



01178

1
23

**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería

**ESPEJOS SOLARES PARA
PLANTAS FOTOTÉRMICAS**

T E S I S

Que para optar al grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

Presenta:
GENARO ALBERTO CORREA MIRANDA

DIRECTOR: RAFAEL ALMANZA SALGADO

México, D.F., 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A lo largo de estos tres años, al tiempo que
la tesis iba cobrando forma,
he tenido la oportunidad de conocer a quienes
de manera directa o indirecta,
con su cariño, apoyo, estímulo, ideas y ejemplo
han aportado todo lo que soy y tengo ahora;
inspiración que ha sido volcada parcialmente
en este trabajo de investigación.

A Clemente y a Raúl

Mi mayor agradecimiento
a Rafael Almanza
por su paciencia, confianza y guía.

Resumen

Se presenta la metodología de fabricación de espejos de aluminio-cuarzo de primera superficie. Dadas sus características ópticas y de resistencia al medio ambiente, son buenos candidatos para ser utilizados como materiales reflejantes en equipos que concentran la radiación solar para su aprovechamiento en la generación de calor o electricidad.

Se elaboraron espejos de 30x60cm para demostrar la viabilidad de producir espejos con áreas superiores a 1m² destinados a concentradores solares. El tamaño máximo del espejo está determinado por las dimensiones de la cámara de evaporación.

Se trabajó vidrio flotado como sustrato para las películas por su fácil disponibilidad y costo. La película reflectora es de aluminio de alta pureza; los espesores óptimos para el aluminio fueron ~1000Å. El cuarzo se manejó como un depósito protector del aluminio para evitar su corrosión, las películas tuvieron espesores de ~3500Å.

Los espejos presentaron elevadas reflejancias (0.86) y resistencia a la corrosión. Se les sometieron a varias pruebas para simular condiciones adversas del medio ambiente y en ellas, la reflejancia, que es la propiedad óptica más importante considerando el uso al que se piensan destinar estos materiales, no disminuyó significativamente.

La técnica de depósito se basa en el fenómeno de erosión iónica, donde se hace uso de un plasma, con energía de cientos de eV, para desprender partículas de la sustancia deseada y depositarlas sobre un sustrato. Para ello se utilizaron equipos especiales denominados magnetrones, los cuales confinan el plasma en una región pequeña, lo que permite alcanzar una elevada ionización del gas o gases de trabajo a bajas presiones. En el depósito del aluminio se trabajó argón a presiones inferiores y cercanas a 1mTorr, aplicando un potencial de ~400V. Como el cuarzo es un material dieléctrico, su erosión se efectuó con una fuente de radiofrecuencia (13MHz) y bajo potencias de 1kW con presiones entre 2 y 3 mTorr.

Es necesario introducir un porcentaje de oxígeno al momento de evaporar el cuarzo para mantener su composición, debido a que los iones incidentes tienden a disociar la molécula. Cuando se trabajó sin oxígeno se obtuvieron superficies oscuras, amarillentas y de baja reflejancia (~0.60), denotando la presencia de monóxido de silicio.

La calidad de los espejos depende de los siguientes parámetros: calidad del blanco y temperatura del sustrato, energía del plasma, limpieza del sustrato, presión de trabajo, composición del gas de trabajo, geometría del equipo, espesor y uniformidad de la película.

Introducción

Es un tema de actualidad en todo el mundo el de la desregulación de la industria eléctrica y su apertura a la competencia con la justificación de aumentar la eficiencia de las empresas, bajar los costos de producción y de suministro de la energía eléctrica y facilitar el financiamiento de los futuros desarrollos. Pero además, estas empresas en todo el mundo se enfrentan a dos problemas que si bien no eran del todo inexistentes en el pasado, no habían alcanzado la importancia que tienen ahora: el primero es el relativo a la preservación del medio ambiente y el segundo a la conservación y uso eficiente de la energía. La prioridad que se otorga a la solución de estos problemas condicionará las tecnologías que se usarán en el futuro e influirá también en la futura estructura de las empresas eléctricas.

En México la apertura comercial a un mundo donde predomina la economía de mercado y las nuevas condiciones para el financiamiento del crecimiento económico, planteadas por los organismos financieros internacionales, implican la participación del capital privado en todos los proyectos. De otra forma sería imposible obtener los recursos monetarios necesarios para financiar los proyectos productivos que se supone llevan al crecimiento del país vía incremento de exportaciones y expansión del mercado interno.

Si a lo anterior agregamos los nuevos retos técnicos a que deben enfrentarse las empresas eléctricas, podríamos decir que estamos ante el inicio de una nueva época en el desarrollo de la industria eléctrica nacional.

Esta nueva situación empezó a manifestarse en los acuerdos alcanzados durante la negociación del Tratado de Libre Comercio (TLC) entre Canadá Estados Unidos y México, en el capítulo sobre energéticos y especialmente en el punto que se refiere a electricidad. Es en este contexto que se aprueba, con algunas modificaciones, el 18 de diciembre de 1992 la iniciativa para modificar la ley del Servicio Público de energía Eléctrica, pues las disposiciones sobre electricidad del TLC estaban en parte en contradicción con la ley del Servicio Público de Energía Eléctrica vigente y con lo dispuesto en el artículo 27 de la Constitución.

Estos cambios hacen posible la participación de la iniciativa privada en la generación de energía eléctrica. Consideremos también que para minimizar los costos de producción de electricidad es necesario tener un parque de generación diversificado donde haya unidades que suministren la energía para la base de la curva de carga y que en consecuencia operen a plena carga en forma casi continua, unidades que suministren la energía para los picos de demanda y que por lo tanto operarán durante muy pocas horas al día y unidades para cubrir la energía correspondiente a la parte media de la curva, que deberán tener características intermedias entre las dos antes mencionadas. Además, todo esto debe conseguirse limitando al máximo los impactos ambientales.

Dejando a un lado el sector eléctrico, y explorando el consumo energético del sistema socioeconómico mexicano nos damos cuenta que ha estado y está dominado por los hidrocarburos. Las inmensas reservas de crudo y gas natural descubiertas desde mediados de los setenta contribuyeron a afianzar su participación en la oferta y demanda energética global del país. Esto resulta preocupante desde el punto de vista de la Política Energética por la vulnerabilidad en seguridad energética al depender el desarrollo económico nacional de una sola fuente.

Desde luego que esto se hará patente hasta dentro de 50 años, tiempo en que la disminución de las reservas actuales pueda ser definitiva. Sin embargo es desde ahora que los diseñadores de la Política Energética deben empezar a considerar la necesidad de modificar la estructura industrial, el tipo de tecnología, los hábitos de consumo y con ello la demanda creciente de energéticos con la ayuda de otras fuentes y estar en condiciones de llegar a un desarrollo sustentable.

Es entonces donde la potencialidad de las fuentes renovables como medio para responder a la demanda creciente de los sectores tradicionales de consumo se hace presente. Para que esta situación se alcance no solo hace falta canalizar los recursos económicos, humanos y tecnológicos necesarios sino que resulta indispensable una firme determinación política que lo permita.

Externalidades y energías no convencionales

Hoy en día para poder tener un panorama completo del proceso de generación de energía eléctrica es necesario considerar otros factores importantes que van relacionados con el proceso mismo, como son los daños o alteraciones a los alrededores originados en la generación de electricidad.

Los efectos secundarios producidos por los procesos que se llevan a cabo son poco mencionados o simplemente ignorados y por lo tanto nunca cuantificados. Al considerar la producción de energía eléctrica como un proceso termodinámico cerrado, podemos definir como externalidades a los daños o impactos sobre los alrededores causados por la obtención de esa energía. Se deben incluir la extracción y procesamiento de combustibles.

Con la incorporación de las externalidades en la generación de electricidad se pretende medir y cuantificar este costo de producción, incluyendo a las fuentes renovables, y obtener lo que se llama el costo social o costo real de la energía.

Uno de los principales costos externos en la producción de energía eléctrica es el costo ambiental, que, en muchas ocasiones, no es tomado en cuenta.

Estos costos asociados a las externalidades constituyen uno de los principales argumentos a favor del uso de las *energías no convencionales*. El hecho de no tomarlos en cuenta establece una barrera de mercado difícil de librar para este tipo de tecnologías incluso en aquellos países donde la conciencia ecológica está más desarrollada. Los progresos tecnológicos realizados a lo largo de ya más de dos décadas contribuyen, a hacer más accesibles y atractivas las tecnologías basadas en la energía solar, energía eólica y la obtenida a base de biogas, principalmente, debido a la reducción de sus costos. Incorporando estos costos a los costos nivelados de generación para los sistemas convencionales de producción de energía eléctrica, la diferencia entre tecnologías se acorta.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de varios estudios de estimación de costos de externalidades en la generación eléctrica; la variación en los costos de un estudio a otro es significativa, esta discrepancia se debe principalmente a la falta de uniformidad en los criterios de evaluación, pero también los límites máximos de contaminantes permitidos por las autoridades pueden aumentar o disminuir estos valores.

Tabla 1. Estimados de externalidades en la producción de electricidad. Por fuente y tecnología (¢USD/KWh, Dólares de 1989)

	Menor-Mayor ¹	Instituto Fraunhofer ²	Universidad de Pace ²	Bonneville Power Administration ³	Otros ²
Combustibles y Nuclear					
Turbina de gas	0.09-2.8	0.53-2.8	0.7-1.0	0.09	X
Combustóleo	0.28-6.7	0.53-2.8	2.5-6.7	0.28	X
Carbón	0.04-25.8	0.53-2.8	2.5-5.7	0.72-1.07	0.04-25.8
Nuclear	0.001-37.78	0.55-5.5	2.91	0.001-0.014	0.06-37.8
No convencionales					
Fotovoltaica	0-0.4	0-0.204	0-0.4	X	0-0.15
Eólica	0-0.15	0-0.004	0-0.1	X	0-0.15
Biomasa	-0.012-0.7	X	0-0.7	0.012-0.55	X
Geotérmica	0-0.2	X	X	0-0.02	X
Aprovechamiento de basura	-3.6-46.6	X	2.79-2.8	-3.56-46.56	X
Solar térmica ⁴	---	---	---	---	0-1.68

1. Signo negativo indica costo negativo (beneficio).

2. Meridian Corporation, Considering environmental costs in energy planning: alternative approaches and implementation, en: Solar Engineering 1991, ASME.

3. Bonneville Power Administration, Estimating environmental costs and benefits for five generating resources, preparado para el Departamento de energía de estados unidos (DOE), Contract DE-AC79-83BP11551, 1986.

4. Pacific Northwest Laboratory, Implications of environmental externalities assessments for solar thermal power plants, en: Solar Engineering 1991, ASME.

Existe una amplia variedad de externalidades producidas donde donde la variedad y complejidad es amplia, y traducir la relación externalidades-costo se presenta muy difícil de efectuar. Sin embargo, es importante evaluar económicamente las externalidades más inmediatas. Estas pueden ser las emisiones de gases invernadero, ozono, óxidos de nitrógeno, partículas,

radiación, contaminación de agua, contaminación de suelo, daños a la salud, impactos en las actividades productivas (agricultura, silvicultura, pesca, etc.), daños en construcciones y monumentos y otros efectos de tipo social (recreación e impacto visual, entre otros).

Para poder llevar a cabo un análisis de externalidades es necesario seguir varios pasos que nos permitan determinar el efecto ambiental de una planta durante su periodo de vida útil:

- Determinación de emisiones contaminantes
- Estudio de transporte y dispersión
- Respuesta a las emisiones contaminantes
- Evaluación de la respuesta

Es importante señalar que los mercados más atractivos y viables para las fuentes no convencionales de energía se encuentran en las regiones remotas, donde la introducción de la red de distribución resulta onerosa y poco atractiva tanto para la empresa eléctrica como para la empresa distribuidora de combustibles a causa del consumo marginal que representan dichas zonas geográficas.

