

24
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**FABRICACIÓN Y PRUEBAS DE
INTEMPERISMO DE ESPEJOS DE ALUMINIO
OPTIMIZADOS PARA PLANTAS SOLARES
GENERADORAS DE ELECTRICIDAD**

T E S I S

Que para obtener el título de
INGENIERO QUÍMICO

Presenta:

Genaro Alberto Correa Miranda

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

México, D.F., 1993



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

Índice

1. Introducción	4
2. Descripción del Equipo	11
Presión y Vacío	
Sistemas de Bombeo	
Sistema Generador de Vacío	
Cámara de Evaporación	
Cañón de Electrones	
Medidor de Espesores	
Cátodo para Descarga Luminosa	
3. Preparación de los Espejos	22
Tipos de Vidrio	
Limpieza del Sustrato de Vidrio	
Evaporación del Aluminio y Óxido de Silicio	
4. Propiedades de los Espejos	34
Medición de sus Propiedades Ópticas	
Adhesión entre el Vidrio y las Películas	
Resistencia a la Abrasión	
5. Pruebas de Intemperismo	54
Generalidades	
Pruebas con Humedad	
Ciclo Térmico	
Alta Temperatura	
Inmersión en Solución Salina	
Atmósfera de Bióxido de Azufre	
Pruebas de Abrasión	
6. Discusión de Resultados	67
Características de la Película Protectora	
Influencia de la Evaporación y el Espesor de Aluminio en la Reflejanca	
Espesores Óptimos para las Películas	
Limpieza en el Vacío	
Pruebas de Intemperismo	
7. Conclusiones y Sugerencias	78
8. Referencias y Bibliografía	83
9. Anexo	86

INTRODUCCIÓN

Es indiscutible en la actualidad la importancia de los combustibles fósiles en el mundo; cabe señalar que el 90% de toda la energía primaria se deriva del carbón, petróleo y gas natural. Sólo para la generación de electricidad, representan el 66%, y de éstos, 2/3 pertenecen al carbón, es decir el 44% del total. [1]

Esta posición dominante se ha visto amenazada a causa de las emisiones contaminantes resultantes (SO_2 , NO_x y CO_2), sustancias responsables de la lluvia ácida, smog y calentamiento de la atmósfera.

Sin embargo, y aún conociéndose los daños que representa el quemarlos, no se espera que esto cambie pronto cuando uno observa las reservas probadas de dichos energéticos. A los niveles actuales de consumo en el mundo, el carbón puede durar 230 años, el petróleo 40 y el gas 60. Y si suponemos un incremento anual en la demanda del 2%, entonces las reservas tardarán en agotarse 90, 30 y 40 años respectivamente. En el caso de México, es conocido que no posee gran cantidad tanto de gas natural como de carbón y las reservas de petróleo son para poco menos de 60 años[3].

Entonces la pregunta acerca del futuro de los combustibles fósiles en la generación de electricidad se restringe a: ¿Cómo puede la tecnología empleada en las carboeléctricas disminuir las emisiones?.

Actualmente las carboeléctricas, las plantas más usadas a nivel mundial, conocidas como PFC (Pulverized Fired Coal), siguen ofreciendo un proceso económico, viable y eficiente, pero con el inconveniente de que son muy contaminantes. Ahora bien, se encuentran en etapa de desarrollo, tecnologías capaces de satisfacer las exigencias ambientales actuales, junto con una generación de electricidad más económica aún incluso bajo requerimientos más severos en cuanto a emisiones se refiere.

Las principales son:

- Combustión Atmosférica en Lecho Fluidizado (AFBC)
- Combustión Presurizada en Lecho Fluidizado (PFBC)
- Gasificación con Ciclo Combinado Integrado (IGCC)

Sin embargo, estos desarrollos, el diseño final, su construcción y obtención de una experiencia de operación -prerrequisito para obtener altos niveles de seguridad- tomarán tiempo, de 10 a 20 años.

Como se puede observar, es de esperarse que continuarán desarrollándose versiones nuevas del proceso de combustión directa del carbón junto con ciclos combinados con gas. Y el problema de remover partículas, cenizas y vapores de metales alcalinos de los gases generados está lejos de resolverse[1].

El gobierno y otras compañías en el extranjero están comenzando a comprender que se necesita una política de apoyo al ahorro energético que permita a las nuevas tecnologías librar las barreras del mercado. En México, aunque no se tenga carbón, en los próximos años se instalarán carboeléctricas, importando el carbón de Australia e Indonesia, para así disminuir el consumo de derivados del petróleo, ya que este tiende a agotarse con rapidez.

La perspectiva promisorio para los sistemas solares generadores de electricidad, al inicio de la década pasada, se vino abajo con la caída de los precios del petróleo. La tecnología solar no soportó el abaratamiento de la generación de electricidad con combustibles fósiles.

Los expertos se muestran optimistas por el resurgimiento de dichas tecnologías en los próximos 5 años, pues los mismos argumentos que les dieron origen siguen válidos: *fluctuaciones en el precio de los combustibles, disminución de las reservas y fluctuaciones en el suministro de los mismos*; además de *las restricciones a nivel internacional que exigen la reducción de la contaminación* [2].

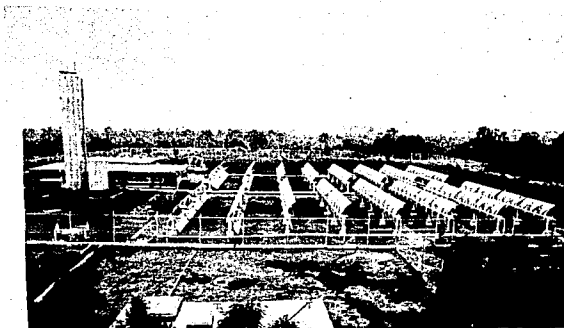
Este resurgimiento no será solo en sistemas grandes de colectores solares tipo canal parabólico; también se dispondrá de torres de energía solar hacia el final de la década, como proyectos avanzados. Por lo que respecta a los sistemas pequeños, no hay que olvidar a los discos solares con aplicaciones en sitios remotos, dispositivos tan económicos como los sistemas fotovoltaicos y con un potencial promisorio en cuanto a la reducción de su costo, que avanza más rápidamente que para los fotovoltaicos.

Hay que resaltar que, la tecnología de canal parabólico ya está desarrollada, sólo se busca perfeccionarla y abaratarla, por ello, resulta una opción muy atractiva a corto plazo. En la actualidad se tienen 9 plantas de este tipo trabajando en el desierto de Mojave, que proporcionan un total de 350 MW; y cuyos espejos abarcan un área total de 2,600,000 m².

Bajo este panorama surge la idea del presente proyecto, patrocinado por el Programa Universitario de Energía (PUE) y con gran interés por parte de la Comisión Federal de Electricidad. Uno de los objetivos es mejorar la técnica de preparación de los elementos ópticos, para alargar su vida útil; pues existe como antecedente una planta solar de 10 kW en la UNAM y en la que se presentó una resistencia a la corrosión relativamente corta por parte de los espejos ahí instalados.

Este trabajo comprende el desarrollo y progresos de la segunda generación de espejos de Al-Si₂O₃ de primera superficie, etapa final de una serie de proyectos realizados en los Institutos de Ingeniería y de Física de la UNAM.

▪ Véase página 31.



Planta solar de 10kW, con concentradores de tipo canal parabólico. Ubicada en el Vivero Alto, Ciudad Universitaria, U.N.A.M.

Como se menciona en la bibliografía, los espejos de aluminio de primera superficie poseen numerosas ventajas sobre los espejos de segunda superficie:

- ❑ *No se hace necesario emplear sustrato de vidrio de baja absorción. El cual no se fabrica en México.*
- ❑ *La protección de la película de aluminio se efectúa automáticamente con la película de vidrio que se le deposita*
- ❑ *Se tiene una alta reflexión desde el UV hasta el IR, pasando por el visible; siendo superior al espejo de plata en la región UV*
- ❑ *Se obtiene una mejor adherencia del aluminio al sustrato, disminuyendo con ello problemas por corrosión.*
- ❑ *Resistencia física a la abrasión*
- ❑ *Facilidad de limpieza*

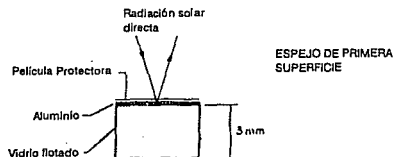
Estos espejos, que emplean vidrios comunes, se constituyen en una opción económicamente viable para fabricar los materiales reflejantes necesarios en concentradores solares.

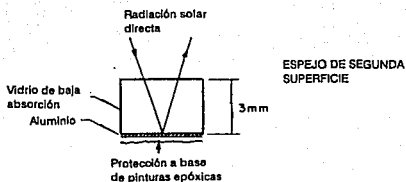
En 1986, el Instituto de Ingeniería desarrolló la primera generación de espejos de aluminio de primera superficie, utilizando evaporación térmica al vacío y evaporación reactiva. Sin embargo, el aluminio depositado con estas técnicas dio malos resultados, por ejemplo, aparición de microagujeros en la película de aluminio desde donde se iniciaba la corrosión.

Bajo estas circunstancias, la segunda generación de espejos se desarrolló aplicando técnicas de evaporación por medio de un cañón de electrones. Este trabajo presenta los resultados finales en la investigación por lograr espejos de primera superficie de alta calidad. En esta última etapa, se utilizaron dos cañones de electrones; uno de ellos para evaporar exclusivamente aluminio, minimizándose la formación de microagujeros. El segundo se empleó para evaporar óxido de silicio, que se constituye como la capa protectora.

Con esta técnica se evita tener que abrir la cámara de evaporación, cuando se cuenta con un solo cañón, entre cada una de las evaporaciones para hacer el cambio de la sustancia a evaporar, evitándose así la contaminación del espejo al romperse el vacío y permitir la entrada de aire. Con esto se pueden producir películas de Aluminio y Si_2O_3 de alta calidad y reducir o evitar corrosión de los espejos al introducirse contaminantes durante el cambio de crisoles.

Los espejos de primera superficie consisten en dos películas: una *metálica reflectora*, normalmente plata o aluminio y otra *altamente transparente y protectora*. Ambas depositadas en sucesión sobre un sustrato de vidrio.





El aluminio se adhiere bien a la superficie del vidrio y no se opaca al exponerse al aire; por su parte, los óxidos de silicio poseen una gran afinidad por la película de Al, convirtiéndose entonces en una excelente capa protectora, su espesor es de 2,000 a 2500 Å, el doble de lo que se deposita de aluminio.

Nunca antes se habían realizado investigaciones en el campo de la energía solar, de películas frontales de vidrio sobre la película reflejante, por lo que esta técnica resulta innovadora y muy atractiva para llevarse a nivel industrial.

La técnica de preparación del sustrato es determinante para la durabilidad del espejo, pues una limpieza deficiente del vidrio disminuye la adherencia de la película reflejante, debido a la presencia de agentes contaminantes, acortando el tiempo de operación de los espejos.

La calidad de estos espejos tiene que ser sumamente alta, ya que tendrán que soportar condiciones meteorológicas extremas, puesto que las zonas más viables para la instalación de una planta solar son aquellas en las que se presente una elevada insolación. Para el caso de nuestro país, estas condiciones se reúnen en la parte norte y centro.

Una vez conseguida la fabricación de espejos con alta reflejancia y pocas zonas con microagujeros, se procedió a la realización de pruebas de intemperismo, las cuales reducen el tiempo de exposición a 2 ó 3 meses en lugar de 1 ó 2 años, tiempo que se requeriría si estuvieran expuestos únicamente al medio ambiente, como fue el caso de las etapas anteriores[7, 8, 13].

Para ello, se utilizó la cámara que para este fin tiene el Instituto de Ingeniería.

Se sometieron los espejos a varias pruebas:

Ciclos térmicos

Medio salino

Atmósferas altamente corrosivas

Exposición a la atmósfera real

Alta temperatura

Con un tiempo de permanencia en cada prueba de 2 a 3 semanas, y evaluando periódicamente su reflejancia hemisférica total por medio de un reflectómetro solar tipo SSR de la compañía Devices & Services. Además de efectuar una observación directa de las condiciones del espejo.

De esta forma, y de acuerdo con los resultados que se muestran en esta tesis, resulta una posibilidad real y práctica el construir una planta solar generadora de electricidad en nuestro país -desde el punto de vista técnico- puesto que se han logrado elaborar espejos durables y con propiedades ópticas adecuadas para tal fin. Sólo restaría hacer un estudio previo de factibilidad económica y un escalamiento a planta piloto, para así traducir este proyecto del papel a una realidad tangible.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Antes de iniciar la descripción de los equipos, es conveniente repasar brevemente algunos conceptos que más adelante se utilizan.

PRESIÓN Y VACÍO

La presión de un gas es una característica de la acción de sus moléculas sobre las paredes del recipiente que lo contiene. Depende del número y velocidad promedio con que chocan, y, como la presión depende de la energía cinética de las moléculas, también lo es de la temperatura. Si el número de moléculas en el recipiente disminuye, la presión será menor, aumentará la distancia de separación entre ellas, haciendo mayor el camino o trayectoria media libre, la cual es inversamente proporcional a la presión. Por lo tanto, en un volumen se tendrá alto vacío si la trayectoria media libre de las moléculas que lo ocupan es mayor que las dimensiones del recipiente [14].

Un vacío ideal es un espacio que no contiene partículas, gases, vapores u otra materia y que, consecuentemente, no tiene presión. Pero esta condición no existe, por lo que no se puede obtener un vacío ideal. Por tanto, un vacío fabricado es expresado en términos de comparación con la presión atmosférica. En general, se dice que un recipiente se encuentra al vacío cuando la presión en el mismo es inferior a la atmosférica. Para medidas de vacío o presión parcial, las unidades de uso más común son los Torr y mTorr, siendo el Torr equivalente a un mm de mercurio. Ambas se refieren a la altura de una columna de mercurio mantenida por la diferencia entre la presión atmosférica y un nivel de vacío o presión parcial alcanzada.

Las mejores cámaras de vacío están construidas de materiales resistentes a la oxidación, tal como los aceros inoxidable de la serie 300. Las cámaras pueden construirse también de aceros al carbono con un recubrimiento adecuado, debido a que cuando los aceros al carbono son expuestos al vacío se desoxidan, y al reexponerlos a las condiciones atmosféricas normales su vuelven a oxidar rápidamente, lo que afecta la eficiencia del sistema de bombeo.

SISTEMAS DE BOMBEO

Las cámaras de vacío se pueden evacuar con varios sistemas de bombeo, los cuales deben ser capaces de alcanzar y mantener la presión especificada. El sistema de bombeo se escoge de acuerdo con la presión y volumen de gas, es decir, la velocidad de bombeo requerida para un proceso específico considerando el tamaño de la cámara de vacío.

Los sistemas de bombeo se dividen en dos subsistemas: las bombas de prevacío (mecánica), las cuales pueden evacuar el gas desde la presión atmosférica hasta una presión de 10^{-3} Torr y las bombas de alto vacío (difusión, iónica, sublimación y criogénica), que por no tener manera de expulsar los gases directamente a la atmósfera, requieren vacíos previos del orden de 10^{-2} Torr, logrando de esta manera presiones comprendidas entre 10^{-3} y 10^{-10} Torr.

La figura 2.1 muestra los intervalos de presiones en relación con la atmosférica y los intervalos de operación de las bombas más comunes.

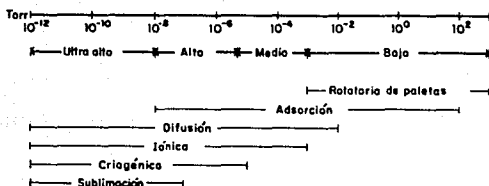


Figura 2.1. Comparación de intervalos de vacío y de operación de las bombas más comunes

Los equipos principales, empleados para la fabricación de los espejos solares fueron los siguientes: sistema generador de vacío, cámara de evaporación, dos cañones de electrones y un medidor de espesores.

SISTEMA GENERADOR DE VACÍO

El sistema generador de vacío está formado por una bomba de pre-vacío y otra de alto vacío.

La **bomba de pre-vacío** evacua el gas del interior de la cámara de evaporación hasta una presión de 10^{-3} Torr. Es una bomba de desplazamiento positivo con sellos que permiten la operación hasta 25 mTorr, pueden descargar el gas del interior de la cámara directamente a la atmósfera (fig. 2.2). En cada ciclo, un volumen del gas del sistema cerrado se expande y es atrapado dentro de una cámara de la bomba. Entonces, es comprimido por el movimiento de las aspas, paletas o pistones en el interior de la bomba y expelido a través de una salida equipada con una válvula de descarga.

