



9  
2 g'  
UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

INTEMPERIZACION DE ESPEJOS  
PARA USO EN ENERGIA SOLAR

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A  
JOSE LUIS BAZAN ORTIZ

TESIS CON  
FALSA FE CRONOL.

MEXICO, D. F., 1989



## **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 está 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

### O B J E T I V O S

CAPITULO	I	INTRODUCCION
CAPITULO	II	FUNDAMENTO DE ENERGIA SOLAR
	2.1	<i>Que es la energia solar</i>
	2.2	<i>Radiación Solar incidente sobre la superficie de la Tierra.</i>
	2.3	<i>Captación solar</i>
	2.4	<i>Tipo de colectores</i>
	2.5	<i>Aplicaciones de los colectores solares</i>
CAPITULO	III	ESPEJOS USADOS EN ENERGIA SOLAR
	3.1	<i>Tipos de espejos</i>
	3.2	<i>Materiales usados en espejos para uso en energia solar</i>
	3.3	<i>Obtención de espejos</i>
	3.4	<i>Propiedades de los espejos</i>
	3.5	<i>Métodos de determinación de las propiedades</i>
CAPITULO	IV	ESPEJOS DESARROLLADOS EN EL INSTITUTO DE INGENIERIA
	4.1	<i>Selección del sustrato</i>
	4.2	<i>Limpieza del sustrato</i>
	4.3	<i>Desarrollo experimental de espejos</i>
	4.4	<i>Degradación por efecto del medio ambiente</i>
CAPITULO	V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
CAPITULO	VI	AGRADECIMIENTOS
CAPITULO	VII	BIBLIOGRAFIA

**OBJETIVOS**  
■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

## O B J E T I V O S

Esta tesis tiene como objetivo la descripción, análisis y posible explicación del deterioro que sufren los espejos usados en aplicaciones solares, al ser expuestos al medio ambiente. La razón que origina este trabajo es la necesidad de contar con espejos que tengan buena resistencia al ataque del medio, cuando se requiere el uso de sistemas concentrados solares que convierten la energía solar a energía eléctrica o mecánica. Tal ha sido la experiencia acumulada durante 14 años del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Para el logro de los objetivos varias muestras de espejos, - de diferentes materiales y con variación en sus parámetros - de fabricación, se exponen al Sol y son inspeccionados periódicamente de manera visual, óptica y microscópicamente. En este trabajo interesa el daño físico y la propiedad denominada reflejancia. Un aspecto importante del trabajo es establecer el daño del espejo conforme avanza el tiempo de exposición, tratando de determinar su tiempo de vida útil.

**C A P I T U L O I**  
-----

**INTRODUCCION**

## 1. INTRODUCCION

En los últimos años se ha observado una creciente demanda energética, es por ello que ha crecido el interés por desarrollar nuevas tecnologías que logren el aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía, dentro de las que se encuentran la nuclear, solar, eólica, mareomotriz y biomasa. Estas no llegarán a substituir a los hidrocarburos, pero van a contribuir en cierta proporción, a cubrir la demanda mundial de energéticos.

En México se han realizado diversas investigaciones para el aprovechamiento de nuevas fuentes de energía, actualmente en muchas comunidades rurales de la República Mexicana, por ejemplo en Huesca, Tecajec y Zacapalco en el estado de Morelos y en Concepción Hidalgo, Texmola y Tlaxcala en el -

Estado de Tlaxcala, se calienta agua con ayuda del sol. La energía solar aprovecha la radiación proveniente del sol para transformarla en energía eléctrica o mecánica, también se puede usar directamente como en los calentadores solares.

Para alcanzar altas temperaturas, mayores a 373K, es necesario concentrar la radiación solar, para lo cual se utiliza un equipo captador-concentrador solar, estos equipos están compuestos de un sistema óptico y un sistema absorbedor. El sistema óptico es un espejo, plano o curvo, en el cual inciden los rayos solares reflejándolos hacia el sistema absorbedor.

En el Instituto de Ingeniería se han investigado, desde hace aproximadamente 14 años, equipos para la transformación de la energía solar. Se instaló en 1978 una planta solar que funciona con tres tipos de espejos: acrílico aluminizado, de nombre comercial FEK-244 fabricados en EUA., aluminio electropulido (Kingston-Lux, importado), y acrílico grueso aluminizado, se observó que todos sufrían degradación por efecto del medio ambiente en aproximadamente 5 años de operación; a nivel mundial no se tiene la tecnología adecuada para el desarrollo de espejos solares y por tanto se hace necesario investigar la técnica ideal para su elaboración. El Instituto de Ingeniería de la UNAM desde hace tres años, se ha abocado a la investigación del desarrollo de espejos de primera superficie que tengan una durabilidad mínima de

20 años sin que sus propiedades ópticas se vean afectadas - por efecto de los constituyentes y contaminantes atmosféricos, desarrollando además su propia tecnología.

Los espejos usados en aplicaciones solares, deben tener las siguientes características: alta reflejancia, alta transmitancia y mínima emitancia. Los espejos, de primera o segunda superficie, se construyen depositando un metal de alta - reflejancia, comúnmente aluminio o plata, sobre un sustrato, vidrio o acrílico, este depósito se realiza sublimando el - material reflector en una cámara a alto vacío, que se conoce como evaporación térmica.

Para evitar que el medio ataque al material reflector y pierda sus propiedades ópticas, es necesario protegerlo por medio de delgadas películas transparentes, para evitar pérdidas de radiación por absorción, las películas protectoras - se componen de:  $\text{Si}_x\text{O}_y$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , vidrio, plásticos transparentes y  $\text{MgF}_2$ .

Para obtener una buena adherencia del material reflector y protector sobre el sustrato y aumentar la vida útil del espejo es requisito indispensable eliminar todos los contaminantes de la superficie del sustrato, para lo cual se utilizan técnicas químicas y físicas.

Con la experiencia obtenida en los proyectos realizados, se llegó a la conclusión de que los mejores espejos pueden lograrse usando sustratos de vidrio. Los materiales usados en las -

películas protectoras son:  $Al_2O_3$ , y  $Si_xO_y$ . Cada una de ellas se obtiene por el proceso de evaporación térmica, sin embargo existen diferencias importantes en la obtención de dichas películas.

Un aspecto importante relacionado con la duración de estos espejos son los fenómenos de intemperismo, así como la limpieza para conservarlos con excelente reflejancia. Este trabajo relata cual ha sido el comportamiento de varias muestras de espejos que han sido expuestos durante aproximadamente - dos años.

C A P I T U L O   I I

-----

FUNDAMENTOS DE LA ENERGIA SOLAR

## 2. FUNDAMENTOS DE LA ENERGIA SOLAR

### 2.1 Que es la energia solar

Actualmente la sociedad demanda grandes cantidades de energía, que ha originado que se investiguen nuevas fuentes de energía que ayuden a satisfacer paralelamente las necesidades actuales. Una de las fuentes alternas de energía que se investigan es la *energía solar*.

La fuente de la energía solar es la radiación proveniente del Sol; para su aprovechamiento se requiere de captarla y usarla directamente o transformarla en calor útil hacia un medio de trabajo (agua, aire, u otro fluido térmico).

En cualquier sistema que use la energía solar indirectamente (fototérmico) se busca, que la temperatura de operación sea lo suficientemente alta para que su disponibilidad ter-

modinámica sea satisfactoria.

El Sol es la estrella más grande de nuestro sistema solar, con un diámetro aproximado de  $1.4 \times 10^6$  km., más de cien veces el diámetro de la Tierra, promediada entre el perihelio y el afelio. La estructura del Sol es enormemente compleja, está constituida de cinco regiones principales:

- Núcleo:** En esta región se genera casi el 90% de la energía total, alcanzando temperaturas en el intervalo de 8 a 40 millones de grados.
- Fotósfera:** En esta capa se genera la mayor parte de la radiación solar que llega a la superficie - de la tierra.
- Atmósfera Solar:** Compuesta de gases fríos que constituyen - la capa inversora o de inversión.
- Cromósfera:** Capa de aproximadamente 10,000 km de espesor.
- Corona:** Capa que envuelve a todo el sistema, tiene una bajísima densidad y alta temperatura.

Para fines de estudio y cálculo de ingeniería es aceptable considerar al Sol como un cuerpo negro a una temperatura - constante de 5762 °K y una constante solar de  $1353 \text{ W/m}^2$ . La constante solar se define como la cantidad de energía por - unidad de tiempo que recibe del Sol una superficie de área unitaria, ubicada fuera de la atmósfera terrestre.

En termodinámica un cuerpo negro se define como un objeto - que absorbe toda la radiación, visible y no visible, que -

choca contra él. Por lo tanto, un cuerpo negro es un radiador y un absorbedor perfecto, emitancia = 1 y absorptancia=1. Un cuerpo negro no necesita parecer negro, puede, de hecho, parecer brillante. Por ejemplo, el Sol puede considerarse como un cuerpo negro dado que absorbe toda la radiación que incide en él.

Se ha encontrado que la energía total emitida por unidad de tiempo desde una unidad de área de un cuerpo negro a la temperatura absoluta  $T$ , es directamente proporcional a  $T^4$ . Esta es la ley de Stefan-Boltzmann, la cual puede escribirse como

$$P = \sigma T^4$$

donde

$P$  = potencia emitada por unidad de área

$\sigma$  = constante universal de Stefan-Boltzmann igual

$$\text{a } 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

## 2.2 Radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra.

Del total de radiación solar extraterrestre, sólo un porcentaje llega a la superficie de la Tierra. Esta pérdida de energía ocurre aún en condiciones del cielo despejado. La disminución de la radiación solar al atravesar la atmósfera terrestre es debida a la absorción de radiación por los constituyentes atmosféricos.

La atmósfera terrestre está constituida por diferentes ca-

capas y gases, entre los principales gases tenemos: nitrógeno, oxígeno, argón, bióxido de carbono, y restos de otros gases, además de ozono y vapor de agua, que se encuentran concentrados en las cercanías del suelo.

El ozono absorbe la radiación ultravioleta con longitud de onda menor de  $0.4\mu\text{m}$ . El vapor de agua y el bióxido de carbono absorben la energía con longitudes de onda mayores de  $2.3\mu\text{m}$ , en la banda del infrarrojo. Por tanto, de la radiación solar extraterrestre, comprendida entre las longitudes de onda de  $0.2$  a  $2.6\mu\text{m}$ , sólo llega a la superficie de la Tierra la radiación con longitudes de onda de  $0.29$  a  $2.3\mu\text{m}$ .

La figura 2.1 muestra el espectro de la radiación solar de un cuerpo negro, la radiación solar extraterrestre y la radiación solar a nivel del mar.

La radiación solar está constituida por dos componentes:

1. Radiación directa: Esta radiación no experimenta cambios en su dirección al atravesar la atmósfera terrestre.
2. Radiación difusa: Es aquella que sufre dispersión y por tanto no tiene una dirección única.

La radiación total es la suma de las componentes directa y difusa. Otro aspecto importante es la transmitancia atmosférica que relaciona la cantidad de radiación que se transmite en la atmósfera; definida por la ecuación:

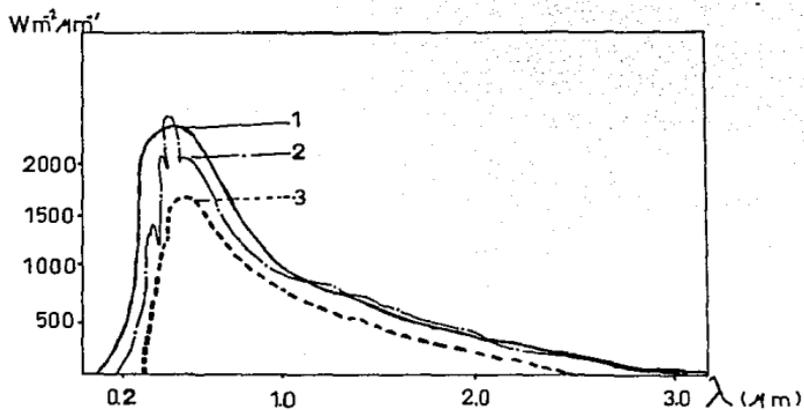


Fig 2.1 ESPECTRO DE LA RADIACION SOLAR

- 1 CUERPO NEGRO A 5762 K
- 2 RADIACION EXTRATERRESTRE
- 3 RADIACION A NIVEL DEL MAR

$$\bar{\tau}_{atm} = I_b / I_o \quad (2.1)$$

donde:  $I_b$  = Radiación solar directa terrestre.

$I_o$  = Radiación solar directa extraterrestre.

A condiciones de cielo despejado:

$$\bar{\tau}_{atm} = 0.5 (\exp (-0.65m) + \exp (-0.095m)) \quad (2.2)$$

donde:  $m$  = masa de aire.

La masa de aire se define como, la distancia que recorre la radiación solar a través de la atmósfera; se calcula por la ecuación:

$$m = \sec \theta_z \quad (2.3)$$

A nivel del mar:

$$m = (1.229 + (614 \sin \omega)^2)^{0.5} - 614 \omega \quad (2.4)$$

donde:  $\theta_z$  = ángulo cenital, es el ángulo formado por la posición del Sol con respecto al cenit.

$\omega$  = altura solar, es el ángulo que forma el Sol con respecto al horizonte, este ángulo es el complemento del ángulo cenital.

### 2.3 Captación Solar

La captación solar se realiza mediante colectores, los cuales deberán estar orientados continuamente hacia el Sol para captar la mayor cantidad de energía. Los colectores solares son fijos o con movimiento continuo (siguiendo la tra

yectoria del Sol), en consecuencia es requisito indispensable conocer la posición del Sol en el firmamento, para orientar adecuadamente los captadores solares.

### 2.3.1 Posición del Sol

Si consideramos a la Tierra fija y al Sol moviéndose alrededor de ésta, el Sol tendrá únicamente dos grados de libertad en su movimiento, por tanto su posición queda determinada mediante dos variables angulares: altura solar ( $\omega$ ) y el acimut solar ( $\gamma$ ).

La altura solar es el ángulo complementario del cenit solar. El acimut solar es la desviación que tienen los rayos solares con respecto al sur verdadero.

Estas dos variables dependen de tres parámetros:

1. Latitud del lugar ( $\phi$ ), que es el ángulo formado entre el ecuador y el sitio de interés, siendo positivo hacia el norte y negativo hacia el sur.
2. Declinación ( $\delta$ ), es el alejamiento que experimenta el Sol hacia el norte ó hacia el sur, y se calcula con la ecuación:

$$\delta = 23.45 \text{ sen } (360 (284 + n) / 365) \quad (2.5)$$

donde: n = día del año

3. Angulo horario ( $w$ ), es igual a cero al mediodía solar y, adquiere un valor de  $15^\circ$  de longitud por cada hora, siendo por convención, positivo por las mañanas y negativo por la tarde.

La altura solar se cálcula mediante la ecuación:

$$\text{sen } \omega = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \phi \text{sen } \delta \quad (2.6)$$

y el acimut solar por:

$$\text{sen } \gamma = \cos \delta (\text{sen } \omega / \cos \omega) \quad (2.7)$$

Otro factor importante es conocer el máximo de horas de insolación diaria, que se obtiene usando la expresión:

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.8)$$

donde  $\omega_s$  es el ángulo horario cálculado a la puesta del Sol.

$$\text{Si } T_d = 2/15 \omega_s \quad (2.9)$$

entonces:

$$T_d = 2/15 \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.10)$$

### 2.3.2 Radiación solar sobre una superficie

Otro ángulo importante que se debe calcular al diseñar un - captador solar es el ángulo de incidencia de la radiación.

Considerando una superficie inclinada que forma un ángulo S con respecto al horizonte, el ángulo de incidencia queda de terminado por:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen } \delta \text{sen } \phi \cos S - \text{sen } \delta \cos \phi \text{sen } S \cos \gamma_s + \\ & \cos \delta \cos \phi \cos S \cos \omega + \cos \delta \text{sen } \phi \text{sen } S \cos \gamma_s \\ & \cos \omega + \cos \delta \text{sen } S \gamma_s \text{sen } \omega \end{aligned} \quad (2.11)$$

De esta expresión se deducen las relaciones para tres casos importantes:

1. Radiación sobre una superficie horizontal.

en este caso  $S = 0$  ;  $\theta = \theta_z$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \sigma + \cos \delta \cos \sigma \cos \omega \quad (2.12)$$

2. Radiación en una superficie inclinada hacia el sur. El ángulo de incidencia es idéntico al ángulo acimutal, si la latitud del lugar es  $(\phi-S)$ .

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\phi-S) + \cos \delta \cos(\phi-S) \cos \omega \quad (2.13)$$

3. Radiación en una superficie vertical orientada al sur.

En este caso  $S = 90^\circ$  y  $\epsilon_z = 0$

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \phi + \cos \delta \sin \phi \cos \omega \quad (2.14)$$

## 2.4 Tipos de colectores

Se tiene una diversidad de formas de colectores solares, sin embargo el uso de un tipo específico de colector estará en función de la temperatura que se desea obtener, es decir para que será utilizado el colector. En términos generales los captadores solares se pueden clasificar como:

1. Colectores planos
2. Colectores concentradores

### 2.4.1 Colectores planos

Los colectores planos tienen múltiples aplicaciones en distintos procesos de conversión de energía solar, aún cuando

están limitados a temperaturas de operación inferiores a - 100 °C.

Este tipo de colectores son fijos, tienen ciertas ventajas sobre los colectores concentradores, trabajan con las componentes directa y difusa de radiación, fáciles de operar e instalar, su principal desventaja radica en su baja temperatura de operación.

En la figura 2.2 se muestra un diagrama de un colector plano con sus partes más importantes. Como se observa la energía solar atraviesa una o más cubiertas transparentes (comunmente de vidrio) hasta llegar a la placa absorbadora, el calor es transferido por conducción hacia los tubos, llegando al fluido de trabajo por convección. El material aislante ayuda a disminuir la pérdida de calor por conducción de la placa de absorción hacia los alrededores. Todo el sistema se encuentra adentro de una caja que lo protege, esta puede ser de metal, plástico u otro material.

Los paneles solares para la transformación de la energía solar en energía eléctrica son colectores planos, pero su funcionamiento es distinto.

#### 2.4.2 Celdas solares

Estos equipos transforman la energía solar en energía eléctrica al usar materiales semiconductores. Este método tiene limitaciones, entre las cuales es importante señalar el he-

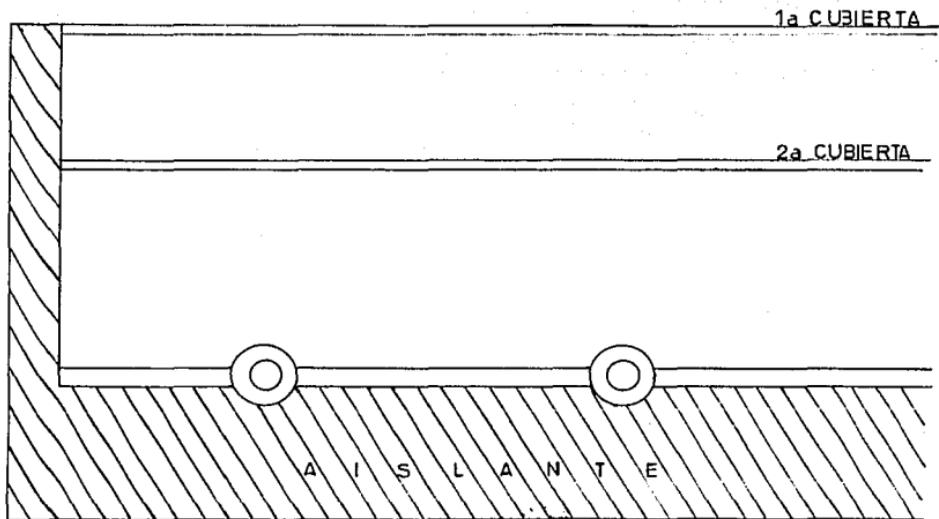


FIG 2.2 CAPTADOR SOLAR PLANO

cho de que cerca de la mitad de la radiación solar se produce en el infrarrojo largo, sin energía suficiente para producir reacciones fotoquímicas y fotovoltaicas.

Las células fotovoltaicas o células de capa-barrera se construyen con cristales de silicio con impurezas de arsénico y boro, esto es para tener electrones libres que actúan transportando energía (en el caso del arsénico) y para dejar un "hueco" positivo en los átomos de silicio. Sin embargo no siempre se produce corriente eléctrica en el semiconductor, porque el traslado simultáneo de un electrón por el hueco positivo no es suficiente y se hace necesario generar una diferencia de potencial en los extremos para que se produzca electricidad.

Las células fotovoltaicas están compuestas de una unión P-N (positivo-negativo) en un semiconductor entre una capa positiva que contiene cargas móviles positivas y una capa negativa que contiene electrones móviles, cuando el cristal recibe luz de suficiente energía, los electrones se liberan y fluyen hacia el electrodo, y a través de un conductor a otro electrodo donde se combinan con los huecos positivos. La capa barrera en la unión P - N impide que los electrones y los huecos se combinen instantáneamente y obliga a los electrones a recorrer el conductor, lo que produce energía eléctrica. El potencial eléctrico necesario para generar electricidad se produce cuando los electrones y los huecos se concentran en los electrodos.

Generada la electricidad, esta potencia de corriente directa puede seguir dos caminos: por un lado puede pasar directamente a una batería de almacenamiento, que va a permitir que el sistema siga funcionando de noche; por el otro pasa a una - unidad que convierte la corriente directa en alterna para su uso. En la figura 2.3 se muestra un esquema del equipo.

#### 2.4 Concentradores solares

En este tipo de equipos se obtiene alta densidad de energía sobre un absorbedor, con lo cual se alcanzan altas temperaturas normalmente en el intervalo de 500 a 1500 °K, aún cuando se han logrado temperaturas de hasta 3600 °K.

Los concentradores solares están constituidos por dos sistemas:

1. Sistema óptico: Es la superficie de un espejo, construida de un material reflejante, donde se capta la energía y de ahí se dirige hacia una pequeña área.
2. Sistema absorbedor: Es el sitio donde se concentra la radiación.

En el sistema absorbedor la densidad de energía es del orden de 1.5 a varios miles de veces la radiación que llega al sistema óptico.

Los colectores concentradores operan únicamente con la componente directa de radiación solar. Su forma geométrica es cilíndrico-parabólica o parabólica, se les puede clasificar

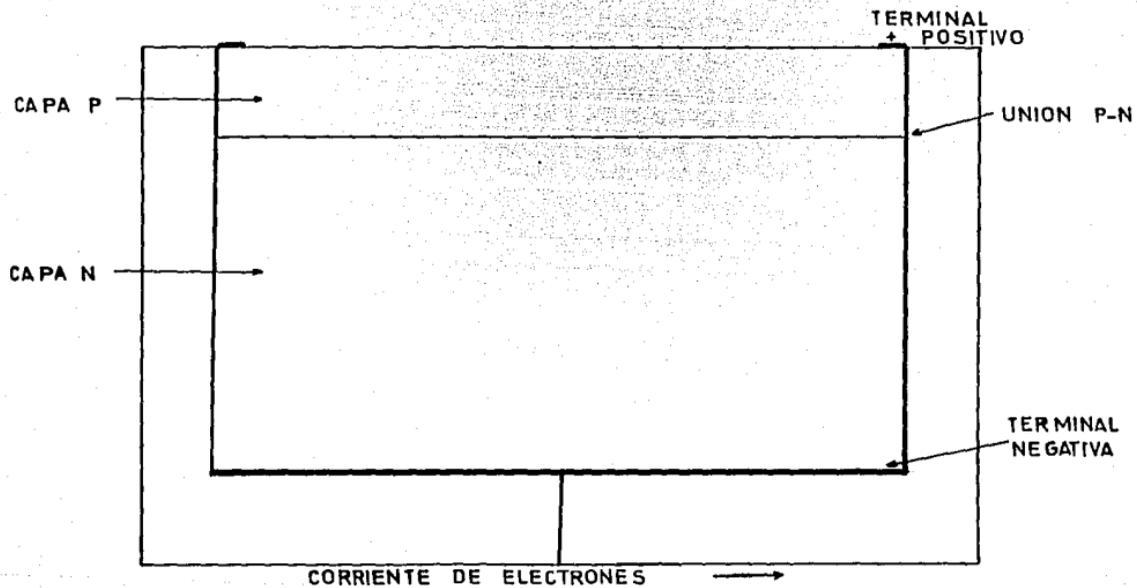


FIG 2.3 DISPOSICION DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA

en dos tipos.