Tecnologías para la generación de electricidad con Energía Solar

El uso de plantas solares para la generación de electricidad en regiones geográficas con alta insolación constituye una opción promisoriosa y con numerosas ventajas desde el punto de vista ambiental. Además, la diversificación en el abastecimiento de energía es una estrategia altamente recomendable al momento de desarrollar una política energética específica. En el anexo del presente trabajo se discute, un poco a más detalle, la conveniencia para México de desarrollar estas tecnologías.

En la actualidad, existe una gran variedad de tecnologías basadas en la energía solar; algunas de ellas para quien desee adquirirlas. Tal es el caso de los sistemas generadores de tipo canal parabólico. En California, Estados Unidos, existe una capacidad instalada de 354MW y cuentan con casi diez años en servicio; constituyen el 80% de la generación mundial de electricidad por energía solar. La generación fotovoltaica ha alcanzado ya una capacidad de generación anual de 80MW. Por su parte, los Paraboloideos de revolución con motor Stirling y las Torres con receptor central siguen como plantas de investigación, se han alcanzado eficiencias de conversión térmica-electricidad de 15% hasta poco más de 25%.

El mayor obstáculo al que se enfrenta la electricidad solar es el elevado costo de inversión de las plantas. Además, el recurso solar depende de las variaciones climáticas que determinan el número de días soleados. A priori, parece que estas instalaciones están impedidas en suministrar energía en la punta o la base de la curva de carga por estas razones, pero existen algunas variantes que pueden solucionar este problema.

Una de ellas es la inclusión de un respaldo de generación con turbina de gas, empleando gas natural como combustible; esto permitiría compensar las fluctuaciones de energía radiante a lo largo del día y posibilita la operación en horas nocturnas.

La segunda solución es integrar sistemas de almacenamiento de energía que permitan incrementar el número de horas diarias de operación, así como compensar también algunas

pequeñas fluctuaciones en el suministro de radiación solar. La capacidad de estos sistemas de almacenamiento van de 12 a más horas de operación, llegando hasta 24h en el caso de los estanques solares. Existen también sistemas de almacenamiento con baterías cuando se trata de potencias bajas.

Son varias las opciones para la generación eléctrica con tecnologías fototérmicas; a continuación se describen las que han probado su viabilidad desde el punto de vista técnico. Figura 1.1.

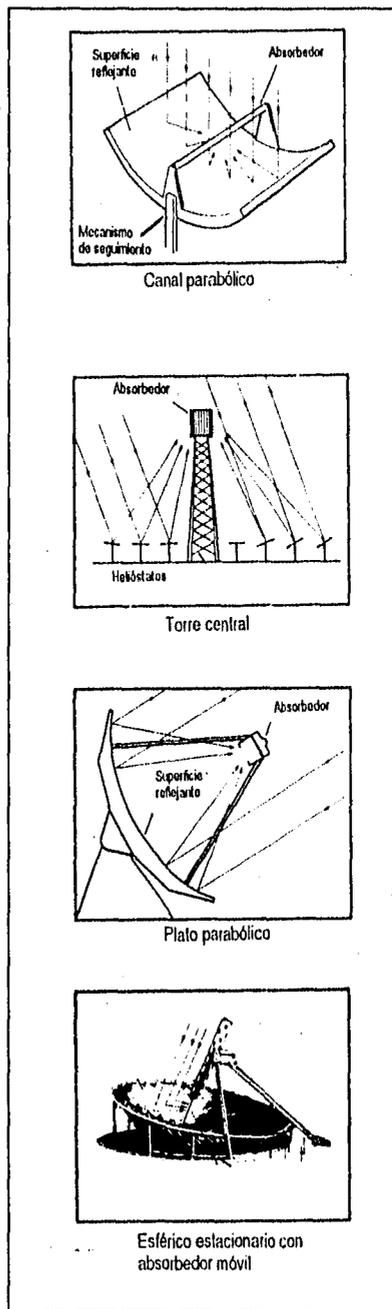


Figura 1.1. Diferentes tipos de concentradores solares

Concentradores cilíndrico-parabólicos

Como se aprecia en a figura 1.1. su forma es parecida a la de una parábola extendida a lo largo de un eje montada sobre un mecanismo que rastrea al Sol.

Estos dispositivos aumentan la intensidad de la radiación solar a reflejarla sobre una superficie absorbente situada en el foco de la parábola y que recibirá solamente el flujo solar que pueda captar la apertura del concentrador. Esta concentración se logra por medio de superficies que reflejan o refractan la radiación solar.

Las superficies reflejantes que se usan son: espejos de plata de segunda superficie (0.9-0.95 de reflejancia), espejos de aluminio de primera superficie (0.86-0.89), hojas de aluminio pulidas (0.75-0.80) y plásticos plateados o aluminizados (0.80-0.95). Al concentrar la radiación se consiguen temperaturas mayores a 200°C.

La línea focal del concentrador coincide con el eje de rotación de los soportes. Como la longitud del eje es grande comparada con la anchura, sólo se controla este movimiento con un eje (esto ocasiona alguna pérdida de eficiencia si se le compara con el control por dos ejes).

Para lograr altas concentraciones se requieren mecanismos muy precisos que sigan el movimiento aparente de Sol; también dependen de la curvatura geométrica del concentrador. Los concentradores con una relación de concentración de 10 a 3000 necesitan curvaturas compuestas muy precisas, de otra forma, los focos donde incide la radiación reflejada serán poco puntuales. Es importante que el tubo esté ubicado sobre el foco de la parábola pues variaciones de $\pm 3\%$ pueden reducir la eficiencia a la mitad. Para

compensar las variaciones en la distancia focal, que muchas veces pueden originarse por deformaciones mecánicas durante la operación de equipo, se pueden sobredimensionar los tubos.

El absorbedor o receptor puede ser un tubo recubierto de negro y con el cual se alcanzan temperaturas del orden de 300°C; si al tubo se le recubre con una sustancia con adecuado comportamiento térmico y se rodea a su vez por otro tubo de vidrio al vacío se pueden alcanzar temperaturas de hasta 600°C. Este equipo absorbe la energía solar la convierte en calor y lo transfiere al fluido térmico, que puede ser un aceite especial como el Therminol 66 o Caloria HT43. El uso de vapor de agua, como fluido térmico, está cobrando popularidad pues no provoca impactos sobre el medio ambiente y se evita incurrir en los costos asociados con el manejo de los aceites especiales.

En el arreglo con aceite, éste a su vez, en un intercambiador de calor, produce el vapor necesario para mover al generador de electricidad. En el anexo, al final de la tesis se muestra un diagrama con el arreglo de este tipo de plantas, así como un desglose general de su estructura de costos.

Las potencias que pueden alcanzar estos sistemas dependen de número de concentradores. Se manejan comercialmente módulos escalabes de 30MW y 80MW.

Torre central

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

Los helióstatos son espejos planos (pudiendo presentar también una curvatura), que se orientan hacia la parte superior de la torre central. Pueden ser de un área de 4 a 10m² y espaciarse sobre un campo que tenga un radio dos a tres veces mayor que la altura de la torre, de manera que no entre sí no se hagan sombra excesivamente. La superficie de estos espejos puede ser de los mismos materiales que en el caso de los concentradores de canal parabólico; de hecho, esa es la característica común de los sistemas fototérmicos.

Es posible lograr razones de concentración de 3000 y temperaturas que van de 500°C a 2000°C. El arreglo de sistema de torre central evita instalar gran cantidad de tuberías para cubrir grandes distancias del transporte del fluido térmico, reduciendo así pérdidas de calor. El mayor costo de este tipo de instalación se debe a la gran cantidad de helióstatos que siguen a Sol, estos sí con movimiento en dos ejes, y a que el absorbedor debe ser capaz de recibir de 1 a 2 MW/m² de flujo de energía solar y transferir el calor con un mínimo de pérdidas.

Después de su reflexión en los espejos, la energía solar redirigida es convertida en calor por el receptor, pudiendo ser de dos tipos: de cavidad o exterior. En el primero a luz solar entra a través de un hueco, la pared interna de la cavidad es la superficie de transferencia de calor y en ella se encuentra la tubería por donde circula el fluido de trabajo, que puede ser vapor directamente; pero la densidad de energía que debe ser absorbida es tal que se recomienda el manejo de sodio líquido o sal fundida. En el segundo, la tubería cubre la parte externa del absorbedor.

Existen plantas experimentales en Estados Unidos y en la Plataforma Solar de Almería, en España.

Platos parabólicos

El paraboloides de revolución es una superficie producida a girar una parábola alrededor de su eje óptico. Se les denomina en inglés *parabolic dishes*. En este tipo de concentradores se pueden alcanzar concentraciones de 500 a 3600. Debido al tamaño finito del sol y a imperfecciones en la construcción de espejos, el foco en sistemas de este tipo no es puntual. Las temperaturas que se han logrado alcanzar van desde los 500°C hasta los 2000°C.

Como el área del receptor es reducida, las pérdidas térmicas son pequeñas y principalmente por radiación, por lo que generalmente no es necesario utilizar cubierta en el absorbedor para evitar efectos convectivos. En cambio, su desempeño es más sensible a las propiedades ópticas de sistema.

Al igual que en la torre central, el flujo de radiación puede entrar por un hueco en el receptor y calentar al fluido de trabajo que se encuentre circulando en su interior. Otro arreglo genera *in situ* la electricidad integrando un motor/alternador junto con el absorbedor. El motor Stirling es el que ofrece la mayor eficiencia de conversión, con un límite máximo de 45%. Pueden obtenerse potencias que van desde 7 hasta 50kW, en función del tamaño del concentrador.

La superficie óptica y reflectora puede formarse de diferentes formas dependiendo del tamaño de la parábola y las necesidades. Puede ir desde varios espejos orientados a diferentes ángulos, dependiendo de su ubicación, de tal forma que den la geometría parabólica; hasta membranas de acero con deformación plástica o membranas plásticas aluminizadas y tensadas con ayuda de un ligero vacío para asegurar su especularidad.

Por sus características, se les considera apropiados para aplicaciones energéticas en pequeña escala o sistemas aislados. Sin embargo, integrando gran número de ellos puede ser factible emplearlos en actividades que requieran importantes flujos de energía.

Reflectores esféricos estacionarios con absorbedor móvil.

En inglés se les conoce como *hemispherical bowls*. La diferencia entre éstos y los paraboloides de revolución radica en que son reflectores fijos; la superficie reflectora no se mueve para rastrear el movimiento aparente del Sol, sino que el absorbedor es el que se desplaza a lo largo de la línea focal para recibir la radiación.

Los concentradores se instalan a un ángulo con respecto al horizonte igual al de la latitud del lugar.

Debido a la simetría esférica del colector, su comportamiento óptico es independiente de ángulo de incidencia de los rayos solares. La radiación es dirigida para formar un foco distribuido a lo largo de una línea que se extiende desde la superficie del espejo hasta la mitad del radio de curvatura. Así, el absorbedor se coloca de tal manera para que pueda moverse a lo largo de la línea de foco y pueda interceptar los rayos reflejados; que van cambiando de posición conforme el día transcurre.

Para asegurar su forma esférica, la superficie reflectora se compone de un mosaico de pequeños espejos, pues construir una sola pieza de gran tamaño y con esa geometría, es complicado y costoso.