El tipo que se usó en este trabajo de investigación fue una bomba mecánica rotatoria de paletas en aceite marca Sargent Welch, modelo 1397; con una capacidad de 500 L/min y capaz de alcanzar una presión de 10^{-2} Torr en una hora.

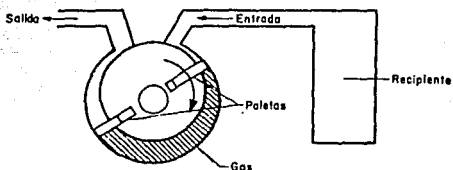


Figura 2.2. Diagrama esquemático de una bomba mecánica rotatoria.

Las bombas de alto vacío normalmente no cuentan con partes mecánicas móviles. A bajas presiones, es difícil de extraer el gas con bombas mecánicas, pues el efecto de llenar rápidamente cualquier volumen desaparece; por eso la difusión de las moléculas dentro de la garganta de la bomba debe ser fácil para impartirles, por transferencia de momentum, una dirección de movimiento preferente [8]. Para conseguir niveles de vacío menores a 10^{-3} Torr generalmente se usan bombas de difusión de vapor; dichas bombas emplean un chorro de moléculas pesadas (aceite de baja tensión superficial o mercurio) que golpean a las moléculas de gas empujándolas en la dirección de salida de la bomba. fig 2.3.

El ciclo de operación consiste en que el aceite se calienta en la parte inferior y el vapor formado se fuerza a subir dentro del calentador hasta las toberas, donde es expulsado y cae arrastrando moléculas de gas, se condensa sobre las paredes de la bomba y conduce a las moléculas de gas hacia un punto donde pueden ser removidas por la bomba mecánica de pre-vacío. El enfriamiento de las paredes se hace con agua.

Las moléculas de aceite deben ser muy estables y pesadas para lograr transmitir una velocidad máxima a las moléculas de gas. Los aceites especiales son muy útiles para trabajar a bajas presiones de vapor (10^{-7} Torr), no son tóxicos y presentan un buen comportamiento al estar en contacto con diversos materiales usados en la construcción de sistemas de vacío, pero pueden romperse molecularmente cuando se calientan y exponen al aire [8].

Para reducir el regreso de las partículas de la bomba de difusión hacia la cámara se usa una trampa criogénica. Consiste en un arreglo de pantallas y paredes, enfriadas con aire o nitrógeno líquidos, que tienen la función de condensar las moléculas de los gases y vapores del aceite. Su eficiencia aumenta a medida que la temperatura del refrigerante disminuye.

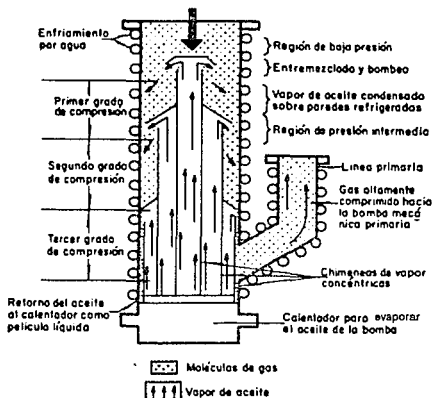


Figura 2.3. Bomba de difusión de vapor de aceite.

En el laboratorio de Implantación de Iones del Instituto de Física de la UNAM, lugar donde se realizó esta parte del trabajo experimental, se cuenta con una bomba de difusión de aceite, marca Leybold; su capacidad es de 4,000 L/s y utiliza aceite de baja tensión superficial tipo D.G.704. Se puede alcanzar con este equipo una presión de 1 a 4×10^{-5} Torr. El sistema de vacío tiene dos válvulas de plato (fig. 2.4), una localizada en la línea primaria y otra que conecta a la bomba de difusión con la bomba mecánica (válvula 1). En la línea primaria, entre la válvula 2 y la bomba de difusión se encuentra la trampa criogénica, enfriada con nitrógeno líquido y cuya función ya se mencionó.

CÁMARA DE EVAPORACIÓN

La cámara de evaporación consiste en un tanque de acero al carbón sin recubrimiento interno, con un volumen de 1.7 m^3 . Originalmente fue diseñada para la implantación de iones pesados y aluminizado.

Cuenta con ventanas que sirven para observar el desarrollo de las pruebas, así como también para colocar dispositivos y medidores de vacío, entre otros. Una de las tapas constituye el acceso y cuenta con sellos, para evitar la entrada de gases de la atmósfera al interior.

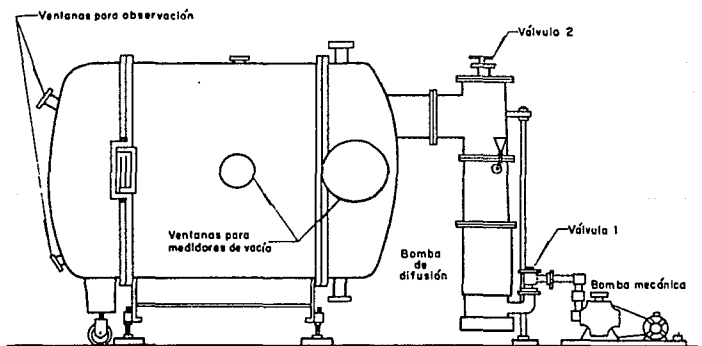


Figura 2.4. Cámara de evaporación.

CAÑÓN DE ELECTRONES

Los dos cañones de electrones se encargan de suministrar energía a una sustancia para evaporarla en vacío; dicho suministro se hace por medio de un bombardeo de electrones. Este dispositivo genera un flujo de electrones mediante un filamento de tungsteno, son acelerados y enfocados sobre la superficie de la sustancia a evaporar, gracias a la aplicación de campos eléctricos que van de 4 a 10 kV.

Para el funcionamiento de los cañones se requiere una corriente mínima del haz de 10 mA. Al chocar los electrones sobre la sustancia, la mayor parte de la energía cinética de las partículas se convierte en calor, y por lo tanto se pueden alcanzar temperaturas que exceden los 3,000 °C. Puesto que la energía cedida se realiza con partículas cargadas, es posible concentrarlas para incidir sobre la sustancia de manera que existan partes que queden a baja temperatura, sobre todo las que entran en contacto con el crisol. Gracias a esto, las interacciones que pudieran existir entre el evaporante y el crisol pueden reducirse en gran medida.

Existe una gran variedad de arreglos [18 y 20], y pueden clasificarse de acuerdo con la técnica usada para sostener al evaporante. Para nuestro caso, el cañón empleado es el de trayectoria curva; esto significa que el haz sigue una trayectoria de este tipo a causa de la aplicación de un campo magnético perpendicular a su trayectoria. Este campo magnético se suministra por un imán permanente.

Como fuente de electrones se emplea un alambre de tungsteno, que mantiene su forma y solidez a las altas temperaturas. La vida media del filamento está limitada por las reacciones posibles con los vapores del evaporante y por la erosión iónica debido a la incidencia de iones positivos de alta energía.

Cuando al filamento se le induce corriente empieza a liberar electrones, para esto se requiere un alto voltaje, que va a partir de cero hasta llegar al requerido, de aproximadamente 4 kV. Una vez liberados, los electrones llegan al campo magnético que existe entre las 2 placas de hierro (Fig. 2.5); de ahí, la velocidad del electrón se vuelve constante y su trayectoria se desvía, dirigiéndose al centro del crisol en donde se va a evaporar al material en experimentación. En el instante en que los electrones tienen contacto con la sustancia a evaporar, toda su energía cinética se transforma en energía calorífica, la cual, a estos valores de energías (4keV) permite que se logren temperaturas

del orden de 3,000 °C; de manera que se pueden evaporar metales refractarios y óxidos.

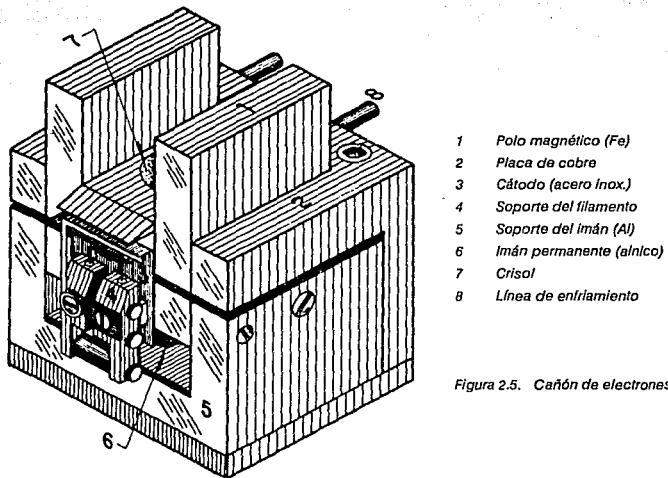


Figura 2.5. Cañón de electrones

En la figura 2.6 se observa la ubicación dentro del tanque de los cañones de electrones. Cada cañón posee un crisol que contiene la sustancia a evaporar, los crisoles son de diferentes materiales; para evaporar aluminio se utiliza uno de nitruro de boro, el otro está hecho de grafito y se utilizó en la evaporación del óxido de silicio. La razón de emplear dos materiales distintos obedece a que el grafito no reacciona con el mencionado óxido, inclusive estando al rojo vivo (durante la evaporación, debido a que es necesario conseguir una alta temperatura, los crisoles adquieren dicho estado), otro tanto ocurre con el BN y el aluminio. Los crisoles descansan sobre una placa de cobre de 1.2 cm de espesor, en cuyo interior se encuentra una tubería del mismo material que conduce agua de enfriamiento, para evitar que al calentarse empiece a evaporar algunas partículas de cobre; asimismo, esta placa fue horneada para evitar un desprendimiento de gases provocado por posibles impurezas.

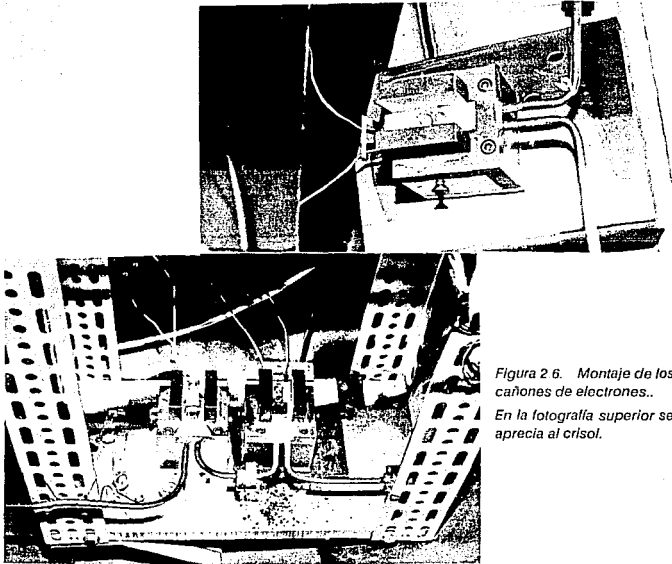


Figura 2 6. Montaje de los cañones de electrones..
En la fotografía superior se aprecia al crisol.

MEDIDOR DE ESPESORES

El medidor de espesores es un dispositivo que, en cualquier momento durante las evaporaciones, nos permite verificar el grosor de las películas depositadas. Opera, ya sea determinando el peso del depósito, o mediante la detección del cambio de la frecuencia oscilatoria de un cristal pequeño de cuarzo, sobre el que se condensa el evaporante.

En nuestro caso, el sensor de cuarzo -instalado dentro de la cámara y junto a los vidrios- se conectó a un monitor de espesores, modelo QM-301. De esta forma, es posible estimar la velocidad de deposición y ajustarla con sólo aumentar o disminuir la corriente eléctrica que llega a los cañones.

Los vidrios y el medidor se encuentran a alrededor de 40 cm de altura respecto a los cañones, sostenidos por una estructura metálica adecuada para dicho fin.

CÁTODO PARA DESCARGA LUMINOSA

Un cátodo circular de 90 cm de diámetro, fabricado a partir de una barra de aluminio, se suspende en el interior de la cámara de evaporación, cercano a los vidrios y aislado de las paredes del tanque. Se conecta a una fuente de alto voltaje de corriente directa capaz de alcanzar 5,000 volts y 1,000 mA. Se utiliza para realizar la última etapa en la limpieza de los vidrios, ionizando las moléculas de oxígeno que son introducidas al interior de la cámara, formando un plasma; dichos iones, bombardean la superficie de los vidrios desorbiendo gases que aún estén presentes.

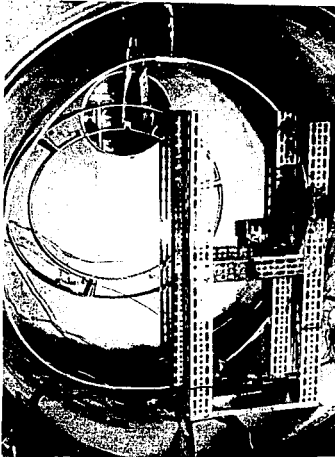
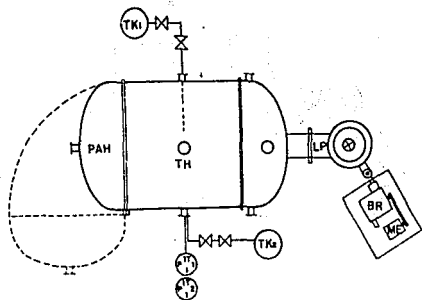
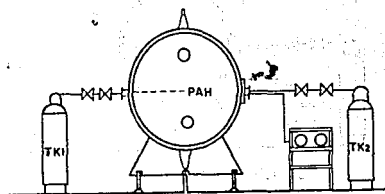


Figura 2.7. Vista interior de la cámara.

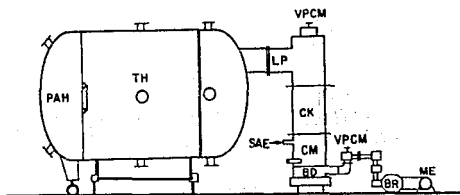
Se observa el cátodo circular de aluminio y la estructura que soporta tanto a los espejos como a los cañones.



PLANTA



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

- TK Tanques de almacenamiento de gases
- BD Bomba de difusión
- BR Bomba rotatoria
- ME Motor eléctrico
- TH Tanque horizontal
- LP Línea principal
- CK Condensador
- CM Serpentin
- PAH Puerta de acceso
- SAE Sistema de agua de enfriamiento
- VPCM Válvula de plato

Equipo completo de la cámara para evaporación térmica (alto vacío) (Esquemático)

PREPARACIÓN DE LOS ESPEJOS

Tipos de Vidrio

El material más comúnmente usado en aplicaciones solares es el vidrio, a causa de su transparencia, costo y comercialización. Sólo se deteriora ligeramente con los agentes atmosféricos y responde eficientemente a los esfuerzos mecánicos (dilatación y compactación). Un inconveniente que presenta es su densidad, pues para sostenerlo en una instalación solar se requieren estructuras grandes y fuertes; además de su conocida fragilidad la cual dificulta su manejo.

La absorbancia del vidrio depende de su composición química. Las principales fuentes de absorción las constituyen los iones Fe^{2+} (absorben a una longitud de onda de 1,100 nm) y Fe^{3+} (300 nm). Una forma de identificar al vidrio con alto contenido de hierro es mirarlo por el borde: si es verde, su contenido de hierro es alto; en cambio, si el contenido de hierro es bajo, presentará una tonalidad azul o gris [11].

Un tipo de vidrio que se recomienda ampliamente por sus características es el vidrio flotado [8, 16, 17]. En el proceso de su elaboración, los componentes del vidrio son fundidos a una temperatura de 1610 °C. Después de pasar por varias etapas de refinamiento, donde adquiere todas sus características, el vidrio fundido es vaciado a una línea continua de estaño fundido; donde por diferencia de densidades queda sobre la superficie del estaño, resultando además con una cara esencialmente plana y un lado muy liso.

Mientras se le expone a una temperatura baja con el objeto de solidificarlo, es necesaria una atmósfera reductora para controlar la oxidación del metal fundido.

Es posible estirar el vidrio durante su proceso de solidificación, llegándose hasta el punto de fabricar láminas de vidrio flotado con espesores de 1.5 mm. Después del proceso de estiramiento, pasa por otro de recocimiento, el cual sirve para aliviar la tensión en su estructura, producto del estiramiento.