1. Concentradores fijos o estacionarios
2. Concentradores con seguimiento continuo del Sol.

#### 2.4.3.1 Concentradores Estacionarios

Los concentradores menos complejos son los que no requieren seguimiento continuo del Sol; estos tienen un ángulo de aceptancia muy grande, concentración baja y diseño con base en alguna curva sencilla; su orientación debe ser en dirección este-oeste a fin de obtener mejor aprovechamiento de los ángulos de aceptancia grandes.

Los concentradores estacionarios de mayor concentración son los llamados parabólicos compuestos (CPC), desarrollados por Welford y Winston. Están formados por dos segmentos parabólicos simétricamente colocados alrededor de un eje; el foco de cada parábola se localiza en el extremo de la superficie absorbadora coincidente con la parábola opuesta. En la figura 2.4 se muestra este tipo de concentrador.

Otro tipo sencillo de concentradores que se pueden construir con dos espejos en forma de V. Con este sistema es factible obtener concentraciones hasta de tres. Este tipo de concentradores se muestra en la figura 2.5.

#### 2.4.3.2 Concentradores con seguimiento continuo.

Cuando se necesitan concentraciones mayores de 10 por período diarios de 6 h. o más a lo largo de todo el año, se re-

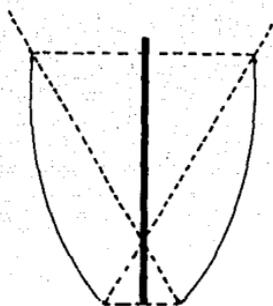


FIG 2.4 CONCENTRADOR PARABOLICO COMPUESTO

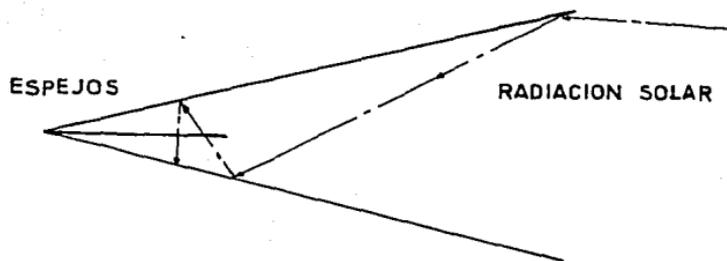


FIG 2.5 SISTEMA EN V

quieren sistemas con seguimiento al Sol. Existen dos tipos diferentes de concentradores: los de curvatura simple o concentradores cilíndricos, ya sea con curvatura circular o parabólica, y los de curvatura compuesta, o tipo platillo como los paraboloides de revolución y los casquetes semiesféricos. En estos sistemas, el seguimiento del Sol se hace generalmente a través de sensores fotosensitivos que envían una señal de naturaleza eléctrica a un sistema electrónico y un servomecanismo.

Concentradores con curvatura sencilla. Uno de los sistemas que más se ha desarrollado en los últimos años es el concentrador cilíndrico-parabólico. En general, en los sistemas que están operando actualmente, el absorbedor puede o no girar simultáneamente con el concentrador; el objetivo principal es que exista un buen enfoque sobre el absorbedor que se encuentra a lo largo del foco de la parábola. Las concentraciones en dichos sistemas están en el intervalo de 15 a 50, y las temperaturas de trabajo alcanzables entre 473 y 623 °K.

Estos sistemas pueden operar con orientación norte-sur, este-oeste o polar. Conforme su orientación, el movimiento angular necesario para seguir al Sol será más lento o más rápido, por ejemplo, en el caso de ser norte-sur, el movimiento es - alrededor de 15 °/h, en tanto que en este-oeste el movimiento alrededor del mediodía es mínimo. La selección de la - orientación dependerá de la cantidad de energía requerida a

lo largo del día y a lo largo del año. En la figura 2.6 se observa un concentrador cilíndrico-parabólico.

Concentradores con curvatura compuesta. Para concentraciones arriba de 50 es necesario utilizar sistemas de curvatura compuesta, como son los reflectores paraboloides de revolución o los casquetes semiesféricos. Idealmente, estos sistemas funcionan durante todo el día con una incidencia de la radiación normal a su apertura.

1. Paraboloides de revolución. Los espejos parabólicos son las únicas superficies que mantienen una distancia focal constante desde el vértice del propio espejo. El paraboloide de revolución es una superficie producida al girar una parábola alrededor de su eje óptico.

En este tipo de concentradores se pueden alcanzar concentraciones de 500 a 3600. Debido al tamaño finito del Sol y a imperfecciones en la construcción de espejos, el foco de este tipo de concentradores no es puntual. Las temperaturas que se han logrado alcanzar en estos sistemas van desde los 773 hasta los 2273 °K.

2. Sistema reflector esférico estacionario (SRTA). Este sistema consiste en un espejo a base de un casquete semiesférico con el cual se efectúa el enfoque sobre un absorbedor lineal de tamaño apreciable, colocado paralelo a la radiación incidente. Como el espejo es estacio

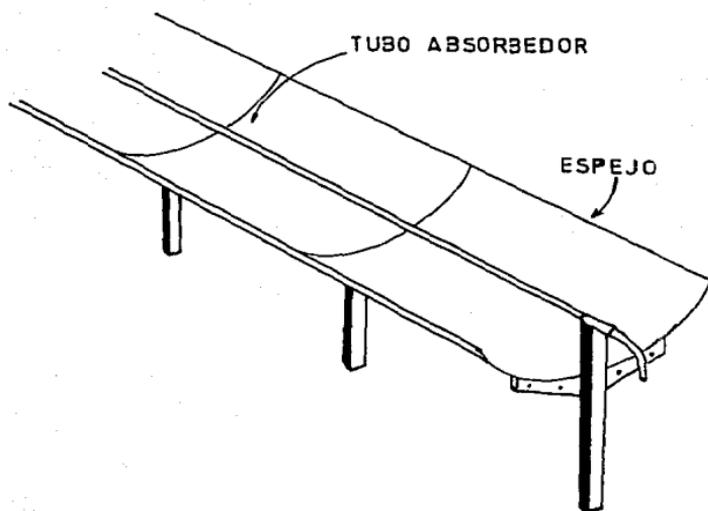


FIG 2.6 CAPTADOR CILINDRICO PARABOLICO

nario, en este tipo de concentradores, se pueden construir con relativa facilidad unidades grandes. Además, se reducen las pérdidas que ocurren al transportar la energía térmica, y los costos de instalación y bombeo del fluido de trabajo.

3. Sistema de torre central. Se desarrolla actualmente para generar altas potencias, del orden de MW. Consiste en un conjunto de helióstatos que reflejan la radiación solar directa hacia una torre central, con un absorbedor colocado en la parte superior de la torre.

En dichos sistemas se logran razones de concentración máximas de 3000 y temperaturas en el intervalo de 773 a 2273 °K. El arreglo del sistema de torre central evita instalar gran cantidad de tuberías para cubrir grandes distancias de transporte del fluido de trabajo, reduciendo así las pérdidas de calor. El mayor costo de este tipo de instalación se debe a la gran cantidad de helióstatos que siguen la trayectoria del Sol y a que el absorbedor debe ser capaz de recibir de 1 a 2 MW/m<sup>2</sup> de flujo de energía solar y transferir el calor con un mínimo de pérdidas.

### *2.5 Aplicaciones de los colectores solares*

La energía solar tiene amplias aplicaciones; a continuación se mencionan las más comunes y sencillas.

-Calentamiento de agua para uso doméstico. Para este proceso únicamente se requiere de un colector plano, con la orientación adecuada; se logran temperaturas de hasta 353 °K. El sistema tiene un flujo natural en que el agua fría se introduce por la parte inferior y sale caliente por la parte superior, debido a su menor densidad.

-Calefacción doméstica. Los sistemas de calefacción solar se clasifican en dos categorías principales:

1. Sistemas pasivos
2. Sistemas activos

Los sistemas de calefacción pasivos son aquellos que no tienen componentes mecánicos. Se trata de una modificación de la arquitectura de las viviendas y de los materiales de construcción para conseguir un mayor aprovechamiento de la energía solar que incide sobre el edificio.

En los sistemas clasificados como activos, la energía solar es captada mediante colectores planos, donde se calienta aire o agua. Después, el fluido caliente, procedente del colector se deja correr por los radiadores de las habitaciones.

- Obtención de agua pura. (Destiladores solares). Se denominan destiladores solares a los aparatos que empleando energía solar, transforman el agua contaminada o salobre en agua pura. Su construcción se basa, exclusivamente, en el efecto invernadero y no exige otro tipo de tecnología.

El agua contaminada se coloca dentro de un recipiente, en una habitación que tiene un techo transparente, a lo largo del cual resbala el agua pura que ha condensado y cae a un canal colector.

- Secado de alimentos y materiales diversos. El secado por radiación solar se puede producir directamente exponiendo el material sólido a la radiación solar, con o sin cubierta transparente. También se puede realizar indirectamente por calentamiento a través de una corriente de aire de baja humedad relativa, la cual se calienta en los colectores
- Cocinas solares. Una de las aplicaciones más simples de la energía solar consiste en hervir o calentar comida con la radiación solar que es concentrada por medio de un colector concentrador solar. En un concentrador solar parabólico, provisto de un recipiente, se concentra la radiación, sobre la base horizontal del recipiente calentando a alta temperatura agua o aceite y cocinando los alimentos.
- Motores solares. Su funcionamiento básico es transformar la energía radiante en energía mecánica. Cuenta con un espejo concentrador, y un sistema absorbedor que actúa como caldera generadora de vapor. La mayor parte de los motores solares se fabrican de manera que puedan actuar con energía solar o cualquier otro tipo de energía.

Los motores solares son de baja potencia y baja eficiencia ya que las pérdidas de calor son grandes.

En los dibujos siguientes se muestran algunos de los equipos solares descritos.

Un aspecto importante es que si se requiere obtener temperaturas mayores a  $373^{\circ}\text{K}$ , es necesario concentrar la radiación solar, lo cual se logra por medio de los equipos denominados concentradores solares, descritos anteriormente, los que funcionan por medio de un espejo, que es el sistema óptico, en el cual inciden los rayos solares y son reflejados hacia el absorbedor. Este espejo es la parte más importante de los sistemas solares porque de su adecuado funcionamiento depende en gran medida la eficiencia del equipo. En el siguiente capítulo se analizan los constituyentes de los espejos y los tipos usados en la energía solar.

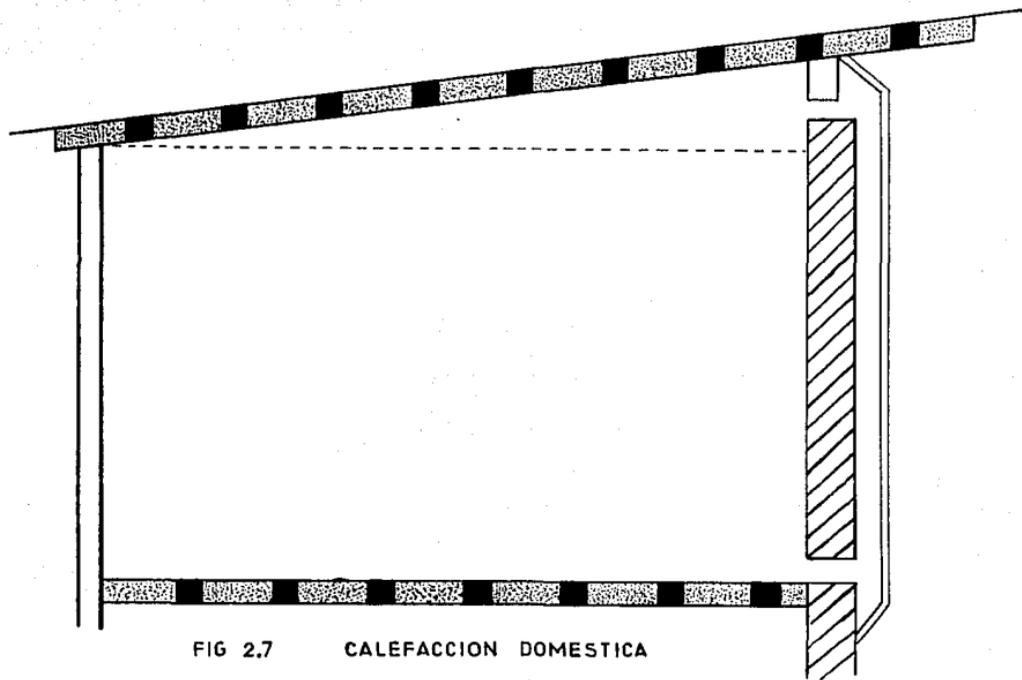


FIG 2.7

CALEFACCION DOMESTICA

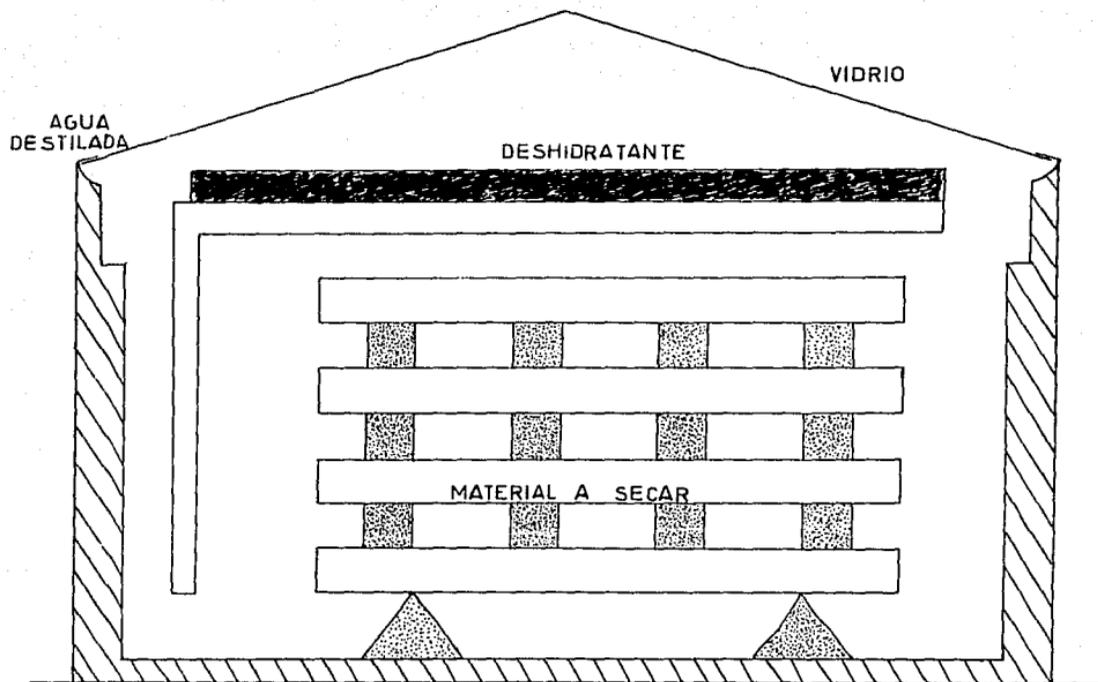


FIG 2.8 SECADOR SOLAR

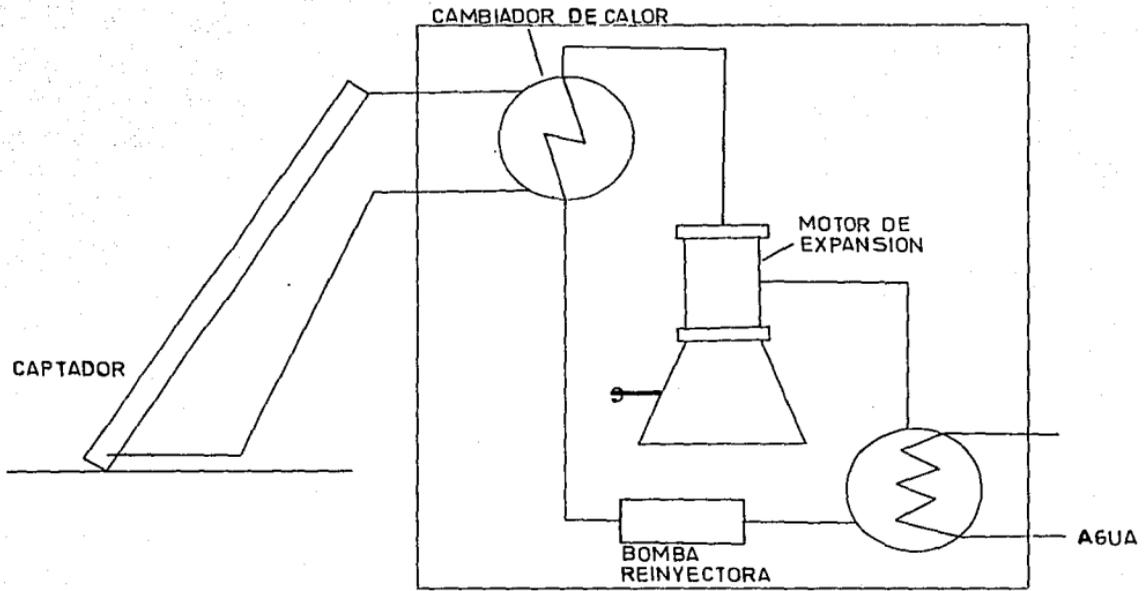


FIG 2.9 MOTOR SOLAR

C A P I T U L O   I I I

-----

ESPEJOS USADOS EN ENERGIA SOLAR

### 3. ESPEJOS USADOS EN ENERGIA SOLAR

Para la captación de la radiación solar se usan colectores planos y colectores curvos, denominados concentradores. Con los colectores planos se obtienen temperaturas de hasta 373 °K porque estos sistemas no concentran la radiación solar - sino solamente la transfieren hacia el fluido por convección, conducción y radiación. Los colectores-concentradores trabajan por medio de lentes o un sistema de espejos, con los que alcanzan altas temperaturas.

La obtención de altas temperaturas y altas densidades de concentración en los sistemas solares depende del uso de grandes áreas con alta reflejancia, esto se logra por medio de espejos.

Las principales características del espejo concentrador son:

1. Captar y reflejar la mayor cantidad de radiación solar
2. Concentrar la radiación que incide sobre él, en un área lo más pequeña posible.

Para satisfacer estos objetivos es necesario que el espejo - tenga una alta reflejancia y, por tanto una mayor eficiencia. La reflejancia del espejo es la relación que existe entre la radiación solar reflejada y la radiación solar incidente.

$$\gamma = \text{Radiación reflejada} / \text{Radiación incidente.}$$

Un espejo ideal es aquel que tiene reflejancia muy cercana a la unidad. Existen dos tipos de espejos los que se clasifican en:

1. Espejos de primera superficie.
2. Espejos de segunda superficie.

La principal diferencia en los dos tipos de espejos es que - en unos los rayos solares inciden directamente sobre una película reflectora y en los otros deben atravesar un sustrato para incidir el material reflector.

### 3.1 Tipos de espejos

#### 3.1.1 Espejos de primera superficie

Los espejos de primera superficie se caracterizan por tener al material reflector sobre un sustrato, además la radiación solar sólo atraviesa una delgada película protectora transpa

rente para incidir sobre el material reflector, reflejándose hacia el sistema absorbedor, atravesando nuevamente la película protectora.

En la figura 3.1 se muestra un esquema de un espejo de primera superficie con sus constituyentes principales. Este tipo de espejos tiene la ventaja de que la radiación solar no atraviesa el sustrato, por lo que no hay absorción de radiación de sus componentes. Estos espejos tienen una mayor reflectancia.

### 3.1.2 Espejos de segunda superficie

En los espejos de segunda superficie, el material reflector queda por abajo del sustrato, en este caso denominado superestrato, y los rayos solares deben atravesar todo el superestrato para incidir en el material reflector. Esta es la principal diferencia entre los dos tipos de espejos.

Para minimizar el ataque de los agentes atmosféricos, la película reflectora es protegida por medio de cuatro capas de diferentes materiales: cobre, pintura, polímero y adhesivo. Otra capa de adhesivo puede ser aplicada entre las capas de pintura y polímero para aumentar la protección y unión del sistema. En la figura 3.2 se muestra el esquema de un espejo de segunda superficie con todas sus partes constitutivas.

### 3.2 Materiales usados en espejos para uso en energía solar

Las partes constitutivas de un espejo para la captación con

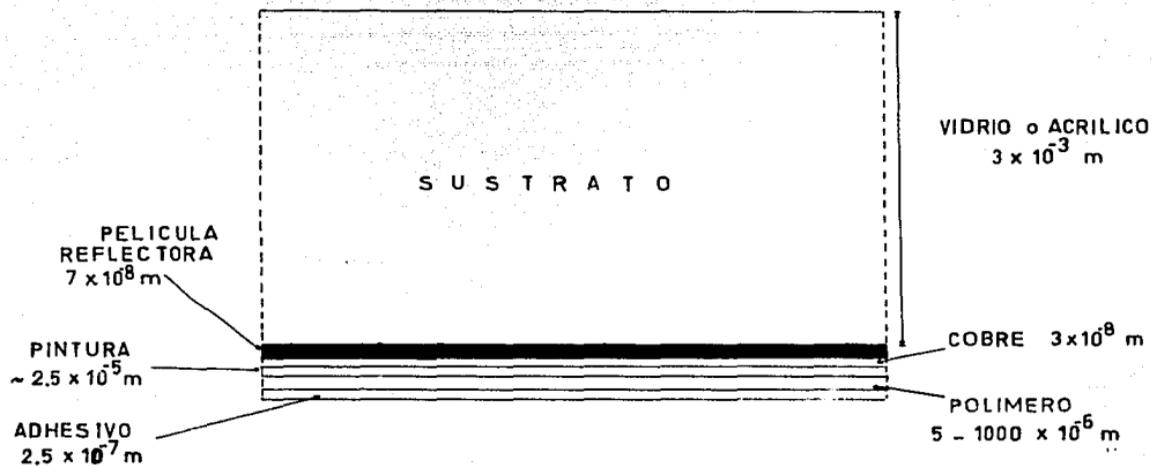


FIG 3.2 ESPEJO DE SEGUNDA SUPERFICIE

centración de la radiación solar son:

1. Película reflectora
2. Sustrato
3. Películas protectoras.

De estos tres constituyentes, la más importante es la película reflectora, la cual debe reflejar la mayor cantidad de radiación solar que incida en ella, para lograr altas temperaturas y la disponibilidad termodinámica sea satisfactoria.

### 3.2.1 Película reflectora

Los elementos químicos con alta reflejancia, y los más comúnmente usados en energía solar son plata y aluminio; existen otros elementos que pueden ser utilizados como superficies reflectoras, por ejemplo el rodio; otra forma de obtener una superficie reflectora es puliendo un metal, manual o mecánicamente, hasta tener un terminado de espejo, por ejemplo cobre o acero inoxidable, en este caso no existe el sustrato, porque el propio metal es superficie reflectora y sustrato. Sin embargo normalmente se utiliza plata y aluminio porque tienen una mayor reflejancia, el proceso de depositación sobre el sustrato se realiza con mayor facilidad, el costo del material y su proceso de manufactura son bajos.