Su principal ventaja es que al ser fijos pueden construirse unidades de gran tamaño a costos razonables, sin embargo, el 50% de las pérdidas que se registran en la eficiencia son por no

poder aprovechar al máximo la radiación incidente a causa de su inmovilidad. Un disco de 20m de diámetro puede producir vapor a temperaturas de 550°C y 7MPa. Sus aplicaciones son similares a las de los platos parabólicos.

Espejos solares de primera superficie y la ciencia de las películas delgadas

Bajo este panorama es donde se desarrolla el presente trabajo de investigación, cuyo objetivo específico es mejorar la técnica de fabricación de los elementos ópticos, de un sistema generador de electricidad con energía solar, y específicamente en sistemas termosolares, simplificando el proceso para bajar costos e incrementar al mismo tiempo su tiempo de vida útil.

Este trabajo presenta el desarrollo y progresos en la fabricación de espejos, de Al-SiO₂ de primera superficie. Es producto del esfuerzo continuado a lo largo de varios años de investigaciones conjuntas entre los Institutos de Ingeniería y Física de la UNAM y se busca la producción de dichos espejos a nivel industrial.

El proceso experimental consistió en depositar sobre un sustrato de vidrio, por medio de erosión iónica, una capa de aluminio de alta pureza y, sobre ella, cuarzo (SiO₂) a manera de protección. La erosión iónica posibilita elaborar espejos con grandes áreas obteniendo películas más homogéneas y resistentes a bajo costo; de ahí su gran difusión e importancia en la deposición de todo tipo de películas delgadas, tanto en laboratorios de investigación como en importantes compañías industriales.

Los recubrimientos que combinan películas delgadas de metales y dieléctricos poseen una gran tradición e importancia en el campo de la óptica y la electrónica; varían en complejidad, partiendo desde una simple capa, hasta cientos de ellas con espesores de decenas de angstroms cada una. Se utilizan en la elaboración de las cabezas magnéticas de lectura-escritura, como protección al medio y al uso intenso, como filtros, en sistemas de láseres, etc.

En el caso de las películas metálicas, las altas reflejancias que exhiben a lo largo de un rango amplio del espectro, constituyen una característica difícil de superar al momento de considerar precio y desempeño. Fueron los primeros recubrimientos ópticos producidos y algunos resultan indispensables en ciertos sistemas; por ejemplo, por su bajo costo y rapidez de depósito se utilizan en la fabricación comercial de cámaras y discos compactos.

Sin embargo, aunque la tecnología del depósito de películas metálicas ya se considera madura a causa de los muchos años que lleva desarrollándose, siguen apareciendo propiedades importantes por mejorar, como lo son aquellas relacionadas con la resistencia y duración al medio ambiente; asimismo, muchos esfuerzos se han orientado a desarrollar el proceso de depósitos metálicos sobre sustratos sensibles al calor.

Estos recubrimientos se pueden dividir en dos grupos: Unos donde la utilidad principal está dada por la capa metálica y otros donde la capa o capas metálicas —que pueden ser de uno u otro metal— se utilizan junto con películas de dieléctricos. De estos últimos un ejemplo importante lo constituyen los dispositivos basados en la *chromogénesis*, palabra derivada del griego χρομα (color) and γενεσις (creación) y que se emplea para designar a la rama de la ciencia de los materiales, la óptica e ingeniería que estudia a aquellos materiales *chromógenos* capaces de modificar sus propiedades ópticas en función de los cambios que haya en el medio; y que pueden ser temperatura, intensidad luminosa, aplicación de voltaje, presión, etc. Básicamente, se

utilizan películas selectivas a diferentes longitudes de onda situadas en el rango del espectro electromagnético que va del ultravioleta al infrarrojo, pasando por el visible. Dentro de la cromogénesis se efectúan investigaciones para desarrollar *ventanas inteligentes* que controlen los flujos de radiación, sistemas basados en cristales líquidos y vidrios oftálmicos, entre otros.

Se han desarrollado una amplia variedad de procesos de depósito, cada uno con sus ventajas y desventajas dependiendo de las propiedades deseadas.

La evaporación térmica es la más simple y barata; consiste en calentar una resistencia eléctricamente con lo que se consigue aumentar la temperatura y evaporar el material deseado sobre un sustrato, sin embargo, es difícil de trabajar cuando se desean producir películas con áreas grandes y de larga duración, sus aplicaciones principales se limitan a equipos de laboratorio o protegidos del medio ambiente.

La erosión iónica por medio de magnetrones es otra forma de deposición de vapores con mucha importancia en la actualidad; se aplica para superficies de gran tamaño y con grandes volúmenes de producción, como lo son los grandes vidrios para los modernos edificios de oficinas. Sus ventajas la representan la alta duración de las películas, repetibilidad, escalamiento y facilidad de control del proceso de fabricación. No resulta tan práctica cuando se desean películas con espesores muy uniformes a lo largo de toda la superficie que requieren ser evaporados a baja velocidad y en especial cuando se trabaja con materiales dieléctricos.

Otros métodos son el electrodeposito y depósito de vapores por medios químicos. El primero se emplea en el cromado de piezas y es particularmente útil en superficies irregulares o curvas, los problemas surgen cuando se trata de disponer de los desechos; el depósito de vapores por medios químicos generalmente origina desechos tóxicos y el equipamiento y controles son los más caros. En óptica se comienza a explorar este tipo de tecnología.

Descripción del proyecto desarrollado

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 cuarzo que se le deposita
- * Se tiene una alta reflexión desde el UV hasta el infrarrojo; siendo superior al espejo de plata en el ultravioleta.
- * Se obtiene una mayor adherencia del aluminio al sustrato, disminuyendo con ello problemas por corrosión.
- * Resistencia física a la abrasión
- * Facilidad de limpieza

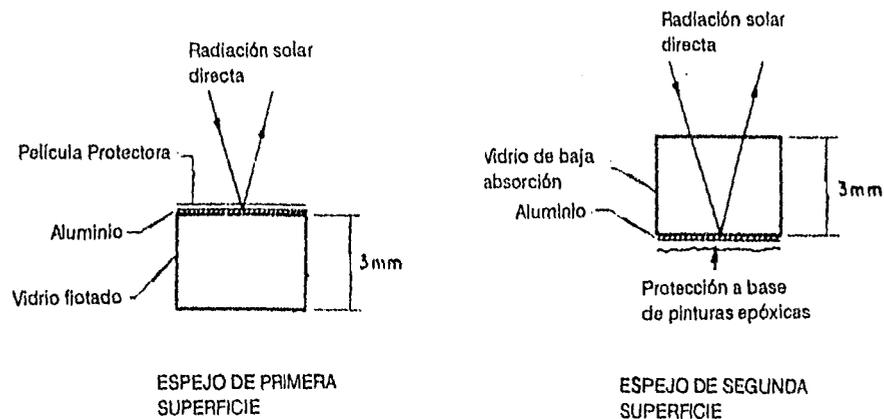
Estos espejos, que emplean vidrios comunes, se constituyen en una opción económicamente viable para fabricar los materiales reflejantes necesarios en concentradores solares.

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, hubo 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 y actualmente se trabaja con magnetrones — con base en los parámetros de fabricación y calidad determinados por estas etapas— para obtener los espejos al tamaño real.

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 3,000 a 3,500 Å.

En México, nunca antes se habían realizado investigaciones en el campo de la energía solar de películas frontales de vidrio sobre la película reflejante. Esta técnica de fabricación por magnetrones resulta prometedora y muy atractiva para llevarse a nivel industrial por la facilidad que representa su producción a gran escala. De hecho, la empresa Vitro utiliza esta tecnología para elaborar vidrios de grandes áreas con fines ornamentales principalmente.

España y Alemania son los únicos países donde existen también grupos de investigación dedicados al desarrollo de espejos de primera superficie, sin embargo, a la fecha, su experiencia en el comportamiento de los espejos bajo condiciones ambientales adversas es incipiente.

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 región noroeste.

Gracias a los magnetrones se consigue la fabricación de espejos con alta reflejancia y escasa formación de microagujeros. A continuación 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.

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

Se sometieron los espejos a diferentes condiciones:

- * Ambientes húmedos
- * Ciclos térmicos
- * Medio salino
- * Alta temperatura

Evaluando periódicamente su reflejancia hemisférica especular por medio de un reflectómetro solar tipo SSR-ER 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 utilizar estos espejos en la construcción de 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. Restaría hacer estudios tendientes a mejorar los diseños de planta que existen para adaptarlos a las condiciones de nuestro país; pues el traslado directo de las tecnologías desarrolladas en el extranjero no constituye la opción óptima, principalmente por los costos de algunos materiales que no se fabrican en México, la vulnerabilidad que origina la dependencia del exterior en partes de repuesto y en la solución de problemas de operación que pudieran presentarse. Algunos áreas a atacar serían los mecanismos de seguimiento, los sistemas de control, los sistemas de conversión y transporte de fluidos, etc.

Posteriormente, un estudio de factibilidad económica y un escalamiento a planta piloto, serían la etapa siguiente para traducir este proyecto del papel a una realidad tangible. En ese sentido, para dar una idea del nivel de los costos que intervienen y de las dificultades del financiamiento de este tipo de proyectos se incluye un anexo al final de la tesis donde se hace un análisis económico de dos opciones de generación con energía solar. En él se hace el reemplazo de la tecnología óptica de los concentradores, que está basada en los espejos de segunda superficie, por la desarrollada en este trabajo y se sustituye el aceite térmico especial, especificado en los diseños actualmente en operación en el mundo, por la generación directa de vapor. El resto de los componentes de la planta —y por lo tanto, sus costos— permanecen sin cambio. Los resultados muestran una diferencia del 30% en el costo de la electricidad producida por una planta totalmente solar y una solar-ciclo combinado.

Bajo las tendencias actuales para el desarrollo del sector eléctrico, la situación geográfica del país y la disponibilidad de infraestructura en la distribución de gas natural, la opción de generación mixta —mejor conocido como sistema híbrido— podría ser una buena oportunidad para incorporar a la energía solar en la producción de electricidad en firme e iniciar una nueva era en la industria eléctrica nacional, tal y como se dijo al inicio de este trabajo. Sin embargo, la disponibilidad de financiamiento y otras variables económicas tienen la última palabra.

Capítulo 2

¿Qué es la erosión iónica?

Cuando una superficie sólida es bombardeada con partículas con alta energía, tales como iones a alta velocidad, los átomos de la superficie del sólido son virtualmente "arrancados" debido a la colisión. A este fenómeno se le llama *erosión iónica* o *sputtering*.

El evento se inicia por una primera colisión entre las partículas incidentes y los átomos del sólido, los cuales son empujados de la superficie hacia el interior, creando un fenómeno parecido al del tiro inicial en una partida de billar, donde rebotan con los primeros átomos que conforman la red policristalina del sólido, suponiendo un arreglo aleatorio de los mismos, —la distribución de la energía del choque llega a extenderse de 50 a 100Å por debajo de la superficie, sin embargo, la mayor parte del intercambio de momentum ocurre solo hasta 10Å [Ishitani, 1974; Harrison, 1968] — desplazando hacia afuera a su vez a los que se encontraban en la superficie en ese momento. El átomo desalojado viaja a través del medio donde se encuentran los iones y se condensa en la superficie del sustrato.

La fracción de energía cinética transferida por la partícula incidente se obtiene con la siguiente ecuación: [Sequeda, 1986]

$$\varepsilon = \frac{4M_i M_t}{(M_i + M_t)^2} \quad (1)$$

Donde: M_i la masa del ion incidente [kg]

M_t la masa del blanco[†] [kg]

[†] Así también se les denomina a los materiales a ser erosionados y proviene de la palabra en inglés *target*.