Finalmente, la lámina de vidrio ya enfriada, se pasa por una serie de cortadores suspendidos en el aire que dan la medida deseada. A continuación, se lavan y empaquetan, obteniéndose así vidrios con dos caras sumamente lisas.

Una de las caras queda con residuos de estaño, el cual es fácilmente identificable por medio de una lámpara de luz ultravioleta. Al incidir esta radiación sobre la superficie con estaño, se observa una fluorescencia característica [16].

Existen otros problemas que dependen de la composición química del vidrio, por ejemplo, la difusión de ciertos constituyentes químicos (como el sodio en el vidrio común) o absorción de algún gas, que pueden reaccionar con el aluminio depositado y, consecuentemente, disminuir su reflectividad [17]. De esta manera, se justifica el uso de desecadores y alta temperatura en el método de limpieza propuesto; puesto que así se favorece la desgasificación y eliminación de cualquier contaminante que haya penetrado.

El sustrato utilizado fue vidrio flotado comercial, pues uno de los objetivos de este trabajo era comprobar si al utilizar este tipo de material se obtenían espejos duraderos y de alta calidad; todo lo anterior aunado a su bajo costo.

En etapas anteriores del desarrollo de este proyecto [7], se había trabajado con vidrios tipo cal-sosa, vidrios con un alto contenido de FeO y cuyos espejos tuvieron un

desempeño aceptable, pero no suficiente para satisfacer los requerimientos de una planta solar.

Se quiso comparar qué tan buenos resultados brindaba el vidrio flotado en comparación con el vidrio especial Corning 7090, que se utiliza en el Laboratorio de Energía Solar del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, cuya característica principal es una total transparencia a las radiaciones solares. Para lograrlo, se hicieron algunas evaporaciones con él como sustrato. Las pruebas de intemperismo se encargaron de indicarnos su comportamiento.

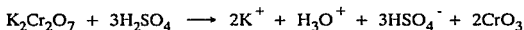
Limpieza del Sustrato de Vidrio

La limpieza del sustrato es un paso muy importante en la deposición de cualquier película o recubrimiento, puesto que así se consigue una buena adherencia. El proceso de limpieza requiere que sean rotos los enlaces entre las moléculas contaminantes, así como entre el contaminante y el sustrato [8]. De tal forma que la elección de la técnica depende de los materiales que componen al sustrato, el tipo de contaminantes y el grado de limpieza que se quiera lograr.

Esta limpieza es esencial tanto para aumentar la adhesión entre las películas y el vidrio, como para minimizar la corrosión de los espejos. Se debe remover de las hojas de vidrio polvo, grasa, algún gel (capa del gel natural del vidrio, depositada en la superficie del cristal durante su fabricación), capas de cierto óxido, etc. antes de colocarse dentro de la cámara de evaporación. Cualquier contaminación en la superficie del vidrio, por pequeña que sea, es causa de defectos en la película depositada y trae como consecuencia la reducción de la vida media del espejo[7].

El proceso de limpieza puede ser inducido por medios químicos o administrando la suficiente energía para remover la impureza; ya sea, calentando o mediante un bombardeo con partículas [8,32]. Un simple proceso mecánico tal como tallar, puede ser eficiente si se realiza cuidadosamente para evitar dañar la superficie. Los métodos químicos más usuales se basan en la limpieza con ácidos, cuyo efecto limpiador se debe a la conversión de óxidos y grasas en compuestos solubles [7, 32].

Uno de los métodos químicos más socorridos a nivel laboratorio es la limpieza con mezcla crómica. Su uso como agente limpiador del sustrato se fundamenta en el poder oxidante extremadamente fuerte que tiene; producto de la adición de sales crómicas al ácido sulfúrico concentrado. No se trata de una simple disolución, en realidad se produce la siguiente reacción:



Independientemente de la técnica utilizada para la limpieza del sustrato, siempre existe un tratamiento final denominado descarga luminosa y que se realiza dentro de la cámara de evaporación.

Es un proceso físico que consiste en la exposición del vidrio a un plasma generado por una descarga luminosa. Dicha descarga es establecida entre un ánodo y un cátodo muy próximos al sustrato, de tal manera que su superficie quede dentro del plasma. Los voltajes necesarios varían desde 500 a 5,000 volts. Se pueden usar voltajes de corriente alterna o de corriente directa, sin embargo, es más común el empleo de esta última.

En la limpieza por descarga luminosa, la eliminación de impurezas es resultado de los siguientes mecanismos: [24]

- 1.- Calentamiento directo debido al choque de partículas cargadas.
- 2.- Desorción de impurezas por el bombardeo continuo de electrones.
- 3.- Desorción de impurezas como resultado del bombardeo de iones de baja energía o partículas neutras.
- 4.- Modificación de la superficie del vidrio por la adición continua de las partículas que conforman al plasma.

El mecanismo 4 es muy importante, particularmente para sustratos con alto contenido de SiO_2 , porque ayuda a la formación de puentes oxidantes entre el vidrio y metales reactivos como el aluminio o el cromo. Se ha observado además, que ello favorece la nucleación durante la subsecuente deposición de la película reflectora.

Las técnicas empleadas fueron baño en una solución ácida (mezcla crómica) y bombardeo con iones. El procedimiento de limpieza fue como sigue:

- Un vidrio de 100x40x3 mm se lava con detergente comercial y esponja suave; se enjuaga con agua corriente hasta eliminar por completo de la superficie la sensación jabonosa.
- Ya lavada, la hoja de vidrio se sumerge en una solución de mezcla crómica a 80°C durante media hora.

La composición es la siguiente:

$K_2Cr_2O_7$	24g
H_2SO_4	408 mL
H_2O	144 mL

- Los vidrios se sacan cuidadosamente de la mezcla crómica y se dejan enfriar unos minutos, se enjuagan con agua y limpian con un trapo hasta eliminar los residuos de la solución; después, para quitar parte del agua, se dejan secar al ambiente o por medio de una pistola de aire caliente.
- Ya para terminar el proceso, el sustrato se enjuaga con agua destilada usando una pisseta; al terminar se colocan los vidrios dentro de un recipiente con alcohol isopropílico. Por último, se secan ya sea con aire caliente o con alguna parrilla, a una temperatura de 90-110°C de 20 a 30 minutos.

A lo largo de esta etapa, es necesario examinar el mojado de las superficies, para determinar si el sustrato está limpio. A esto se le conoce como "water-break-test" [10]: "si un sustrato limpio se extrae de un recipiente con agua pura, una película continua de agua permanece en su superficie". Esto quiere decir que hay un buen mojado entre el sustrato y el agua". De esta forma, se puede comprobar el grado de limpieza de los vidrios.

Una vez concluido el proceso de limpieza, los sustratos de vidrio se deben guardar en algún recipiente para evitar su contaminación y absorción de humedad, para tal fin se utiliza un desecador herméticamente cerrado. Ahora, los vidrios están listos para convertirse en espejos.

Evaporación del Aluminio y Óxido de Silicio

La evaporación es una de las tres técnicas utilizadas para la deposición de materiales metálicos sobre sustratos de vidrio; las otras son la deposición química y la erosión iónica.

De estas técnicas, la que más se utiliza para producir espejos de una manera comercial es la deposición química. La evaporación es la que le sigue en importancia de uso, pero es más común encontrarla como el método preferido en laboratorios de investigación. La erosión iónica requiere mucho equipo periférico, por llamarlo de alguna manera, pues involucra cámaras de vacío y mucha energía para lograr desprender iones de un metal y depositarlos en un sustrato [11].

Todas poseen ventajas y desventajas. Además, se puede conocer la técnica empleada para la elaboración del espejo con sólo apreciar su duración. Así pues, la técnica que deja un mayor contenido de contaminantes en la superficie reflectora es la de deposición química, pues el proceso se realiza en condiciones ambientales comunes, en presencia de humedad y polvo. Los otros dos métodos también presentan contaminación aunque mucho menor, debido a que se llevan a cabo dentro de cámaras especiales de vacío, donde sólo pueden "ensuciar" los gases que se usan durante el proceso en sí; es por ello que se recomienda el manejo de gases inertes.

Puesto que no es objeto de esta tesis profundizar en las variantes tecnológicas que existen para fabricar y evaluar espejos, describiré, de modo general, el proceso de evaporación con cañón de electrones, cuya metodología fue la que en realidad se siguió.

Evaporación .

El calentamiento de una resistencia, hecha de un material con alto punto de fusión como tungsteno, molibdeno, tantalio o niobio, genera un flujo de electrones que incide sobre el crisol con la sustancia a evaporar y recubierto algunas veces por cierto tipo de cerámica para evitar emisión de impurezas. Estos electrones, al chocar, transforman su

energía cinética en calorífica, trayendo consigo un cambio de agregación de la sustancia dentro del crisol. Se genera un vapor, que va a depositarse sobre la superficie fría del vidrio que el evaporante encuentre en su trayectoria.

Según el material que se vaya a evaporar, es el tiempo y la intensidad de la corriente que se deja circular, pues con ello se controla el espesor de la película, que para ser reflectiva, requiere espesores mayores a los 700 Å.

Mecanismo de formación de las películas

La deposición de las películas se realiza por medio de una condensación de los vapores en el sustrato de vidrio. Este fenómeno está basado en el concepto de formación de núcleos que crecen y coalescen para dar origen a una capa continua de la sustancia.

En los años 50, con el advenimiento de la microscopía electrónica, se comprobó que dichas películas se formaban a partir de una nucleación y su posterior crecimiento.

La secuencia de formación de las películas es como sigue: [12]

- 1.- *Se adsorben en el sustrato monómeros a partir de los vapores presentes.*
- 2.- *Se forman embriones de varios tamaños.*
- 3.- *Se crean núcleos en crecimiento constante, que originan cúmulos.*
- 4.- *Estos cúmulos siguen el proceso de nucleación hasta que se tocan y coalescen, dando origen a islas que ocupan un área menor a la suma de la ocupada por los cúmulos originales dejando expuesta una nueva superficie en el sustrato.*
- 5.- *En el área recién abierta se adsorben más monómeros, ocurriendo una nueva nucleación, denominada secundaria, que contribuye a acortar distancia entre islas.*
- 6.- *Mientras, las islas continúan creciendo dejando canales o agujeros, los cuales se llenan vía nucleación secundaria para, finalmente, dar lugar a una película continua del material evaporado.*

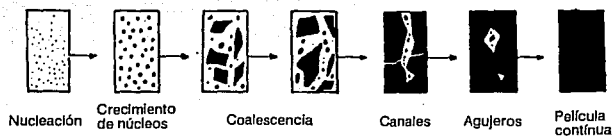


Figura 3.1. Secuencia de formación de las películas.

Numerosas observaciones han concluido que los núcleos más pequeños tienen un tamaño de 2 a 3 nm y su crecimiento es tridimensional; aunque el crecimiento paralelo al sustrato es mucho mayor, resultado de la difusión de los monómeros en la superficie. La coalescencia ocurre en menos de una décima de segundo. El tamaño del grano en la película ya conformada, propiedad morfológica importante, es controlada por la recrystalización que ocurre cada vez que coalescen los núcleos o islas entre sí [12].

Sin embargo, hay que mencionar que, aunque la continuidad de las películas es muy necesaria, no es siempre posible de conseguir y depende, como lo señalo más adelante, de la velocidad de evaporación y el espesor de la misma.

Proceso de Evaporación

Los vidrios ya completamente limpios se montan sobre una estructura metálica puesta, ex-profeso, dentro de la cámara de evaporación y a una altura de 40 cm por arriba de los cañones de electrones.

En cada proceso de evaporación se colocan 3 vidrios, abarcando una área de 200 x 150 mm solamente, pues de esta manera se asegura que el ángulo de incidencia de los vapores no sea mayor a 30°. En este trabajo, como materia prima para la superficie reflejante se emplea aluminio de alta pureza (99.999%) y monóxido de silicio al 99% como material protector.

Una vez alcanzado un vacío dentro del evaporador de alrededor de 10^{-5} Torr, se cierra parcialmente la válvula aislante de alto vacío (válvula 2, fig. 2.4) y se abre la válvula

de aguja para permitir la entrada de oxígeno hasta una presión de 10 micrones, con el cual se produce la descarga luminosa (plasma) a condiciones de 3,000 V y 400 mA. La descarga luminosa se constituye como la etapa final in situ de la limpieza del sustrato de vidrio. Este proceso dura de 15 a 20 minutos. Durante la descarga luminosa, los iones acelerados a altas velocidades, al chocar, son capaces de remover gases adsorbidos en la superficie del vidrio. Para sustratos de vidrio, se prefiere la descarga luminosa con oxígeno porque se incrementa la adhesión entre la película de aluminio y el vidrio [7].

Al terminar esta etapa, se abre por completo la válvula aislante de alto vacío para extraer todos los gases del interior. Al conseguirse un vacío entre 1 y 4×10^{-5} Torr, se empieza a aplicar gradualmente corriente al cañón de electrones que tiene el crisol con aluminio hasta conseguir la velocidad de evaporación deseada. Se deposita entonces, una película reflejante de $1,000 \text{ \AA}$ sobre la superficie de los vidrios y a una velocidad mínima de 3.5 \AA/s .

A continuación se presenta una corrida típica de este proceso:

TIEMPO	TIEMPO EFECTIVO (minutos)	PRESIÓN EN EL EVAPORADOR (Torr)	CORRIENTE EN EL CAÑÓN DE e ⁻ (mA)	ESPESOR (Å)
12:56	0	5.0×10^{-5}	30	0
12:58	2	5.0×10^{-5}	35	0
12:59	3	4.9×10^{-5}	40	13
13:00	4	4.6×10^{-5}	40	35
13:01	5	4.6×10^{-5}	45	162
13:02	6	4.7×10^{-5}	50	560
13:03	7	4.5×10^{-5}	50	1013

Una vez que se alcanzó el espesor deseado, se apaga el cañón y se introduce suficiente oxígeno para alcanzar una presión en la cámara de evaporación que va de 8×10^{-5} hasta 1×10^{-4} Torr (la presión de 1×10^{-4} es el valor máximo al cual se puede trabajar, pues este es el límite dentro del intervalo de operación al cual trabaja la fuente de poder, que alimenta a los cañones). El siguiente paso es la evaporación del SiO en una atmósfera de oxígeno, con el otro cañón de electrones; a esto se le conoce como evaporación reactiva [9,20] pues no es sólo SiO lo que se deposita sobre el espejo, sino un compuesto producto

de la reacción de éste con el oxígeno: bióxido de silicio (SiO_2). Si se evapora suficiente monóxido de silicio, a una velocidad de 1-3 Å/seg, hasta llegar a producir una capa protectora de 2,500Å, se consigue una película con una proporción de 1.5 átomos de oxígeno por cada átomo de silicio. Una manera cómoda de expresar dicha relación estequiométrica se logra con la fórmula: Si_2O_3 , que es la que se manejará de aquí en adelante.

Un análisis cuidadoso mediante espectroscopía de infrarrojo e índices de refracción de películas de óxidos de silicio, realizado por Ritter y Pliskin en la década de los sesenta [39] [40] [41], mostró que se favorece la formación de Si_2O_3 cuando se evapora bajo estas condiciones.

Dichas investigaciones arrojaron la siguiente información: [41]

EVAPORACIÓN DE SiO			PROPIEDADES DE LOS OXIDOS DE Si		
Composición de la Película	Condiciones de Evaporación		Compuesto	Índice de Refracción (0.55 μm)	λ característica (μm)
SiO	1×10^{-5} Torr	20 Å/s	SiO	1.9-1.2	10.2
SiO y SiO_2	1×10^{-4} Torr	370 Å/s	Si_2O_3	1.52-1.55	9.4-9.7 y 11.5
Si_2O_3	1×10^{-4} Torr	4 Å/s	SiO_2	1.46-1.47	9.3-9.4 y 12.5
SiO_2 y poco Si_2O_3	1×10^{-3} Torr	4 Å/s			

Se trazó un gráfico de las constantes de extinción obtenidas de los espectros infrarrojos versus la relación estequiométrica de átomos de oxígeno respecto a los de silicio y se compararon contra los valores que tendrían si el compuesto en la película fuese SiO_2 .

El número de átomos de silicio, fue determinado por microanálisis. Dicha técnica consistió en establecer cuántos iones Ag^+ eran reducidos por los átomos de silicio parcialmente oxidados (átomos Si^{2+} del SiO que no reaccionó), de tal forma que con los equivalentes de reducción, y el espesor de película, se cuantificaba la masa, y con ello, la composición.