Las películas de aluminio o plata que se depositan sobre el sustrato tienen un espesor aproximado de  $1 \times 10^{-8}$  m.

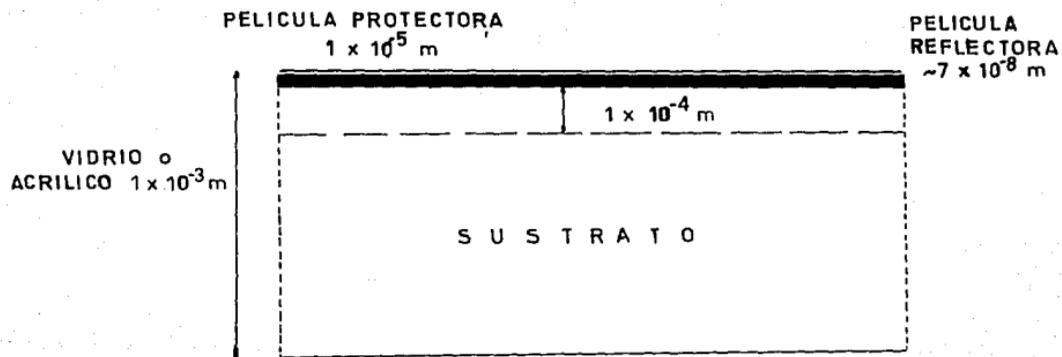


FIG 3.1 ESPEJO DE PRIMERA SUPERFICIE

### 3.2.2 Sustrato

El sustrato es el material sobre el cual se deposita la película reflectora. Este material es normalmente vidrio o acrílico, delgado en espejos de primera superficie y grueso para los de segunda superficie. Una característica importante del sustrato es que debe ser claro para tener una alta transmitancia y evitar pérdidas de radiación solar por absorción, debe tener además una excelente tersura para que la radiación solar sea reflejada en el ángulo correcto.

El espesor del sustrato es del rango de:  $1 \times 10^{-4}$  a  $3 \times 10^{-3}$  m.

#### 3.2.2.1 Vidrio

El vidrio es de los materiales más usados en la elaboración de espejos. Existen varios procesos para la producción de vidrio. Para aplicaciones solares, es preferible el obtenido por el proceso de flotación, por la alta calidad del vidrio así obtenido. El vidrio "flotado" tiene una alta transmitancia, bajo contenido de hierro y se obtiene con espesores de  $1.5 \times 10^{-3}$  a  $12 \times 10^{-3}$  m., con superficie totalmente lisa.

El proceso consiste en la flotación de un silicato de cal - sosa sobre un baño de estaño fundido. Una consecuencia del proceso es que se obtienen dos caras distintas para el vidrio, una con retención de estaño y la otra relativamente libre de estaño; esta última es la preferida para la producción de espejos.

El vidrio usado en la captación de la radiación solar debe tener bajo contenido de iones  $Fe^{3+}$  y  $Fe^{2+}$ , porque estos iones absorben radiación solar. El  $Fe^{3+}$  absorbe en el ultravioleta y su efecto es despreciable para aplicaciones solares. Sin embargo el  $Fe^{2+}$  tiene una ancha banda de absorción, centrada en los 1000 nm., una región donde es considerable la radiación solar.

El uso de vidrio como sustrato tiene muchas ventajas; es químicamente estable, lo suficientemente duro para resistir la abrasión mecánica y alta transmitancia, pero para usar vidrio en los captadores-concentradores solares, el vidrio debe deformarse elásticamente hasta adquirir la forma geométrica requerida, esta deformación produce un esfuerzo de tensión en el vidrio, superior al permitido mecánicamente. El vidrio delgado (espesor menor a  $1.7 \times 10^{-3}$  m) tiene un esfuerzo de tensión menor al máximo permitido, pero es demasiado frágil y difícil de manipular.

#### 3.2.2.2 Plásticos

El otro material ampliamente usado como sustrato en aplicaciones solares son distintos tipos de plásticos, entre los más comunes son:

1. Acrílico
2. Resina poliéster reforzada con fibra de vidrio
3. Teflón

De todos ellos el más común para aplicaciones de energía solar, es el acrílico, delgado y grueso para espejos de primera y segunda superficie respectivamente.

Una ventaja del acrílico es que se puede deformar elásticamente para obtener la geometría requerida, sin embargo cambia de color al ser expuesto al medio ambiente y es permeable a los gases atmosféricos, lo que se acrecienta con el uso.

Entre los poliésteres el más representativo es el mylar, tiene la desventaja de que sus propiedades ópticas y mecánicas disminuyen considerablemente con el uso.

El teflón tiene una transmitancia solar semejante al vidrio y buena estabilidad a la radiación ultravioleta, es resistente a la humedad. Su principal desventaja es que retiene fuertemente las partículas de polvo, su costo es elevado y es difícil de trabajar.

### 3.2.3 Películas reflectoras

Los espejos se deben proteger del ataque de los agentes atmosféricos, mediante el depósito de películas protectoras sobre las reflectoras. La principal función de las películas protectoras es minimizar el efecto de los fenómenos de intemperización, así como, disminuir los daños a la película reflectora por abrasión mecánica producida por la limpieza. Estas películas aumentan considerablemente la vida útil de los espejos sin perder sus propiedades ópticas.

Los compuestos normalmente usados para espejos de primera su perficie, con película reflectora de aluminio, son  $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgF}_2$ , vidrio y plásticos transparentes. Estos compuestos son transparentes y con despreciable absortancia en el es pectro visible. Cada una de estas películas se deposita con diferentes condiciones de operación, mediante procesos de - evaporación térmica, anodizado u otros. Se requiere de un - control del depositado porque debe hacerse en forma uniforme y controlando el espesor de la película.

Para espejos de primera superficie con película reflectora - de plata, la película protectora es de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y sobre esta - una de  $\text{SiO}_2$ . Ambas películas son transparentes.

Los espejos de segunda superficie se protegen con una serie de capas de distintos materiales: cobre, pintura, polímero y adhesivo.

**Cobre:** Se deposita por dos métodos, el galvánico y el químico. En ambos procesos se requiere de un calentamiento posterior del espejo ( $43-63\text{ }^\circ\text{C}$ ) con la finalidad de curar las capas metálicas y de secar. El calentamiento se realiza con rayos infrarrojos, dirigiéndolos hacia al lado del vidrio ó del acrílico.

**Pintura:** Debe ser de secado rápido. La capa de pintura también debe ser curada a una temperatura de  $120^\circ\text{C}$ . Cuando se usa sustratos de acrílico, el curado se realiza a  $50^\circ\text{C}$ , para evitar deformaciones porque el acrílico no resiste altas temperaturas.

Estas dos capas no son suficientes para una protección adecuada de los espejos usados en energía solar, por lo cual es necesario cubrir con otros materiales, que son, polímero y -

adhesivo ó adhesivo-polímero-adhesivo; esta última protege más eficientemente.

**Polímero:** Se vende en diferentes presentaciones y dependiendo de esta se deposita de tres maneras distintas. El primer proceso se denomina de vaciado, la segunda forma es de rocío y la última es de fijación de la capa plástica a la superficie. En la tabla 3.1 se muestran los principales polímeros usados y su respectivo nombre comercial. (4)

**Adhesivo:** Para unir al soporte del concentrador, es necesario una capa de adhesivo después del polímero y en algunos casos también después de la capa de pintura. Existen distintos tipos de adhesivos los cuales se comercializan en varias formas físicas: polvo, películas, dispersiones, sólidos para fundir, pastas, líquidos y en dos partes componentes.

En la tabla 3.2 se enlistan diferentes adhesivos en su presentación comercial. (4)

Los espesores de las distintas capas protectoras son:

Cobre:	$3 \times 10^{-8}$ m
Pintura:	$2.5 \times 10^{-5}$ m
Polímero:	$5 - 100 \times 10^{-6}$ m
Adhesivo:	$3 \times 10^{-7}$ m

### 3.3 Obtención de espejos

Para la obtención de los espejos se utilizan principalmente tres procesos de elaboración que son:

1. Proceso húmedo ó depositado químico
2. Evaporación térmica
3. Erosión catódica

Tabla 3.1 Principales polímeros usados en el recubrimiento de espejos.

<u>Nombre genérico</u>	<u>Abreviación</u>	<u>Nombre comercial</u>	<u>Fabricante</u>
politetrafluoretileno	T	Teflón	Du Pont
policlorotrifluoretileno	CT	Aclar ó Kel F	Quim.Allied ó Comp. 3M
fluoruro de polivinilo	FV	Tedlar	Du Pont
fluoruro de polivinilideno	FVA	Kynar	Pennwalt
copolímero de tetrafluoretileno y hexafluorpropileno	FEP	Teflón FEP	Du Pont
perfluoralcoxi-sustituido con politetrafluoretileno	PFA	Teflón PFA	Du Pont
copolímero de etileno y tetrafluoretileno	E-TFE	Tefzel	Du pont
copolímero de etileno y clorotrifluoretileno	E-CTFE	Halar	Quim. Allied
polimetilmetacrilato	PMMA	Lucite ó Plexiglas	Du Pont ó Rohm & Hass
acetato de etilenvinilo	AEV	Elvax	Du Pont
copolímero de étileno y propileno	E-P	Vistalon	Química Exxon
poliisobutileno	IB	Vistanex	Química Exxon
polietilentereftalato	ETF	Llumar	ICI
cloruro de polivinilideno	CVD	Saran	Química Dow
copolímero de estireno y butadieno	E-B	Kraton	Química Shell
poliester	E	Mylar	Du Pont
policarbonatos			
resinas de silicón			
resinas epoxi			

Tabla 3.2. Formas disponibles de adhesivos

<u>Adhesivo</u>	<u>Forma disponible*</u>
<u>Termofijo</u>	
Caseina	1, 2
epoxi	2, 3, 5
melamina formaldehído	1, 2
fenol formaldehído	1, 2
poliester	1, 2
poliuretano	1, 2, 3, 4
resorcínol formaldehído	1, 2, 3, 4
silicón	1, 4, 5
urea formaldehído	1, 2, 3
<u>Termoplástico</u>	
acetato de celulosa	1, 2, 4, 6
butirato de celulosa	1, 2, 4
carboximetil celulosa	1, 4
etil celulosa	1, 4, 6
hidroxietyl celulosa	1, 4
metil celulosa	1, 4
nitrato de celulosa	1, 4
poliamida	2, 6
polietileno	6
polimetilmetacrilato	4
poliestireno	1, 6
acetato de polivinilo	3, 4, 7
alcohol polivinílico	1, 3, 4
cloruro de polivinilo	1, 4, 5

- \* 1 = polvo  
 2 = película  
 3 = dispersión  
 4 = líquido  
 5 = pasta  
 6 = sólido para fundir  
 7 = permanentemente pegajoso

### 3.3.1 *Proceso húmedo o químico*

Esta técnica es utilizada para la obtención de espejos de plata y operativamente es intermitente. Para la obtención del espejo se usan dos soluciones reactivas:

Solución A: Es un complejo de plata-amoniaco, de un pH promedio de 8.8.

Solución B: Es una solución de azúcar básica (azúcar invertida ó glucosa) que actúa como reductora del ión  $Ag^{+}$ ; también se usan aldehídos de cadena corta como reductores, con un pH promedio de 9.7.

Ambas soluciones son rociadas sobre la superficie del vidrio reaccionando en la superficie para formar una capa metálica de plata.

### 3.3.2 *Evaporación térmica*

Por el proceso de evaporación térmica se obtienen espejos de alta calidad, aplicables en los equipos solares. El proceso consiste en la evaporación de un metal, depositándose los vapores sobre un blanco (sustrato), el proceso se realiza en una cámara de alto vacío.

El material a evaporar se coloca en crisoles, constituido por filamentos de tungsteno, por los cuales se hace pasar una alta densidad de corriente. La intensidad de la corriente es variable en el crisol, esta depende del material a evaporar y de la rapidez requerida en la evaporación. El proce

so se lleva a cabo dentro de una cámara especial, evacuada a una presión de vacío aproximada a  $5 \times 10^{-5}$  Torr.

Bajo estas condiciones de operación, el vapor del material reflector es altamente móvil, depositándose sobre el sustrato en forma de una película uniforme. Un requisito indispensable para obtener películas de alta calidad es que el material a evaporar sea de alta pureza.

Esta técnica tiene mayores ventajas que el proceso químico como son: mayor adherencia de la película reflectora en el sustrato, mayor control sobre la rapidez de evaporación del material reflector, lográndose los espesores requeridos, y un depositado uniforme.

El proceso de evaporación térmica también es usado para obtener las películas protectoras.

### 3.3.3 Erosión Catódica

El proceso de erosión catódica consiste en la dispersión de un material por la acción de partículas con alta energía que chocan sobre él. Las partículas energéticas (electrones) se generan debido a la presencia de una diferencia de potencial entre un ánodo y un cátodo.

El cátodo es el material que se va a erosionar y del ánodo se desprenden los electrones a una alta velocidad, normalmente se usa cobre como ánodo. Los electrones que se desprenden del ánodo, son dirigidos hacia el cátodo chocando a una

gran velocidad sobre este y desalojando partículas del material, debido a un cambio de momentum, recolectándose en el sustrato.

Este proceso nos permite obtener películas con la misma composición y estructura del material erosionado. Los procesos de erosión se clasifican en dos tipos:

1. Proceso de descarga de alto voltaje
2. Proceso de ión dirigido

En el primer proceso se generan las partículas energéticas debido a una diferencia de potencial entre los electrodos. En el proceso de ión dirigido, los electrones se generan por medio de un cañón de electrones o un acelerador de partículas.

### 3.4 *Propiedades de los espejos*

Las propiedades de los espejos son de suma importancia porque de estas depende, en gran parte, del buen funcionamiento de los sistemas solares. No obstante no todas las propiedades son de interés en esta investigación, centrándose en la propiedad óptica llamada reflejancia, sin embargo es necesario mencionar otras de esas propiedades, las cuales se deben analizar al desarrollar los diferentes sistemas que trabajan con radiación solar, además de las propiedades mecánicas de los materiales.

### 3.4.1 Propiedades ópticas

Las propiedades ópticas más importantes para los espejos solares son:

1. **Reflejancia.** Característica de los cuerpos brillantes de reflejar la luz que incide sobre él.  
Se define como la razón de radiación reflejada de un material a la radiación incidente sobre el mismo.
2. **Transmitancia.** Que es la razón de la energía radiante transmitida por un material dado a la energía solar incidente.
3. **Emitancia.** Se define como la razón de radiación emitida por la superficie de un cuerpo a la radiación emitida por un radiador perfecto a la misma temperatura.
4. **Absortancia.** Propiedad del material que se utiliza para absorber la radiación solar.

Todas las propiedades son funciones de la longitud de onda de la radiación incidente y del flujo de esta. Otras propiedades ópticas de los materiales que se deben considerar son: índice de refracción y el coeficiente de extinción, los que son función de la longitud de onda de la radiación. Cuando se usa vidrio en la cubierta de los colectores solares, se puede considerar a todas las propiedades independientes de la longitud de onda de la radiación.

Cada una de estas propiedades es importante, no obstante su análisis se debe realizar dependiendo del equipo solar a utilizar y en cada parte constitutiva del equipo por separado, porque no afectan de la misma manera a los constituyentes del sistema solar. Por ejemplo para sistemas que trabajan con espejos de primera superficie, sólo importa la propiedad llamada reflejancia, porque aún cuando se presentan los fenómenos de transmitancia y emitancia, estos son mínimos y se pueden despreciar. Para concentradores de segunda superficie, además de alta reflejancia se requiere de máxima transmitancia.

La emitancia se presenta en todas partes del equipo, y no se puede evitar porque siempre que exista un gradiente de temperatura entre el equipo y los alrededores existirá un flujo de energía, del cuerpo de mayor temperatura hacia el de menor temperatura, es decir se presenta la emitancia.

### 3.5 Métodos de determinación de las propiedades

Para calcular las propiedades ópticas de los espejos se puede recurrir a:

1. Medición de las propiedades mediante equipos especiales de análisis.
2. Tablas, donde se reportan las diferentes propiedades a diversas temperaturas.
3. Cálculo de las propiedades por medio de correlaciones matemáticas.

En el mercado existen diversos equipos que pueden ser usados en la determinación de las propiedades ópticas, por ejemplo los espectrofotómetros, que son normalmente usados para la determinación de transmitancia. Sin embargo, puede también ser usado para medir reflejancias, cambiando algunos accesorios y calibrandolo mediante un espejo patrón.

Existen en la literatura tablas en donde se muestran datos de las diferentes propiedades ópticas, como se muestra en - la tabla 3.3.

Las propiedades ópticas se cáculan por medio de relaciones desarrolladas por diferentes investigadores.

SUPERFICIE	REFLEJANCIA
PLATA ELECTROLAMINADA	0.96
ALUMINIO DE ALTA PUREZA	0.91
REFLECTOR OPTICO EROSIONADO CON AL	0.89
VIDRIO BLANCO PLATEADO	0.88
PELICULA DE AL - SiO	0.87
ALUMINIO DELGADO DE 95% DE PUREZA	0.86
ACRILICO ALUMINIZADO 3M, NUEVO	0.86
ACRILICO ALUMINIZADO 3M	0.85
ALUMINIO COMERCIAL	0.85
MYLAR ALUMINIZADO TIPO C	0.76

Tabla 3.3 Reflejancias de diferentes superficies

Para superficies pulidas *Fresnel* ha derivado expresiones para determinar la reflejancia de la radiación que pasa de un medio uno, con un índice de refracción  $n_1$ , a un medio dos, con un índice de refracción  $n_2$ .

$$r_{\perp} = \text{sen}^2 (\theta_2 - \theta_1) / (\text{sen}^2 (\theta_2 + \theta_1)) \quad (3.1)$$

$$r_{\parallel} = \tan^2 (\theta_2 - \theta_1) / (\tan^2 (\theta_2 + \theta_1)) \quad (3.2)$$

$$r = I_r/I_i = 0.5 (r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (3.3)$$

La ecuación 3.1 representa la componente perpendicular de la radiación. La ecuación 3.2 representa la componente paralela de la radiación. La ecuación 3.3 es, entonces la reflejancia de la radiación como el promedio de las dos componentes. Los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son relacionados por la *Ley de Snell* de los índices de refracción.

$$n_1 / n_2 = \text{sen } \theta_2 / \text{sen } \theta_1 \quad (3.4)$$

Si la radiación incide normalmente,  $\theta_1 = \theta_2 = 0$ , la reflejancia es calculada por:

$$r(0) = I_r/I_i = ( (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2) )^2 \quad (3.5)$$

Si un medio es aire, su índice de refracción es cercano a la unidad, entonces:

$$r(0) = I_r / I_i = ( (n-1) / (n+1) )^2 \quad (3.6)$$

En aplicaciones solares, la transmitancia de radiación es a través de una placa plana o de una película de material. La

transmitancia está dada por la siguiente expresión:

$$T_{\perp} = (1-r_{\perp})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\perp}^{2n} = (1-r_{\perp})^2 / (1-r_{\perp}^2) = (1-r_{\perp}) / (1+r_{\perp}) \quad (3.7)$$

La expresión anterior es para la componente perpendicular. Exactamente la misma expresión resulta cuando la componente paralela es considerada, y la transmitancia de radiación es el promedio de las transmitancias de las dos componentes.

$$T_{\text{r}} = 0.5 \left[ \left( (1-r_{\perp}) / (1+r_{\perp}) \right) + \left( (1-r_{\parallel}) / (1+r_{\parallel}) \right) \right] \quad (3.8)$$

Para sistemas con N cubiertas, todas del mismo material, la transmitancia se calcula por la expresión:

$$T_{\text{rN}} = 0.5 \left( (1-r_{\perp}) / (1+(2N-1)r_{\perp}) \right) + \left( (1-r_{\parallel}) / (1+(2N-1)r_{\parallel}) \right). \quad (3.9)$$

La absorción de radiación de una cubierta transparente se describe por la *Ley de Bouguer*, que se basa en la suposición que la radiación absorbida es proporcional a la intensidad de radiación y a la distancia que recorre la radiación a través de la cubierta.

$$dI = -I k dx \quad (3.10)$$

donde k es la constante de proporcionalidad, llamada coeficiente de extinción, y se supone que es constante en el espectro de radiación solar. Integrando la ecuación 3.10 de  $I_0$  a  $I_t$  y de 0 a  $L / \cos \theta_2$ .

$$t_a = I_t / I_0 = \text{EXP} - (kL / \cos \theta_2) \quad (3.11)$$

Para vidrio, el valor de  $k$  varía de  $4 \text{ m}^{-1}$ , para vidrio blanco agua, a  $32 \text{ m}^{-1}$  para vidrio opaco.

La absorción se calcula con la siguiente ecuación:

$$\psi = 0.5 \left[ (1 - \tau_a) \left( (1 - r_i) / (1 - r_i \tau_a) + (1 - r_v) / (1 - r_v \tau_a) \right) \right] \quad (3.12)$$

C A P I T U L O I V

=====

ESPEJOS DESARROLLADOS EN EL INSTITUTO DE INGENIERIA

#### 4. ESPEJOS DESARROLLADOS EN EL INSTITUTO DE INGENIERIA

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se están desarrollando espejos de primera superficie, para aplicaciones solares, el principal objetivo de esta investigación es el desarrollar espejos de alta reflejancia y que resistan las condiciones ambientales de la Ciudad de México.

En todos se utiliza vidrio como sustrato, el material reflector es principalmente aluminio, también se han obtenido espejos de plata, la película protectora se obtiene evaporando  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}$  en atmósfera de oxígeno y aluminio en atmósfera de oxígeno.

Para el desarrollo de los espejos se sigue el procedimiento siguiente:

1. Selección del sustrato
2. Limpieza del sustrato
3. Depositación del material reflector
4. Depositación del material protector

Cada uno de los puntos anteriores es importante, porque de ellos dependen las características más importantes del espejo como son: alta reflectancia, alta transmitancia y mínima emitancia. Además de estas propiedades ópticas, el espejo debe tener una buena adherencia de la película reflectora - en el sustrato y alta resistencia al ataque del ambiente.

Para el depositado del material reflector y protector se usa el proceso de evaporación térmica, que se realiza en una cámara de alto vacío, instalada en el Instituto de Física de la UNAM.

#### 4.1 Selección del sustrato

Los espejos fueron elaborados usando vidrio de 3 mm , de grueso, como sustrato, se eligió este material porque en investigaciones anteriores se demostró que los espejos de acrílico aluminizado se degradan rápidamente al ser expuestos al medio ambiente y que, los espejos de vidrio son más resistentes al deterioro mecánico y a los fenómenos de intemperismo.

Se usaron muestras de 30 X 30 cm y patrones de 15 X 10 cm estos últimos son utilizados para el estudio al microscopio.

## 4.2 Limpieza del sustrato

Un requisito indispensable para obtener una buena adherencia de la película reflectora en el sustrato, es que este último debe estar totalmente libre de impurezas o contaminantes antes de depositar el material reflector. Estos contaminantes se deben al proceso de manufactura, contaminantes transportados por el aire, grasa de los dedos, etc. Existen varios métodos para la limpieza del sustrato, sin embargo se pueden clasificar en dos grupos: químicos y físicos. Los métodos químicos emplean soluciones ácidas o alcalinas y solventes para eliminar las partículas del contaminante, los procesos físicos requieren de la energía necesaria para evaporar las impurezas, por ejemplo, calentamiento y bombardamiento de partículas.