La erosión iónica de materiales por medio del bombardeo con iones positivos de gases nobles es el proceso más antiguo para producir películas delgadas en vacío. Se descubrió hace más de 140 años por Grove (1852) en Inglaterra y Plücker (1858) en Alemania, durante experimentos de ionización de gases [Pulker, 1984]. En ese tiempo era considerado un fenómeno indeseable, puesto que el cátodo del tubo de descarga era destruido. Ya por 1933, la erosión iónica se utilizó para depositar algunas películas conductoras, pero perdió popularidad a causa del rápido desarrollo de otras técnicas como la evaporación térmica. Sin embargo, en 1955 tuvo un resurgimiento que ha durado hasta nuestros días. Investigadores de todo el mundo han realizado numerosos estudios del fenómeno que han dado como resultado su conocimiento completo. Esto permitió un desarrollo tecnológico que nos facilita en la actualidad un control preciso del proceso y con ello la capacidad de producir películas de alta calidad para aplicaciones cada vez más numerosas.

Para describir más a detalle el fenómeno del *sputtering* es necesario explicar el comportamiento de lo que se conoce como plasma.

Descarga luminosa

Si se aplica un voltaje entre dos electrodos espaciados una cierta distancia en un ambiente a baja presión, el flujo de corriente será muy pequeño, debido a que es grande la resistencia del gas neutro presente. Sin embargo, si se hace que el cátodo emita algunos electrones, el campo eléctrico presente los acelerará hacia el ánodo. Estos electrones en su camino chocarán con las moléculas del gas ionizándolo. Con cada colisión se producen nuevos electrones de tal forma que el número de electrones que llega al ánodo es mayor que el producido originalmente en el cátodo. Por su parte los iones son acelerados hacia el cátodo. Se dice entonces que existe un flujo de corriente entre los electrodos.

Si el voltaje aplicado es lo suficientemente grande, algunos de estos iones al chocar contra el cátodo producirán más electrones, fenómeno que se conoce como emisión secundaria de electrones. Estos nuevos electrones siguen el mismo mecanismo antes descrito y generan nuevos iones y nuevos electrones.

La corriente que se produce se puede deducir por la siguiente expresión: [Maissel, 1970; Stephen, 1990].

$$I = \frac{I_0 \cdot e^{(\alpha d)}}{\{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)\}} \quad (2)$$

- Siendo: I la corriente total que llega al ánodo [A]
 I_0 la corriente generada en el cátodo por la fuente externa [A]
 α probabilidad de ionización del gas
 d la distancia entre electrodos [m]
 γ probabilidad de emisión de electrones secundarios, emitidos por la ionización del gas

Si el voltaje entre los electrodos se va incrementando, α y γ también, y el denominador de la ecuación se aproxima a cero. En ese punto la corriente, I , tiende a aumentar con rapidez

manteniéndose el voltaje constante. A esta situación se le conoce en inglés como *gas breakdown* o abatimiento del gas.

El mínimo voltaje al cual se consigue librar esta resistencia del gas al flujo de corriente está dado por: [Stephen, et.al, 1990].

$$V = \frac{A \cdot Pd}{C + \ln(Pd)} \quad (3)$$

Siendo: V el voltaje de abatimiento del gas [V]
 P la presión del sistema [Pa]
 d la distancia entre electrodos [m]
 A el inverso de la polarización eléctrica, depende del gas [(C/m²)⁻¹]
 C constante, depende del gas [adim.]

Después del *gas breakdown*, ocurre la descarga luminosa. Esta descarga luminosa se manifiesta visualmente, a causa de la ionización y excitación de los átomos del gas presente, se dice entonces que el gas "encendió". Para que se presente la descarga luminosa el número de electrones generados debe ser suficiente para producir tantos iones que puedan a su vez ser fuente de igual número de electrones, de esta manera el proceso se autosostiene.

La descarga luminosa se divide en diferentes regiones, ubicadas entre los electrodos, pues hay diferencias en la distribución de potencial [Stephen, 1990; Kiyotaka, 1992; Pulker, 1984]. Estas son el halo catódico, el espacio oscuro, el plasma, el espacio oscuro de Faraday, la columna positiva y el halo anódico, entre otros. Figura 2.1.

De estas regiones la más importante es el *espacio oscuro* o *cathode dark space*. Casi toda la caída de potencial (voltaje) ocurre en esta zona. Es aquí donde los iones se aceleran hacia el cátodo, donde, como se dijo, son causa de la emisión secundaria de electrones. Este último fenómeno se presenta con una probabilidad de 0.1 a 0.05 —alrededor de 10 a 20 iones deben chocar con el cátodo para liberar un electrón—.

Como el mayor gradiente del campo eléctrico se encuentra en dicha zona, y la velocidad de los electrones es mayor que la de los iones del gas, la densidad electrónica es pequeña no así la de los iones. Figura 2.1.

Después del espacio oscuro y en dirección al ánodo está la región del plasma², caracterizada por densidades iguales de iones y electrones; valores típicos se sitúan entre 10⁹ a 10¹¹ por cm³. Esta es la zona donde se concentran la mayor cantidad de partículas y es la región más luminosa.

Si la separación y la presión entre el cátodo y el ánodo no es pequeña —depende de la configuración del sistema, pero usualmente más de 15cm ya no se considera distancia corta— pueden existir otras regiones.

² Un plasma es la mezcla de átomos, iones, electrones, protones; todos coexistiendo en una mezcla homogénea; se le considera el cuarto estado de la materia.

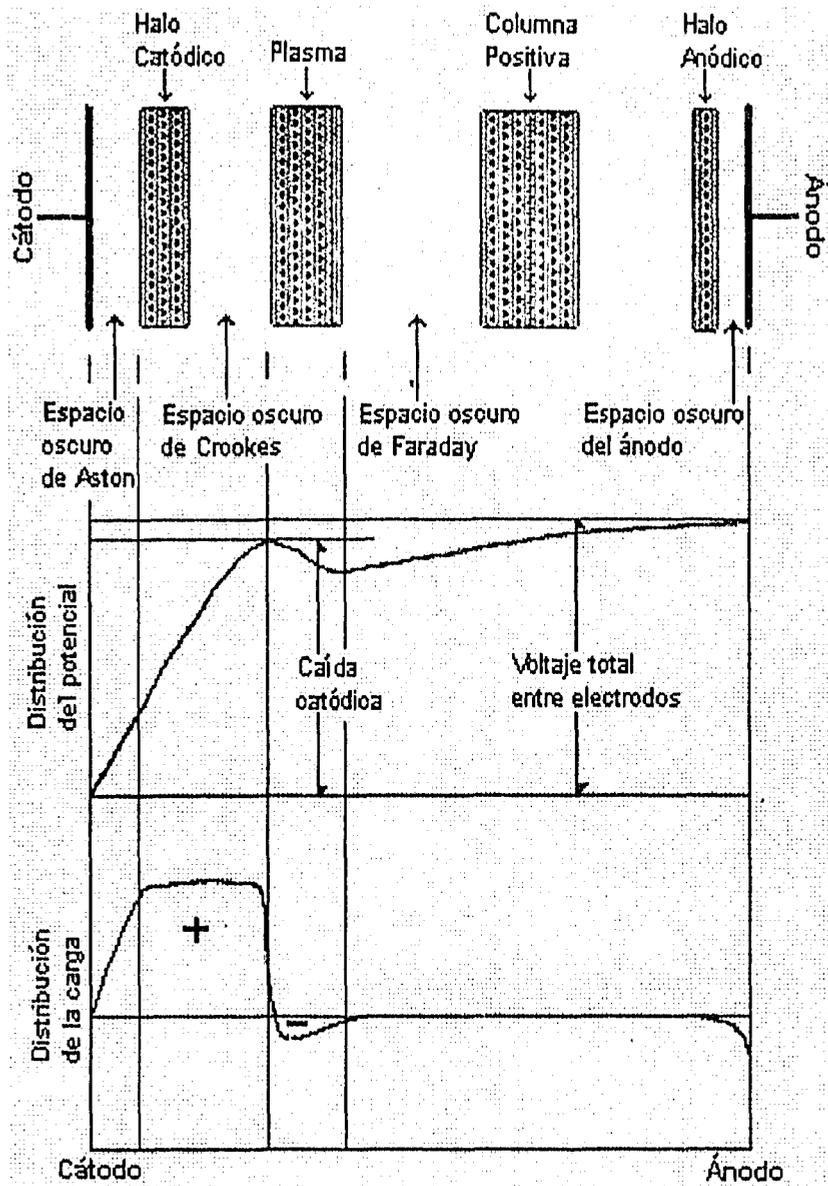


Figura 2.1 Regiones que se presentan en la descarga luminosa

Después del plasma se puede presentar otra zona oscura denominada *región oscura de Faraday*. Como se observa en la Figura 2.1., cuando los electrones llegan a la región del plasma ya poseen prácticamente la máxima energía disponible en el sistema; parte de esta energía se pierde por la serie de colisiones con el gas que producen la ionización. Eventualmente su energía disminuye hasta el punto en que ya no es posible producir iones adicionales (15.3eV para el argón), entonces, al final de la zona del plasma los electrones empiezan a acumularse creando una región oscura —porque ya no son capaces de ionizar o excitar átomo alguno— con una ligera carga negativa.

Los electrones después de cruzar por difusión la región oscura de Faraday son acelerados hacia el ánodo por la pequeña diferencia de potencial que aún existe respecto a él. Su comportamiento es descrito por la ecuación (2), pero en este caso γ vale cero. A esta región se le conoce como la *columna positiva*.

Autosostén del plasma

Una vez que se ha iniciado la ionización del gas, el número de electrones secundarios producidos en el cátodo es suficiente para mantener la descarga luminosa. La Figura 2.2., es un diagrama de dicho fenómeno.

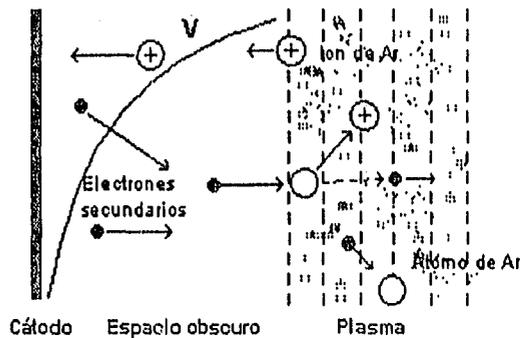


Figura 2.2 Representación del autosostén del plasma

El autosostén del plasma constituye la base para realizar la erosión iónica y con objeto de aprovechar este fenómeno, en el depósito de películas delgadas se han creado equipos y configuraciones basados en corriente directa o radio frecuencia.

Erosión iónica con corriente directa

La Figura 2.3 muestra en detalle el fenómeno de erosión iónica entre los electrodos. En la Figura 2.4. aparece la configuración por corriente directa, la más simple para realizarlo. Existen otros arreglos, pero en realidad solo son mejoras basadas en esta configuración básica.

Se requieren dos electrodos: un cátodo y un ánodo conectado a tierra física. En la superficie frontal del cátodo se coloca el material a erosionar, mientras que en la superficie posterior un sistema para refrigerarlo, generalmente agua. En el ánodo se instala el sustrato. A la cámara donde se encuentran ambos electrodos se le introduce un gas de trabajo, generalmente argón por sus cualidades de gas inerte. La descarga luminosa se inicia y se mantiene aplicando voltajes que van de cientos a miles de volts, dependiendo de la presión a la que se trabaja.