Es posible llevar a cabo esta técnica analítica gracias a que la reacción de oxidación se efectúa en la superficie del sustrato. El oxígeno se encuentra quimisorbido en la película donde se depositará el compuesto de silicio, su número se puede calcular según una ecuación propuesta por Trapnell, que depende del número de moléculas de oxígeno que colisionan con el sustrato [39], un valor de 3×10^{16} moléculas de O_2/cm^2 en un segundo es el usual para favorecer la formación de Si_2O_3 . Conociendo cuánto oxígeno, cuánto monóxido de silicio y teniendo la masa, es posible determinar la cantidad de monóxido de silicio que reaccionó.

Los resultados mostraron una película compuesta de 1.5 átomos de oxígeno por cada átomo de silicio (si hubiese reaccionado todo el SiO , se tendrían 2 átomos de oxígeno por cada silicio), una manera cómoda de expresar dicha relación es proponer la fórmula aparente Si_2O_3 . Los espectros de estas películas presentan bandas de absorción corridas y más anchas que las del SiO_2 . Esto se debe a la porosidad y deficiencia de oxígeno. Su estructura contiene numerosos enlaces "cortados" ($\equiv Si-O \cdot \cdot Si \equiv$ en lugar de $\equiv Si-O-Si \equiv$), los cuales pueden ser parcialmente hidrogenados si hay hidrógeno en el gas residual ó posiblemente también vapor de agua; sin embargo, esta absorción se presenta sobre todo al exponerse la película a la atmósfera -de ahí que se haya mencionado párrafos arriba, que al exponerse al aire la película se termina de oxidar- ($\equiv Si-O-O-Si \equiv$).

Esta película protectora posee baja absorción en la región solar del espectro electromagnético y una alta dureza. El SiO tiene una transmitancia más baja que el Si_2O_3 . Baja velocidad y alta presión del oxígeno son, entonces, la clave para producir espejos de alta calidad, según se pudo comprobar tanto en lo citado por la bibliografía como en los experimentos realizados.

En cualquier momento durante las evaporaciones, el espesor de las películas depositadas se verifica con el medidor de espesores. De esta forma, es posible estimar la velocidad de deposición y ajustarla con sólo aumentar o disminuir la corriente eléctrica que llega a los cañones.

Los datos que se registran en una evaporación típica de SiO se muestran en la siguiente tabla:

TIEMPO	TIEMPO EFECTIVO (minutos)	PRESIÓN EN EL EVAPORADOR (Torr)	CORRIENTE EN EL CAÑÓN DE e ⁻ (mA)	ESPESOR (Å)
12:00	0	1.0×10^{-4}	18	24
12:03	3	1.0×10^{-4}	18	128
12:04	4	1.0×10^{-4}	18	136
12:06	6	1.0×10^{-4}	18	173
12:20	20	1.0×10^{-4}	20	468
12:22	22	1.0×10^{-4}	20	505
12:24	24	1.0×10^{-4}	20	548
13:06	66	1.0×10^{-4}	20	1538
13:08	68	1.0×10^{-4}	20	1580
13:10	70	1.0×10^{-4}	20	1650
13:50	110	1.0×10^{-4}	22	2476
13:52	112	1.0×10^{-4}	22	2510
13:52'30"	112.5	1.0×10^{-4}	22	2534

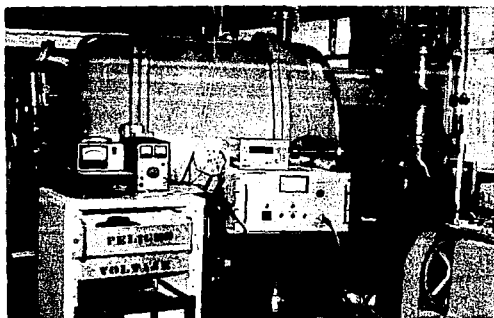


Figura 3.2. Vista general del equipo de evaporación. En primer plano se aprecia la fuente que alimenta a los cañones de electrones; a su izquierda aparece la fuente para la descarga luminosa y sobre ella, el medidor de espesores; a su vez sobre éste se encuentra uno de los dos medidores de presión.

PROPIEDADES DE LOS ESPEJOS

Medición de sus Propiedades Ópticas.

Para los espejos de primera superficie con aplicación en energía solar, la reflejancia es la propiedad óptica más importante, determina su eficiencia en el campo de trabajo y es un criterio por el cual se puede evaluar su grado de corrosión o degradación.

La reflejancia debe ser lo más alta posible en dos aspectos, uno considerando la región de longitud de onda, y el otro, en los ángulos de incidencia a los cuales trabajarán los espejos

Cuando un rayo de energía luminosa incide sobre un espejo, parte de él es reflejado y parte absorbido. La reflejancia solar se define como la relación entre la radiación solar reflejada (I) y la radiación solar incidente (I_0). A esta relación comúnmente se le identifica como ρ_s , y es igual a I/I_0 .

El rayo reflejado consta de dos partes: la componente reflejada especularmente, que es la extensión del rayo incidente como lo definen las leyes de la reflexión (en otras palabras es el mismo rayo, pero reflejado), y la componente reflejada difusamente, la cual es la parte dispersada por la superficie a causa de su rugosidad.

Las leyes de reflexión estudian los efectos producidos con haces de luz incidentes y reflejados por una superficie, (esto en el caso de haces provenientes de una fuente sobre un espejo), o más precisamente los ángulos de los rayos incidentes y reflejados por una superficie reflectora respecto al plano normal a ésta, lo cual se conoce como la ley de Snell. Al incidir en el plano de incidencia, el ángulo reflejado es igual al ángulo de incidencia.

Se tiene entonces que $\theta_{inc} = \theta_{ref}$

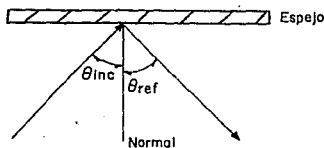


Figura 4.1. Reflejanca especular.

Los ángulos θ_{inc} y θ_{ref} están medidos a partir del plano normal a la superficie reflectora; la superficie anterior se considera completamente lisa o con irregularidades muy pequeñas que no afectan la reflexión. A este tipo de reflexión se le llama reflexión especular [35].

Existen diferentes tipos de reflexiones según la superficie del material. A continuación se explican las características de dichas superficies partiendo de la incidencia de un cono de luz con un ángulo sólido. Se considera un ángulo sólido ya que el sol tiene un tamaño finito de $32'$, visto desde la Tierra, lo cual nos hace recibir conos de luz sobre cualquier superficie, si la radiación solar no ha sido dispersada.

Al incidir un haz de luz con cierto ángulo sólido, las superficies reflejan el rayo en dos componentes, la especular y la difusa. Puede darse el caso de que una de ellas predomine sobre la otra, entonces, se tienen dos tipos de reflejancia:

- **Especular** La reflexión se realiza conservando el mismo ángulo sólido respecto a un plano normal.
- **Difusa** La reflexión pierde el ángulo sólido de incidencia y se distribuye el haz con igual intensidad hacia todas las direcciones en forma hemisférica.

Cuando una superficie es muy rugosa o presenta diferentes matices de color, su componente difusa refleja hacia todos lados con diferentes intensidades, a esta reflexión se le conoce como **general**.

Existen diferentes métodos para realizar la medición de la reflejancia; pueden dividirse en dos grupos:

- Métodos que miden la reflejancia sin necesidad de usar una muestra patrón de referencia (estándar). A los aparatos que trabajan de esta forma se les conoce como reflectómetros absolutos
- Técnicas que utilizan un estándar de reflejancia conocida como comparación

Para el primer caso, como no hay una muestra de referencia, el detector debe medir la energía incidente en el espejo, así como la reflejada por éste. Los reflectómetros de múltiples pasos se han convertido en los más utilizados debido a su gran precisión y porque permiten efectuar mediciones a diferentes ángulos de incidencia (10° a 80° respecto a la normal). La Figura 4.2 es un esquema de este tipo de aparatos. El haz emitido por la fuente es dirigido y colimado por E1, E2 y E3; E4 es el espejo que se está midiendo y variando su orientación se modifica el ángulo de incidencia; finalmente, E5, E6 y E7 lo dirigen al detector.

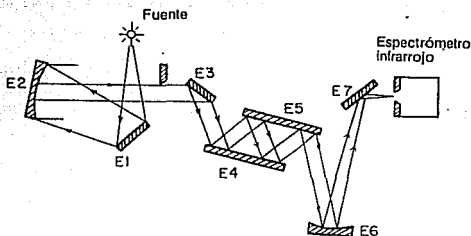


Fig. 4.2. Reflectómetro absoluto de múltiples pasos, diseñado para medir reflectancia en el infrarrojo. E4 y E5 son siempre paralelos, variando la distancia entre ellos es posible modificar el número de reflexiones. Al cambiar su orientación el ángulo de incidencia es diferente.

Puesto que los valores de reflectancia determinados con reflectómetros absolutos se obtienen en intervalos con diferente longitud de onda, el tiempo que se requiere para conseguir curvas espectrales de reflectancia a lo largo de una región grande del espectro solar es sumamente largo. Por tanto, cuando se tienen que medir las reflectancias contra la longitud de onda, se emplean muestras estándar calibradas apropiadamente en espectrofotómetros, por ejemplo, de doble haz.

La figura 4.3 es un esquema donde se observa que una fuente común produce dos haces con trayectorias paralelas idénticas. En una de ellas se intercambian la muestra de referencia y la que se va a medir. Los haces reflejados entran al espectrofotómetro donde se dispersan, mediante un prisma o con rejillas, para hacer incidir la longitud de onda deseada. Después de la dispersión, se obtiene la relación de los dos rayos. De esta manera se obtiene la precisión más alta, pues uno de los haces permanece intacto mientras que es con el otro con el que se trabaja. Sin embargo, existe un problema: la reflectancia sólo se puede determinar a un ángulo de incidencia particular y cercano a la normal. Sólo los equipos relativamente nuevos incorporan accesorios adicionales para solventar esta dificultad.

Ahora bien, los detectores de los diferentes aparatos que existen efectúan la medición registrando alguna de las dos componentes que refleja cualquier superficie: la

especular o la difusa. Entonces, lo que obtenemos son dos reflejancias, la reflejancia especular y la reflejancia direccional hemisférica.

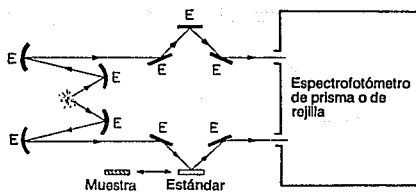


Figura 4.3. Diagrama de un espectrofotómetro de doble haz.

REFLEJANCIA ESPECULAR.

Su medición es simple, se hace llegar al espejo un rayo luminoso con cierto intervalo de longitud de onda que es reflejado y se mide la intensidad del mismo con un detector.

REFLEJANCIA DIRECCIONAL HEMISFÉRICA.

Se mide con un reflectómetro de esfera integrante. Para la gran mayoría de estos equipos, el haz incidente se dirige con una inclinación de alrededor de 7° respecto de la normal a la superficie del espejo a medir. Existen detectores dispuestos alrededor de la esfera, para medir ya sea el haz reflejado por una superficie completamente blanca o por una superficie completamente especular.

Todas estas reflejancias se miden a diferentes longitudes de onda, es por ello que genéricamente se les denomina **reflejancias espectrales** (ρ_λ). Ahora bien, la evaluación de todos estos datos, a lo largo del intervalo del espectro electromagnético que nos interesa (300 a 2800 nm), da como resultado la **reflejancia solar** (ρ_s), propiedad óptica más importante en el análisis de espejos solares y la que realmente nos interesa.

De esta forma, la reflejancia solar direccional hemisférica y la reflejancia solar especular se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_s = \frac{\int \rho_\lambda E_\lambda d\lambda}{\int E_\lambda d\lambda} \quad (1)$$

Siendo: ρ_s la reflejancia solar,
 E_λ la irradiancia directa solar espectral [10,11],
 ρ_λ la reflejancia espectral.

La integral no puede ser resuelta puesto que ρ_λ y E_λ no las tenemos como expresiones matemáticas, entonces, hay que modificar la ecuación para emplear la serie de datos que tenemos.

Reemplazando las integrales por sumatorias:

$$\rho_s = \frac{\sum \rho_\lambda E_\lambda \Delta\lambda_i}{\sum E_\lambda \Delta\lambda_i} \quad (2)$$

El ámbito de longitudes de onda que nos interesa puede ser dividido en N intervalos de igual energía (pero de diferente tamaño en cuanto a longitudes de onda se refiere) para facilitar el cálculo. Por lo que la ecuación (2) se transforma en:

$$\rho_s = \sum \rho_{\lambda_i} \cdot \frac{E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i}{\sum E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i} \quad (3)$$

Como E_λ es la irradiancia solar directa espectral, es decir, la irradiancia que recibe en un intervalo de longitud de onda, considerando la suma de todos estos valores tenemos E_s , como la irradiancia solar directa normal.

Y entonces:

$$\frac{E_\lambda \Delta\lambda}{\sum E_\lambda \Delta\lambda} = \frac{E_s/N}{E_s}$$

Simplificando:

$$\frac{E_\lambda \Delta\lambda}{\sum E_\lambda \Delta\lambda} = \frac{1}{N}$$

Obteniéndose finalmente la ecuación (4):

$$\rho_s = \frac{1}{N} \cdot \sum \rho_\lambda \quad (4)$$

Hay que recordar que los nombres de reflejancia solar direccional-hemisférica y reflejancia solar especular son diferentes nombres derivados de diversos métodos para evaluar una única propiedad óptica, la reflejancia solar. Esto lo ejemplifica más adelante la Tabla 4.

De la ecuación (4) se observa que con sólo tener la reflejancia espectral, el cálculo de la reflejancia solar es sencillo.

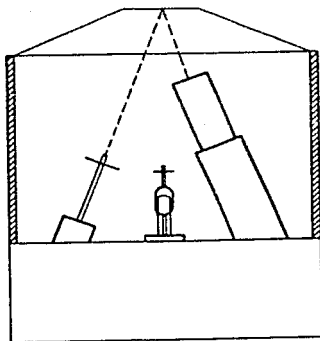
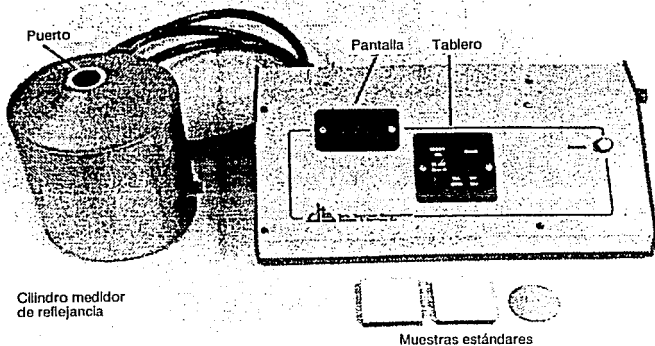


Figura 4.4. Fotografía y esquema del interior del reflectómetro SSR-ER.

En este trabajo se midieron la reflejancia solar especular y la reflejancia espectral; de esta última, específicamente la reflejancia espectral especular y la reflejancia espectral direccional hemisférica.

Medición de la Reflejancia Solar Especular.

Se empleó un reflectómetro de espectro solar (SSR) de la compañía Devices & Services. La Figura 4.4 presenta un diagrama de tal reflectómetro.

La medición era sumamente simple: una vez calibrado el aparato, se coloca el espejo a medir en el puerto (Fig. 4.4) y el reflectómetro indica en la pantalla la reflejancia solar especular del espejo en cuestión. El reflectómetro trabaja de la siguiente manera: Produce una iluminación difusa, de la cual parte es reflejada por el espejo a un cierto ángulo hacia el colimador y, luego, dirigido a 4 detectores, sensibles cada uno a diferentes zonas del espectro (UV, azul, rojo e infrarrojo cercano e infrarrojo hasta 250 nm). Los resultados de cada detector son sumados para así generar una aproximación al espectro solar real. Figura 4.5.

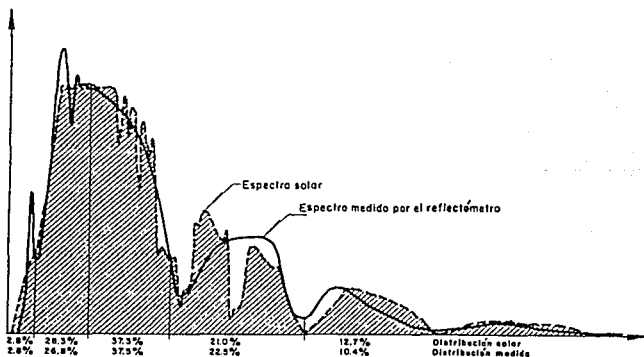


Figura 4.5. Comparación del espectro solar y el medido por el reflectómetro.