Los agentes limpiadores eliminan a las impurezas al romper las uniones partícula-partícula de los contaminantes y a las uniones contaminante-sustrato. La técnica de limpieza se elige con base al grado de limpieza requerido.

### 4.2.1 Métodos químicos

1. Soluciones alcalinas. Las soluciones alcalinas se emplean para eliminar contaminantes grasosos y manchas sólidas ó semisólidas. Los principales constituyentes de las soluciones alcalinas son compuestos de sodio (carbonatos, fosfatos, silicatos e hidroxidos), eliminan los contaminantes por uno ó más de los siguientes

**mecanismos:**

**Saponificación:** El aceite vegetal ó animal es parcialmente removido, normalmente la saponificación es baja e incompleta.

**Emulsificación:** Este es un mecanismo por el cual el contaminante es "quebrado" y suspendido en el lavado en forma de partículas muy finas.

**Dispersión:** Por este proceso se disminuye la concentración del contaminante.

**Floculación:** Una vez que los contaminantes son removidos y dispersados son transportados al exterior en forma de floculos, que quedan suspendidos en solución y no son redepositados.

2. Soluciones ácidas. La limpieza con ácido emplea una solución de un ácido mineral u orgánico ó una sal ácida en combinación con un agente humectante y detergente para eliminar óxido, aceite, grasa y otras impurezas de la superficie. Para incrementar el poder de limpieza, se pueden agregar agentes antiespumantes, inhibidores y solventes.

Existen una gran variedad de formulaciones que pueden ser empleadas, sin embargo se clasifican en cinco clases con respecto a su composición.

1. Soluciones de ácidos minerales
2. Soluciones de ácidos orgánicos
3. Mezclas de ácidos minerales con orgánicos
4. Mezclas de ácidos-solventes
5. Soluciones de sales ácidas

El efecto limpiador de los ácidos se debe a que convierte a algunos óxidos y grasas en compuestos solubles en agua.

3. Lavado con solventes. Los principales solventes usados como agentes de limpieza son: compuestos alifáticos, hidrocarburos clorados, alcoholes, acetona y benceno. Los compuestos alifáticos son probablemente los más usados por su bajo costo y alto punto de centelleo. Los hidrocarburos clorados son excelentes agentes de limpieza, pero son muy tóxicos. Los alcoholes son usados para aplicaciones especiales.

Se debe considerar que estas sustancias tienen limitaciones como la que algunas pueden atacar a los materiales.

#### 4.2.2 Métodos físicos

1. Limpieza por calentamiento. Un método efectivo de limpieza es, calentando el sustrato, si la geometría lo permite, se puede realizar directamente con la flama de un mechero. Para vidrio y cerámica vidriada se requieren temperaturas menores a 1273 °K, energía suficiente para desorber las moléculas contaminantes de la superfi

cie del sustrato, esto es debido a que la materia orgánica es oxidada y transformada en constituyentes volátiles.

Es importante que la combustión sea completa para evitar depositar "hollín" sobre la superficie del sustrato. Un calentamiento no uniforme también produce tensiones que pueden fracturar al sustrato.

2. Limpieza por descarga luminosa. De los diferentes procesos físicos usados en la limpieza de sustratos, la técnica por descarga luminosa es la más usada y la que mejores ventajas ofrece. Este proceso consiste en la exposición del sustrato en el plasma de una descarga luminosa, la descarga es establecida entre dos cátodos situados muy próximos al sustrato, de tal manera que la superficie quede dentro del plasma. Los voltajes usados en el proceso de descarga luminosa varían desde 100 a 5000 volts. Se usan electrodos de aluminio, porque este material se erosiona lentamente en presencia de gases oxidantes y por tanto no hay una significativa depositación del material en la superficie del sustrato. Se pueden usar voltajes de corriente alterna o de corriente directa, sin embargo son más comunes las descargas de corriente directa.

En el proceso de descarga luminosa, el sustrato no es parte del circuito como en el método de erosión, aún -

cuando este último es un efectivo método de limpieza, el bombardeo de la superficie con partículas de alta energía ocasiona erosión y posible aspereza del sustrato, - además se puede depositar material extraño proveniente del contraelectrodo. Si estos fenómenos no son significativos para nuestros fines, entonces la limpieza por - erosión es preferida sobre la limpieza por descarga luminosa.

En la limpieza por descarga luminosa, la eliminación de impurezas son inducidas por uno o más de los mecanismos siguientes:

1. Calentamiento directo debido al choque de partículas cargadas.
2. Desorción de impurezas por el bombardeo continuo de electrones.
3. Desorción de impurezas resultado del bombardeo de - iones de baja energía o partículas neutras.
4. Modificación de la superficie del vidrio por la adición continua de oxígeno.
5. Aumento de la nucleación durante la subsecuente de-  
positación de la película.

Los mecanismos 4 y 5 son los más importantes, de particular importancia para vidrio con alto contenido de  $\text{SiO}_2$  es el mecanismo 5, porque ayuda a la formación de puentes oxidantes entre el vidrio y metales reactivos como el aluminio ó el -

romo.

Se ha demostrado en diversas investigaciones que la descarga luminosa es efectiva sólo en presencia de oxígeno.

#### 4.3 Desarrollo experimental de espejos

A continuación se describen los pasos que se siguieron para la elaboración de los espejos, así como una descripción de las condiciones de operación.

Con base en investigaciones anteriores se eligió al vidrio de 3 mm., como sustrato, porque el acrílico se degrada rápidamente y la adherencia de la película reflectora es pobre.

##### 4.3.1 Limpieza del sustrato

Para obtener una buena adherencia entre la película reflectora y el sustrato es requisito indispensable que se encuentre totalmente libre de impurezas. Para este fin en los espejos desarrollados en el Instituto de Ingeniería se utiliza el procedimiento siguiente de limpieza del sustrato, previo a la depositación del material reflector.

El desengrase de los sustratos se llevó a cabo, primero con un lavado de agua y detergente, usando un detergente comercial de marca "ROMA", seguido de un desengrase con alcohol isopropílico, inmediatamente el sustrato se introduce a una cámara de alto vacío para realizar una limpieza por descarga luminosa. La limpieza por descarga luminosa se efectúa en una atmósfera de gas argón y voltajes de 3 kV para todos

los espejos.

Se evaluará una nueva técnica para la eliminación de contaminantes, previa a la limpieza con descarga luminosa, esta técnica consiste en un lavado del sustrato con una solución de ácido fluorhídrico al 5% en peso. El ácido fluorhídrico es un abrasivo que ataca a la superficie del vidrio, desbastandola y por tanto eliminando las impurezas, después de este lavado los sustratos se limpian por descarga luminosa.

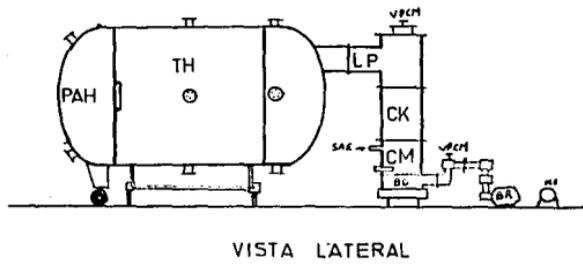
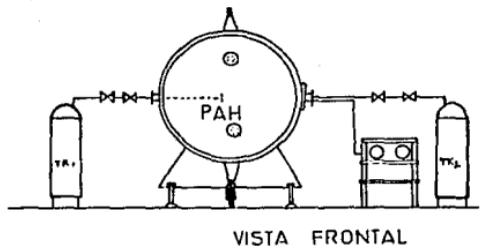
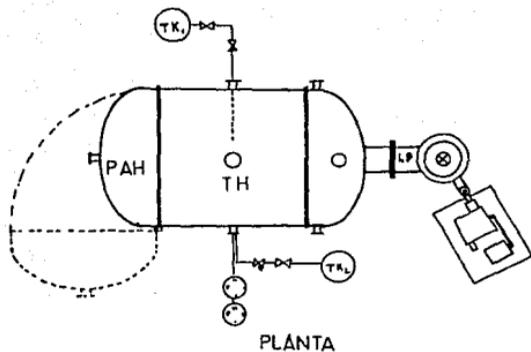
En estas condiciones se considera que el sustrato de vidrio se encuentra totalmente libre de impurezas y, por tanto la adherencia del aluminio es excelente.

#### 4.3.2 Evaporación del material reflector

Para la evaporación del material reflector se usa una cámara de alto vacío, de 1.5 m<sup>3</sup>., instalada en el Instituto de Física de la UNAM. En esta cámara también se realiza la limpieza por descarga luminosa. Tiene capacidad para obtener espejos de hasta 0.5 m<sup>2</sup>. La cámara tiene conectadas una bomba mecánica para obtener vacíos de 10<sup>-3</sup> Torr y una bomba de difusión para obtener vacíos de hasta 10<sup>-5</sup> Torr, un termopar para lecturas de temperaturas, un equipo para medir espesores y una fuente de poder. En la figura 4.1 se muestra un diagrama del equipo con todos sus componentes.

##### 4.3.2.1 Evaporación de aluminio

Existen diferentes tipos de crisoles para evaporar sustancias, los más idóneos para evaporar aluminio son los mostra



- TK TANQUE DE ALMACENAMIENTO
- 3D BOMBA DE DIFUSION
- BR BOMBA ROTATORIA
- ME MOTOR ELECTRICO
- TH TANQUE HORIZONTAL
- LP LINEA PRINCIPAL
- CK CONDENSADOR
- CM SERPENTIN
- PAH PUERTA DE ACCESO
- SAE SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO
- VPCM VALVULA DE PLATO

FIG 41 EQUIPO PARA EVAPORACION TERMICA

dos en la figura 4.2. Estos crisoles están contruídos con tungsteno. El aluminio se evapora cuando se tiene una presión de vacío en la cámara de  $5 \times 10^{-5}$  Torr y una corriente de 40 a 80 Amp., para obtener la temperatura de  $1100^{\circ}\text{C}$  necesarios para que el aluminio se evapore.

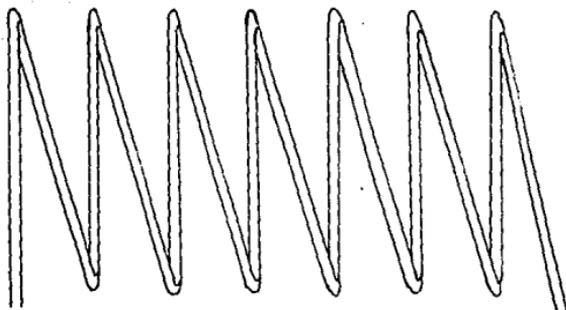
#### 4.3.2.2 Evaporación de plata

En investigaciones previas se demostró que la plata tiene una pobre adherencia con el vidrio, para incrementar esta adherencia es necesario depositar sobre el sustrato una película de cromo ó nicromel y posteriormente evaporar la plata. Esta evaporación se realiza usando crisoles de tantalio a una presión de  $10^{-5}$  Torr, la densidad de corriente en el crisol debe ser de 30 a 80 Amp.

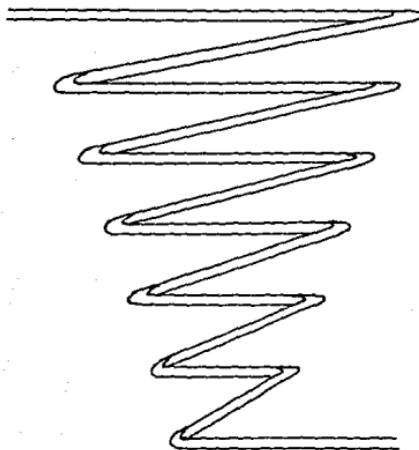
#### 4.3.2.3 Evaporación de $\text{Si}_x\text{O}_y$

El  $\text{SiO}$  se evapora sobre los espejos y se realiza inmediatamente después de evaporar el aluminio, la presión en el interior de la cámara debe ser del orden de  $5 \times 10^{-5}$  Torr y una corriente de aproximadamente 100 Amp, para alcanzar la temperatura de 1150 a  $1250^{\circ}\text{C}$ , necesaria para la evaporación del  $\text{SiO}$ . El crisol es un tubo de tantalio, cerrado en uno de sus extremos, con un diámetro exterior de 3.18 mm., el crisol tiene cinco perforaciones de aproximadamente 0.5 mm y una longitud de 80 mm.

Para evaporar el  $\text{SiO}_2$  se requiere de un cañón de electrones y un crisol de grafito, esta evaporación se realiza en pre-



a) ESPIRAL



b) CANASTA

FIG 42 TIPO DE CRISOLES

sencia de gas oxígeno. Para el  $\text{Si}_2\text{O}_3$ , es necesario evaporar lentamente  $\text{SiO}$ , a una velocidad aproximada de 3 a 4  $\text{Å}^\circ/\text{seg}$ . dentro de una atmósfera de oxígeno, a una presión de  $10^{-4}$  Torr, de manera que se efectue una evaporación reactiva con el oxígeno.

#### 4.3.3 Espejos desarrollados

##### 4.3.3.1 Evaporación de Al y SiO (muestra 10)

Sustrato: Vidrio de 30 X 30 cm , y 0.3 cm , de espesor.

Limpieza: Lavado con jabón y alcohol isopropílico. Descarga luminosa por 30 min , con 3 kV y una corriente de 250 mAmp , en atmósfera de argón.

Evaporación de aluminio con una presión en la cámara de  $5 \times 10^{-5}$  Torr y una densidad de corriente de 48 a 60 Amp.

Evaporación de SiO (Crisol 1)

Tiempo (Hrs)	Espesor ( $\text{Å}^\circ$ )	Vacío (Torr) $\times 10^5$	Corriente (Amp)
12:38	---	5.0	97
12:40	179	5.0	97
12:41	535	4.9	97
12:42	856	4.9	97
12:43	1018	5.0	97
12:44	1110	5.1	97
12:45	1236	5.2	100
12:46	1367	5.5	100
12:47	1389	5.3	105
12:48	1425	5.5	105
12:49	1477	5.6	105
12:49'31"	1507	5.9	105

## Segunda evaporación de SiO (crisol 2).

Tiempo (Hrs)	Espesor (A°)	Vacío (Torr) X 10 <sup>5</sup>	Corriente (Amp)
12:52	---	6.6	---
12:54	63	6.2	100
12:55	227	5.5	105
12:56	555	5.0	110
12:57	784	5.0	110
12:59	985	5.3	110
13:01	1111	5.5	110
13:04	1283	5.5	115
13:07	1362	5.8	115
13:10	1375	6.3	115

En la tabla se puede observar que la evaporación del monóxido de silicio tiene una rapidez variable, es decir no se controla la evaporación, esto es debido a que no se requería hacer una evaporación reactiva con el oxígeno, porque se desataba una película de SiO y por tanto la rapidez de evaporación no se controla.

En el crisol uno se inicia la evaporación a una velocidad de 100 A°/min, finalizándose a 30 A°/min, alcanzando una rapidez de hasta 356 A°/min. En el crisol dos se inicia a 63 A°/min, se tiene un máximo de 328 A°/min, y se terminó con 13 A°/min.

La tonalidad de la película de SiO es amarillenta y tiene un grosor aproximado de 3000 A°. Según la bibliografía el espesor necesario para proteger al espejo contra la abrasión

es del rango de 1000 a 2000 Å°. El espejo tiene una reflectancia promedio de 0.817. Las mediciones de reflectancias se efectuaron con un reflectómetro de espectro solar tipo SSR - de la compañía Devices and Services (EUA).

#### 4.3.3.2 Evaporación de Al y SiO<sub>2</sub>. (Muestra 9)

Sustrato: Vidrio de 30 X 30 cm y espesor de 0.3 m.

Limpieza: Lavado con jabón y alcohol isopropílico. Descarga luminosa durante 20 min , con un voltaje de 3 kV y una corriente de 200 mAmp , en atmósfera de argón.

Evaporación de aluminio con una corriente de 50 Amp , y vacío en la cámara de  $5 \times 10^{-5}$  Torr.

Evaporación de SiO en atmósfera de oxígeno. (crisol 1).

Tiempo (Hrs)	Espesor (Å°)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Corriente (Amp)
12:46	0	1.00	80
12:47	--	1.00	90
12:49	42	0.98	105
12:50	166	1.00	105
12:51	342	1.00	105
12:52	442	1.00	100
12:53	506	1.10	100
12:54	575	1.00	100
12:55	642	1.00	100
12:56	682	1.00	100
12:57	776	1.00	103
12:58	877	0.98	103
12:59	972 <sup>^</sup>	0.96	103

Tiempo (Hrs)	Espesor (A°)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Corriente (Amp)
13:00	1042	1.00	103
13:01	1113	1.00	105
13:02	1187	1.00	107
13:03	1266	1.00	110
13:04	1330	1.00	110
13:05	1360	1.00	110
13:06	1430	1.00	115
13:07	1520	0.98	115

Segunda evaporación de SiO en atmósfera de O<sub>2</sub> (crisol 2)

Tiempo (Hrs)	Espesor (A°)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Corriente (Amp)
13:10	0	1.00	100
13:12	59	1.00	110
13:13	177	0.96	112
13:14	301	0.96	112
13:16	395	0.90	110
13:17	450	0.94	112
13:18	495	1.00	112
13:19	552	1.00	115
13:20	602	1.00	115
13:21	652	1.00	117
13:22	700	1.00	117
13:23	760	1.00	120
13:24	824	1.00	123
13:25	877	1.00	123
13:26	923	1.00	125
13:27	961	1.00	127
13:28	1010	1.00	130
13:29	1052	1.00	132
13:30	1097	1.00	135
13:31	1129	1.00	135
13:32	1182	1.00	140

Tiempo (Hrs.)	Espesor (A°)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Corriente (Amp)
13:33	1224	0.98	140
13:34	1260	1.00	140
13:35	1288	1.00	140
13:35'15"	1297	1.00	140

Para poder efectuar una evaporación reactiva con el oxígeno, de tal manera que el SiO se transforma a Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, es necesario que la rapidez de evaporación no sea mayor de 240 A°/min. (11) En la tabla se observa que se mantuvo un control en la velocidad de la evaporación, la cual alcanza un valor máximo de - 176 A°/min , para el crisol 1 y de 124 A/min , para el crisol dos.

La película de Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub> depositada sobre el aluminio es prácticamente transparente y tiene un espesor aproximado de 3000A°. Tiene una reflejancia promedio de 0.850, lo cual indica ó - permite afirmar que, con el mismo espesor de película, el Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es más transparente que el SiO.

#### 4.3.3.3 Evaporación de Al y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Muestra 11)

Sustrato: Muestras de vidrio de 30 X 30 cm , y de 10 X 15 cm , ambos con un espesor de 0.3 cm.

Limpieza: Lavado con jabón y alcohol isopropílico. Descarga luminosa por 20 min , en una atmósfera de argón a una presión de  $5 \times 10^{-5}$  Torr, un voltaje - de 3 kV , y 150 mAmp.

Evaporación de aluminio a una presión de vacío de  $4.9 \times 10^{-5}$  Torr y 40 Amp. (crisol 1 y 2).

Tiempo (Hrs)	Corriente (Amp)
12:36	45
12:48	45

Segunda evaporación de aluminio en atmósfera de oxígeno a una presión de  $1 \times 10^{-4}$  Torr. (crisol 3 y 4)

Tiempo (Hrs)	Corriente (Amp)
13:00	20
13:00'26"	30
13:03	45
13:07	60
13:13	65
13:21	70
13:24	70

La segunda evaporación se realizó en una atmósfera de oxígeno para obtener una película protectora de óxido de aluminio ambos espejos tienen una buena apariencia y buena adherencia, sus reflejancias promedio son:

1. Espejo de 30 X 30: 0.805
2. Espejo de 10 X 15: 0.852

El espejo patrón será estudiado al microscopio, para analizar el efecto de los contaminantes atmosféricos en las películas, protectora y reflectora.

#### 4.3.3.4 Evaporación de aluminio. (Muestra 12)

Sustrato: Muestra de 30 X 30 cm , y de 10 X 15 cm , ambos

de vidrio con un espesor de 0.3 cm.

**Limpieza:** Lavado con jabón y alcohol isopropílico. Descarga luminosa durante 20 min , a un voltaje de 3kV , 125 mAmp , y una atmósfera de argón.

**Evaporación de aluminio.**

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr) X 10 <sup>5</sup>	Corriente (Amp)
13:07	5.9	30
13:09	5.9	40
13:10	5.9	45
13:15	4.8	45
13:22	4.8	50
13:27	4.7	50

A este espejo no se le depósito película protectora, sólo tiene una película reflectora de aluminio puro, para analizar su comportamiento con respecto a los que sí tienen material protector. Sus reflejancias promedio iniciales son:

1. Espejo de 30 X 30: 0.863
2. Espejo de 10 X 15: 0.850

Se puede observar que este espejo tiene reflejancias promedio un poco mayor que los espejos con película protectora, como esta diferencia es pequeña, podemos asegurar que las películas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son casi transparentes.

#### 4.3.3.5 Evaporación de aluminio y oxido de aluminio (Muestra 13)

**Sustrato:** Muestras de vidrio de 30 X 30 cm , y de 10 X 15 cm , con un espesor de 0.3 cm.

**Limpieza:** Lavado con jabón y alcohol isopropílico. Descarga luminosa.

Evaporación de aluminio a una presión de vacío de  $5 \times 10^{-5}$  Torr y una corriente de 40 Amp.

Segunda evaporación de aluminio en atmósfera de oxígeno, a una presión de  $1 \times 10^{-4}$  Torr, una corriente de 20-70 Amp, durante 25 min.

Este espejo se realizó con características semejantes al espejo descrito en el punto 3. Las reflejancias promedio son:

1. Espejo de 30 X 30: 0.736
2. Espejo de 10 X 15: 0.722

Las reflejancias promedio iniciales son menores que las obtenidas con un espejo semejante, esto se debe a problemas en uno de los filamentos de tungsteno.

#### 4.3.3.6 Evaporación de aluminio y descarga de alto voltaje (Muestra 14)

**Sustrato:** Muestras de vidrio de 30 X 30 cm, y de 10 X 15 cm, con un espesor de 0.3 cm.

**Limpieza:** Lavado con jabón y alcohol isopropílico. Descarga luminosa por 20 min, con 3 kV y 125 mAmp, en atmósfera de gas argón, a  $6.3 \times 10^{-5}$  Torr.

Evaporación de aluminio.

Tiempo (Hrs)

Corriente (Amp)

11:45

10

Tiempo (Hrs)	Corriente (Amp)
11:53	15
12:00	20
12:03	35
12:05	40
12:10	50
12:13	10
12:16	15
12:19	20
12:21	28
12:22	40
12:23	52
12:26	30

En esta evaporación se utilizó un filamento delgado y otro normal. A las 12:13 Hrs , se inicia la evaporación con el filamento delgado. A las 12:26 se fué la luz, reiniciándose se la evaporación a las 13:09 hrs , a presión de  $6.3 \times 10^{-5}$  Torr.

Tiempo (Hrs)	Corriente (Amp)
30:09	30
13:13	36

Terminada la evaporación del aluminio, el espejo se conecta al aro de alto voltaje, con la finalidad de oxidar el aluminio, para lo cual se introduce oxígeno en la cámara, a una presión de  $1 \times 10^{-4}$  Torr.

Descarga de alto voltaje: Se inicia a las 11:45 Hrs , a 3 kV , y 250 mAmp. El voltaje varía de 2-3 kV , y de 120-150 mAmp. El plasma se mantiene cerca de 3 kV , se terminó la descarga a las 13:45 Hrs , se acumuló 2 Hrs , bajo el plasma.