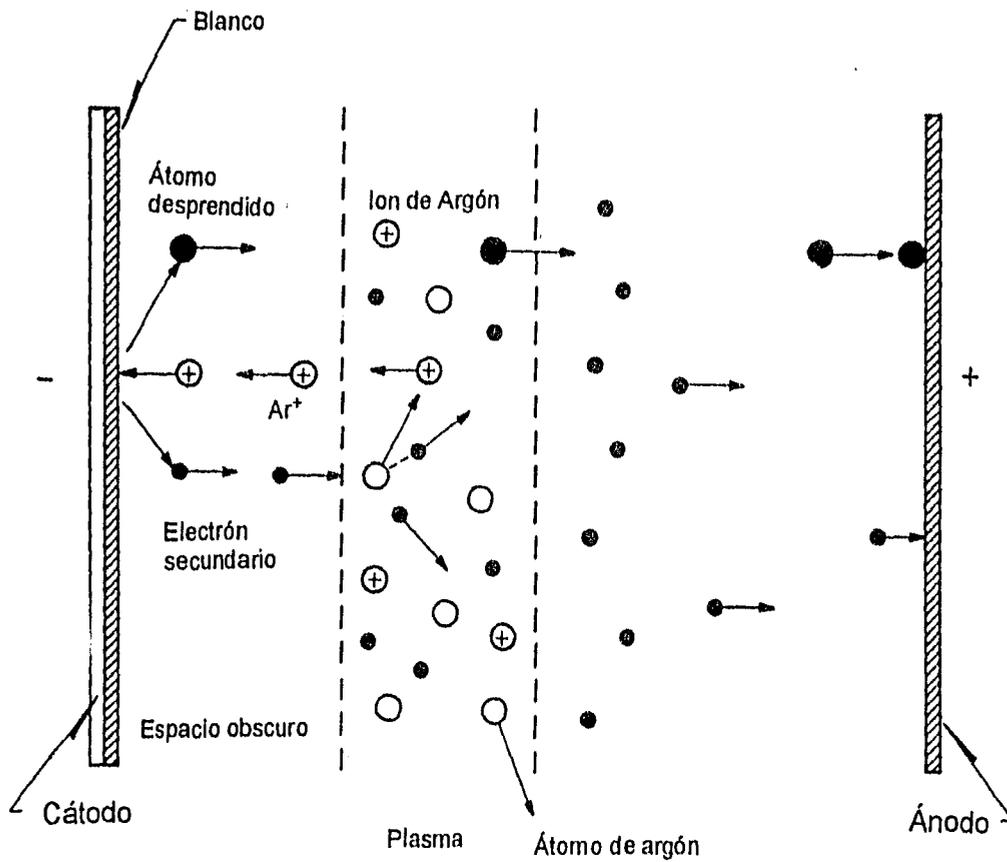


Figura 2.3. Representación del fenómeno de erosión iónica

La cantidad de material desprendido del cátodo (S) para una superficie plana, suponiendo un arreglo aleatorio de los átomos del sólido (aproximación para una estructura policristalina) y que las colisiones son elásticas, se calcula con: [Sigmund, 1969]

$$S = k_1 \alpha \left(\frac{M_i}{M_t} \right) \epsilon \frac{E}{U} \quad (4)$$

Siendo: S la cantidad de material erosionado [átomos/ion] M_i masa del ion [kg]
 E la energía cinética del ion incidente [J] M_t masa del átomo del blanco [kg]
 U la entalpía de sublimación del blanco [J]
 k_1 cte. [incluye energía de enlace del blanco y las masas de las partículas]
 α función que depende de M_t/M_i [involucra ángulo de incidencia y camino libre medio del ion]
 ϵ la fracción de energía cinética transferida por el ion [ecuación 1]

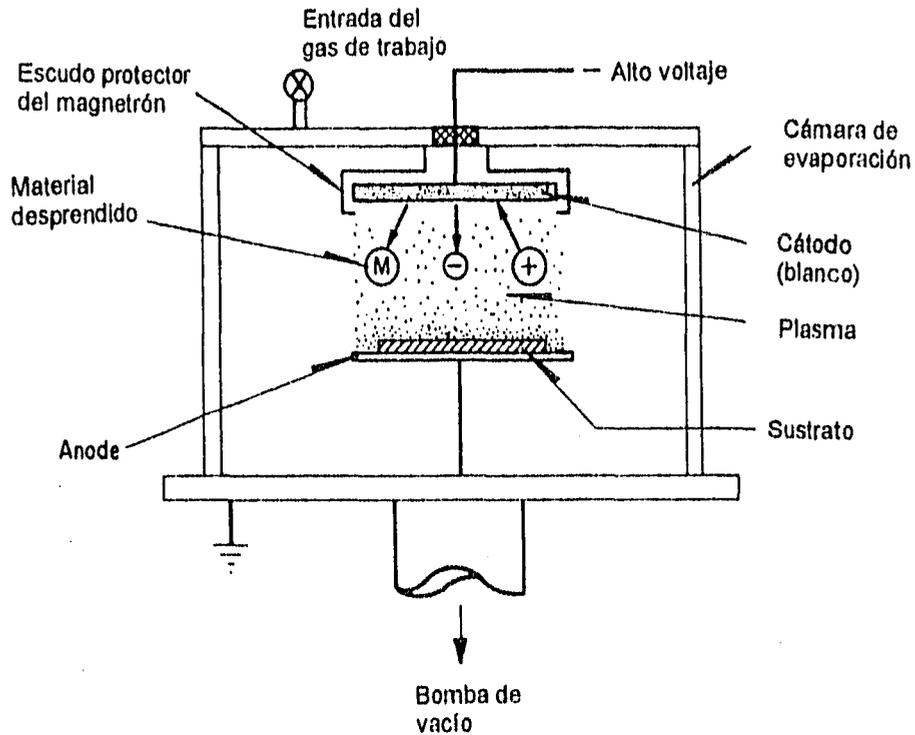


Figura 2.4. Configuración básica de un sistema de erosión iónica por corriente directa

Suponiendo que las partículas se comportan como esferas sólidas (*hard sphere model*), S se puede obtener con:

$$S = \frac{3}{4} \pi^2 \alpha \frac{\epsilon E}{U} \quad (5)$$

Donde las literales son las mismas que en (4)

A su vez, el depositado total en el sustrato por unidad de área, sin la presencia de un campo magnético, se obtiene con: [Kiyotaka, 1992]

$$R = \frac{k_2}{t} \left(\frac{S_0}{P \times d} \right) \quad (6)$$

Siendo: k_2 constante
 d distancia entre electrodos [m]
 S_0 total de partículas desprendidas por unidad de área [n/m^2]
 t tiempo
 n número de partículas
 P presión del sistema [Pa]
 R tasa de depósito [$n/m^3 s$]

Y bajo un campo magnético, en este caso magnetrones planos³ una buena aproximación es:

$$R \approx \frac{k_3 S_0}{t} \quad (7)$$

$k_3=1$ para magnetrones planos [k =relación de radios entre cátodo y ánodo para magnetrones cilíndricos]

Como se observa, la cantidad depositada es independiente de las propiedades del material, excepto por la entalpía de sublimación —véase ecuaciones. 4 y 5—. Es esa relativa insensibilidad a las propiedades de los materiales a depositar lo que le da a la erosión iónica su versatilidad y universalidad. No ocurre lo mismo con los procesos químicos y térmicos donde existe una dependencia exponencial a la energía de activación. También es evidente que la velocidad de depósito del material depende directamente de la presión del gas y la distancia entre los electrodos.

Erosión iónica con radiofrecuencia

La erosión iónica con corriente directa de materiales dieléctricos no puede llevarse a cabo debido a que existe acumulación inmediata de cargas positivas en la superficie de material a depositar, lo que provoca que la descarga luminosa no se mantenga por mucho tiempo.

Los iones se acumulan pues el material no es conductor, entonces, en la superficie la carga neta se hace positiva; lo que repele a los nuevos iones que van llegando.

Este problema se resuelve aplicando el potencial con radiofrecuencia. De esta manera la polaridad de los electrodos se cambia varios miles o millones de veces por segundo, lo que evita que transcurra el tiempo suficiente para que las cargas se acumulen.

Este fenómeno fue observado por Robertson y Clapp en 1933. En 1960 se empezó a utilizar en el depósito de películas de dieléctricos [Kiyotaka, et al, 1992]. Actualmente, la erosión iónica con radiofrecuencia es ampliamente utilizada para la fabricación de películas de compuestos como SiO_2 , Al_2O_3 , BN, Si_3N_4 , Ta_2O_5 , HfO_2 y otros óxidos [Stephen, 1990]. Un arreglo típico del sistema se presenta en la Figura 2.5.

La mayoría de los blancos para erosión iónica se adhieren a una placa metálica refrigerada con agua. El adhesivo es generalmente soldadura de indio, de indio-estaño o algún epóxico tanto conductor térmico como eléctrico. Es muy importante la refrigeración cuando se manejan dieléctricos pues por las características no conductoras de los materiales el calor se acumula más rápidamente que en los metales, pudiendo inclusive cuando se trabaja a altas potencias, que se alcance la temperatura de sublimación y el material sea tanto erosionado como evaporado. Por estas razones los blancos llegan a ser más delgados; con espesores inferiores a un centímetro.

³Nótese que desaparece el término Pd. El campo magnético aumenta la probabilidad de colisión, lo que permite trabajar a presiones muy bajas.

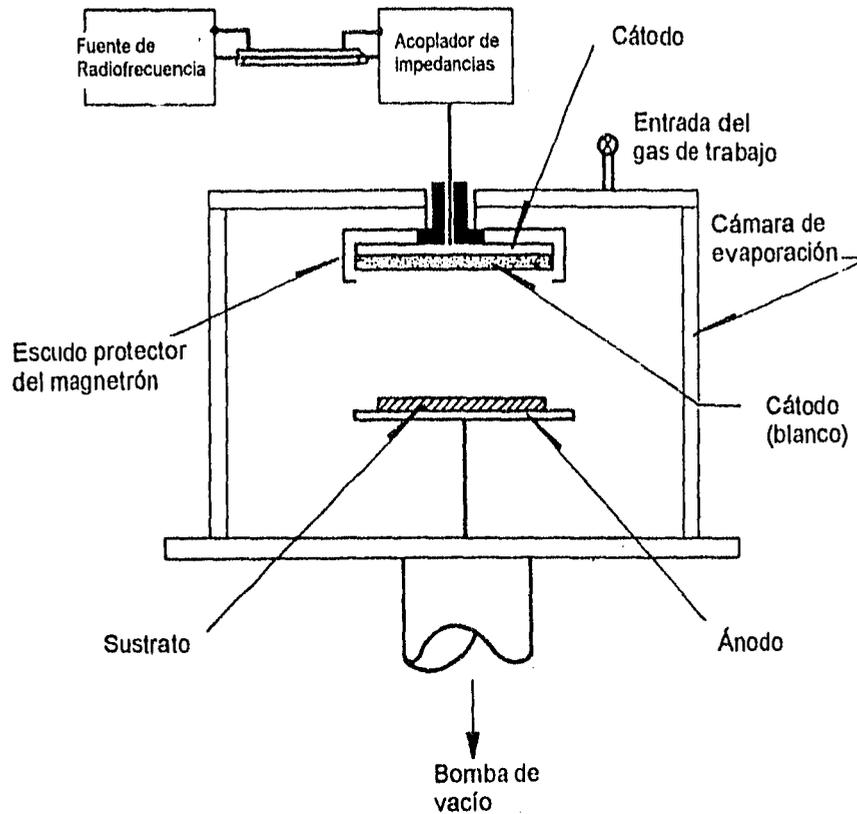


Figura 2.5. Arreglo típico de un sistema de erosión iónica con radiofrecuencia

La impedancia del plasma es del orden de 1 a 10 k Ω , mientras que la impedancia de la fuente de radiofrecuencia se diseña para que sea de 50 Ω . Por esta razón el sistema de erosión con radiofrecuencia requiere de un acoplador de impedancias entre la cámara, donde se encuentra el plasma, y la fuente de radiofrecuencia. Su función es transformar las características resistivas y capacitivas del plasma a valores de 50 Ω para que la fuente pueda operar correctamente y transfiera el máximo de la potencia al gas, disminuyendo las pérdidas por potencia reflejada; que sería el caso cuando las impedancias sean diferentes.