Pueden producirse errores si los materiales a medir son muy diferentes a los de las muestras de referencia.

Para calibrar el aparato se emplearon espejos de referencia, proporcionados por el fabricante del equipo.

La mayor parte de las reflejancias medidas en este trabajo se obtuvieron con el reflectómetro de espectro solar (SSR).

Medición de la Reflejanca Espectral.

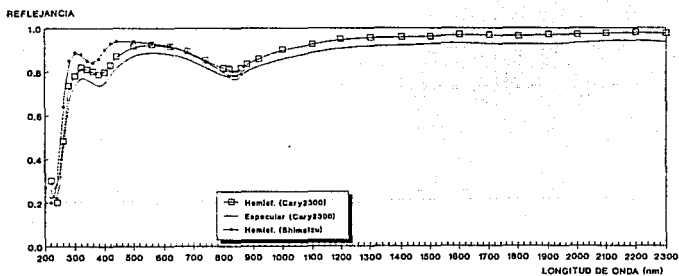


Figura 4.6. Gráfico de ρ_{λ} la reflejanca a diferente longitud de onda.

Otra técnica para la determinación de ρ_{λ} fue la medición de la reflejanca espectral [9,16,27]. Ésta se realizó con un espectrofotómetro Shimadzu. Las figuras 4.7 y 4.8 son esquemas del interior del aparato.

La medida de la reflejanca espectral nos brinda la posibilidad de determinar la reflejanca solar con gran precisión, además de proporcionar información detallada acerca del comportamiento de los materiales en función de la longitud de onda.

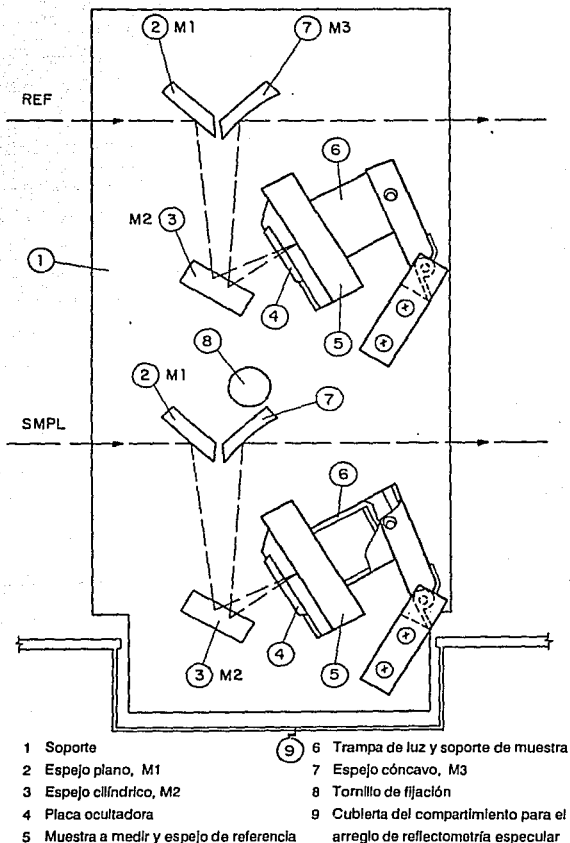
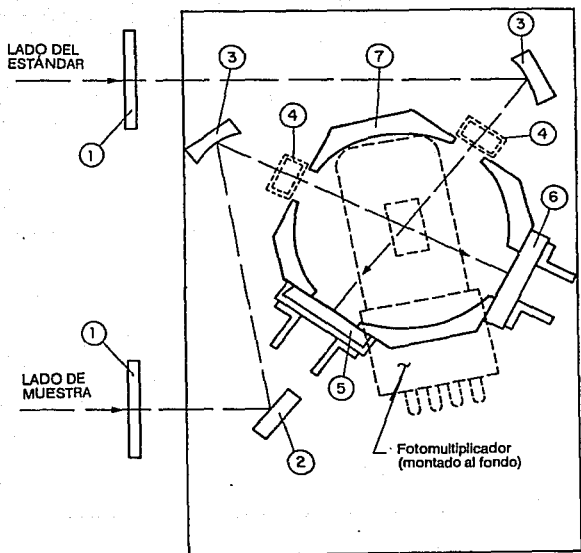


Figura 4.7. Esquema del arreglo para medir la reflejanca especular en el espectrofotómetro Shimadzu.



- | | |
|---|--------------------------------|
| 1 Ventana | 5 Muestra estándar |
| 2 Espejo plano | 6 Muestra a medir |
| 3 Espejo cóncavo | 7 Esfera integrante (detector) |
| 4 Celda para medición de la transmisión | |

Figura 4.8. Diagrama del arreglo de esfera integrante para medir reflectancia direccional hemisférica en el espectrofotómetro Shimadzu.

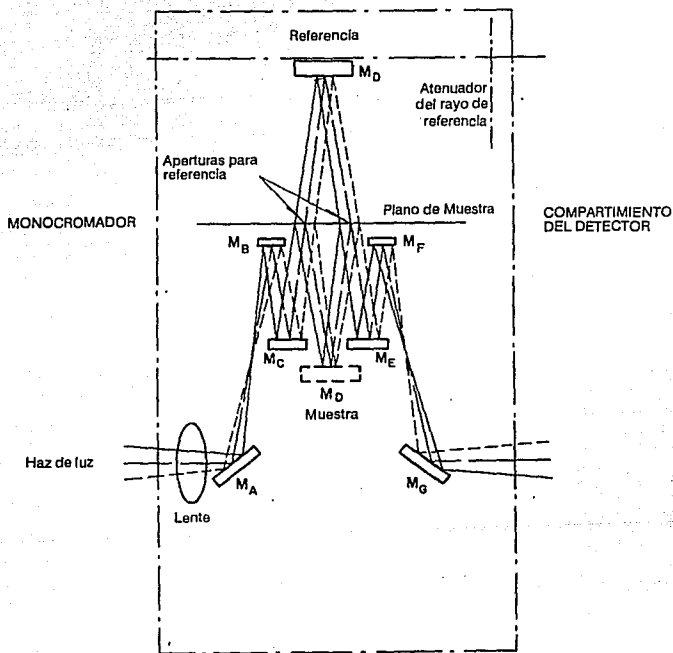


Figura 4.9. Esquema del arreglo para medir reflejancia especular en el espectrofotómetro Cary 2300

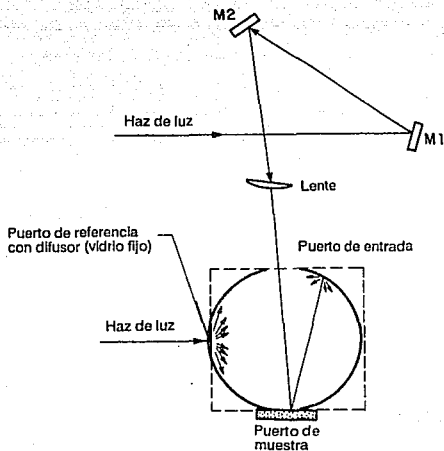


Figura 4.10. Diagrama del arreglo de esfera integrante para medir reflectancia direccional hemisférica en el espectrofotómetro Cary 2300.

Con la ayuda de una muestra de sulfato de bario como referencia, se mide la reflejancia espectral direccional hemisférica de los espejos a diferentes λ s. Se trabajó, además, con un espectrofotómetro marca Cary 2300, con un estándar también de sulfato de bario. Fig 4.9 y 4.10.

La utilización de la reflejancia espectral fue a modo de comparación y para asegurar la calidad de los espejos; también se evaluaron dos espejos seleccionados por sus altos valores de reflejancia en el reflectómetro SSR, con los espectrofotómetros Shimatzu (ρ_x') y Cary 2300 (ρ_x).

Con la ecuación (4) y estos datos, mostrados en la Tabla 3, se elaboró la Tabla 4. Para ello, se dividió el margen de longitud de onda de (220 a 2,600 nm) en 25 intervalos de igual energía. La figura 4.7 es la gráfica de los valores de la Tabla 3.

Tabla 3. Reflejancias espectrales de un espejo de primera superficie

LONGITUD DE ONDA (nm)	REFLEJANCIA ESPECTRAL ρ_u			
	ρ_H	$\rho_{H'}$	ρ_x	ρ_x'
220	0.301	0.200	0.261	0.163
240	0.201	0.220	0.159	0.204
260	0.482	0.640	0.426	0.503
280	0.735	0.850	0.684	0.710
300	0.780	0.890	0.734	0.782
320	0.820	0.880	0.776	0.792
340	0.810	0.850	0.766	0.774
360	0.800	0.840	0.752	0.754
380	0.787	0.860	0.732	0.759
400	0.798	0.900	0.743	0.788
420	0.830	0.930	0.777	0.822
440	0.870	0.940	0.821	0.853
460	0.892	0.940	0.848	0.875
480	0.907	0.940	0.866	0.891
500	0.917	0.940	0.878	0.900
520	0.922	0.940	0.885	0.907
540	0.924	0.940	0.889	0.910

LONGITUD DE ONDA (nm)	REFLEJANCIA ESPECTRAL ρ_{λ}			
	ρ_{II}	ρ_{II}'	ρ_s	ρ_s'
560	0.925	0.930	0.890	0.911
580	0.924	0.930	0.890	0.909
600	0.921	0.930	0.888	0.906
620	0.915	0.920	0.882	0.901
640	0.909	0.910	0.877	0.894
660	0.902	0.900	0.869	0.886
680	0.893	0.890	0.861	0.876
700	0.880	0.870	0.848	0.865
720	0.867	0.870	0.835	0.852
740	0.852	0.850	0.821	0.837
760	0.834	0.830	0.803	0.820
780	0.820	0.810	0.790	0.801
800	0.815	0.80	0.782	0.786
820	0.811	0.780	0.778	0.774
840	0.790	0.780	0.758	0.772
860	0.815	0.790	0.777	0.780
880	0.838	-----	0.805	0.795
900	0.845	-----	0.810	0.811
920	0.861	-----	0.825	0.828
940	0.880	-----	0.836	0.843
960	0.890	-----	0.849	0.856
980	0.895	-----	0.853	0.867
1000	0.900	-----	0.859	0.876
1100	0.925	-----	0.889	0.907
1200	0.950	-----	0.910	0.926
1300	0.955	-----	0.917	0.939
1400	0.958	-----	0.920	0.949
1500	0.960	-----	0.927	0.956
1600	0.970	-----	0.935	0.961
1700	0.967	-----	0.926	0.965
1800	0.962	-----	0.927	0.969
1900	0.970	-----	0.925	0.971

Tabla 4. Resultados del cálculo de la reflejancia solar a partir de la espectral.

LONGITUD DE ONDA (nm)	REFLEJANCIA ESPECTRAL ρ_{λ}		
	$\rho_{ }$	ρ_{\perp}	ρ_{\perp}^1
390	0.790	0.735	0.774
436	0.850	0.799	0.837
466	0.892	0.848	0.875
492	0.912	0.872	0.895
518	0.922	0.885	0.907
543	0.924	0.889	0.910
565	0.925	0.890	0.911
592	0.922	0.889	0.907
616	0.918	0.885	0.903
644	0.909	0.877	0.894
669	0.898	0.865	0.881
697	0.880	0.845	0.865
724	0.867	0.835	0.852
764	0.834	0.803	0.820
798	0.815	0.782	0.786
834	0.800	0.768	0.773
870	0.826	0.791	0.788
940	0.880	0.836	0.843
996	0.900	0.855	0.870
1048	0.913	0.876	0.891
1108	0.925	0.889	0.907
1228	0.950	0.910	0.929
1320	0.955	0.914	0.941
1560	0.969	0.934	0.959
1760	0.960	0.920	0.968
REFLEJANCIA SOLAR	0.893	0.856	0.875

Adhesión entre el Vidrio y las Películas.

El desprendimiento de las películas, ya sea reflejante o protectora, constituye una falla común en los espejos. Puede originar su degradación, desde defectos a simple vista hasta la destrucción completa del espejo.

Para analizar la adhesión del vidrio a las películas, se realizaron dos pruebas experimentales. La primera fue comprobar el grado de adherencia, pegando un pedazo de cinta adhesiva sobre la película reflectora y asegurándose de que pegue bien; entonces se procede a desprenderla, pudiendo ocurrir que la película sea removida por completo, parcialmente o, lo mejor, que permanezca en su sitio. La segunda consistió en sumergir al espejo en nitrógeno líquido durante 10 minutos; a continuación se deja que adquiera nuevamente la temperatura ambiente y se repite el proceso. Este pequeño ciclo de enfriamientos y calentamientos se repite por 15 veces.

Al terminar las dos pruebas no se observó cambio en la apariencia ni en las propiedades mecánicas. Con ello se comprobó que los enlaces del aluminio con el sustrato y las películas entre sí son lo suficientemente fuertes. Por lo que podemos predecir que los espejos conservarán sus cualidades por largo tiempo en su exposición directa al medio ambiente.

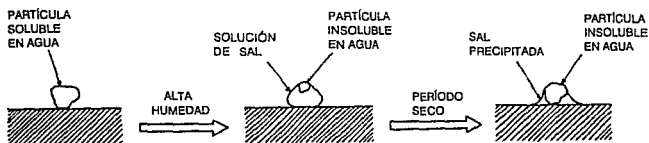
Cuando se trabajaba con un solo cañón de electrones, se presentaba una pobre adhesión entre el trióxido de silicio y el aluminio [7]. Este fenómeno se atribuye a la influencia del aire sobre el Al depositado, el cual se introducía en el momento de abrir la cámara de evaporación para reemplazar el crisol con aluminio por el que contenía monóxido de silicio. Ahora, teniendo dos cañones de electrones, no es necesario romper el vacío, pues desde un principio se encuentran los dos crisoles.

Resistencia a la Abrasión.

El principal agente degradante del vidrio lo constituye el polvo que, acompañado de la humedad, se adhiere fuertemente a su superficie, lo que hace necesario emplear métodos de limpieza que implican abrasión mecánica y, por lo tanto, pérdida de especularidad.

Se ha estimado [11] que las partículas de polvo más pequeñas son las que más fácilmente se adhieren a la superficie -las que tienen un radio menor a 500 nm presentan fuerzas de atracción del tipo de Van der Waals- y desarrollan una rápida adherencia en los primeros catorce días, la cual se ve incrementada a una menor velocidad con el paso del tiempo.

El polvo atmosférico contiene dos tipos de partículas: orgánicas e inorgánicas; dentro de las partículas inorgánicas existen algunas que son solubles en agua. Con humedad relativa alta, las partículas de polvo solubles forman gotas microscópicas de solución salina, las cuales retienen a las partículas insolubles. Al disminuir la humedad relativa, las gotas se evaporan a la vez que se da una precipitación de las sales disueltas, quienes actúan como adhesivo de las no solubles que se encuentran dentro de la misma gota (figura 4.12).



REFUERZO PAULATINO DE CAPAS DE PARTICULAS CEMENTADAS



Figura 4.12. Mecanismo de adhesión del polvo.

De esta forma, se crea una película que al combinarse con las partículas de origen orgánico da lugar a una especie de cemento difícil de remover [25]. En zonas industriales se debe añadir, y con mayor razón en la Ciudad de México, la influencia de partículas contaminantes, que en los últimos años se ha convertido en un factor importante para la degradación de cualquier material expuesto.

En este caso, se llevaron a cabo pruebas sencillas de abrasión; consistieron en limpiar los espejos con un trapo suave y seco unas veces, y otras se empleó uno húmedo. No hubo diferencia en la apariencia y la reflejancia en ninguno de los dos casos.

PRUEBAS DE INTEMPERISMO

Generalidades

Dado que el objetivo que persigue esta tesis es la construcción de espejos de alta calidad y gran durabilidad, para constituir así una opción rentable y alternativa en la generación de electricidad; es necesario asegurarse de su desempeño bajo condiciones climáticas adversas.

Se efectuaron pruebas de intemperismo para examinar las propiedades de tales espejos y predecir su comportamiento una vez en operación.

Se plantearon dos caminos a seguir:

- ☒ *Exposición de los espejos al medio ambiente.*
- ☒ *Exposición de los espejos a condiciones extremas simuladas en el laboratorio.*

La primera opción es más veraz, pero requiere mucho tiempo, así como diversas locaciones para analizar diferentes variables. De esta manera se dio mayor importancia a la simulación de pruebas de intemperismo bajo condiciones extremas.