Al extraer el espejo de la cámara se observan daños, ocasionados por el alto voltaje, estos daños son: fractura de la película reflectora, principalmente donde se conectó el espejo al aro de alto voltaje, esta fractura tiene una estructura en forma de "panal de abeja". También se rompió el vidrio. Las reflejancias promedio iniciales son:

1. Espejo de 30 X 30: No se midió su reflejancia, porque se desechó la muestra.
2. Espejo de 10 X 15: 0.820

Sólo se trabajará con el espejo patrón, aún con los daños - descritos.

#### 4.3.3.7 Evaporación de aluminio y $\text{Si}_2\text{O}_3$ . (Muestra 15)

Sustrato: Muestras de vidrio de 30 X 30 cm , y 10 X 15 cm. con espesor de 0.3 m.

Limpieza: Lavado con jabón y alcohol isopropílico. Descarga luminosa durante 20 min con 3 kv y 250 mAmp en atmósfera de argón.

Evaporación de aluminio con dos filamentos, el primero con una corriente de 30 Amp , y el segundo con 45 Amp.

Evaporación de  $\text{SiO}$ , en una atmósfera de oxígeno. (crisol 1).

Tiempo (Hrs)	Espesor (A°)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Corriente (Amp)
12:56	0	1.0	40
12:57		1.0	70
12:58		1.0	80
12:59	4	1.0	90
13:00	145	1.0	100
13:01	323	1.0	
13:02	480	1.0	95
13:03	615	1.0	90
13:04	658	1.0	92
13:05	718	1.0	94
13:06	796	1.0	96
13:07	888	1.0	98
13:08	988	1.0	100
13:09	1092	1.0	102
13:10	1200	1.0	104
13:11	1315	1.0	106
13:12	1439	1.0	108
13:13	1540	1.0	108
13:13'11"	1558	1.0	

Segunda evaporación de SiO<sub>2</sub>, en atmósfera de oxígeno a una presión de  $1 \times 10^{-4}$  Torr.

Tiempo (Hrs)	Espesor (A°)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Corriente (Amp)
13:17	--	1.0	90
13:18	14	1.0	97
13:19	148	1.0	100
13:20	325	1.0	100
13:21	528	1.0	98
13:22	664	1.0	96
13:23	762	1.0	96
13:24	866	1.0	98
13:25	964	1.0	100

Tiempo (Hrs)	Espesor (A°)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Corriente (Amp)
13:26	1035	1.0	102
13:27	1131	1.0	105
13:28	1239	1.0	108
13:29	1359	1.0	110
13:30	1462	1.0	110
13:30'35"	1511	1.0	110

Para formar el  $\text{Si}_2\text{O}_3$ , es necesario evaporar al  $\text{SiO}$  en presencia de oxígeno a una velocidad no mayor a  $240 \text{ A}^\circ/\text{min}$  por lo cual es necesario controlar la evaporación. En la tabla se observa que en un instante se obtuvo un máximo de  $248 \text{ A}^\circ/\text{min}$ , que excede lo recomendado en la bibliografía, sin embargo se controló la evaporación. En el crisol dos, la velocidad máxima fué de  $203 \text{ A}^\circ/\text{min}$ . Se observan buenas condiciones del espejo, solo pequeños orificios característicos de todos los espejos obtenidos. El grosor de la película es de  $3069 \text{ A}^\circ$ . Sus reflejancias promedio iniciales son:

1. Espejo de 30 X 30: 0.855
2. Espejo de 10 X 15: 0.858

Este espejo se elaboró para reponer a otro con características semejantes, que se extravió del lugar donde se exponen a la radiación solar.

#### 4.3.3.6 Evaporación de Al y $\text{Si}_2\text{O}_3$ (Muestra 16 y 17)

A partir de este espejo se elaboran únicamente muestras de  $10 \times 15 \text{ cm.}$ , depositando sobre el sustrato películas de aluminio y  $\text{Si}_2\text{O}_3$ , en el orden siguiente: aluminio- $\text{Si}_2\text{O}_3$ -alumi-

nio-Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Sustrato: Dos muestras de vidrio de 10 X 15 cm , y espesor de 0.3 cm.

Limpieza: Lavado con jabón y alcohol isopropílico. Descarga luminosa en atmósfera de argón durante 20 min con un voltaje de 2-3 kV , y 250 mAmp.

Primera evaporación de aluminio.

Vacío (Torr) X 10 <sup>5</sup>	Corriente (Amp)
6.7	35
7.0	37
6.8	40
6.8	45
7.0	50
5.8	60
5.4	65
5.5	70
5.3	75

Primera evaporación de SiO<sub>2</sub> en atmósfera de oxígeno.

Tiempo (Hrs)	Espesor (Å°)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Corriente (Amp)
13:09	--	1.0	60
	--	1.0	70
	--	1.0	75
	--	1.0	80
13:11		1.0	90
13:12	78	1.0	90
13:13	181	1.0	90
13:14	293	1.0	90
13:15	413	1.0	90
13:16	513	1.0	90

Tiempo (Hrs)	Espesor (A°)	Vacío (Torr)	Corriente (Amp)
		$\times 10^4$	
13:17	600	1.0	92
13:18	687	1.0	95
13:19	773	1.0	97
13:20	872	1.0	100
13:21	1011	1.0	105
13:22	1121	1.0	105
13:23	1207	1.0	105
13:24	1277	1.0	107
13:25	1348	1.0	110
13:26	1420	1.0	115
13:27	1488	1.0	115
13:28	1540	1.0	115
13:28'34"	1557	1.0	115

## Segunda evaporación de aluminio.

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr)	Corriente (Amp)
	$\times 10^5$	
---	6.7	---
---	7.3	---
---	5.4	50
13:35	5.3	60

## Segunda evaporación de SiO en atmósfera de oxígeno

Tiempo (Hrs)	Espesor (A°)	Vacío (Torr)	Corriente (Amp)
		$\times 10^4$	
13:40	0	1.0	---
13:42	96	1.0	100
13:43	208	1.0	100
13:44	402	1.0	103
13:45	583	1.0	100
13:46	684	1.0	100
13:47	774	1.0	100
13:48	900	1.0	103

Tiempo (Hrs)	Espesor (Å°)	Vacío (Torr)	Corriente (Amp)
		$\times 10^4$	
13:49	997	1.0	103
13:50	1108	1.0	105
13:51	1213	1.0	107
13:52	1358	1.0	110
13:53	1480	1.0	110
13:54	1600	1.0	110
13:55	1654	1.0	110
13:56	1711	1.0	110
13:57	1732	1.0	110

Se observa en la tabla que se mantuvo un control en la evaporación del SiO<sub>2</sub>, para obtener la película deseada. Se tuvo una velocidad máxima en la primera evaporación de 139 Å°/min, y para la segunda evaporación de 194 Å°/min. La nueva forma de arreglo en las películas se debe a que se quiere mejorar la adherencia entre el sustrato y las películas protectoras y reflectoras. No se midieron sus reflejancias promedio iniciales por estar descompuesto el reflectómetro.

#### 4.3.3.9 Evaporación de Al y Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Muestra 18)

**Sustrato:** Dos muestras de vidrio de 10 X 15 cm., y con un espesor de 0.3 cm.

**Limpieza:** Lavado con una solución de HF al 15% en peso, - agua, detergente líquido vel rosita y agua destilada. Descarga luminosa por 20 min, en atmósfera de argón, con 3 kV, y 250 mAmp.

Primera evaporación de aluminio.

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr)X10 <sup>5</sup>	Corriente (Amp)
12:43	8.0	45
12:48	6.2	40
12:50	5.7	50

## Segunda evaporación de aluminio.

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Corriente (Amp)
12:55	5.9	40
12:57	5.7	50

## Primera evaporación de SiO en atmósfera de oxígeno.

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Espesor (A°)	Corriente (Amp)
13:06	1.3	0	80
13:07	1.0	--	--
13:08	1.0	--	90
13:09	1.0	49	90
13:10	1.0	124	92
13:11	1.0	189	92
13:12	1.0	343	94
13:13	1.0	500	94
13:14	1.0	620	90
13:15	1.0	698	90
13:16	1.0	800	92
13:17	1.0	894	92
13:18	1.0	973	94
13:19	1.0	1061	96
13:20	1.0	1141	98
13:21	1.0	1251	100
13:22	1.0	1355	102
13:23	1.0	1428	102
13:24	1.0	1488	102
13:25	1.0	1500	102

## Segunda evaporación de SiO en atmósfera de oxígeno.

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr)	Espesor (Å°)	Corriente (Amp)
	X 10 <sup>-4</sup>		
13:30	1.0	--	--
13:31	1.0	--	--
13:32	1.0	27	80
13:33	1.0	44	95
13:34	1.0	114	95
13:35	1.0	259	95
13:36	1.0	415	--
13:37	1.0	508	93
13:38	1.0	578	93
13:39	1.0	650	95
13:40	1.0	735	98
13:41	1.0	811	98
13:42	1.0	895	100
13:43	1.0	1071	102
13:44	1.0	1164	105
13:45	1.0	1260	105
13:46	1.0	1341	107
13:47	1.0	1414	107
13:48	1.0	1476	107
13:49	1.0	1508	107

Con este espejo se inicia la evaluación de una nueva técnica de limpieza, con el fin de mejorar la adherencia del material reflector en el sustrato. Se usa una solución de ácido fluorhídrico diluida, porque este ataca al vidrio desgastándolo y, por tanto eliminando las impurezas de la superficie.

Se controló la evaporación del SiO, teniendo un máximo de rapidez, para la primera evaporación, de 157 Å°/min, y de 156 Å°/min, para la segunda. El espesor aproximado de la película de Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es de 3000 Å°. No se midieron sus refle-

jancias promedio iniciales, por estar descompuesto el equipo.

#### J.3.3.10 Evaporación de Al y $Si_2O_3$ . (Muestra 19)

**Sustrato:** Dos muestras de vidrio de 10 X 15 cm , y con espesor de 0.3 cm.

**Limpieza:** Lavado con HF al 5% en peso y agua destilada, secado en horno de microondas. Descarga luminosa - durante 20 min , en atmósfera de oxígeno y 3 kV.

Primera evaporación de aluminio:

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr)	Corriente (Amp)
11:23	$5.0 \times 10^{-5}$	35
11:26	$5.3 \times 10^{-5}$	35
11:27	$5.3 \times 10^{-5}$	50

Segunda evaporación de aluminio.

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr) $\times 10^{-5}$	Corriente (Amp)
11:29	5.2	30
11:32	5.3	35
11:36	5.3	40
11:40	5.3	45
11:41	5.3	45

Primera evaporación de SiO en atmósfera de oxígeno.

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr) $\times 10^4$	Espesor ( $\text{Å}^\circ$ )	Corriente (Amp)
11:48	1.0	0	--
11:49	1.0	18	80
11:50	1.0	30	85
11:51	1.0	74	87
11:52	1.0	135	87

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Espesor (A°)	Corriente (Amp)
11:53	1.0	235	90
11:54	1.0	346	90
11:55	1.0	446	90
11:56	1.0	518	90
11:57	1.0	590	90
11:58	1.0	630	90
11:59	1.0	676	90
12:00	1.0	715	90
12:01	1.0	785	92
12:02	1.0	877	95
12:03	1.0	914	95
12:07	1.0	940	97
12:08	1.0	1028	97
12:09	1.0	1073	100
12:10	1.0	1147	105
12:11	1.0	1221	105
12:13	1.0	1279	105
12:14	1.0	1328	105
12:15	1.0	1368	105
12:16	1.0	1400	105
12:17	1.0	1424	
12:18	1.0	1444	110
12:19	1.0	1464	110

Segunda evaporación de SiO en atmósfera de oxígeno.

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr) X 10 <sup>4</sup>	Espesor (A°)	Corriente (Amp)
12:24	1.0	5	90
12:25	1.0	60	90
12:26	1.0	144	93
12:27	1.0	288	92
12:28	1.0	410	92
12:29	1.0	515	92

Tiempo (Hrs)	Vacío (Torr) $\times 10^4$	Espesor ( $\text{Å}^\circ$ )	Corriente (Amp)
12:30	1.0	595	92
12:31	1.0	672	95
12:32	1.0	761	97
12:33	1.0	838	97
12:34	1.0	863	100
12:35	1.0	960	100
12:36	1.0	1027	100
12:37	1.0	1093	102
12:38	1.0	1153	102
12:39	1.0	1218	105
12:40	1.0	1281	107
12:41	1.0	1355	110
12:42	1.0	1438	110
12:43	1.0	1518	110
12:44	1.0	1588	110

La técnica de limpieza del espejo se modificó en su proceso de secado, el anterior se secó con pistola de aire caliente y en este se utilizó un horno de microondas, estos últimos tienen mejor aspecto. Se mantuvo control en la rapidez de evaporación en aproximadamente  $180 \text{ Å}^\circ/\text{min}$ , el espesor de la película protectora es de aproximadamente  $3000 \text{ Å}^\circ$ .

No se tomaron sus reflejancias promedio iniciales, porque el equipo está descompuesto.

#### 4.4 Degradación por efecto del medio ambiente

La degradación que sufren los espejos al ser expuestos al medio ambiente es la parte medular de la investigación. Para analizar este fenómeno todos los espejos desarrollados en el Instituto de Ingeniería son expuestos a la radiación solar en una estructura metálica, orientada hacia el sur y con  $20^\circ$  de inclinación, que corresponde a la latitud de la Ciudad de México.

Los espejos descritos en el capítulo anterior, son resumidos en la tabla 4.1, donde se indican sus principales características, así como su denominación y su número correspondiente. Los primeros ocho espejos que se muestran en la tabla no se describen en el capítulo precedente, esto es porque dichos espejos (muestra 1 a 8) son elaborados antes de iniciado este trabajo de tesis.

El análisis del fenómeno de intemperismo se realiza de tres formas:

1. Inspección física: Se describen los daños ocasionados al espejo durante su período de exposición.
2. Reflejancia. A todos los espejos seleccionados para intemperizarlos se les toma su reflejancia, por el anverso y reverso, sucios y limpios, la lectura se realiza periódicamente y se gráfica la reflejancia contra el tiempo de exposición.
3. Inspección al microscopio. Las muestras patrón, de 10 X 15 cm., son analizadas al microscopio una vez al mes.

La inspección al microscopio sólo se realiza con los espejos patrones por la dificultad que presentan los espejos de 30 X 30 cm., para manipularse en el microscopio.

Las muestras 7 y 8 se desechan rápidamente porque sufren un acelerado ataque y por tanto se cuentan con muy pocos datos

No. de Muestra	Denominación	Substrato	P. Reflectora	P. Protectora
1	A-7	acrílico	aluminio	---
2	A-11	acrílico	aluminio	---
3	A-23	acrílico	aluminio	---
4	V-R	vidrio	aluminio	---
5	V-6	vidrio	aluminio	---
6	V-26	vidrio	aluminio	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
7	D-Ag	vidrio	plata	---
8	Ag-S	vidrio	plata	---
9	Al-Si-I	vidrio	aluminio	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
10	Al-Si-II	vidrio	aluminio	SiO
11	Al-I	vidrio	aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
12	Al-11	vidrio	aluminio	---
13	Al-III	vidrio	aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
14	Al-IV	vidrio	aluminio	---
15	Al-Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	vidrio	aluminio	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
16	Al-V	vidrio	aluminio	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
17	Al-VI	vidrio	aluminio	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
18	V-Al-I	vidrio	aluminio	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
19	V-Al-II	vidrio	aluminio	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
20	Al-Vol	vidrio	aluminio	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Tabla 4.1 Características de los espejos intemperizados

de reflejancia, razón por la cual no se grafican. La muestra 9 se perdió a los pocos días de iniciarse su intemperización. De la muestra 14 a la 20 se tienen muy pocos datos de reflejancia o se carecen de ellos, porque el equipo se descompuso, además de que su intemperización se inicia recientemente.

#### 4.4.1 Inspección Física

**Muestra 1.** La película reflectora se ha desprendido en aproximadamente 20% de su superficie, principalmente en las orillas. Este desprendimiento es ocasionado por un manejo inadecuado en la manipulación del espejo y al contacto de la esponja o del agua de enjuague cuando son lavados, esto ocurre porque existe una difusión de agua hacia la interfase aluminio sustrato que despega al material reflector y que después se desprende a simple contacto. Se aclara que el trato que se dá a los espejos es de mucho cuidado para no dañarlos.

La película reflectora se observa opaca y con una tenue tonalidad blanca, además parece que se ha desgastado porque se observa más delgada.

**Muestra 2.** Este espejo desapareció del lugar de exposición a los 461 días de iniciarse su intemperización. Sus daños más apreciables eran: desprendimiento del material reflector, opacamiento y desgaste de la misma.

**Muestra 3.** En este espejo no se observa desprendimiento del material reflector, lo cual indica buena adherencia del aluminio con el sustrato. La película reflectora, al parecer, se ha desgastado paulatinamente observándose actualmente casi nula con -

un color grisáceo y opaco, es decir perdió brillo.

- Muestra 4. Al espejo se le rompió aproximadamente la cuarta parte de su superficie original. Existen una gran cantidad de rayones en toda la superficie. Se ha desprendido poco material reflector. Al igual que en los espejos de acrílico, el aluminio parece haber sufrido un desgaste y se ha cubierto de una coloración blanca y opaca.
- Muestra 5. Sólo se observan rayones al material reflector ocasionados por la inadecuada manipulación del espejo. No hay desprendimiento de aluminio. El espejo ha perdido reflejancia, porque se observa opaco y con un tono blanco muy suave. Se presenta el característico desgaste del material reflector.
- Muestra 6. El espejo desapareció del lugar de exposición.
- Muestra 7. Sólo se expuso al medio 20 días, en los cuales los espejos se cubrieron de una coloración blanca, al parecer se sulfataron. En las orillas se observan manchas de color café, este fenómeno es muy intenso en algunas zonas. Los espejos no tienen película protectora.
- Muestra 8. Se expuso al medio el mismo tiempo que el espejo anterior, en los cuales se atacó rápidamente a la película de plata, cubriéndose de un color blanco con manchas cafés en las orillas. El espejo no tiene material protector.
- Muestra 9. Desapareció del lugar de exposición.
- Muestra 10. A este espejo se le formó una coloración en forma de arco iris, la cual se observa desde su elaboración, esta coloración se ha intensificado, predominando el color azul y amarillo. En algunas zonas se ha desprendido material reflector, ocasionado por el lavado del espejo, lo anterior se de-

duce porque el desprendimiento sigue una dirección.

**Muestra 11.** Se ha desprendido aproximadamente 30% del total del material reflector, esta pérdida de aluminio se debe al lavado del espejo. Toda la superficie del espejo ha adquirido una coloración amarillenta con manchas del mismo color. El aluminio se ve opaco.

**Muestra 12.** El lavado del espejo ha ocasionado que se desprenda el aluminio en un 30% aproximadamente. En toda la superficie se observan manchas amarillas, lo mismo que en toda la orilla, esta coloración es tenue y opaca. Las manchas indican ataque al material reflector.

**Muestra 13.** Se observan grandes manchas de color amarillo, algunas de las cuales tienen un color más intenso, casi café. A trasluz se notan grandes sitios sin aluminio que se ha desprendido al ser lavado el espejo. Se observan manchas blancas, que aparecieron desde la elaboración del espejo, dichas manchas se deben a una deficiente limpieza y se encuentran alojadas en la interfase vidrio-aluminio.

**Muestra 14.** El espejo se conectó al aro de alto voltaje, que ocasiona fracturas en el aluminio, con el transcurso de la exposición estas fracturas se han agrandado y se ha opacado el aluminio de su alrededor. Se empieza a manchar el espejo y a desprender el material reflector.

**Muestra 15.** El espejo empieza a adquirir una tenue coloración amarillenta. En una orilla se inicia el desprendimiento del material reflector. Este fenómeno no ha continuado, sin embargo faltó limpieza al sustrato y el agua filtrada a la interfase contribuye al desprendimiento del material reflector. No se observan más daños.

**Muestra 16.** Se ha desprendido gran cantidad del material re-

flexor en toda la superficie del espejo. Este deterioro se inicio a pocos días de exposición, continuando hasta la fecha. No hay adherencia, lo cual supone una deficiente limpieza del sustrato, además se han presentado lluvias en el tiempo de exposición, pero el daño no se debe totalmente a la lluvia.

- Muestra 17.** Presenta el mismo daño que el anterior. Las muestras se elaboraron con las mismas condiciones de operación y al mismo tiempo.
- Muestra 18.** Se observan gran cantidad de manchas alojadas en la interfase vidrio-aluminio, no se limpio adecuadamente el sustrato. Se ven los orificios característicos de todos los espejos, estos orificios al parecer se deben a impurezas en el crisol usado en la evaporación. Se inició recientemente la intemperización.
- Muestra 19.** Muchos orificios en toda la superficie, estos son muy pequeños, sólo observables a traluz. Manchas en la interfase vidrio-película reflectora. No se observan más daños. La intemperización se inicia.
- Muestra 20.** Se observa un ataque al espejo en forma de manchas de color negro, dicho ataque es más acentuado en algunas zonas, no se ha desprendido aluminio, lo cual supone buena adherencia del material, el ataque al espejo se efectuó rápidamente.

#### 4.4.2 Análisis de reflejancia

Las muestras de los espejos que se describen en la tabla 4.1, son expuestos al medio y su reflejancia se mide periódicamente usando el reflectómetro de espectro solar de la *Devices & Services Co.* Una vez que el espejo se toma del armazón de exposición es llevado al reflectómetro y ahí se le mide su reflejancia en cinco puntos por el anverso y el reverso, respec

tivamente. Después los espejos se someten a limpieza con jabón vel-rosita, agua y esponja, regresándose a tomar su reflejancia. Los promedios de las lecturas son graficadas. Las primeras muestras ya han sido expuestas por cerca de 600 días.

En las gráficas 1, 2, 3 y 4 se puede observar el comportamiento de las muestras 1, 2 y 3. Todas son de acrílico. Las reflejancias iniciales para vidrio y acrílico son semejantes. Su reflejancia ha disminuido de 0.88 a 0.72 para las muestras 1 y 2, y de 0.88 hasta 0.50 para la muestra 3, para el anverso sucio, lado normal de trabajo de los espejos. Para el anverso limpio se obtienen prácticamente los mismos valores por lo que se deduce que el polvo afecta despreciablemente a la reflejancia. El reverso sucio ha disminuido de 0.67 a 0.62 para las muestras 1 y 2 y de 0.67 a 0.45 para la tres; comparativamente con el anverso sucio, la disminución es menor. La diferencia que hay entre anverso y reverso es significativa - al inicio (dos décimas), pero se abate con el tiempo aproximadamente a la mitad. De nuevo se obtienen diferencias despreciables entre las muestras limpias y sucias. Desde el punto de vista de aplicaciones la muestra 3 ya sería inservible y debería desecharse.

Las cuatro siguientes graficas 5, 6, 7 y 8, se refieren a la variación de la reflejancia para las muestras 4, 5 y 6. La disminución de la reflejancia ha sido en menor proporción que en las muestras de acrílico, por ejemplo de 0.88 a 0.80 en las muestras 4 y 5, para el anverso sucio. La muestra 6, que

que es la única de las tres que tiene recubrimiento protector ( $\text{Si}_2\text{O}_3$ ), se ha conservado su reflejancia original, 0.85, aunque en el transcurso ha tenido altibajos. También se hace notar que la reflejancia original de la muestra 6 es más baja que las otras dos muestras, lo que puede deberse a una pequeña absorción de la radiación por parte de la película protectora. En lo que se refiere a la limpieza del anverso se nota que no hay aumentos perceptibles de la reflejancia de las muestras limpias. Los reversos de las muestras se comportan semejantemente a los anversos, pero los valores son menores por aproximadamente una décima.