La corriente en el blanco debida a los iones incidentes, para radiofrecuencia, (I_s) está dada por:

$$I_s = c \frac{dv}{dt} \quad (8)$$

Donde c es la capacitancia entre el plasma y el cátodo y dv/dt es la variación en el tiempo del potencial del cátodo. Esta expresión muestra que el aumento en la frecuencia incrementa la corriente de iones al blanco. [Kiyotaka, 1992]

Las diferencias principales entre la erosión iónica con radiofrecuencia y con corriente directa se listan a continuación.

- El continuo cambio de polaridad en los electrodos hace que los electrones oscilen en el área del plasma y ganen suficiente energía para realizar varias colisiones ionizantes. Esto permite que la descarga luminosa sea menos dependiente de la emisión de electrones secundarios, lo que permite reducir a su vez el voltaje necesario para vencer la resistencia inicial del gas.
- El mismo fenómeno incrementa también la probabilidad de colisión entre los electrones secundarios y las moléculas del gas, lo que permite que la presión de trabajo disminuya hasta valores cercanos a 1mTorr.
- Como no se necesita que el blanco sea conductor, se puede erosionar cualquier material. La frecuencia normal de operación de las fuentes es de 13.56MHz, aunque existen investigaciones donde se ha trabajado a frecuencias de kHz.
- Los sistemas de radiofrecuencia presentan cátodos con un área menor a la del ánodo. Esta configuración asimétrica induce una polarización negativa en el cátodo lo que facilita más el movimiento de los iones positivos[Kiyotaka,et.al,1992]. Además hay otro fenómeno que refuerza esta polarización; como los electrones tienen mayor movilidad, en la fase "inversa" del ciclo llegan más cargas negativas al cátodo que positivas durante la fase "normal", por tanto, no se alcanza a neutralizar toda la carga negativa presente en la superficie del cátodo. [Davidse, 1966]
- La disminución en la presión del sistema reduce también el número de colisiones del material erosionado en tránsito hacia el sustrato, esto se traduce en una mayor eficiencia de transporte.

Movimiento de las partículas bajo un campo electromagnético

En la presencia de un campo eléctrico E y un campo magnético B , un electrón de carga e y velocidad V se ve sometido a una fuerza (F) dada por:

$$F = eE + eV \times B \quad (9)$$

Siendo:

F	[N]	e	[C]
B	[T]	V	[V]
E	[N/C]		

Cuando el campo eléctrico es constante y no existe campo magnético, un electrón experimenta una aceleración constante en la dirección de E dada por:

$$a = \frac{eE}{m} \quad (10)$$

Siendo:

a	[m/s ²]
E	[N/C]
m	[kg]

Para el caso donde solo exista campo magnético y la velocidad del electrón únicamente tenga componente perpendicular a la dirección de B , su movimiento seguirá una órbita circular como se muestra en la figura 2.6.

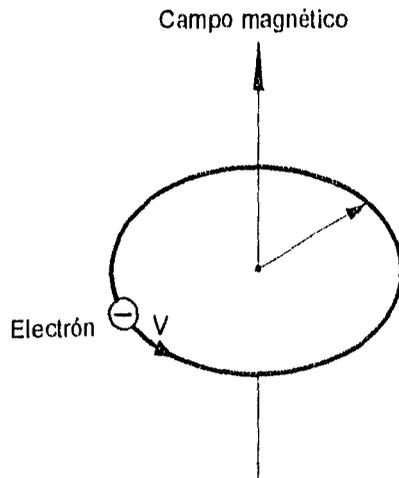


Figura 2.6. Movimiento de los electrones en un campo magnético.

El radio de esta órbita es:

$$r = \frac{mV}{eB} \quad (11)$$

Siendo: r [m] e [C]
 m [kg] B [T]
 V [V]

La energía cinética del electrón es a su vez:

$$E_c = \frac{1}{2}mV^2 \quad (12)$$

Siendo: E_c [J]
 m [kg]
 V [m/s]

Combinando ambas ecuaciones:

$$r = \frac{\sqrt{2mE_c}}{eB} \quad (13)$$

Por tanto, para partículas con la misma energía cinética, las más pesadas tendrán una órbita mayor. Iones y electrones tienen direcciones de rotación contrarias.

Si el electrón cuenta en su velocidad con una componente paralela al campo magnético, describirá una órbita helicoidal como se muestra en la Figura 2.7.

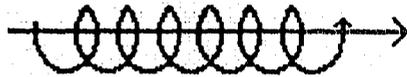


Figura 2.7 Órbita descrita por un electrón bajo un campo magnético, el radio de giro depende de su frecuencia de rotación.

Si E es paralelo a B , el campo magnético no tiene influencia sobre la velocidad del electrón paralela a dicho campo. Si el campo eléctrico es perpendicular a B , el electrón mostrará un movimiento cicloidal con un desplazamiento perpendicular del centro de su órbita tanto a E como a B . Fig. 2.8.

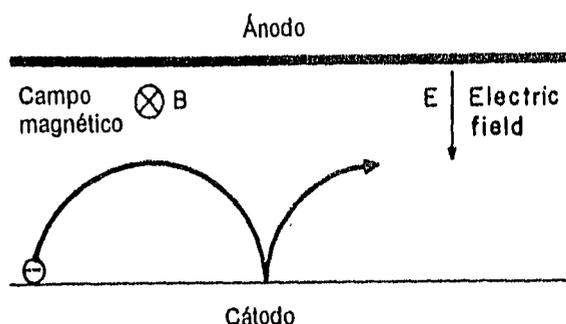


Figura 2.8 Órbita descrita por un electrón bajo un campo eléctrico perpendicular al campo magnético

Erosión iónica con magnetrones

La presencia de un campo magnético es la diferencia fundamental entre los sistemas ya descritos y aquel que utiliza magnetrones. En la erosión iónica con magnetrones el campo magnético mantiene confinado al plasma en un área menor y cercana al cátodo.

La erosión iónica con magnetrones fue propuesta por primera vez por Denning en 1936. A comienzos de los sesenta le reconsideró como un proceso útil en el depósito de películas delgadas y ya para la década siguiente era ampliamente usada para la elaboración de circuitos de silicio. Hoy en día sus aplicaciones a gran escala más importantes se encuentran en la microelectrónica, industria automotriz y en vidrios destinados a la industria de la construcción.

Existen dos tipos de magnetrones, el cilíndrico y el plano; en ambos, se incluyen imanes permanentes por detrás del material a erosionar, con un campo magnético emergente paralelo a su superficie y con una intensidad de cientos de gauss. La configuración de los campos eléctrico y magnético induce a los electrones en el plasma a seguir un movimiento cicloidal (Figura 2.9.) donde el centro de su órbita se desplaza en la dirección de $E \times B$. El campo magnético está orientado de tal manera que los electrones al moverse en dicha dirección $E \times B$ quedan confinados en un toroide sobre la superficie del blanco. Este confinamiento crea un plasma más denso que en los sistemas donde el campo magnético está ausente.

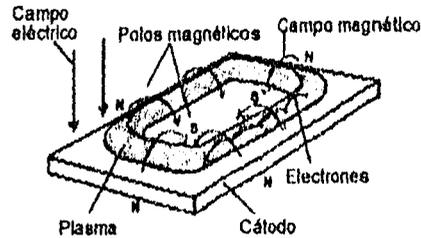


Figura 2.9. Movimiento de los electrones y confinamiento del plasma en magnetrones planos

El resultado final es una mayor corriente y menor voltaje para mantener el plasma. 500 volts y 5 amperes son valores típicos que contrastan contra los 2500V y 0.5A que se requieren cuando no existe campo magnético [Kiyotaka,1992]. Asimismo, el movimiento cicloidal de los electrones incrementa la probabilidad de colisiones con las moléculas de gas y con ello la eficiencia de ionización, lo que se traduce en un descenso de la presión de trabajo del sistema hasta 1×10^{-4} Torr. Valores usuales se sitúan entre 1 y 10mTorr [Stephen,et.al,1990]. Con una menor presión se incrementa la velocidad de depósito del material erosionado, dado que aumenta su camino libre medio.

Descripción del equipo

Los equipos principales, empleados para la fabricación de los espejos solares fueron los siguientes: sistema generador de vacío, cámara de evaporación, dos magnetrones planos una fuente de corriente directa de 1.5kW, una fuente de radiofrecuencia de 1.25kW y un medidor de espesores.

En el trabajo experimental, se utilizaron dos magnetrones planos, aplicando a uno corriente directa y al otro radiofrecuencia. En el arreglo con corriente directa, el cátodo es un blanco de aluminio de 99.99% de pureza, tamaño de 12.5x25cm y 1.25cm de espesor. El equipo que proporciona la potencia es una fuente fabricada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. El arreglo con radiofrecuencia consiste en un magnetrón con un cátodo de cuarzo de la misma área que el de aluminio pero con un espesor de 3mm, un acoplador de impedancias y una fuente de poder de 1250W.

Magnetrones

La figura 2.10. es un esquema de los magnetrones planos utilizados. Están conformados por un blanco del material a depositar, una placa trasera que actúa como medio de contacto entre el sistema de enfriamiento por agua y el blanco; tres imanes de ~ 300 gauss que dan lugar a un campo magnético que confina el flujo de electrones a una trayectoria similar a la mostrada en la figura 2.9., un marco de acero inoxidable (en inglés es mejor conocido como *ground shield*), colocado en la parte frontal del magnetrón, que actúa como escudo o protección al cuerpo de mismo y que aísla el campo magnético y evita que las partículas del plasma que rodean al equipo ataquen zonas distintas a las deseadas. Por ser el acero un material difícil de erosionar, es poco probable que alguna descarga llegase a contaminar la película. Es un equipo disponible comercialmente y fabricado por la empresa Materials Science.

La distancia entre el escudo del magnetrón y el blanco es crítica y debe ser lo más corta posible para asegurar que quede dentro de la zona oscura, espacio que se forma, como ya se explicó previamente, entre el plasma y el cátodo. En radiofrecuencia si la distancia es muy pequeña, como el escudo está conectado a tierra, toda la energía suministrada se pierde a través de la conexión a tierra [Stephen,1990]. En la literatura se recomienda una distancia de medio centímetro. En nuestro caso, fue ajustada a 4.3mm en el magnetrón con el blanco de aluminio, mientras que en el de cuarzo fue de 7mm, distancia recomendada por el fabricante.

Durante las pruebas preliminares con corriente directa y, después haber de reemplazado el blanco de aluminio por uno de mayor pureza, al montar el escudo del magnetrón no se tuvo cuidado en conservar la misma separación a lo largo del magnetrón. Pese a que todos los dispositivos estuvieron bien aterrizados, hubieron dificultades para "encender" el plasma y acumulación de cargas, que produjeron considerables picos de corriente al instante de iniciar la ionización del gas y que dañaron a la fuente de corriente directa fabricada por el instituto de ingeniería. Para nuestro sistema, la separación de poco más de 4mm dio mejores resultados que la original de 5.5mm.