En este estudio, la idea principal fue examinar las propiedades de los espejos de primera superficie de $\text{Al-Si}_2\text{O}_3$ y asegurarse de la protección a la corrosión que debe brindar la película de Si_2O_3 . La degradación se estimó por cambios en la apariencia física y en la reflejancia. Para ello, antes de cada prueba se registraban su correspondiente reflejancia y algunas imperfecciones que pudieran presentar, por ejemplo, presencia de rayones, algún microagujero, etc.

De acuerdo con investigaciones previas realizadas dentro del mismo Instituto [7, 8, 13] y con lo sugerido por la literatura [15, 22, 33], se seleccionaron las siguientes pruebas:

- » HUMEDAD
- » CICLO TÉRMICO
- » ALTA TEMPERATURA
- » INMERSIÓN EN SOLUCIÓN SALINA
- » ATMÓSFERA DE BIÓXIDO DE AZUFRE
- » ATMÓSFERA REAL
- » PRUEBAS DE ABRASIÓN

Preparación y selección de los espejos

Todos los espejos fueron fabricados a una alta velocidad de evaporación en el aluminio (3.5 y más Å/s) y muy baja para el trióxido de silicio (menos de 3 Å/s). La principal diferencia entre las muestras fue la variación de espesores de la película de Si_2O_3 (de 1,500 a 2,800 Å).

Para cada prueba se tenían espejos con los dos espesores. En algunos de ellos, las dos películas se depositaron sobre la superficie contaminada con el estaño del vidrio flotado; en el resto se hizo por el lado libre de este metal.

La razón era determinar la influencia de la presencia del estaño en las propiedades del espejo .

Pruebas con Humedad.

Cámara de Intemperismo.

La cámara de intemperismo empleada en estos experimentos se ilustra en la figura 5.1. La caja está hecha de acero inoxidable y materiales aislantes. Sus dimensiones internas son 1m de largo, 1m de ancho y 1m de alto. Se encuentra conectada a un humidificador ultrasónico marca Samsung (modelo HU-820A) que se encarga de producir el vapor de agua necesario para generar y mantener la humedad deseada. La humedad relativa (HR) se midió con un indicador de humedad y temperatura HMI31, marca Vaisala, y era controlada con sólo ajustar el volumen del vapor que entraba a la cámara. Para evitar pérdidas de humedad, la tapa está sellada con empaque de hule. Cuenta además con una resistencia eléctrica y un sistema de refrigeración para poder obtener altas y bajas temperaturas. Un termopar permite registrar la temperatura en el interior de la cámara sin necesidad de tener que abrirla durante el experimento. Un ventilador asegura una distribución uniforme de la humedad y la temperatura.

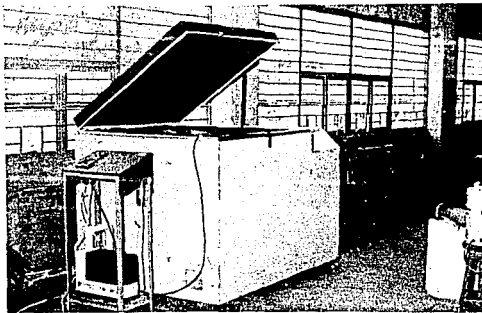


Figura 5.1. Cámara de Intemperismo

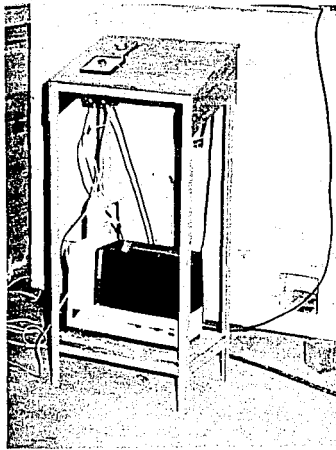


Figura 5.2. Acercamiento de la Cámara de Intemperismo; en primer plano se observa el panel de control, con el termostato para el termopar y el apagador del ventilador; en la parte inferior se encuentra el humidificador ultrasónico.

Procedimiento

Se realizaron dos tipos de experimentos, cada uno a condiciones diferentes:

- a) Temperatura ambiente y 100% de humedad relativa
- b) 50°C y 60% de humedad relativa.

Los espejos completamente limpios se colocan en una estructura de aluminio que denominaremos "marco" (figura 5.3), el cual se introduce en el fondo y el centro de la cámara de intemperismo.

Se pone a trabajar el humidificador y se tapa la cámara, previo ajuste del volumen del vapor. Se puede utilizar una gama de combinaciones de temperatura y humedad, pero siempre de acuerdo con la línea de operación del equipo [36].

A lo largo de los experimentos se midió la reflejancia una vez por semana. Se realizaron tres experimentos, dos de ellos a temperatura ambiente y 100% HR, durante 4 semanas cada uno.

Las Tablas 5, 6 y 7 presentan los resultados de estas pruebas:

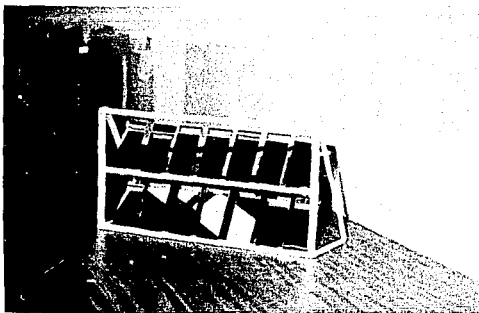


Figura 5.3. Marco de aluminio donde se aprecia la colocación de los espejos

Tabla 5. Reflejancia después de exposición a Temperatura Ambiente y 100% de Humedad

Muestra	Espesor de Película (Å)		Reflejancia $\rho_s (\pm 0.001)$					Aspecto de los Espejos
	Al	SiO ₂	Previa	Después de: (semanas)				
				1	2	3	4	
3-11-2	1340	2230	0.850	0.862	0.859	0.859	0.855	agujeros muy pequeños
4-1-1	1500	2522	0.843	0.847	0.845	0.844	0.844	agujeros muy pequeños
4-8-2	1517	748	0.843	0.832	0.822	0.818	0.822	agujeros pequeños
4-20-1	2000	2200	0.811	0.826	0.820	0.820	0.820	agujeros muy pequeños
4-27-2	2000	2000	0.840	0.854	0.851	0.852	0.845	
4-29-3	4000	2500	0.864	0.875	0.870	0.870	0.868	
5-4-3	2000	2500	0.866	0.877	0.877	0.879	0.873	

Tabla 6. Reflejancia después de exposición a Temperatura Ambiente y 100% de Humedad

Muestra	Espesor de Película (Å)		Reflejancia $\rho_s (\pm 0.001)$				Comentarios
	Al	SiO ₂	Previa	Después de: (semanas)			
				1	2	3	
10-07-1	1257	2850	0.888	0.887	0.887	0.887	
10-01-1	980	1557	0.852	0.853	0.852	0.853	
09-29-2	1413	1552	0.850	0.850	0.850	0.851	
09-24-1	1454	2600	0.879	0.880	0.879	0.879	
09-18-1	1225	2534	0.886	0.887	0.886	0.887	
09-14-2	1247	2361	0.884	0.884	0.882	0.884	
09-08-2	1012	2053	0.868	0.868	0.866	0.868	
07-16-2	1000	2200	0.875	0.876	0.873	0.875	
07-08-1	1092	2000	0.871	0.873	0.870	0.873	
Hoja de Aluminio			0.896	0.896	0.893	0.894	
Espejo de Plata de 2a. Superficie			0.920	0.919	0.920	0.920	
Cinta 3M plateada			0.963	0.962	-----	-----	Gran corrosión en costados

Tabla 7. Reflejancia después de exposición a 50°C y 60% Humedad Relativa.

Muestra	Espesor (Å)		Reflejancia $\rho_s (\pm 0.001)$			Comentarios
	Al	Si _x O _x	Prevía	Después de: (semanas)		
				1	2	
10-07-1	1257	2850	0.887	0.888	0.887	
10-01-1	980	1557	0.853	0.853	0.853	
09-29-2	1413	1552	0.851	0.851	0.850	
09-24-1	1454	2600	0.879	0.879	0.879	
09-18-1	1225	2534	0.887	0.887	0.886	
09-14-2	1247	2361	0.884	0.884	0.884	
09-08-2	1012	2053	0.868	0.867	0.867	
07-16-2	1000	2200	0.875	0.874	0.867	
07-08-1	1092	2000	0.873	0.871	0.872	
Hoja de Aluminio			0.894	0.893	0.893	
Espejo de Plata de 2a. Superficie			0.920	0.918	0.918	



Figura 5.4. Fotografía de la cinta 3M después de 1 semana a 100% de HR.

Ciclo Térmico.

Una vez en operación, los espejos estarán sujetos a cambios de temperatura. Estos experimentos estaban dirigidos a examinar la adhesión entre las películas y el sustrato, bajo variaciones en la temperatura, pues cada material presenta un coeficiente de expansión térmico distinto. Este hecho llega a inducir esfuerzos mecánicos capaces de desprender las películas.

El primer paso es colocar las muestras en una mufla a 50° C y humedad ambiental por una hora, una vez transcurrido este tiempo se dejan enfriar al ambiente por otra hora. A continuación se sumergen por medio de una canastilla dentro de nitrógeno líquido durante 20 minutos. Entonces, se retiran para que nuevamente alcancen la temperatura ambiente; esta etapa dura 60 minutos, para luego repetir el proceso. Después de cada ciclo, se revisa la apariencia de los espejos.

Se efectuaron cinco ciclos en total.

A continuación se dan los resultados:

Tabla 8. Reflejancias después del ciclo térmico.

Muestra	Espesor (Å)		Reflejancia $\rho_s (\pm 0.001)$		Comentarios
	Al	Si ₂ O ₃	Previo	Después de 5 Ciclos	
10-07-3	1257	2850	0.884	0.880	El vidrio se rompió
09-24-2	1454	2600	0.877	0.874	
09-18-2	1225	2534	0.885	-----	El vidrio se rompió
08-26-3	1000	2300	0.886	0.883	

Alta Temperatura.

En general, la temperatura es un factor muy importante en la degradación y estabilidad de los espejos, pues puede provocar que el desempeño del espejo disminuya rápidamente. La velocidad de degradación es muy sensible a la temperatura. De acuerdo con las recomendaciones [15], en este tipo de pruebas la temperatura no debe exceder 80°C.

El propósito de esta serie de pruebas es examinar la degradación y estabilidad de los espejos bajo estas condiciones. Cada espejo se calentaba y mantenía a 70° C dentro de una mufla; a intervalos de 24 horas se medía su reflectancia y revisaba su apariencia. La duración del experimento fue de 72 horas.

La siguiente tabla muestra que las películas no se ven afectadas.

Tabla 9. Reflectancias después de exposición a 70° C

Muestra	Espesor (Å)		Reflectancia ρ_r (± 0.001)			
	Al	SiO ₂	Previa	Tiempo de Exposición		
				24h	48h	72h
09-29-3	1413	1552	0.846	0.847	0.848	0.847
09-22-3	1208	2500	0.868	0.869	0.867	0.866
09-14-1	1247	2361	0.885	0.886	0.885	0.885
07-01-2	1000	2000	0.865	0.864	0.863	0.863

Inmersión en Solución Salina.

Se utilizó una solución de cloruro de sodio al 5% en peso en sustitución de una cámara de niebla salina, equipo con el que no cuenta el Instituto de Ingeniería. La inmersión de los espejos se efectuó a una temperatura que oscilaba entre 13 y 16°C, donde permanecieron por 72 horas. Para examinar la corrosión y variación en la reflejancia se revisaban cada 24 h, previo enjuague con agua destilada para eliminar restos de sal.

Salvo un espejo que sufrió apreciable corrosión (figura 5.5), en el resto no hubo daño. La siguiente tabla contiene toda la información.

Tabla 10. Reflejancias después de inmersión en solución salina.

Muestra	Espesor (Å)		Reflejancia ρ_n (± 0.001)				Comentarios
	Al	Si, O ₂	Prevía	Tiempo de Inmersión			
				24h	48h	72h	
10-07-3	1257	2850	0.884	0.884	0.885	0.884	
10-01-3	980	1557	0.845	0.845	0.847	-----	corrosión local
09-14-3	1247	2361	0.879	0.878	0.881	0.880	
07-16-3	1000	2200	0.868	0.868	0.869	0.868	

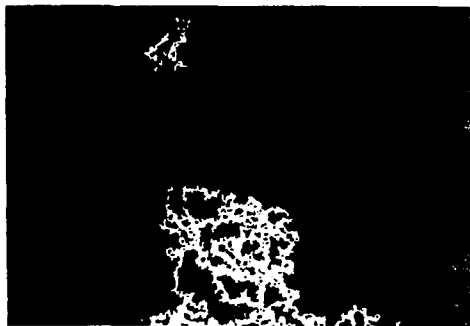


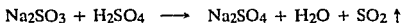
Figura 5.5.
Fotografía de la muestra 10-01-3 después de 24h de inmersión.

Atmósfera de Bióxido de Azufre

Para simular la corrosión provocada por las condiciones atmosféricas en sitios industrializados, se escogió bióxido de azufre como agente contaminante.

Las muestras se exponían dentro de un desecador de vidrio, con un volumen de 10 dm³ aproximadamente y 50 mL de agua, al SO₂ gaseoso que se hacía llegar por medio de una válvula adaptada a la tapa del desecador.

Los espejos descansaban sobre una rejilla de cerámica para evitar que tuvieran contacto directo con el agua. El SO₂ se producía mediante la siguiente reacción química:



El procedimiento de generación del gas fue como sigue:

- ▣ *Introduciendo en un matraz kitasato 5g de sulfito de sodio*
- ▣ *Agregando ácido sulfúrico concentrado, cuidadosamente por medio de un embudo de seguridad, produciéndose de inmediato el SO₂.*
- ▣ *Para detectar la presencia del gas dentro del desecador, se colocó en el interior una tira de papel indicador de pH ligeramente humedecido en la misma posición que los espejos. Cuando el indicador señalaba un valor de cero, se detenía la entrada del SO₂.*

Los espejos se mantuvieron bajo estas condiciones por 48 horas, extrayéndolos sólo a las horas 1, 3, 6, 12, 24 y 48; para verificar su estado y propiedades ópticas. Después de cada revisión, se volvía a llenar el recipiente con el gas.

Los resultados se presentan a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11. Reflejancias después de exposición a Atmósfera de Bióxido de Azufre

Muestra	Espesor (Å)		Reflejancia ρ_s (± 0.001)							Comentarios
	Al	SiO ₂	Previa	Después de: (horas)						
				1	3	6	12	24	48	
09-29-1	1413	1552	0.852	0.853	0.853	0.852	0.852	0.848	0.830	
09-24-3	1453	2600	0.874	0.873	0.873	0.874	0.874	0.872	0.864	Muchos agujeros pequeños
09-18-3	1225	2534	0.881	0.881	0.880	0.881	0.880	0.881	0.881	
08-20-1	1167	2105	0.881	0.880	0.880	0.880	0.879	0.880	0.879	
07-08-2	1092	2000	0.872	0.872	0.873	0.872	0.872	0.873	0.872	

Pruebas de Abrasión.

Una vez en operación, los espejos acumularán polvo y se erosionarán por efecto del paso de partículas arrastradas por el viento; se hace necesario limpiarlos con cierta frecuencia.

Estos aspectos afectarán su especularidad, pues absorben y dispersan la luz, disminuyendo la eficiencia del concentrador solar. Entonces, es importante considerar la resistencia a la abrasión como una propiedad importante de los espejos.

La abrasión y resistencia a la abrasión son difíciles de cuantificar. En este caso, se llevaron a cabo pruebas sencillas de abrasión. Consistieron en limpiar con un trapo suave bajo condiciones de sequedad y humedad.

El procedimiento fue como sigue:

Se talló la superficie de los espejos con un trapo limpio, seco y suave, aplicando un esfuerzo moderado. Después de frotar alrededor de 200 veces, no hubo cambios conspicuos en la apariencia y la reflejancia. A continuación, pero ahora con un trapo empapado en una solución de detergente común, se repitió la prueba. Se obtuvieron los mismos resultados que en el experimento anterior.

Según se observa en la siguiente tabla, la capa protectora es lo suficientemente fuerte para soportar, sin riesgo, lo que sería el mantenimiento de limpieza

Tabla 12. Reflejancias después de las pruebas de abrasión.