Las muestras 7 y 8 son las únicas en las que se depositó plata como película reflectora y no obstante su excelente apariencia, cuando estaban recién elaborados, tuvieron una vida fugaz, siendo inmediatamente atacados al ser expuestos.

La muestra 9 desapareció del lugar de exposición.

El comportamiento de la muestra 10 se indica en la gráfica - 17. Obsérvese el cambio de escala en las abscisas debido a que el tiempo de exposición es más corto que en las muestras anteriores. Las reflejancias son relativamente bajas para espejos (0.82 comparada con 0.90). En la gráfica se logra percibir las diferencias de las reflejancias en anverso y reverso. La mayor reflejancia, 0.82, es para el anverso limpio, luego sigue el anverso sucio con 0.78; los reversos tienen 0.74 y 0.73 para el limpio y el sucio, respectivamente.

En las gráficas 9, 10, 11 y 12 se detalla la variación de la reflejancia en las muestras 11, 12 y 13, de tamaño grande. Nótese de entrada las bajas reflejancias de las muestras: - 0.70 a 0.80. También se debe notar que los mayores valores los tiene la muestra 12 que no fué cubierta con material pro tector. Sin embargo se debe de haber cubierto con una película de  $Al_2O_3$ , una vez que se expuso al medio. Las reflejancias bajan de 0.80 a 0.72 para los anversos sucios y limpios. En los reversos la muestra 13 tiene las mayores reflejancias y la 11 tiene las menores. En promedio las reflejancias dis minuyen de 0.68 a 0.65 para los anversos sucios y limpios, - el tiempo de exposición ha sido de 100 días.

Las muestras 11, 12 y 13 de tamaño chico (patrones) son observ ados en las gráficas 13, 14, 15 y 16. Estas muestras siguieron exactamente el mismo proceso de fabricación que las de - tamaño grande por lo que debieran seguir el mismo comportamien to. La muestra 12 aumenta su reflejancia de 0.80 a 0.85 para el anverso sucio y se conserva en 0.85 para el anverso limpio. La muestra 13 aumenta su reflejancia de 0.70 a 0.80 y de 0.72 a 0.80 para los anversos sucio y limpio, respectivamente. Contrariamente la muestra 11 disminuye su reflejancia de 0.80 a 0.71 y de 0.85 a 0.71 para los anversos sucios y limpios, respectivamente. En el reverso sucio la muestra 13 aumenta su reflejancia de 0.67 a 0.72 y la muestra 12 también de 0.70 a 0.74; la muestra 11 se conserva constante en 0.65. En el reverso limpio las reflejancias aumentan de -

0.70 a 0.74, se incrementan de 0.71 a 0.75 y disminuyen de 0.66 a 0.62 en las muestras 12, 12 y 11, respectivamente.

Las muestras 14, 15 y 16 tienen muy pocos datos de reflejan-  
cia. La primera muestra tiene valores iniciales de 0.78 y 0.65 para anverso y reverso sucio, los valores aumentan a 0.82 y 0.69 cuando el espejo se limpio. Después de ser expuestos durante 57 días los valores mostrados son de 0.85 y 0.74 para anverso y reverso sucio, y de 0.78 a 0.76 para el espejo limpio, respectivamente. Los valores han subido debi  
do a la solarización inicial, lo cual es común. La muestra 15 tiene reflejancias originales de 0.84 y 0.77 y la muestra 16 de 0.82 y 0.74, para anverso y reverso, respectivamente. No se poseen datos de estos espejos después de ser intemper  
izados, lo mismo que las muestras 17, 18, 19 y 20.

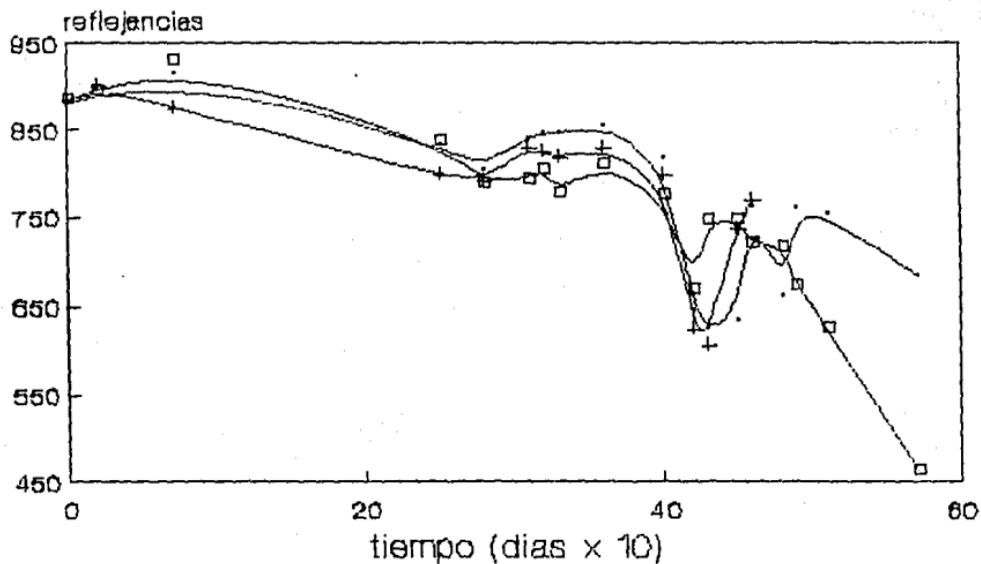
#### 4.4.3 Inspección al microscopio

La inspección al microscopio tiene como finalidad analizar el efecto del medio ambiente en forma más detallada, para lo cual se utiliza un microscopio de marca Leitz modelo Epivert, que tiene integrada una cámara fotográfica de marca Leitz mo  
delo Leica de 35 mm., especial para microfotografías.

Las muestras analizadas al microscopio son de la 7 a la 20, a las que se les tomaron fotografías.

Muestra 7 y 8. Se expusieron al medio ambiente al mismo tiempo. Antes de iniciarse su intemperización al espejo se cubrió de un color café -

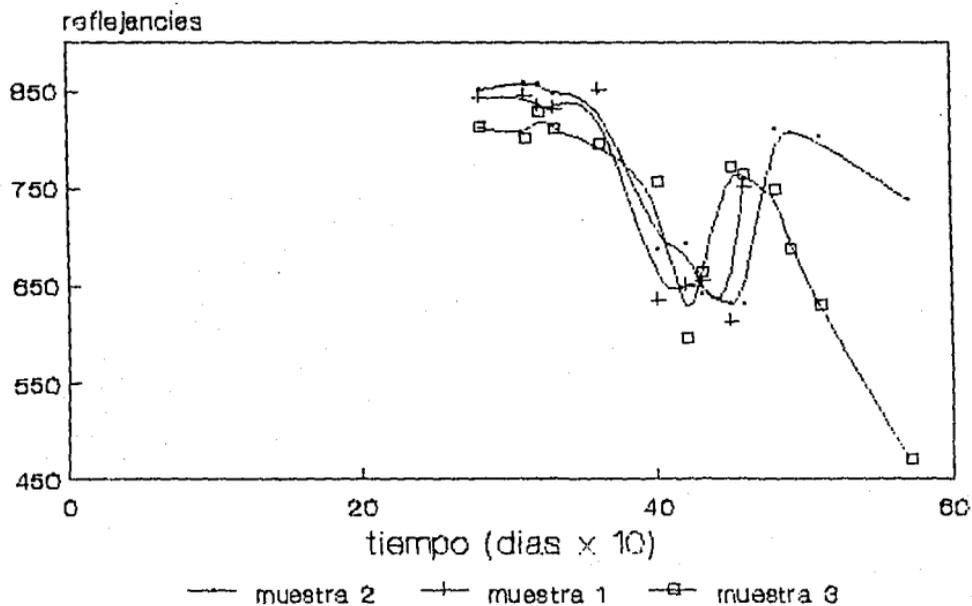
# curva de reflejancias



— muestra 2    + muestra 1    □ muestra 3

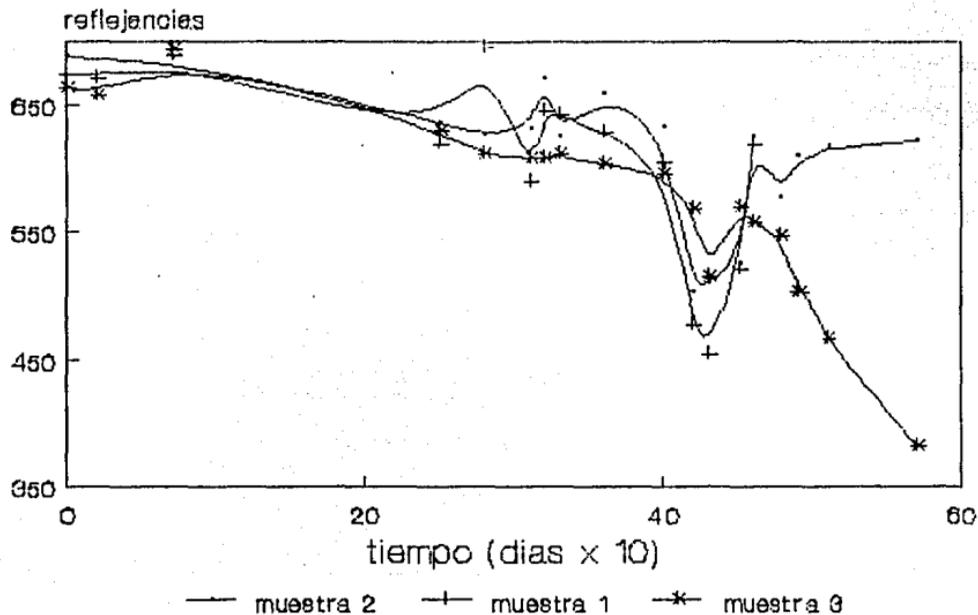
gráfica 1: anverso suola.

# curva de reflejancias



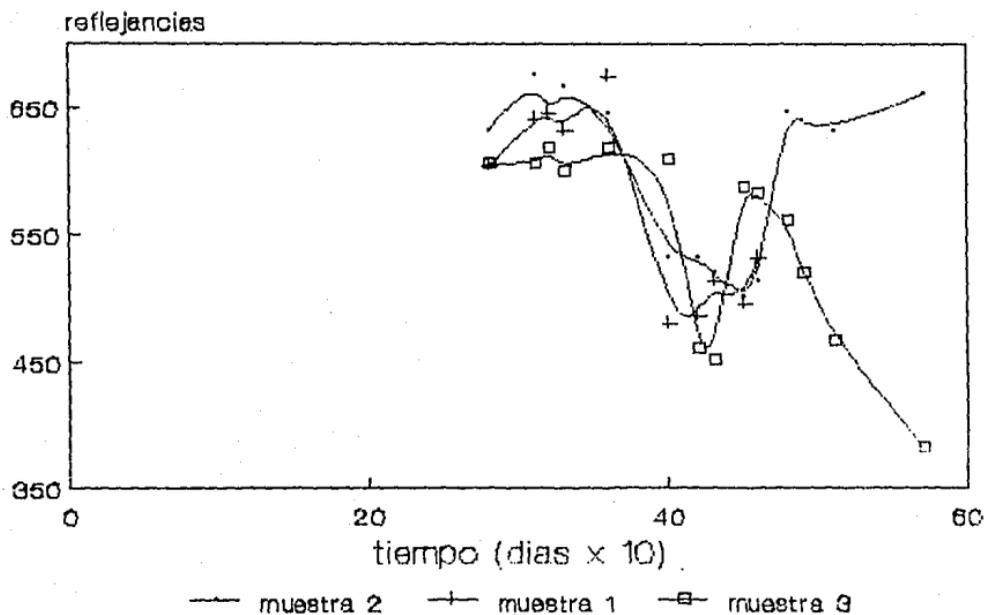
grafica 2: anverso limpio

# curva de reflejancia



grafica 3:reverso sualo.

# curva de reflejancias.



grafica 4: reverso limpio.

# Curva de ReflejanCIAS

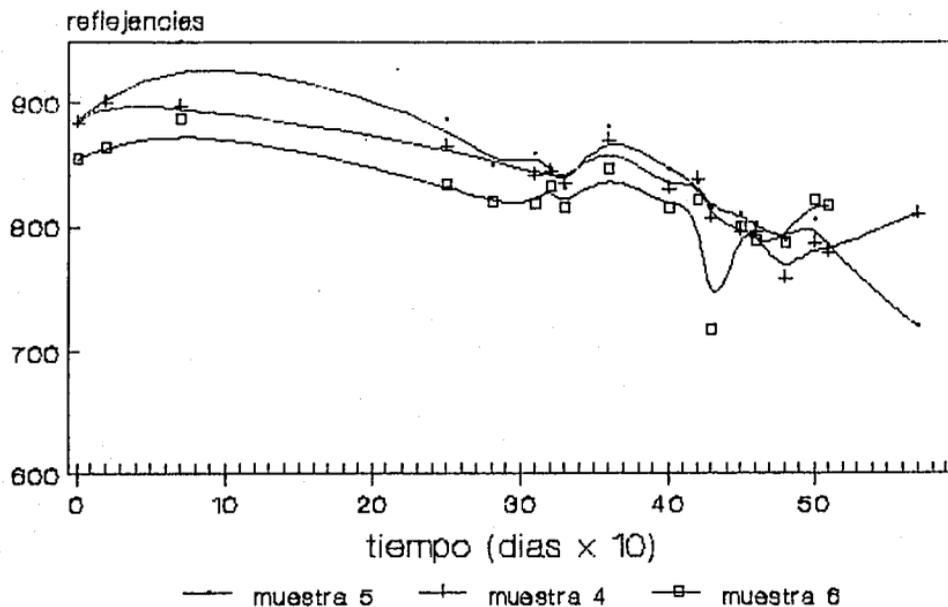


gráfico 5: inverso suelo.

# curva de reflejancias

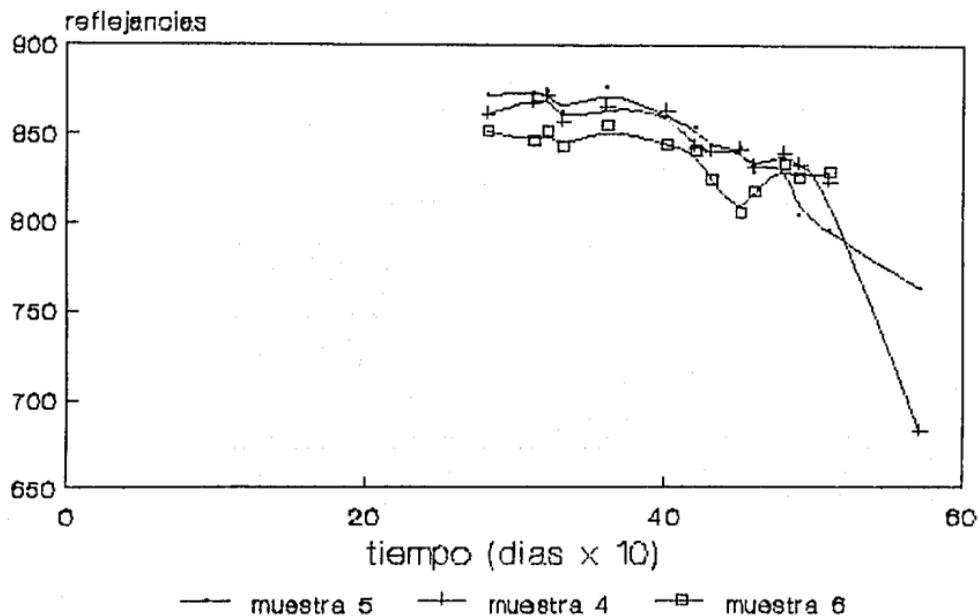
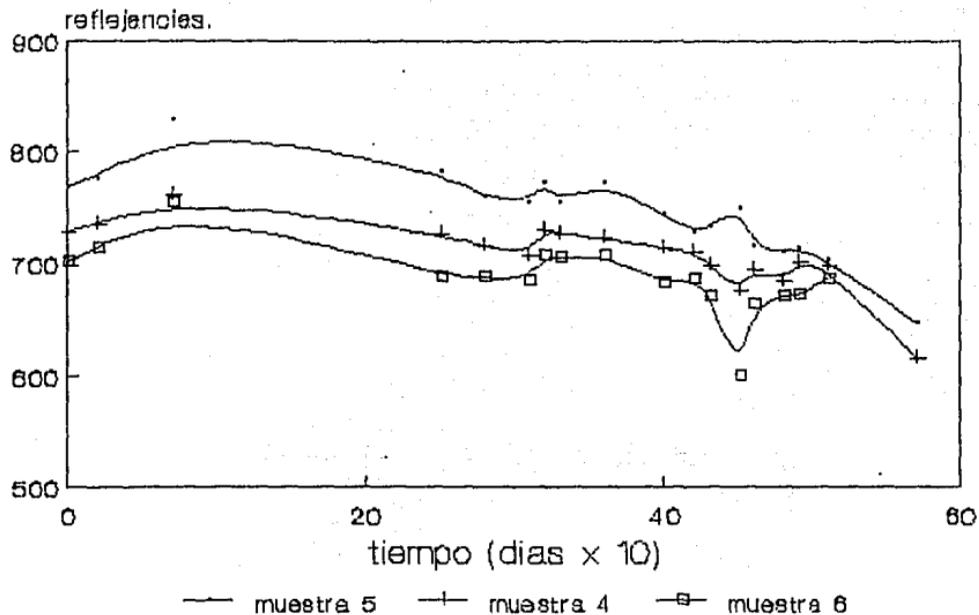


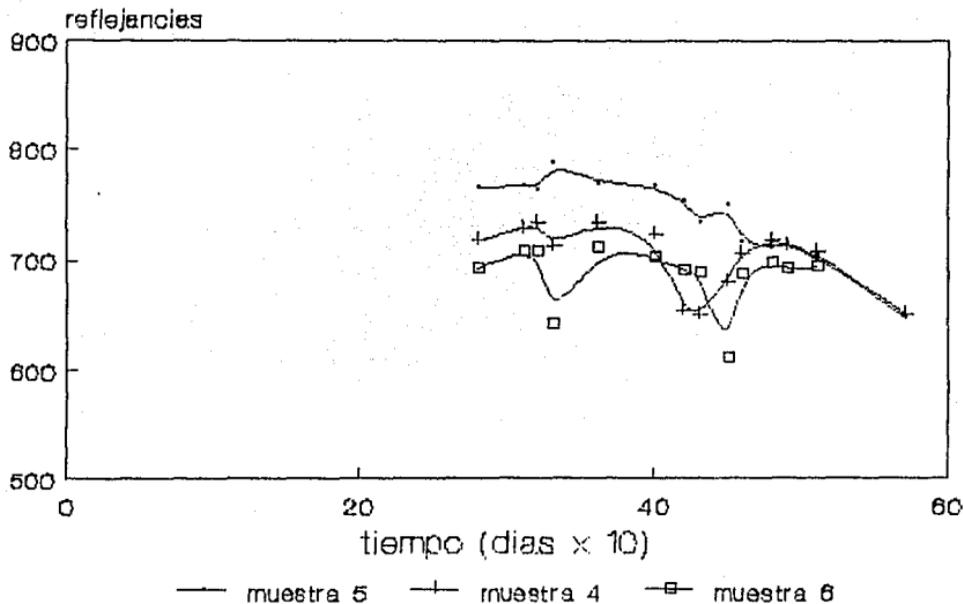
grafico 8: anverso limpio

# curva de reflejancias



grafica 7: reverso suola

# curva de reflejancias



grafica 8: reversa limpia.

# curva de reflejancias espejos de 30 x 30

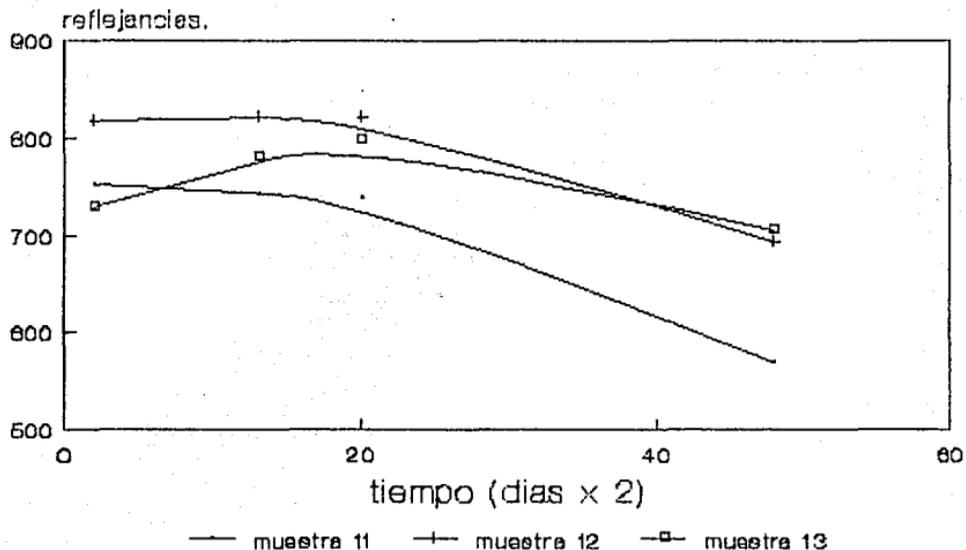
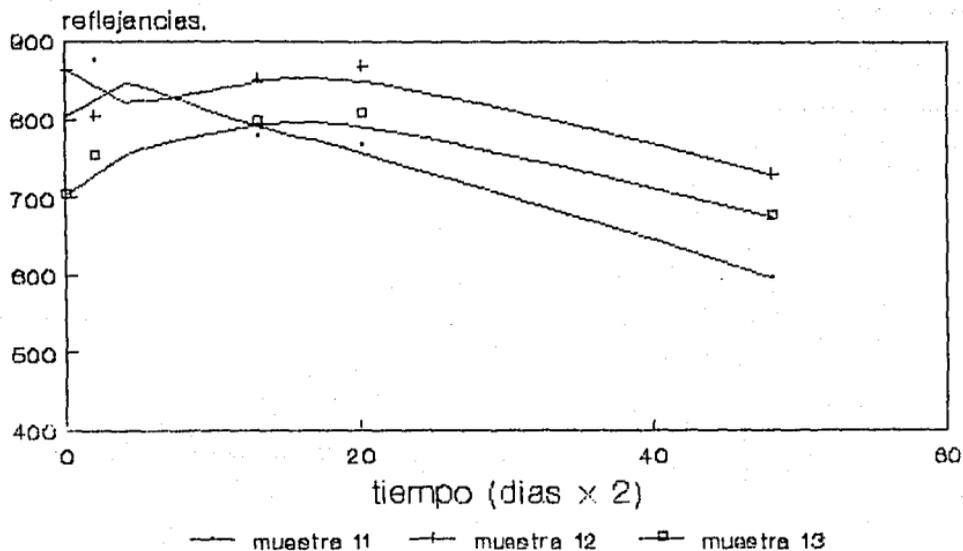


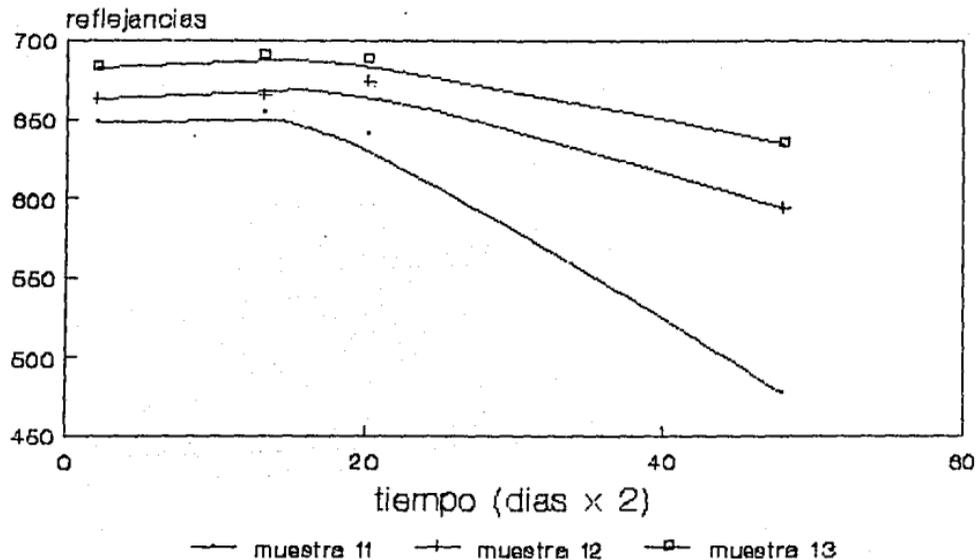
grafico 9: anverso suizo.