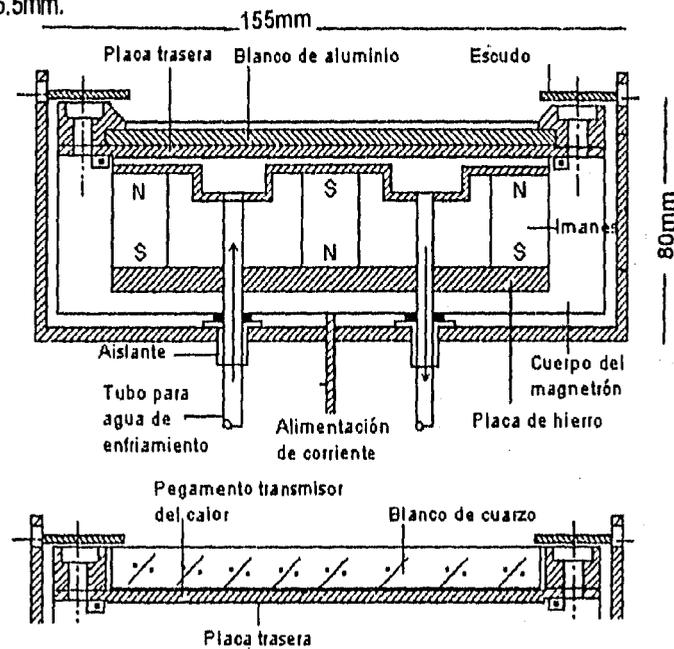


Figura 2.10. Esquema del interior de los magnetrones y detalle del ensamblaje del blanco de cuarzo

Los imanes deben mantenerse perfectamente sellados y evitar que alcancen altas temperaturas, así se previene el daño al pegamento con el que están fijos al magnetrón y de iniciar algún ataque por corrosión que los degrade, ya que se encuentran recubiertos por una resina epóxica.

El agua del sistema de enfriamiento debe tener una resistividad superior a $50k\Omega$ (respecto a tierra) y asegurar que actúe como aislante para evitar que alguna corriente eléctrica se pueda transmitir a través de ella. Se recomienda agua destilada o desmineralizada.

Fuente de radiofrecuencia

Se utiliza una fuente de radiofrecuencia RFXII-1250 de Advanced Energy. Puede proporcionar hasta 1250W de potencia bajo condiciones óptimas. Posee sistemas de protección para descargas súbitas y sobrecalentamiento; una cierta tolerancia de decenas de watts cuando existe potencia reflejada y proporciona una señal constante en base a dos microprocesadores que le dan estabilidad y precisión. Se puede automatizar y controlar su operación por medio de una computadora personal.

Incorpora dos sistemas de enfriamiento, uno por agua y otro por aire. Se ha observado que un ventilador extra mejora el desempeño de la fuente cuando se trabaja a potencias altas durante periodos superiores a 1 hora.

Fuente de corriente directa

En un principio se intentó trabajar con una fuente fabricada ex-profeso por el Instituto de Ingeniería, sin embargo, nunca fue satisfactorio su desempeño por razones expuestas en capítulos posteriores. Se optó por utilizar una fuente de 1500W, de la misma compañía fabricante de la fuente de radiofrecuencia, prestada por el Instituto de Física de la UNAM.

Es capaz de proporcionar una salida de hasta 1000V. Cuenta con un voltaje de encendido y circuito especial para suprimir arcos y picos de voltaje que se producen en el plasma cuando se trabaja con corriente directa. Se puede controlar la salida por corriente, voltaje o potencia, lo que permite una gran estabilidad y flexibilidad de operación según las condiciones imperantes.

Cámara de evaporación

La cámara de evaporación consiste en un tanque de acero al carbón sin recubrimiento interno, con un volumen de 1.7m³. Originalmente fue diseñada para la fabricación de equipos ópticos para telescopios.

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.

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 depósito y el espesor de la película.

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 argón 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.

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

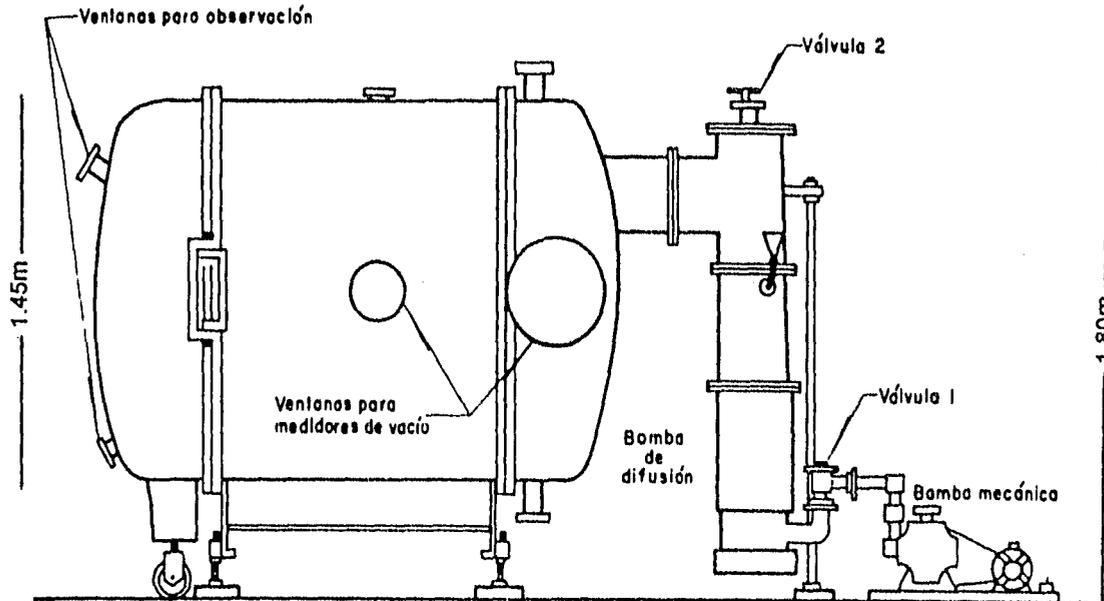


Figura 2.11. Cámara de evaporación y sistema de bombeo.

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, haciéndose mayor el camino o trayectoria libre media, la cual es inversamente proporcional a la presión. Por lo tanto, en un volumen se tendrá alto vacío si la trayectoria libre media de las moléculas que lo ocupan es mayor que las dimensiones del recipiente [Ramírez, 1990].

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 mangra 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 2.12. muestra los intervalos de presiones en relación con la atmosférica y los intervalos de operación de las bombas más comunes.

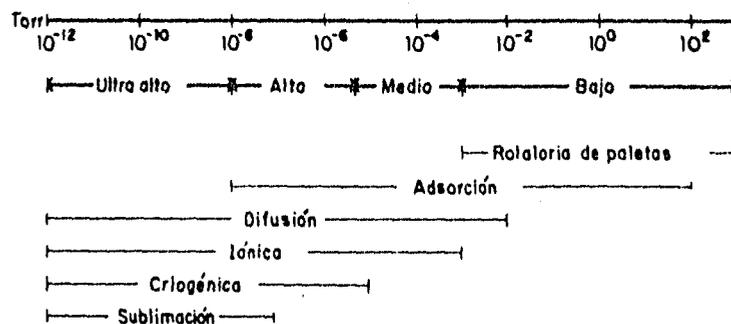


Figura 2.12. Comparación de intervalos de vacío y de operación de las bombas más comunes

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 (Figura. 2.13.). 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.

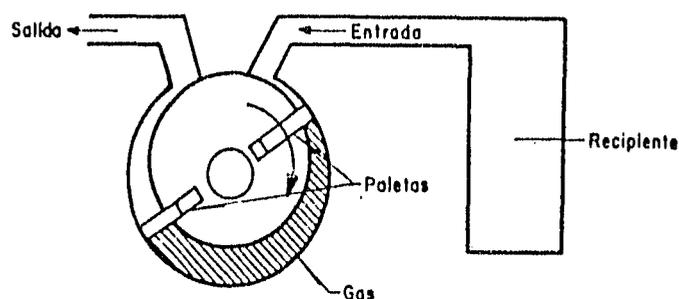


Figura 2.13. Diagrama esquemático de una bomba mecánica rotatoria.

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. 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. 2.14. Otra alternativa son las bombas turbomoleculares, siendo éstas más limpias que una bomba de difusión pero más costosas

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 de silicón 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 [Ramírez, 1990].

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.

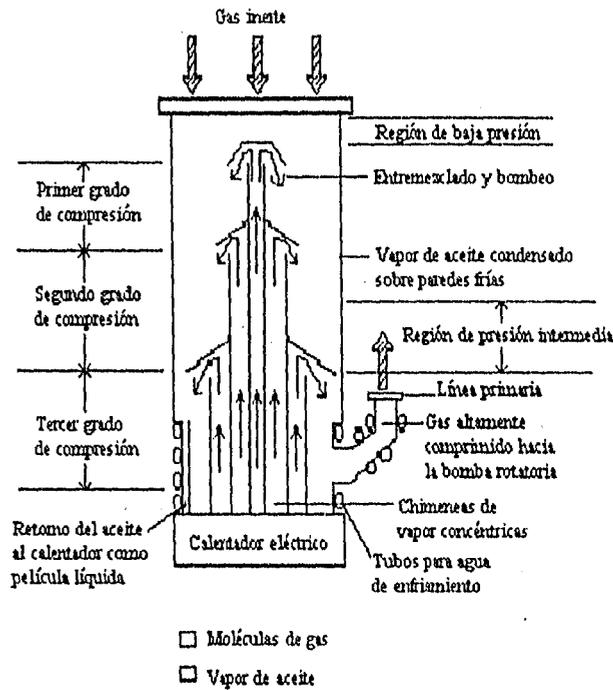


Figura 2.14
Bomba de difusión de vapor de aceite.

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^{-8} Torr. El sistema de vacío tiene dos válvulas de plato (Figura 2.11.), 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, utilizada para condensar el aceite y conservar la eficiencia de la bomba por largos períodos de tiempo.

La limpieza dentro de la cámara, por retrodispersión de moléculas de aceite, se ha mejorado considerablemente con el uso de *faldas de hawaiana*, elementos situados en la parte superior de la bomba de difusión y en contacto con las superficies exteriores frías, provocando internamente gradientes de temperatura en los gases de bombeo. El uso de estos elementos sirvieron para recircular los aceites de bombeo más eficientemente.

Capítulo 3

Desarrollo del experimento

Adaptación de los equipos

Instalación y operación de las fuentes de potencia y magnetrones

De las metas propuestas para esta tesis, la más difícil de alcanzar fue la puesta en marcha de los equipos principales (magnetrones y fuentes de potencia). Además hubo que diseñar y construir varios equipos auxiliares o periféricos que nos permitieran adaptar los primeros a la infraestructura ya existente descrita en el capítulo anterior. Los magnetrones —uno para depósito de metales y el otro de dieléctricos— y la fuente de radiofrecuencia se adquirieron en E.U.A. como equipo comercial con el patrocinio del Programa Universitario de Energía (PUE)

En la literatura abundan artículos que hacen referencia al depósito de películas con magnetrones, sin embargo, están enfocados a describir sus propiedades físicas y las condiciones de operación bajo las cuales se fabricaron; es raro encontrar, incluso en publicaciones orientadas a el diseño de equipos e instrumentación, referencia alguna de cómo hacer funcionar los equipos que producen esas películas.

Por ello, al arranque del trabajo de tesis hubo que familiarizarse con la operación y comportamiento de los magnetrones bajo las condiciones particulares de geometría y tamaño de nuestra cámara de evaporación. Para ello se hicieron varias pruebas preliminares; primero utilizando la fuente de radiofrecuencia y el magnetrón con el blanco de aluminio y después, empleando la misma fuente, pero con el magnetrón para dieléctricos y el blanco de cuarzo.