Muestra	Espesor (Å)		Frotamientos		Reflejancia ρ_r (± 0.001)	
	Al	SiO ₂	Seco	Húmedo	Previa	Posterior
03-24-1	1300	2570	200	-----	0.865	0.865
04-06-2	1000	2500	-----	200	0.866	0.865
07-14-1	1200	2100	200	-----	0.873	0.874
07-06-3	1050	2000	-----	200	0.873	0.874

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Características de la Película Protectora

La capa protectora sobre la película reflejante es de suma importancia para asegurar la duración del espejo, aunque el aluminio evaporado puede protegerse con una capa de óxido (Al_2O_3), su espesor llega a alrededor de 40 \AA [9]; esta película no resulta suficiente para prevenir la degradación de las propiedades reflejantes bajo condiciones climáticas severas y, sobre todo, a la limpieza frecuente de la superficie del espejo.

Por ejemplo, Cong Songling y Chen Jiefeng [26] reportan resultados de intemperismo al medio ambiente de una hoja de aluminio anodizado con una capa de 3 a $4 \mu\text{m}$ de óxido y sus microporos sellados por el método del agua caliente (hot-water-method). Dicho material soportó el ataque sólo de 2 a 3 meses; después de este tiempo, empezó a degradarse.

Así que, es absolutamente necesaria una capa protectora dura y transparente en este tipo de espejos.

Como se comenta en la referencia 9, la película protectora a base de trióxido de silicio (Si_2O_3) constituye un excelente material para realizar recubrimientos, puesto que se adhiere firmemente al aluminio y se endurece rápidamente cuando se expone al aire a causa de la oxidación de su superficie. El trióxido de silicio presenta alta absorbanza a longitudes de onda inferiores a 300 nm [9]. Sin embargo, esto no afecta la reflexión de los espejos, puesto que se desea que trabajen en el ámbito del espectro, que va de 350 a 2,500 nanómetros.

La composición y propiedades ópticas de la película de Si_2O_3 depende, en gran manera, de las condiciones de evaporación: velocidad de deposición y presión de oxígeno. Con objeto de producir una película con las características reflejantes que deseamos (nula absorbanza en UV cercano, visible e infrarrojo cercano), se requiere una velocidad de evaporación de 1 a 3 Å/s y una presión de oxígeno de aproximadamente 1×10^{-4} Torr, pues de otra manera, el compuesto que se deposita en los espejos no es Si_2O_3 .

Como ya se mencionó en el capítulo 3, un estudio sobre las películas de óxidos de silicio, mostró que se favorece la formación de una capa protectora conformada por un óxido de silicio con relación estequiométrica 1:1.5 (para mayor comodidad, expresado como Si_2O_3).

Para determinar la absorción de esta capa, se depositó en un portaobjetos únicamente trióxido de silicio. Comparando la transmitancia antes y después de haber evaporado, se corroboró que dicha capa tiene una absorbanza mínima a la radiación en el ámbito de interés del espectro. La figura 6.1 presenta los espectros correspondientes.

El tipo de estructura que posee la película protectora puede ser policristalina, monocristalina (un solo cristal) o amorfa, dependiendo de la temperatura en el sustrato y la velocidad de deposición [21]. De un análisis de los patrones de difracción de rayos X de la muestra ya mencionada, se obtuvo que su estructura es amorfa (fig. 6.2), coincidiendo con lo mostrado en la bibliografía [42]. Normalmente, las películas de óxidos de silicio evaporadas y condensadas a temperaturas menores a 400°C son vítreas y amorfas; presentan un grado diferente de polimerización, debido a la cantidad de oxígeno presente, llegando a aparecer enlaces -Si-Si-.

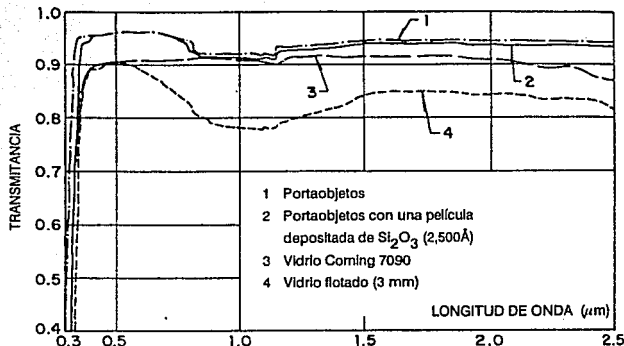


Figura 6.1. Transmítancia de tres tipos de vidrio

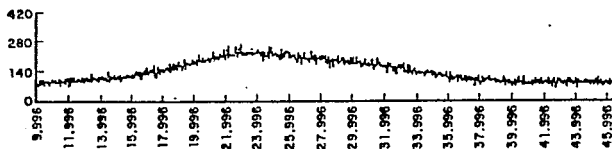


Figura 6.2. Patrón de difracción de rayos X de la película de Si_2O_3

Si se mantiene una baja presión de oxígeno en el evaporador o si la velocidad de evaporación es elevada, la capa protectora revela tanto una absorbancia a todas las longitudes de onda menores a 500 nm, como un color amarillento (típico cuando se tiene monóxido de silicio); en las referencias 7 y 9 se reportan datos similares.

En resumen, la velocidad con que se depositan los vapores de Si_2O_3 y la presión de oxígeno influyen en gran manera en la composición de la capa protectora y en la reflejancia de los espejos de aluminio de primera superficie.

Influencia de la Evaporación y el Espesor de Aluminio en la Reflejancia

Existen opiniones divididas respecto a la velocidad de deposición del aluminio. En la referencia 9, se recomienda que para alcanzar altas reflejancias, es necesaria una velocidad de deposición elevada. Sin embargo, otros investigadores consideran que este aspecto no es importante ni tiene influencia [19].

Para determinar cual criterio resulta verdadero y útil a nuestras necesidades, se prepararon algunos espejos (evaporando únicamente aluminio), unos a alta y otros a baja velocidad; su reflejancia fue medida y los resultados se presentan en la Tabla 13. De ellos, se concluyó que es necesario evaporar rápidamente el aluminio.

Con estos mismos espejos y otros más fabricados especialmente, se hizo también un estudio acerca del espesor óptimo. Observamos que no existe una dependencia entre la reflejancia y el espesor de la película de aluminio si éste es superior a 1,000 Å. En la figura 6.3 se aprecia que a espesores menores a 1,000 Å, la reflejancia decrece; la razón es que la capa de aluminio es tan delgada que deja pasar luz, puesto que se podía mirar a través de ella.

Tabla 6.13. Reflejancias a diferentes velocidades de deposición de aluminio.

Muestra	Espesor de Película (Å)		Velocidad de deposición de Aluminio	$\rho_s (\pm 0.001)$
	Al	SiO ₂	(Å/s)	
04-29-2	4000	2000	8.0	0.864
07-08-2	1092	2000	7.4	0.872
04-27-1	2016	2000	7.3	0.841
02-20-1	1070	2000	1.8	0.805
04-20-1	2000	2000	1.5	0.811
04-20-1	2000	2000	1.5	0.803
05-04-1	2000	2500	7.0	0.866
03-30-2	1313	2500	2.9	0.809

0.85

Tabla 6.14. Reflejanacias a diferentes espesores de aluminio.

Muestra	Espesor de Película (Å)		ρ_s
	Al	Si ₂ O ₃	
06-22-2	400	-----	0.732
06-01-2	633	-----	0.867
06-11-1	648	-----	0.868
06-24-1	1000	-----	0.870
06-29-3	1000	-----	0.871
05-27-2	2000	-----	0.864
06-03-3	4000	-----	0.850

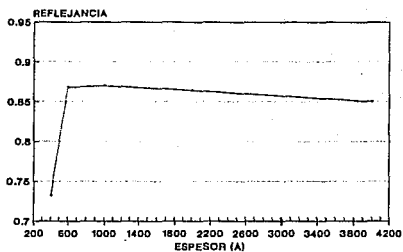


Figura 6.3. Relación entre el espesor de la película de Al y su reflejanacia.

Espesores Óptimos para las Películas

Aparte de las razones anteriores, resulta importante optimizar el espesor de la película reflejante para que el costo de fabricación no sea elevado y para que los esfuerzos mecánicos en las interfases Al-vidrio y Al-Si₂O₃ no provoquen desprendimientos de las películas al deslizarse una superficie sobre otra.

Estos deslizamientos son causados por la diferencia en sus coeficientes de expansión térmica. Entonces, al calentarse y enfriarse el espejo, una película se dilata más que la otra, produciéndose pequeños movimientos que pueden llegar a romper los enlaces existentes. Esto se acentúa si las capas son más gruesas, pues pierden flexibilidad por ser más rígidas.

Con base en los resultados y en las consideraciones ya expuestas, se puede concluir que un espesor de película de 1,000 Å (± 200 Å) para el aluminio es el más apropiado, pues no resulta ni delgado ni grueso.

Considerando al Si₂O₃, éste debe ser lo suficientemente grueso para proteger al aluminio de la degradación y abrasión, pero no a tal grado que reduzca la reflejancia de los espejos.

Nuevamente se fabricaron otros espejos, pero variando el espesor de la capa protectora. Se observó que a espesores menores de 2,000Å, la reflejancia era alrededor de 6% menor que en los espejos con espesores de 2,100 a 2,500Å.

En un principio se pensó que valores entre 1,500 y 2,000 resultaban suficientes, pero los bajos valores de reflejancia motivaron a fabricar espejos más gruesos y bajo una técnica más estricta en cuanto a velocidad de evaporación se refiere; fue entonces que se escogió un valor de 2,500Å, que resultó bastante bueno. Se descartaron espesores mayores porque resultaban ya espejos muy gruesos, aunque hay que señalar que se fabricó un lote a 2,850 Å de Si₂O₃ y su comportamiento fue similar al de los espejos seleccionados como los ideales.

Limpieza en el Vacío

Incluye la limpieza de la cámara de evaporación además de los vidrios.

Las películas se depositan dentro de la cámara, así que la limpieza de ésta no debe ignorarse. Los contaminantes en el proceso de evaporación pueden ser causa del inicio de la corrosión en los espejos.

A menudo la razón de la carencia de adhesión en la película [7], son las moléculas de aceite acumuladas en la superficie del sustrato antes de la deposición. El flujo de vapores de aceite a través de la línea hacia la cámara de evaporación del aceite de las bombas de vacío, puede añadir algunas impurezas

Se ha hecho un gran esfuerzo por reducir dicho fenómeno. Los fabricantes de bombas de vacío incluyen en sus equipos trampas criogénicas y baffles con enfriamiento de agua para condensar los vapores y disminuir la contaminación. También es importante emplear una correcta técnica de evaporación que implique el conocimiento de los fenómenos que intervienen, dado que el manejo del vacío no es cosa fácil y menos si no se cuenta con el equipo adecuado.

Para determinar el grado de contaminación por aceite dentro del evaporador, se colocó en el interior, y cercano a los vidrios, un cristal especial de cloruro de sodio. Después de 30 días y poco más de 10 evaporaciones, se midió la transmitancia del cristal. En el infrarrojo no se observó variación alguna, pero en el UV y el visible, la baja de transmitancia fue del 5% (cifra importante). Esto significa que un buen número de moléculas de aceite se acumularon en la superficie del cristal de sal a lo largo de un mes. Sin embargo, las cuatro horas que se requieren para fabricar un espejo resultan sumamente cortas para que la presencia del aceite fuese determinante. Conocer cuánto aceite puede contaminar en el transcurso de cuatro horas es imposible dado que no se pueden detectar esas cantidades por medios comunes de análisis fotométricos. Otro tipo de técnicas de análisis puede ser llevado a cabo -las que se emplean en química analítica por ejemplo-, pero a costa de la destrucción del cristal.

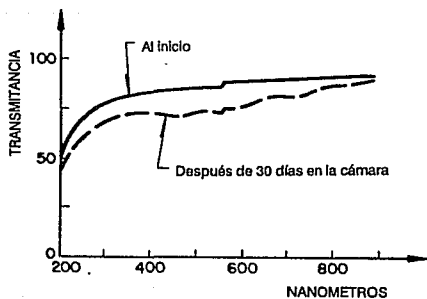


Figura 6.4. Transmitancia del cristal de cloruro de sodio

Pruebas de Intemperismo

Es necesario mencionar que todos los valores de reflejancia medidos una vez iniciadas las pruebas de intemperismo se efectuaron con un reflectómetro de reciente adquisición, y que las cifras de reflejancia previa mostradas en la tabla 5 se midieron con un modelo de mayor antigüedad, el cual ya había pasado por varias reparaciones. Una vez aclarado esto, se justifica el que en dicha tabla, las reflejancias de los espejos aparentemente aumentan a la semana de estar expuestos a la humedad.

El reflectómetro tiene una precisión en las lecturas de ± 0.001 . Se trató de buscar una correlación entre las lecturas de los dos reflectómetros -pues el modelo antiguo daba valores inferiores a los verdaderos- para obtener lo que sería un factor de corrección y convertir las cifras dadas por él.

Espesor de Si_2O_3	Multiplicar por:
2,000-3,000	1.045
menos de 2,000	1.072

Con estos números se corrigieron las reflejancias iniciales de la tabla 5, la tabla 13 y la tabla 14.

De acuerdo con los resultados en las pruebas de humedad (Tablas 5, 6 y 7), la muestra 04-08-2 mostró una severa pérdida de reflejancia a causa del espesor de la capa protectora, 3.5 veces menos gruesa que el valor ideal propuesto. El resto permaneció prácticamente sin cambio, sobre todo aquellos espejos elaborados en la última etapa de la investigación (con números de identificación a partir de 07-01-01) y que mostraron ser los mejores. Estos últimos espejos se fabricaron siguiendo estrictamente los criterios ya expuestos, basados en los resultados preliminares.

Se puede notar la menor calidad de los espejos fabricados en un principio (Tabla 5) pues, sus reflejancias, en la mayoría de los casos, son inferiores al valor mínimo aceptable de 0.870. Además, las pruebas de humedad sí afectaron, aunque de manera ínfima, su reflejancia. Podemos observar que fueron reportados algunos agujeros en ciertas muestras, estos agujeros eran muy pequeños y, obviamente, no influyeron en la reflejancia de los espejos. De hecho, comenzaron a hacerse notar una o dos semanas después de iniciada la prueba de intemperismo.

Con el paso del tiempo, todos los agujeros permanecieron sin cambio y continuaron del mismo tamaño hasta el final de la prueba. Su área no se incrementó; basado en ello, planteamos la hipótesis que dichos agujeros resultan de defectos en la película protectora.

Al no quedar completamente cubierta la película de aluminio, debido a pequeños agujeros presentes en la capa de Si_2O_3 , el vapor de agua oxidó al metal, dando lugar a una delgada capa de óxido de forma semejante a cilindros microscópicos que actuaron como tapones bloqueando y previniendo al resto del aluminio de su oxidación y corrosión, con tal suerte que el crecimiento de los agujeros se detuvo.

En la tabla 6 aparecen otros materiales reflectores que se incluyeron solo a modo de comparación. Se aprecia una alta reflejancia del espejo de plata de 2a. superficie, traído de una planta solar; la hoja de aluminio, para tener un ejemplo de cuánto puede ser capaz de reflejar dicho material, y, finalmente, la cinta 3M, cuyos adhesivos no resisten la humedad pese a ser un material con gran capacidad reflectora.

En resumen, podemos afirmar que los espejos soportan por completo el ataque de la humedad y sin necesidad de tener protección en sus costados, aunque la sugerimos indispensable como medida de seguridad para los espejos definitivos de una planta solar.

En el ciclo térmico, las superficies de los espejos fueron cuidadosamente revisadas para buscar si hubo algún daño, rotura o desprendimiento de las películas. En la Tabla 8 se observa que no existió en ningún espejo alteración de las dos películas, únicamente rotura del vidrio a causa del brusco choque térmico al momento de ser introducidos en el nitrógeno líquido. Las reflejancias disminuyeron un poco.

De los espejos sometidos a alta temperatura, el 07-01-2 y el 09-22-3 tuvieron una ligera disminución de reflejancia. Dado que la duración de esta prueba fue de únicamente 72 horas, y si comparamos que en las pruebas de humedad, donde el tiempo de exposición

alcanzó las 5 semanas, la reflejancia también disminuyó una magnitud similar; verificamos lo establecido por la referencia [15], la cual señala a las altas temperaturas como causa importante de degradación.

La inmersión en solución salina y la atmósfera de bióxido de azufre se establecieron como las pruebas más agresivas y en las que se esperaba hubiera disminución importante de la reflejancia. Sin embargo, los resultados demostraron la alta calidad de los espejos y su gran resistencia a condiciones adversas. Las tablas 10 y 11 ejemplifican esta aseveración.