## curva de reflejancias espejos de 30 x 30



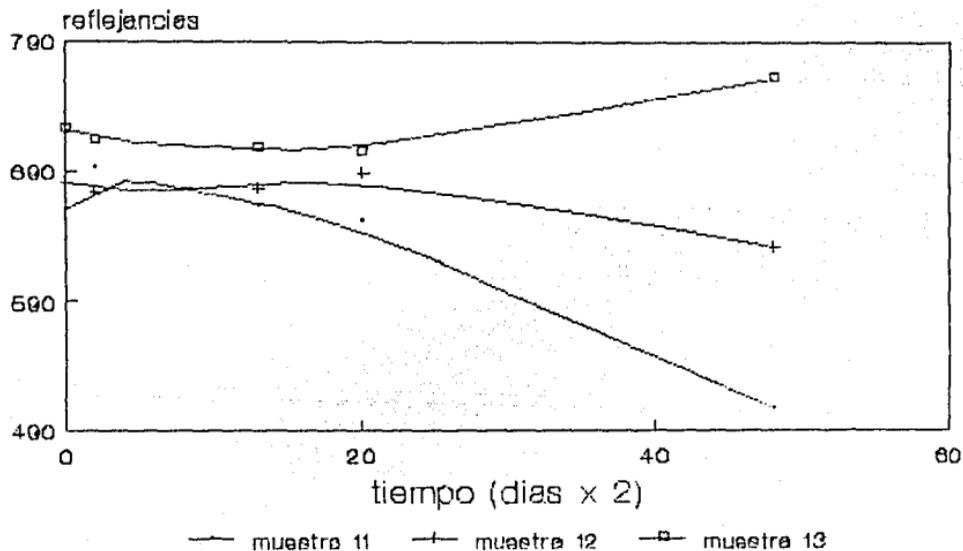
grafica 10: envase limpio

# curva de reflejancias espejos de 30 x 30



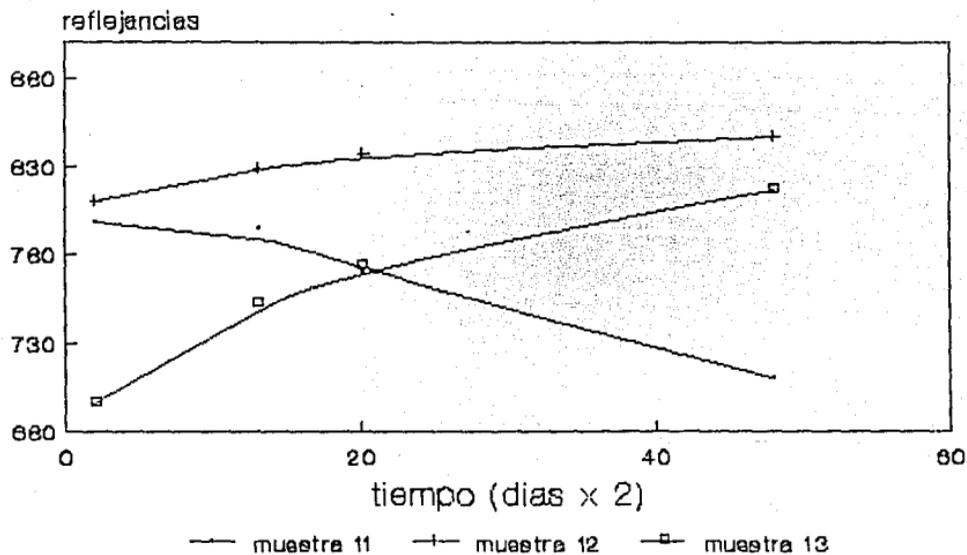
grafica 11:reverso sualo

# curva de reflejancias espejos de 30 x 30



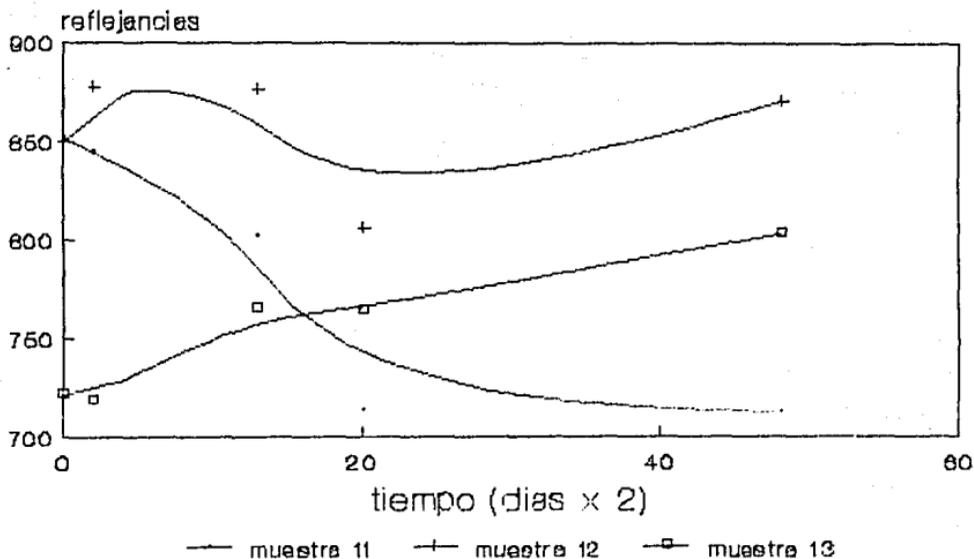
gráficas 12:reverso limpio

## curva de reflejancias espejos patrones



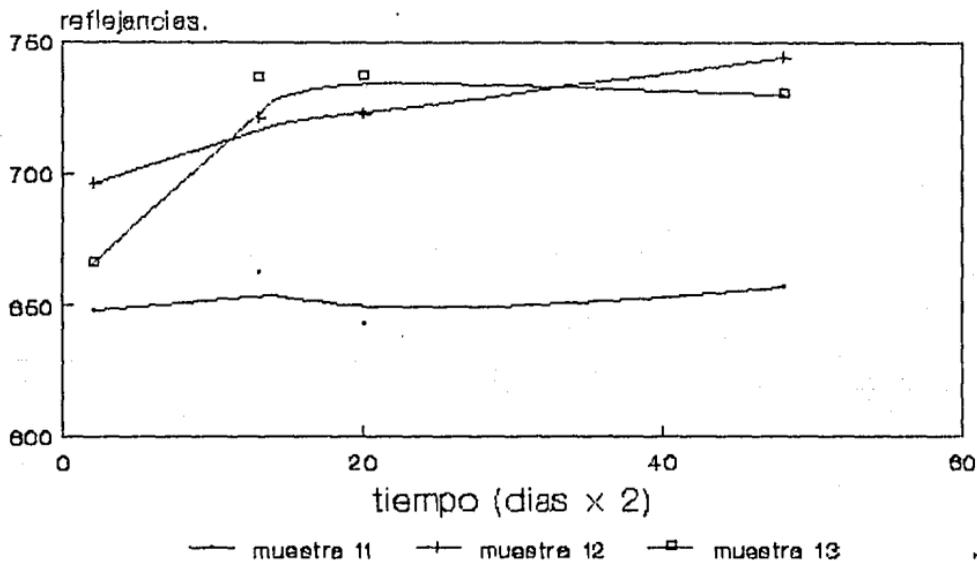
gráfica 13:enverso suelo.

## curva de reflejancias espejos patrones



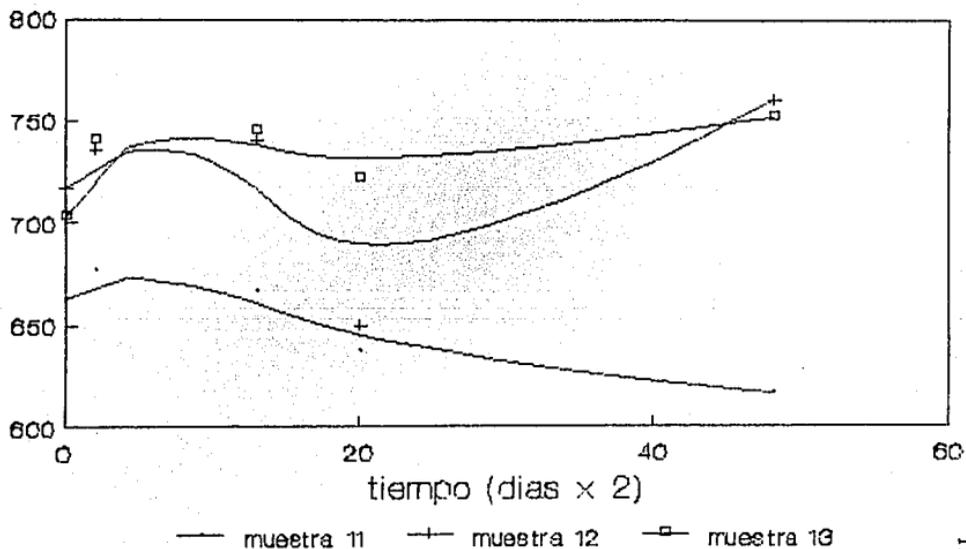
gráfica 14: envaseo limpio

## curva de reflejancias espejos patrones



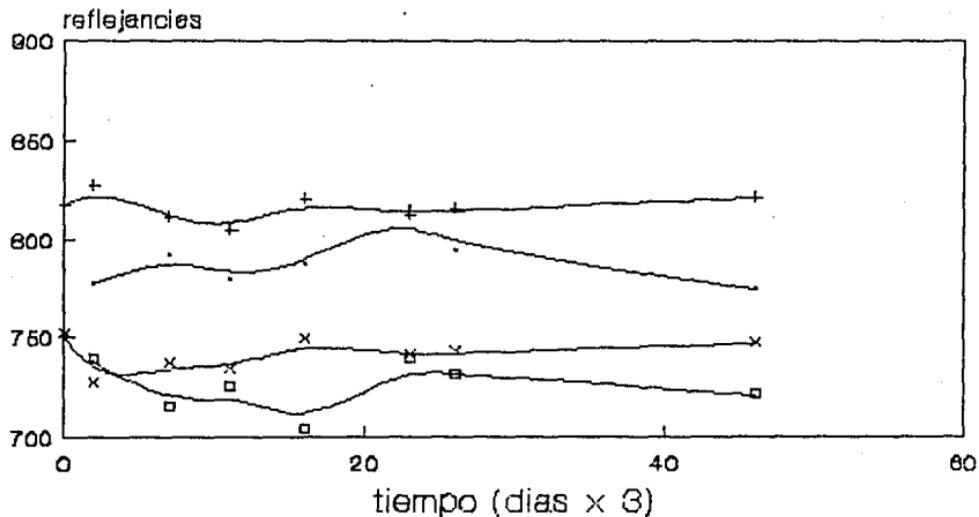
grafica 15:reverso subio.

## curva de reflejancias espejos patrones



grafica 16:reverso limpio

# curva de reflejancias muestra 10.



— anv-suolo    + anv-llimpla    □ rev-suolo    x rev-llimpla

grafica 17.

en las orillas.

- Fotografía 1.* Se muestra una orilla del espejo cubierta de color café, este tipo de ataque se observa - en toda la periferia del espejo, siendo más intensa, como se ve en la fotografía, en la parte próxima al margen del espejo, el ataque no es uniforme.
- Fotografía 2.* Esta estructura en forma de lombriz es un defecto en la evaporación, es decir no se deposito material reflector, o tal vez sea una - fractura en la película provocada por una - contracción en la plata, a su lado se observa un rayón ocasionado por un trato inadecuado del espejo, esta formado por minúsculas - burbujas.
- Muestra 9 y 10.* Sólo se inspeccionó una vez el espejo, su - principal defecto son los pequeños orificios en los cuales no se depositó película reflectora ni protectora, estos orificios son diversos tamaños y formas.
- Fotografía 3.* Aquí se muestra uno de los orificios más grandes encontrados sobre la superficie del espejo, se distinguen las tres capas de material evaporado, siendo la inferior aluminio y las otras dos del material protector.
- Fotografía 4.* Se observa una zona en la cual existe una serie de orificios, en algunos de ellos se ven las orillas de las películas evaporadas sobre el sustrato. Es característico en estos orificios que no se adhiere ninguno de los - materiales. El defecto aquí mostrado se puede deber a una deficiente limpieza o que el crisol de tungsteno se encuentra muy gastado.

- Muestra 11.* Antes de iniciarse su exposición, el espejo presenta una serie de orificios en toda su superficie, exceptuando estas deficiencias, el material reflector se depositó en forma uniforme.
- Fotografía 5.* La mancha aquí mostrada está formada por pequeñas burbujas, por la estructura de la mancha parece que este sitio estaba sucio el vidrio y por tanto no hay adherencia. Los puntos negros más grandes son orificios en la película.
- Fotografía 6.* Esta estructura se trata de algún contaminante que se depositó sobre el espejo después de elaborado, su casi perfecta redondez y la estructura de su interior confirman que no se trata de alguna impureza de los materiales.
- Fotografía 7.* En esta toma se muestra el drástico ataque que ha sufrido el espejo en ambas películas. Las manchas grandes y de un tono más intenso indican la forma en que se está atacando el material reflector. También se alcanza a apreciar el deterioro al material protector. Este espejo ha estado expuesto a la lluvia y el ataque es acelerado.
- Fotografía 8.* Otro aspecto del ataque que se a llevado a cabo en la superficie reflectora, el cual se presenta en forma de manchas de color negro co. En la fotografía se aprecia claramente, el contorno de la mancha, obsérvese que el ataque al aluminio es más intenso en las orillas.
- Fotografía 9.* En las partes donde no se ha atacado el espejo se presenta otro daño, el cual consiste en el desprendimiento del material reflector,

esta pérdida de aluminio es general en todo el espejo. Aquí se muestra una zona, en la cual este fenómeno es intenso. Casi al centro de la fotografía, se observa una pequeña dona, que se ha formado por el ampollamiento del aluminio.

*Fotografía 10.* Se muestra el ataque del material reflector. El mayor orificio se encuentra dentro de una burbuja que parece contener un líquido en su interior, el cual ocasiona un desprendimiento paulatino del material. Obsérvese la forma de los orificios, son casi redondos. En otras zonas se muestra dañado el material protector.

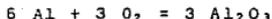
*Fotografía 11.* El agua que se filtra a la interfase vidrio aluminio, ataca rápidamente a los materiales como se ve en la fotografía, desprendiendo el material reflector y fracturando a la película protectora. En el sitio sin aluminio se alcanza a observar rastros de  $\text{Si}_2\text{O}_3$ . También se muestra manchada la superficie, que es otra forma de deteriorar al espejo.

*Fotografía 12.* Otro aspecto de la misma zona.

*Fotografía 13.* Al concluir la temporada de lluvia, la superficie del espejo tiene este aspecto. Desprendimiento del aluminio, en las zonas que se había ampollado la película, por la difusión de agua, ahora parece que se ha arrugado.

*Muestra 12.* Recién elaborados los espejos presentaban los característicos orificios y sólo pequeños daños en la película protectora. A este espejo no se le depositó material protector, pero el aluminio en contacto con el aire, reacciona inmediatamente formando una

película de  $Al_2O_3$ , por la reacción:



- Fotografía 14.* Se observa un defectuoso depositado del material, se presenta en forma de pequeños orificios, algunos de los cuales son negros.
- Fotografía 15.* Se inicia el desprendimiento del material reflector, el agujero mostrado está dentro de una burbuja que parece contener agua. La superficie del espejo se cubrió de un color amarillento, en algunas zonas, esto se observa en la fotografía.
- Fotografía 16.* Aspecto de la superficie que se ha manchado de amarillo, esta tonalidad indica el inicio del ataque a la película, es más intenso en algunos sitios.
- Fotografía 17.* Al filtrarse agua a la interfase vidrio-aluminio, reaccionan los iones, disueltos en el agua, generando gases que ampollan el material reflector. En la fotografía se muestra este fenómeno, el cual es importante porque cuando se lavan los espejos se desprende el material ampollado.
- Fotografía 18.* Aspecto del daño que sufre la superficie de la muestra, este se realiza en la película protectora, se deduce lo anterior porque dentro de las manchas oscuras existen sitios con tonalidades más claras. Los puntos negros, de color intenso, son orificios en el material reflector.
- Fotografía 19.* Otro aspecto del daño sufrido por el material reflector y protector, aquí es más intenso el deterioro en la película protectora, en la cual se han formado costras, y se

ha fracturado, desprendiéndose en algunas partes.

- Fotografía 20.* Sobre la superficie del espejo se observan - manchas amarillentas, una de las cuales se - muestra en la fotografía, el ataque se centra en el óxido de aluminio y no es uniforme.
- Fotografía 21.* Al concluir la temporada de lluvias, el agua filtrada se elimina, sin embargo la difusión de agua y ampolamiento del aluminio han dañado drásticamente al espejo, como se muestra en esta toma, donde los orificios están alineados en una dirección, lo que indica que se ocasionó al lavarse
- Muestra 13.* Los espejos desde el inicio presentaban una - mancha blanca, que se encuentra en la interfa se sustrato aluminio, así como un tono amarillento muy tenue.
- Fotografía 22.* Se inspecciona la mancha blanca, encontrándose que está formada por burbujas con líquido en su interior. Estas burbujas se muestran en la fotografía.
- Fotografía 23.* Las manchas amarillas indican un ataque al ma terial protector, o tal vez impureza de alumi nio. La fotografía presenta este defecto del espejo, mostrándose además un arrugamiento - del material protector.
- Fotografía 24.* Aquí mostramos otra de las manchas mencionadas, siendo esta última una de las más inten sas. El contorno de la mancha se encuentra perfectamente delineado, presentándose el - arrugamiento del material protector.
- Fotografía 25.* Se observa un gran orificio que en su parte interna tiene una circunferencia esto y otros

aspectos no observables en la fotografía, pero si en el microscopio, indican la presencia de un líquido que rodea la zona sin película reflectora. En la parte superior se distingue como se está fracturando el aluminio.

- Fotografía 26.* Muestra del ampollamiento del material reflector, presentándose en forma de gusanos. También son visibles los orificios, la mayoría se encuentra dentro de una burbuja con líquido en su interior.
- Fotografía 27.* Al concluir las lluvias, todos los sitios que se encontraban con líquido desaparecen, pero los daños ocasionados a la película se muestran en forma de costras, lo cual se ve en la fotografía.
- Fotografía 28.* Mismo daño en otra parte del espejo.
- Muestra 14.* La superficie del espejo se encuentra fracturada por la descarga de alto voltaje. En algunos sitios es visible el inicio del ataque a los materiales.
- Fotografía 29.* El paso de alto voltaje parece que quemó al aluminio, esto se muestra en la fotografía.
- Fotografía 30.* Al transcurrir la exposición, el espejo empieza a ser atacado, lo que se manifiesta en manchas amarillentas, formadas con pequeños puntos que parecen burbujas. Este ataque se efectúa en el material protector.
- Fotografía 31.* Otro aspecto del ataque que sufre el espejo por efecto de la intemperización, por lo general estas manchas son de color amarillento.
- Muestra 15.* A los pocos días de iniciarse su intemperización se observa desprendimiento del material reflector principalmente en las orillas.

- Fotografía 32.* Se muestra la zona donde se ha desprendido - rápidamente el aluminio, no hay adherencia entre el vidrio y el material reflector. Ma la limpieza del sustrato.
- Fotografía 33.* Como en la mayoría de los espejos el ataque al material reflector y protector se presenta en forma de manchas en la superficie, estas - manchas son normalmente de color amarillento. En la fotografía se muestra una de estas man chas.
- Fotografía 34.* Cuando hay difusión de agua a la interfase - vidrio-aluminio, inmediatamente el material reflector se ampolla y se desprende del sustrato. Este fenómeno se observa en la fotografía, notése el ataque que sufre el material protector que se ha arrugado.
- Fotografía 35.* Zona con gran desprendimiento de aluminio, - el cual no es uniforme. En algunas partes - se conserva el material protector.
- Muestra 16 y 17.* En estos espejos las películas reflectora y protectora se depositaron en el orden siguiente: Al - Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Al - Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, de forma que te nemos un espejo sobre otro. El objetivo de construir este espejo fué el de tratar de aba tir la corrosión y por tanto conservar las - propiedades ópticas del espejo.
- Fotografía 36.* Se obtuvo una pobre adherencia del aluminio. Obsérvese en la fotografía un orificio en for ma de dona, con pequeñísimas burbujas en el - centro, es decir que se está atacando al mate rial reflector.
- Fotografía 37.* En la superficie del espejo se encuentran man chas, una de ellas se presenta en la fotogra-

fía, tal vez sea suciedad. Obsérvese lo bien definido que está el contorno de la mancha.

*Fotografía 38.* Se filtró agua a la interfase, como se observa en la fotografía, los orificios se encuentran rodeados de agua y algunas zonas se han ampollado.

*Fotografía 39.* En esta parte del espejo se depositó deficientemente el material protector, se observa claramente la forma en que se evaporó el  $\text{Si}_2\text{O}_3$ , el cual se encuentra cubriendo una parte del orificio mostrado.

*Muestra 18 y 19.* Estas muestras se lavaron con HF, su intemperización apenas se inicia y no se tienen fotografías.

*Muestra 20.* La muestra se lavó con alto voltaje, a pocos días de exposición se encuentra bastante dañada. Este daño se presenta en forma de manchas negras, que cubren la totalidad de la superficie. Los daños se muestran en las tres siguientes fotografías.

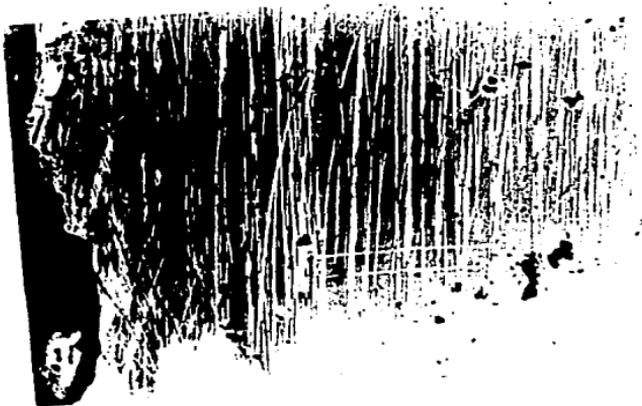
*Fotografía 40.* Muestra de la corrosión que se ha sufrido el espejo.

*Fotografía 41.* Los constituyentes atmosféricos han dañado drásticamente la superficie del espejo.

