T1,T,T3,T2
120 DISP "TMAX(K),TIEMPO(SEG),T(K),TIEMPO(SEG)"
130 INPUT T4,T5,P,P1
140 T6=(T7 4+H14A1/(A2*S)) (1/4)
150 DEF FNG(X)=LOG((X-T4)0(X+T)/((X+T4)0(X-T)))-2*(ATNCT4/X)-A N(T/X)
160 DEF FNG(X)=4*E*A2*S0(T1-T5)*X 3/(M*C)
170 DEF FNH(X)=LOG((X-T7)0(T4+T7)/((X+T7)0(T4-T7)))-2*(ATN(X/T7)-ATN(T4/T7))
180 DEF FNJ(X)=LOG((TO-T4)0(TO+X)/((TO+T4)0(TO-X)))-2*(ATN(T O)-FTN(X/TO))
190 DEF FNJ(X)=(2*X-T4+T)/((X-T4)0(X+T)-(2*X+T4)/((X+T4)0(X-T))
200 DEF FNK(X)=2*(T4/X 2+T4 2)-T/(X 2+T 2)
210 DEF FNL(X)=-12*E*A2*S0(T1-T5)*X 2/(M*C)
220 DEF FNH(X)=-(2*(X+T4)0(X-T)-(2*X-T4)0(X+T))/((X-T4) 2*(X+T) 2)
230 DEF FNH(X)=4*(T4*X/(X 2+T4 2) 2+X0T/(X 2+T 2) 2)+2*4*S*E*A2*X0(T1-T5)/(M*C)
240 E=-(M*C/(4*4T 3*S*A2*(P1-T5)))0FNHP
250 T8=(T7 4+H14A1/(E*A2*S)) (1/4)
260 F1=FNTO+FNHTO
270 F1=FNJTO+FNKTO+FNLTO
280 F2=FNHTO-FNNTO
290 DISP (F/F1)/(1-F*F2/F1 2),TO
300 AO=TO-(F/F1)/(1-F*F2/F1 2)
310 IF ABS(AO-TO) !E-05 THEN 140
320 TO=AO
330 GOTO 260
140 A3=(TO 4-T7 4)*(E*A2*S)/(H1*A1)
350 PRINT TAB10"NUMERO DE MUESTRA"=B
160 PRINT
170 PRINT "MA:A"=N"GR"TAB20"CP="C"J/GRC"TAB40"H="H1" M/CM 2"
380 PRINT "AREA 1="A1"CM 2"TAB22"AREA2="A2"CM 2"TAB44" T DE REF="T7"K"
390 PRINT "T EQUIV(ALFA=1)="T8"K"TAB31" T EQUIV(ALFA=E)="T6"K"
400 PRINT "ALFA="A3"E="E" T EQUIV="TO"K"
410 PRINT TAB20"PUNTOS USADOS EN ESTA DETERMINACION"
420 PRINT TAB2"TEMP1="T"K"TAB20"TIEMPO1="T1"SEG"TAB43"CALENTAMIENTO"
430 PRINT TAB2"TEMP2="T2"K"TAB21"TIEMPO2="T3"SEG"TAB43"CALENTAMIENTO"
440 PRINT TAB2" T MAX="T4"K"TAB21"TIEMPO="T5"SEG.
450 PRINT TAB2"TEMP3="P"K"TAB21"TIEMPO3="P1"SEG"TAB44" ENFRIAMIENTO"
460 END

```

## BIBLIOGRAFIA.

1. G.D. Gordon. Measurement of ratio of absorptivity of sun light to thermal emissivity. The Review of Scientific instruments V31 N11, Nov 1960.
2. Genaro González Reyna. Riqueza minera y yacimientos minerales de México. Banco de México, 1947.
3. W.H. Mr. Adams Heat Transmission 3a. Edición Mac. Graw - Hul.
4. E.R.G. Eckert and Robert M. Drake Jr. Heat and Mass Transfer. 2a. Edición. Mac. Graw Hill.