Si bien hubo descenso de la reflejancia en las muestras sometidas a la atmósfera de SO_2 , sólo la 09-29-1 y la 09-24-3 presentaron variación importante; de ellas, el espejo más atacado posee una capa protectora más delgada, mientras que en el otro surgieron numerosos agujeritos, producto de defectos en su fabricación; el resto no los tuvo.

En la inmersión salina ocurrió un caso similar, la muestra 10-01-3 tuvo corrosión local (fig. 5.5) producto de un defecto en los costados y de la presencia de un agujero. La corrosión, a partir de esos puntos, se propagó por el resto del espejo.

La reflejancia y apariencia de los espejos después de las pruebas de abrasión, tanto en húmedo como en seco, no varió. Esto prueba la dureza de la capa protectora, tan necesaria para los espejos de una planta solar, que para operar con alta eficiencia debe mantenerlos siempre limpios.

En vista de los resultados, se percibe que en la fabricación de los espejos, incluso si se siguen cuidadosamente las condiciones de operación y limpieza necesarias, siempre existe la posibilidad de que surja algún espejo con defectos; sin embargo, dicha probabilidad es pequeña.

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

El análisis de los experimentos y sus resultados permitió llegar a las siguientes conclusiones y plantear algunas sugerencias:

- Los espejos de aluminio de primera superficie con una película protectora de Si_2O_3 son capaces de alcanzar una alta reflectancia (0.89) además de ser resistentes a las condiciones corrosivas del medio ambiente. Estas dos características los hacen buenos candidatos para ser aplicados como materiales reflejantes, principalmente en energía solar.

- En el ultravioleta, los espejos de aluminio tienen una reflectancia mayor que los de plata [27]; por lo tanto, para procesos de purificación donde se manejan radiaciones UV se constituyen como una buena opción.
- La película de Si_2O_3 , producida vía evaporación reactiva y a una velocidad muy baja, demostró ser una excelente capa protectora. Presentó una estructura de tipo amorfo, conformada por diferentes especies químicas (SiO , SiO_2). La relación estequiométrica entre átomos de oxígeno y átomos de silicio fue 1.5:1. Razón por la cual se adoptó la fórmula aparente Si_2O_3 . Es importante resaltar que las propiedades de una película con esta composición, son diferentes a las de aquellas conformadas por únicamente alguno de los dos óxidos del silicio. La formación de la película Si_2O_3 depende de la rapidez de evaporación en la atmósfera de oxígeno.
- El espesor óptimo para la película de aluminio es de $1,000 \text{ \AA}$ con una variación de $\pm 200 \text{ \AA}$. La capa de trióxido de silicio es la clave para alcanzar las propiedades ópticas deseables y de resistencia a la corrosión. Se propone que, para conseguir una protección realmente efectiva, un espesor de $2,300$ a $2,600 \text{ \AA}$ es el indicado.
- Para obtener valores altos de reflectancia, se utilizó una velocidad de deposición de 3.5 \AA/s o mayor, en el aluminio; mientras que para la evaporación del monóxido de silicio, una elevada presión de oxígeno (1×10^{-4} Torr) y velocidades inferiores a 3 \AA/s son muy importantes y necesarias.
- La limpieza de los vidrios también es vital. Permite una buena adherencia de la película de aluminio, así como una completa eliminación de su corrosión.

- El manejo de dos cañones de electrones es un avance técnico de relevancia, pues permitió evaporaciones sucesivas de Al y SiO sin necesidad de romper el vacío. Este aspecto constituyó la columna vertebral de este trabajo de investigación, junto con la velocidad de evaporación; así mejoró la adhesión de las películas al vidrio y entre sí, pues ya no se introducían contaminantes del aire.
- La contaminación al sustrato por el aceite proveniente de las bombas de difusión y mecánica es muy importante y debe evitarse.
- En los pocos espejos donde hubo corrosión, ésta se presentó en pequeñas áreas donde no había la protección suficiente por parte del Si₂O₃. Esto significa que la corrosión depende del proceso de preparación de esta capa, particularmente el espesor y su uniformidad a lo largo de todo el espejo.
- Los resultados de las pruebas de intemperismo mostraron que no es necesaria una protección en los costados del espejo. Sin embargo, considero que para un espejo de mayor área y fabricado con una técnica diferente tal sería el caso para los espejos definitivos en una planta solar, resultará muy recomendable este tipo de protección basado en pinturas especiales.

En la vida diaria, uno observa que la degradación de la película reflectora inicia en los lados, sitios que no se protegen y donde se acumula humedad; ha sucedido lo mismo en plantas solares ya en operación (Mojave), donde, incluso, sí están protegidos en dichas zonas.

Si bien el enlace que existe entre las dos películas y el vidrio es sumamente fuerte, y ello se comprobó al no haber sufrido corrosión importante en los espejos, esta protección no resulta complicada y asegura una mayor duración de los mismos.

- Se probaron como sustrato diferentes tipos de vidrio (flotado, de portaobjetos, Corning 7090, etc.). Después de las pruebas de intemperismo, se comprobó que no había una diferencia detectable en las propiedades ópticas de los diferentes espejos, lo que indicó que existe una amplia gama de vidrios disponibles para la fabricación de espejos de primera superficie.
- En esta investigación, el vidrio escogido como el idóneo fue el flotado comercial, por su mínima rugosidad, bajo costo y disponibilidad. El aluminio se depositó sobre la superficie libre de estaño en la mayoría de los espejos, pero se comprobó que en los que no ocurrió así, su desempeño fue el mismo. Esto nos lleva a concluir que no importa sobre cuál cara se fabrique la capa protectora.
- A diferencia de los espejos de segunda superficie, que ocupan vidrios especiales que no se fabrican en México -blancos principalmente, pues absorben el mínimo de radiación-, los espejos de primera superficie soportan casi cualquier tipo; por ello, sugiero el manejo del vidrio flotado, pues, por las características ya citadas, los costos de fabricación disminuyen. Hay que destacar este aspecto, ya que actualmente el costo de instalación de una planta solar que utilice concentradores a base de espejos de segunda superficie, manufacturados con vidrios blancos, es superior en casi 70% al de una planta termoeléctrica [4]; de tal manera que si ahora se utiliza un vidrio sustancialmente más barato, estaremos haciendo más atractiva una inversión en este tipo de instalaciones.
- Hasta aquí se han conjuntado y resumido todas las experiencias y resultados derivados a lo largo de varios años de investigaciones y de los que esta tesis forma parte. Las perspectivas resultan prometedoras, la tecnología de los espejos de aluminio de primera superficie, si bien representa un avance de factibilidad técnico no muy espectacular, es innovadora en el campo de la energía solar y acorde a las necesidades y posibilidades de este país. Se hace necesario continuar con el desarrollo de esta técnica y no permitir que se pierda en el olvido, para así convertirla en una realidad que ayude al progreso de nuestra nación.

Lo anterior se refiere al hecho de que los espejos con los que se ha trabajado hasta ahora se limitan a un área reducida. Para asegurar la continuidad de este trabajo de investigación, hay que iniciar un proyecto de manufactura de espejos de mayor tamaño, cercanos a los que se planea instalar en una planta solar competitiva a escala industrial.

Para ello, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, partiendo de lo desarrollado hasta ahora, se encuentra adaptando lo que son técnicas de deposición en vacío por medio de erosión iónica (sputtering), empleando lo que se conoce como magnetrones lineales [8, 12], que permitan obtener espejos uniformes y de mayor tamaño.

Es importante indicar que la geometría y tamaño de los electrodos son los aspectos a considerar y que, una vez dominada la técnica de deposición, será posible fabricar los espejos exitosamente a nivel industrial.

BIBLIOGRAFIA

- 1) G. Lundberg; The Future of Fossil Fuels in Power Plants; *A future for energy, flower's 90; Proceedings of the florence world energy research symposium*; Firenze, Italia; S.S. Stecco y M.J. Morai, editores; Pergamon Press; Exeter, U.K.; 1990.
- 2) R. Aringhoff; From my Point of View; *Sun World*; Vol. 16, No. 4; Ed.: International Solar Energy Society (ISES); Birmingham, U.K.; 1992.
- 3) *Oil & Gas Journal*; Worldwide Oil; número especial, 31/12/1990.
- 4) P. Tovar, J.M. Rosado; *Externalidades de una Planta Termoeléctrica*; Tesis de Licenciatura; FI, UNAM; 1993.
- 5) C. Jiefeng, R. Almanza, M. Mazari, et.al.; *Avances de la Segunda Generación de Espejos de Al-SiyOx de Primera Superficie*; Informe Interno Instituto de Ingeniería, Proyecto 1117, UNAM; 1992.
- 6) C. Jiefeng, R. Almanza, M. Mazari, et.al.; *Pruebas de Espejos en Atmosferas Corrosivas y bajo Condiciones Abrasivas*; Informe Interno Instituto de Ingeniería, Proyecto 2118, UNAM; 1992.
- 7) R. Almanza, M. Mazari, R.M. Soriano; *Uso de una Cámara de Intemperismo para probar la Segunda Generación de Espejos Solares*; Informe Interno Instituto de Ingeniería, Proyecto 0118, UNAM; 1991.
- 8) M. Ramírez; *Construcción de Espejos de Plata de Primera Superficie para Aplicaciones en la Energía Solar*; Tesis de Maestría; DEPFI, UNAM; 1990.

- 9) G. Hass, J.B. Heaney, and W.R. Hunter, Reflectance and Preparation of Front Surface Mirrors for Use at Various Angles of Incidence from the Ultraviolet to the Far Infrared; *Physics of Thin Films, Advances in Research and Development*, Ed. por G. Hass, M.H. Francombe y J.L. Vossen; Vol. 12; Academic Press; 1982.
- 10) Maissel L. I. and R. Glang eds., *Handbook of Thin Film Technology*; Capítulo 6; MacGraw-Hill, New York; 1970.
- 11) G.R. González, R. Olvera; *Evaluación de Superficies Reflectivas*; Proyecto Terminal de Ingeniería Física; UAM Azcapotzalco; 1989.
- 12) A.W. Bacuchi, *Preparation and Properties of a Multilayer Reflector Stack Consisting of Glass/Al₂O₃/Al/Ag*; Tesis de Maestría; Universidad de Denver; 1983.
- 13) J.L. Bazán; *Intemperización de Espejos para uso en Energía Solar*; Tesis de Licenciatura; FQ, UNAM; 1989.
- 14) W. Correa, R. Fuentes, G. Fuentes; *Proyecto de un Laboratorio de Implantación de Iones*; Tesis de Licenciatura; FC, UNAM; 1982.
- 15) K. Masterson, A.W. Czanderna, J. Blea, et al; *Matrix Approach to Testing Mirrors*; Parte 2, SERI/TR-255-1627 DE 83 01 1986; 1983.
- 16) J.C. Richmond; *Measurement Techniques for Evaluating Solar Reflector Materials*; (US) National Bureau of Standards, PB 85-119469 NBS-GCR-84-475; 1984.
- 17) A.W. Czanderna, K. Masterson, T. Thomas; *Silverglass Mirrors for Solar Thermal Systems*; SERI/SP-271-2293 DE 85 000537; 1985.
- 18) K.L. Chopra; *Thin Film Phenomena*; Robert H. Krieger Publish. Co. Huntington, N.Y.; 1979.
- 19) R.N. Griffin; Thin Film Solar Reflectors, *Solar Energy Materials*, Vol. 3, No. 1 y2; pp. 227; 1980.
- 20) R. Glang; Reactive Evaporations; En Ref. [10]. Capítulo 1.
- 21) Imdad H. Khan, The Growth and Structure of Single-crystal Film, En Ref. [10], Capítulo 10.
- 22) William E. Dennis and James B. McGee; Silicone Resins for Protection of First Surface Reflectors; *Solar Energy Materials*; Vol. 3, No.2; 1980.
- 23) Campell D.S., Mechanical Properties of Thin Films, En Ref [10]. Capítulo 12.
- 24) R. Brawn; Thin Film Substrates; *Handbook of Thin Film Technology*; L.I. Maissel, R. Glang (editores); McGraw Hill; 1970.
- 25) E. F. Cuddihy; Theoretical Considerations of Soil Retention; *Solar Energy Materials*; North-Holland Publishing Co.; Vol. 4; 1980.
- 26) C. Songling, Chen Jiefeng, et al; *Bright Anodized reflective film on Aluminum Foil*; Reporte del Instituto de Cerámicos de Shanghai; 1990.
- 27) Standard Test Method for Solar Absorption, Reflectance and Transmittance, ASTM Designation E903-82. 1983 Book of ASTM Standards, Vol. 12.02.
- 28) Specification for Solar Constant and Air Mass Zero Solar Spectral Irradiance Tables, ASTM Designation E490; 1976 Annual Book of ASTM Standards; Vol. 15.03.
- 29) Standard Terrestrial Direct Normal Solar Irradiance Tables for Air Mass 1.5, ASTM Designation E891-82. 1983 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 12.02.
- 30) Drummetter L.F. Jr. and Hass G., Solar Absorbance and Thermal Emittance of Evaporated Coatings, *Physics of Thin Films*, Academic Press, (1964), pp 305-361.

- 31) R. Almanza, Chen Jiefeng, G. Correa and M. Mazari, Advances on Aluminum First Surface Solar Reflectors; *Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XI: Selective Materials, Concentrators and Reflectors, Transparent Insulation and Supercapacitors*; SPIE Proc. Series; Vol. 1727, pp. 325-330, 1992.
- 32) R. Almanza, F. Muñoz y M. Mazari; Development of Aluminum First Surface Mirrors for Solar Energy Applications; *Solar Energy*; Vol. 48, No. 5; Pergamon Press; Tarrytown, N.Y.; 1992.
- 33) National Standard for optical parts with Al-SiO Reflective Films by PVD, GB 1320-77 (1978) (In Chinese).
- 34) *Vacuum Technology*; John Wiley & Sons; New York; 1959.
- 35) Encyclopedia of Science and Technology; Mc Graw Hill; 6th Edition; Vol 15; 1980.
- 36) R. Almanza, R. Soriano; *Terminación y Puesta en Marcha de una Cámara de Intemperismo*; Informe Interno Instituto de Ingeniería, Proyecto 0101, UNAM; 1990.
- 37) Manual de Operación del Espectrofotómetro Shimadzu; En Lab. de Investigaciones de Energía Solar, Temixco, Morelos.
- 38) Manual de Operación del Espectrofotómetro Cary 2300; En UAM, Iztapalapa.
- 39) E. Ritter; Deposition of oxide films by reactive evaporation; *J. Vacuum Sci. Technol.*; Vol. 3, pp 225; 1966.
- 40) E. Ritter; Zur Kenntnis der SiO- und Si₂O₃- phase in dünnen schichten; *Optica Acta*; Vol. 9, pp 197; 1962.
- 41) W.A. Pliskin, H.S. Lehman; Structural evaluation of silicon oxide films; *J. Electrochem. Soc.*; Vol. 112, pp 1013; 1965.
- 42) H.K. Pulker; Coatings on Glass; *Thin Films Science and Technology*, Vol. 6; Elsevier; Amsterdam; 1984.
- 43) *Handbook of Chemistry and Physics*; CRC Press Inc.; Boca Ratón, Florida; 1990.

ANEXO

Algunas propiedades físicas y termodinámicas

	ALUMINIO	MONÓXIDO DE SILICIO	BIÓXIDO DE SILICIO
Peso Molecular	26.98 g/mol	44.08 g/mol	60.06 g/mol
Densidad	2.70 g/cm ³	2.13 g/cm ³	2.20-2.70 g/cm ³
Punto de Fusión	660.45 °C	1702 °C	1610-1710 °C
Capacidad Caloríf.	0.897 J/g K	0.678 J/g K	0.739 J/g K
ΔH_{fus}	10.71 kJ/mol	-----	8.51 kJ/mol
Coefficiente de Expansión Térmico	$23.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	-----	$5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Dureza	2-2.9 mohs	-----	6-7 mohs
Tipo de Enlace	Metálico	Covalente	Covalente, Forma malla tridimensional infinita.

Energías de Enlace:

Si-Si	$326.8 \pm 10 \text{ kJ/mol}$
Al-Al	$186.2 \pm 9.2 \text{ kJ/mol}$
O-Si	$799.6 \pm 13.4 \text{ kJ/mol}$

Coefficiente de expansión térmico del vidrio flotado: $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$