*Fotografía 42.* Otro aspecto del daño sufrido por la corrosión.

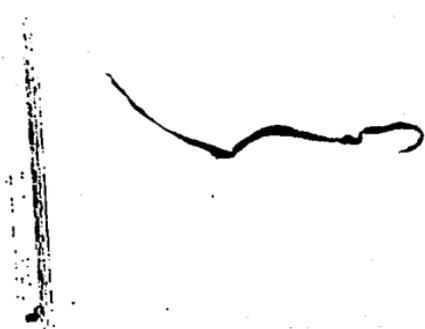
Todos los espejos han sufrido un daño, principalmente por el ataque del agua que se difunde hacia la interfase, en la temporada de lluvias se observó un ampollamiento del aluminio y los orificios estaban rodeados de líquido, fenómeno que concluyó con el fin de las lluvias. El mecanismo de difusión del agua es desconocido, pero se supone que se realiza a través de los orificios. La difusión de agua, el manchado de la superficie

y el ensanchamiento de los orificios son las formas generales de ataque a los materiales del espejo.



Fotografía 1

Muestra 7



Fotografía 2

Muestra 8



Fotografía 3

Muestra 9



Fotografía 4

Muestra 10



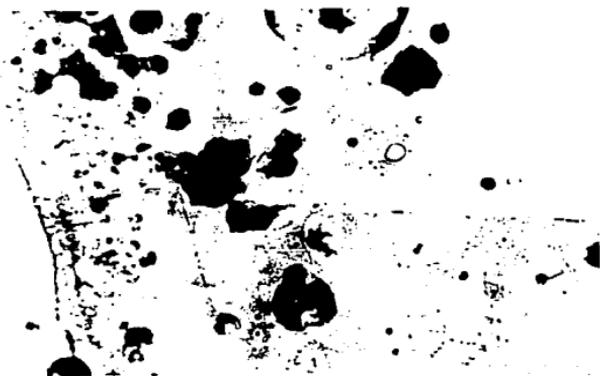
Fotografía 5

Muestra 11



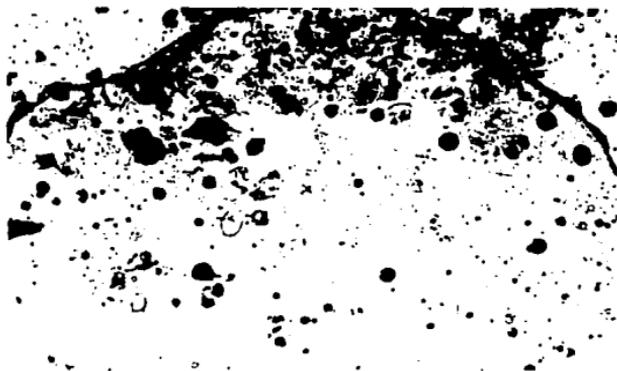
Fotografía 6

Muestra 11



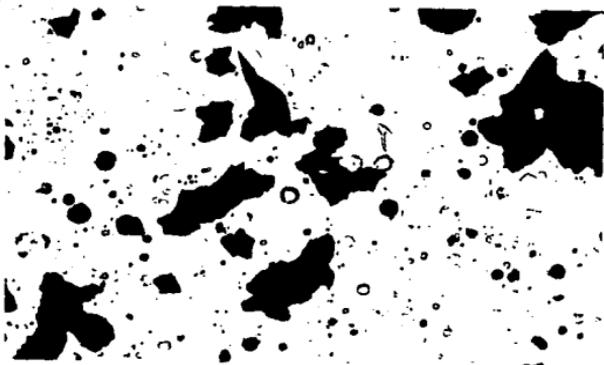
Fotografía 7

Muestra 11



Fotografía 8

Muestra 11



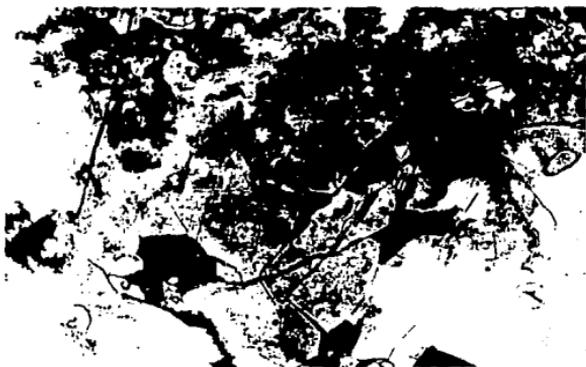
Fotografía 9

Muestra 11



Fotografía 10

Muestra 11



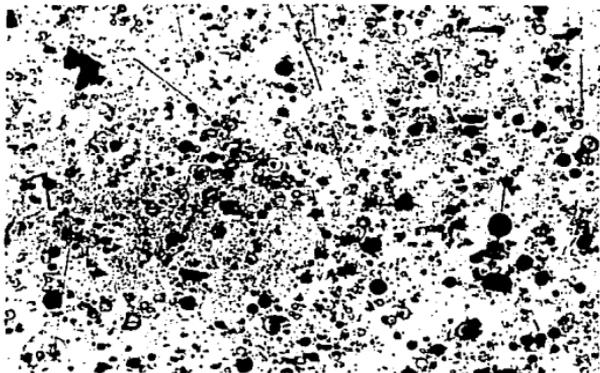
Fotografía 11

Muestra 11



Fotografía 12

Muestra 11



Fotografía 13

Muestra 11



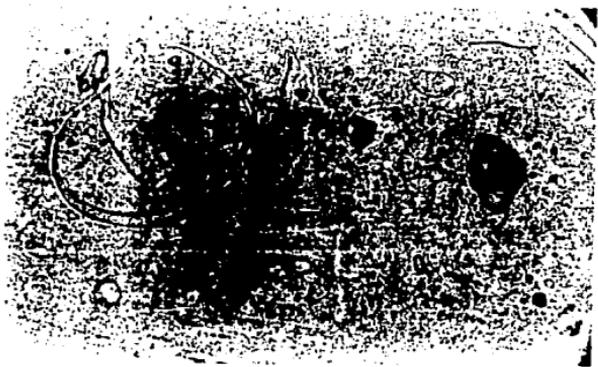
Fotografía 14

Muestra 12



Fotografía 15

Muestra 12



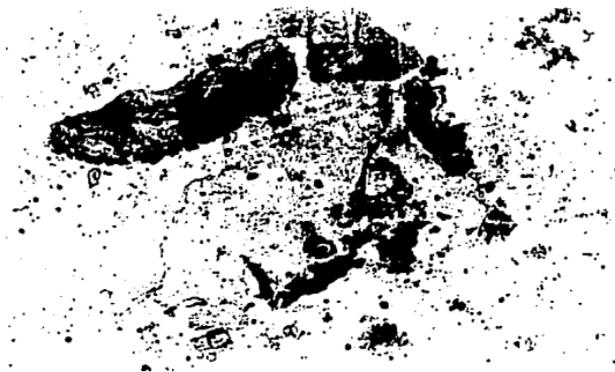
Fotografía 16

Muestra 12



Fotografía 17

Muestra 12



Fotografía 18

Muestra 12



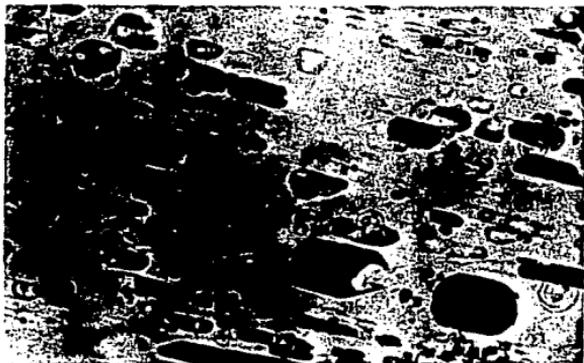
Fotografía 19

Muestra 12



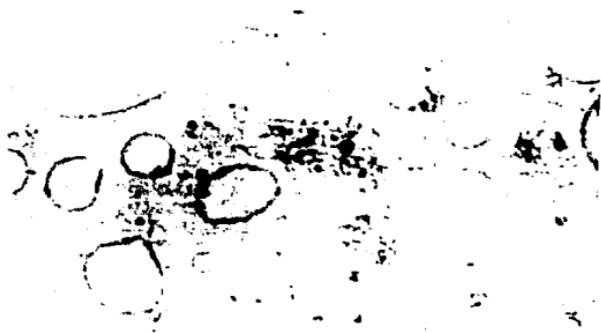
Fotografía 20

Muestra 12



Fotografía 21

Muestra 12



Fotografía 22

Muestra 13



Fotografia 23

Muestra 13



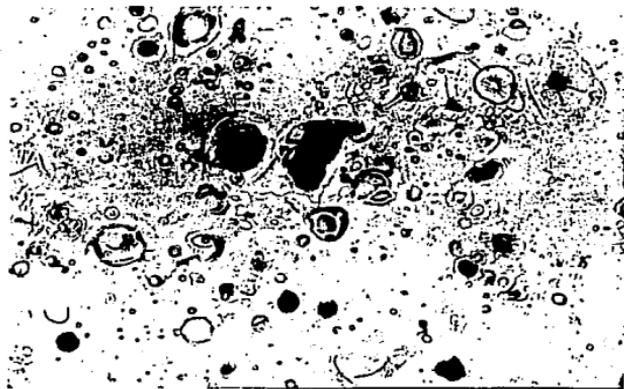
Fotografia 24

Muestra 13



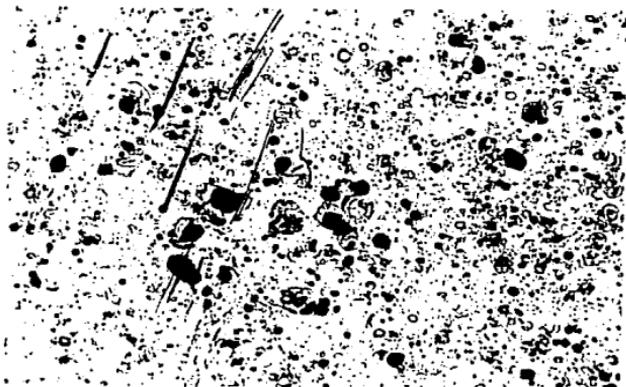
Fotografía 25

Muestra 13



Fotografía 26

Muestra 13



Fotografía 27

Muestra 13



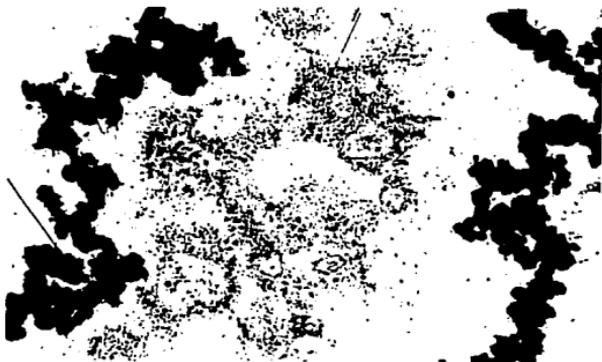
Fotografía 28

Muestra 13



Fotografía 29

Muestra 14



Fotografía 30

Muestra 14



Fotografía 31

Muestra 14



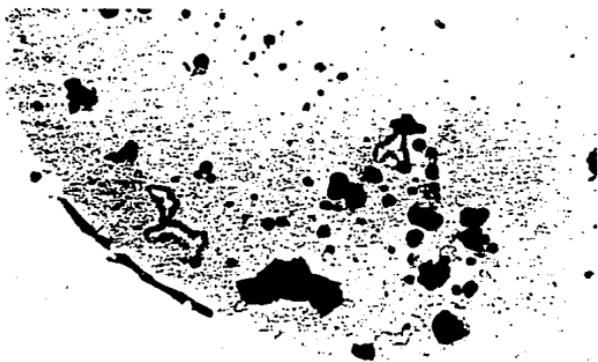
Fotografía 32

Muestra 15



Fotografía 33

Muestra 15



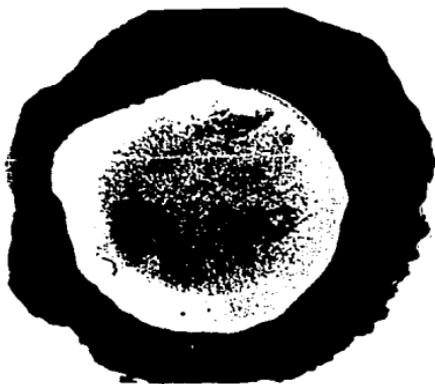
Fotografía 34

Muestra 15



Fotografía 35

Muestra 15



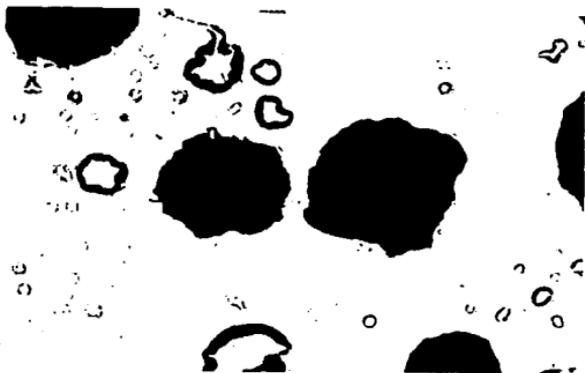
Fotografía 36

Muestra 16



Fotografía 37

Muestra 16



Fotografía 38

Muestra 17



Fotografía 39

Muestra 17



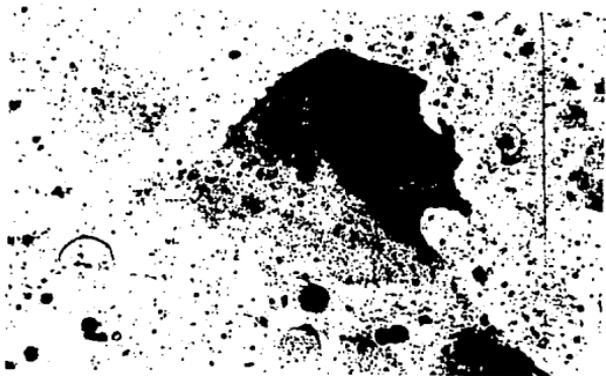
Fotografía 40

Muestra 20



Fotografía 41

Muestra 20



Fotografía 42

Muestra 20

C A P I T U L O V

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

En la mayoría de los espejos se observó un desprendimiento del material reflector y protector, este desprendimiento es ocasionado por:

1. Difusión de agua a la interfase película reflectora-sustrato, que provoca que el material se amolle y se desprenda al momento de la limpieza ó que se elimine al reaccionar con los iones disueltos en el agua.
2. Manejo inadecuado del espejo, al cual se le provocan daños mecánicos. Estos daños se realizan al manipular el espejo en el reflectómetro, el microscopio y al momento de realizar la limpieza.
3. Pobre adherencia del material reflector en el sustrato, debido a deficiente limpieza.

Un fenómeno importante es que en las muestras 1,2,3,4,5 se observa un desgaste en la película reflectora, este fenómeno se debe a que el aluminio reacciona con el oxígeno del medio, formando el óxido de aluminio, que es transparente, y por lo tanto la película se ve más delgada.

De las tres muestras de acrílico: 1,2,3; la 3 es inservible para aplicaciones solares, puesto que a 600 días de exposición tienen una reflejancia promedio de 0.50 para el anverso, lado de trabajo, y de 0.45 para el reverso. De las siguientes tres muestras la número seis (vidrio aluminizado -

con película protectora de  $\text{Si}_2\text{O}_3$ ), es la que ha tenido mejor comportamiento manteniendo su reflejancia promedio en aproximadamente 0.850 para el anverso y en 0.700 para el reverso. Es difícil establecer el comportamiento de las siguientes muestras porque se tienen pocos datos de reflejancia y en algunos casos se carecen de ellos. Los valores promedio de las reflejancias de la mayoría de los espejos es baja, principalmente de la muestra 9 en adelante, para aplicaciones solares, siendo los valores ideales mayores o iguales a 0.90.

En todos los espejos se observó la difusión de agua hacia la interfase material reflector-vidrio, siendo más acentuado este fenómeno en temporada de lluvias, lo que ocasiona ataque al material reflector y protector, este ataque se presenta en forma de manchas de color negruzco, café y amarillento.

La difusión de agua se realiza a través de los pequeños orificios, característicos en todos los espejos, esta difusión de agua provoca que los orificios aumenten de tamaño. En conclusión, el agua es la principal causa del deterioro de los espejos.

## RECOMENDACIONES

Se ha logrado un gran avance en la investigación del efecto del medio ambiente sobre los espejos, aún cuando todavía no se desarrolla el espejo óptimo.

Todos los espejos desarrollados, más que menos, presentan orificios, es decir las películas depositadas sobre él no son continuas. Estos orificios se pueden deber a:

1. Impurezas del material reflector, que no tienen adherencia en el sustrato.
2. Suciedad depositada al momento de instalar, dentro de la cámara de alto vacío, el aluminio, el SiO y el sustrato. Estos contaminantes grasosos se evaporan primero, depositándose sobre el vidrio y por tanto evitan que se adhiera el material reflector.
3. El filamento de tungsteno, que se utiliza como crisol para evaporar el aluminio está muy usado.

Para que la vida útil del espejo se incremente, es indispensable que se eliminen los orificios, porque se ha observado que por ellos se difunde agua hacia la interfase material reflector-sustrato y material reflector-película protectora - que provoca que los materiales se desprendan poco a poco. - El agua filtrada contiene iones disueltos que atacan al aluminio generando gases que provocan el ampollamiento y fractura de la película protectora y reflectora, las que se despre-

den al lavarse la muestra.

Los orificios son sitios idóneos para el ataque de las sustancias presentes en el ambiente, provocando corrosión en el material. Entre los compuestos que pueden provocar corrosión están:

Ozono. Que ataca al aluminio en presencia de humedad. A bajas concentraciones, el ataque al aluminio es débil y se presenta en forma de picaduras. A mayores concentraciones, este ataque se intensifica.

Cloro. El cloro gaseoso seco, así como el cloro líquido no tienen acción sobre el aluminio, pero en presencia de humedad el ataque se hace muy fuerte, con formación de picaduras importantes.

Acido sulfúrico. Las soluciones diluidas de  $H_2SO_4$  (hasta - 20%) disuelven lentamente el aluminio a temperatura ambiente.

Dióxido de azufre. A temperatura ambiente, el gas húmedo sólo provoca un ligero ataque del metal. El anhídrido sulfuroso es muy soluble en agua formando el ácido sulfuroso, que ataca al metal.

El siguiente resultado que llama la atención es la nula influencia del polvo sobre la reflejancia. Se puede incluso recomendar que el lavado se efectúe dos veces por mes, cuando mucho. Lo anterior es cierto, para un ambiente urbano como el de la Ciudad de México.

Los valores iniciales de reflejancia, sobre todo desde la muestra 9, son bajos para usarse como espejo en energía solar. Se requieren valores de 0.90 o mayores que son posibles de alcanzar siempre y cuando se use plata como película reflectora. Sin embargo la plata tiene otros problemas que requieren resolverse antes de poder usarse.

Algunas muestras, por ejemplo la 15 y 20, mostraron una pobre adherencia lo cual se sabe es ocasionada por una deficiente limpieza del sustrato, para superar esta deficiencia se evalúan nuevas técnicas, por ejemplo el pulido con un abrasivo, como el óxido de cerio y el lavado con una mezcla de metanol-potasa, las que pueden resultar efectivas y de gran utilidad. No es recomendable el lavado con detergente roma y/o vel-rosita, porque estos detergentes eliminan superficialmente los contaminantes grasosos, por lo cual se deben evitar completamente. El lavado con ácido fluorhídrico tampoco se recomienda porque es probable que queden residuos en los orificios de la estructura del vidrio, que con el tiempo dañen la película.

Se sugiere que la limpieza con descarga luminosa se realice con oxígeno, ya que se ha comprobado que los mecanismos de limpieza son más efectivos en presencia de este gas.

C A P I T U L O V I

-----

A G R A D E C I M I E N T O S

Un especial reconocimiento al *Dr. Rafael Almanza*, investigador del Instituto de Ingeniería, por sus valiosas aportaciones en la realización del trabajo. Al *Sr. Gabriel Mendoza*, trabajador del mismo Instituto, que ayudó en la elaboración de los espejos investigados.

Al *Sr. Francisco Calderón*, encargado del Laboratorio de Nitruración Iónica, del Instituto de Física de la UNAM, lugar donde se elaboraron los espejos.

A *I.M. Marina Ramírez y J. Hector Llamas Ch.*, becarios del Instituto de Ingeniería, por su ayuda y compañerismo.

A la *Sra. Rosa María Galindo* que mecanografió este trabajo.

Mi agradecimiento al Instituto de Ingeniería por las facilidades otorgadas para la realización de mi tesis.

C A P I T U L O   V I I  
= = = = =

BIBLIOGRAFIA.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Manrique J.A., "Energía Solar Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas", Ed. Harla, México 1984.
2. González Hurtado., "Energía Solar" Ed. Alhambra S.A., - España 1984.
3. Almanza R., Valdez A., López S., "Concentradores Solares" Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, 1981.
4. Almanza R., Mazari M., Muñoz F., "Desarrollo de Espejos para Aplicaciones de la Energía Solar", Proyecto 6135, - Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, 1987.
5. Almanza R., Mazari M., Muñoz F., "Espejos de Primera superficie con Películas Delgadas", Proyectos 7125 y 8112, Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM 1988.
6. Tejada G. Carlos, "Determinación de Propiedades Ópticas de Materiales para el Aprovechamiento de la Energía Solar", Tesis Fac. de Química, UNAM, 1978.
7. Vitro J. Jr and Shelby J.E., "Solarization of heliostat glasses", Solar Energy Materials Vol. 3, No. 1, 2, Septiembre 1980.
8. Farrington Daniels, "Uso directo de la Energía Solar" H. Blume Ediciones, España 1978.

9. Goodyear K, John and Lindberg V.L., Low absorption float glass for back surface solar reflector. *Solar Energy - Materials* Vol. 3, Sept. 1980.
10. Almanza R. y Muñoz F., "*Utilización de la Energía Solar en Comunidades Rurales*", Publicación 490 de las Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, 1985.
11. Chopra L. Kastury, "*Thin Film Phenomena*", New York 1969
13. Duffie J.A. and Beckman W. A., "*Solar Energy Thermal Processes*", John Wiley and Sons, New York 1974.
14. Mills B.E., Surface studies of corrosion in second surface silver heliostat mirrors, *Solar Energy Materials* - Vol. 3, Sept. 1980.
15. Juniére P., Sigwalt M., "*Aplicaciones del aluminio en las Industrias Química y Alimenticias*", Ediciones URMO, España 1966.
16. Perry H. Robert, "*Manual del Ingeniero Químico*", Mc Graw Hill Book Co., Quinta Edición, Vol. 3, México 1985.
17. Encinas Manuel P., "*Enérgéticos y Desarrollo Tecnológico*", Ed. Limusa, México 1979.
18. Salmang Hermann, "*Fundamentos Físico-Químicos de la Fabricación del Vidrio*", Ed. Aguilar, Madrid 1962.
19. Piatti Luigi, "*Materiales de la Ingeniería Química*" Edi

- ciones URM0, España 1973.
20. Bukwalter C. Q. and Mc Vay G.L., Inhibiting degradation of wet process manufactured solar mirrors, Solar Energy Materials Vol. 3, Sep 1980.
  21. Morris L. V., Cleaning agents and techniques for concentrating solar collectors, Solar Energy Materials Vol. 3 Sep 1980.
  22. Marion R.H., The use of thin glass reflectors for solar concentrators, Solar Energy Materials Vol. 3, Sep. 1980.