El depósito de película alguna no se consiguió de inmediato. Resultó que la fuente de potencia no lograba iniciar la descarga luminosa necesaria para la erosión iónica. Se presentaba un fenómeno donde el sistema reflejaba toda la energía proporcionada por la fuente. Esto se debía a que no se tenía un acoplamiento de impedancias entre el gas ionizado que se forma en el interior de la cámara y el de la fuente de poder de radiofrecuencia.

La manifestación de la falta de acoplamiento es la potencia reflejada que recibe la fuente y que llegaba a ser tan grande que incluso la propia protección de la fuente la desconectaba. Como no llegaba energía suficiente al magnetrón, este nunca iniciaba la ionización del gas argón, utilizado como gas de trabajo para hacer el plasma.

La fuente de radiofrecuencia cuenta con un dispositivo para tal fin, denominado precisamente acoplador de impedancias y que regula la componente capacitiva e inductiva del plasma, modificándolas hasta un valor de impedancia de 50Ω y que es al cual trabaja la fuente. Figura 3.1

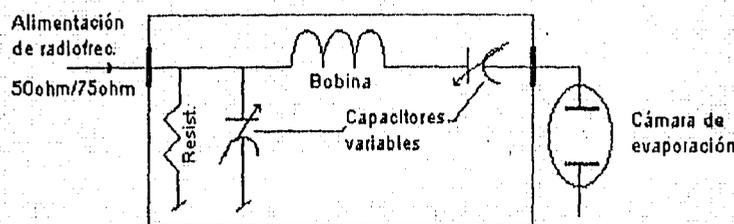


Figura 3.1. Circuito que representa un acoplador de impedancias

Ahora bien, la Figura 3.2 muestra todo el sistema en forma de circuito [Coburn,1972].

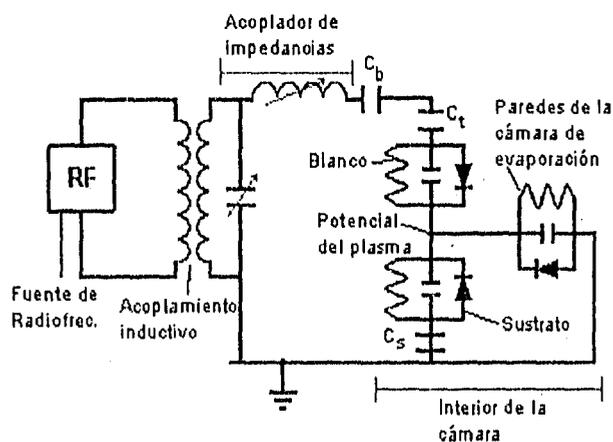


Figura 3.2. Representación en forma de circuito eléctrico de un sistema de erosión iónica con radiofrecuencia

Como se dijo, necesita haber un acoplamiento inductivo y capacitivo entre la fuente de radiofrecuencia y el plasma que produce la erosión iónica.

En la Figura 3.2. se plantea todo el sistema en la forma de un circuito eléctrico equivalente conformado por una fuente de radiofrecuencia, un acoplamiento inductivo, un acoplador de impedancias y un circuito equivalente para el interior del tanque partiendo de que tanto los electrodos como las paredes del tanque están en contacto con el plasma y que la impedancia del plasma está dada por los efectos que produce esa zona.

Cada electrodo se considera un subcircuito con el mismo potencial que el plasma; con una capacitancia, resultado de la presencia de espacio oscuro (o dark space, véase capítulo 2) que separa las cargas del plasma y el electrodo; una resistencia que simula la corriente de los iones que llegan al electrodo debido a su poca movilidad, resultado de su masa, los hace aparecer como resistencia; en cambio, la movilidad de los electrones en un sentido y el otro según se modifica la señal de radiofrecuencia le da características a la corriente, que fluye del plasma al electrodo, que siguen el comportamiento de un diodo. Un circuito similar se aplica para las paredes de la cámara. C_t es la capacitancia del blanco (cátodo) y C_s la del sustrato (ánodo).

El paso de corriente de radiofrecuencia a través del plasma se debe principalmente al movimiento de los electrones por causa del desplazamiento de la nube electrónica. Esta corriente está fuera de fase con el voltaje aplicado y por tanto, no hay transferencia de potencia. La transferencia de potencia se debe a las corrientes de conducción de iones y electrones, relativamente pequeñas, que llegan a los electrodos. Por tanto, en nuestro circuito equivalente, esta transferencia de potencia ocurre conforme la corriente iónica circula por la resistencia — para que haya erosión iónica tiene que haber un paso de corriente—. Una transferencia eficiente de potencia de la fuente al plasma requiere que la fuente de radiofrecuencia opere dando solo carga resistiva. Entonces, el propósito del acoplador de impedancias es brindar inductancias y capacitancias al circuito del plasma para que, en combinación con la carga que da la fuente, forme un circuito resonante al de la fuente.

En otras palabras, el plasma con la ayuda del acoplador de impedancias se convierte en un circuito resistivo igual que el de la fuente de radiofrecuencia; así la fuente "ve" solamente la componente resistiva del plasma y es entonces cuando le puede alimentar de corriente de radiofrecuencia. Una manera de monitorear que tan bien ajustados están los dos circuitos es con la potencia reflejada.

Colocando en corto circuito un determinado número de vueltas de la bobina del acoplador de impedancias, que modifica a la componente inductiva, es que se logró arrancar con radiofrecuencia a los magnetrones. Hubo otros problemas asociados, tales como la sustitución del cable coaxial, proporcionado por el fabricante, por un tubo de cobre plateado y recubierto con teflón ya que para el nivel de potencia requerido, el mencionado cable tendía a derretirse.

En un principio se pensó que esta situación de reflejo de energía se debía a un problema de tierras. Con radiofrecuencia esto es primordial, ya que si hay potencia reflejada significa que toda la energía no llega al magnetrón sino que se dispersa por toda superficie metálica mal puesta a tierra, induciendo corrientes parásitas y con ello mal funcionamiento de los dispositivos electrónicos de medición así como el peligro latente de que el operador sufra una descarga peligrosa. Otra posible causa que se contempló fueron las pérdidas a través del cable coaxial.

Como la radiofrecuencia es un tipo de radiación que hay que manejar con cuidado, se tuvo la precaución de acortar lo más posible la longitud del conductor y así reducir el riesgo de pérdidas y la probabilidad de tener un contacto accidental con él.

Cuando se superaron las dificultades con las impedancias y se logró hacer trabajar a los magnetrones se inició la caracterización de los parámetros óptimos de potencia, presión, distancia entre electrodos y tiempo de depósito de la erosión iónica.

En principio se trabajó solamente con radiofrecuencia mientras la coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería terminaba de construir la fuente de corriente directa que se pensaba utilizar para la erosión del blanco de aluminio.

Una vez entregada la fuente de corriente directa, al hacer pruebas con ella, se notó que era muy sensible a los súbitos cambios de corriente; además el voltaje proporcionado resultaba insuficiente. Se le hicieron las modificaciones necesarias y se consiguió hacer la erosión iónica, sin embargo no siempre se tenía éxito.

Las causas del fallo fueron la presencia de arcos al iniciar la descarga del plasma que se reflejaban en picos de corriente, los cuales, para controlarlos nos obligaban a bajar el voltaje. Al disminuir el voltaje no había energía suficiente para iniciar el sputtering. Otro fenómeno observado fue que el plasma no mantenía una formación constante de iones a causa de las variaciones de presión en el sistema inherentes al gran volumen de la cámara y la gran velocidad de bombeo que se tiene. Se intentó suprimir esta oscilación en la presión pero la medida resultó insuficiente; se concluyó que la fuente de corriente directa necesitaba ser controlada por potencia y no por voltaje para compensar este problema. Además, para iniciar la ionización del gas de trabajo y, la posterior formación del plasma, hay que vencer una resistencia inicial; la fuente entonces debe proporcionar un pico elevado de corriente y voltaje de unos pocos segundos de duración denominado voltaje de encendido. Esta característica tampoco viene incorporada en la fuente.

Para proseguir con el proyecto hubo que recurrir a otra fuente de corriente directa con supresor de arcos, voltaje de encendido y control de energía por potencia.

Diseño y construcción de los equipos auxiliares

Para poder iniciar el trabajo con los magnetrones planos se diseñó y mandó construir lo siguiente:

- Tubería de acero inoxidable en forma de Y, pulida y con uniones a base de soldadura de plasma de argón para trabajo en alto vacío, para montar los dos magnetrones.
- Abrazaderas de aluminio para fijar los magnetrones a la tubería y dar flexibilidad de ajuste
- 2 soportes circulares de hierro de 1.30m de diámetro y 7cm de ancho con orificios para tornillos de ajuste
- Estructura metálica de hierro, de 1.10m de largo y 0.6m de ancho, a partir de solera de 3cm. Es para dar soporte extra a los magnetrones y colocar el sustrato.
- Brida de aluminio con compartimiento intermedio para vacío diferencial. Es para introducir el mecanismo que mueve al sustrato

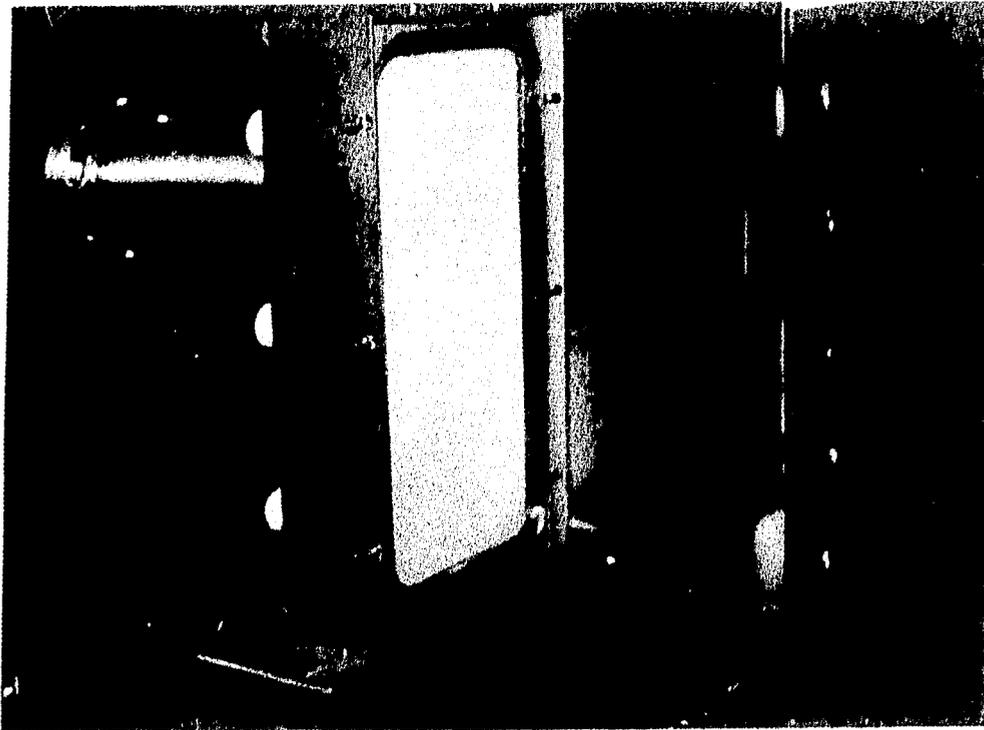


Figura 3.3. Arreglo de los magnetrones y el sustrato en el interior de la cámara

Asimismo, se adaptó equipo disponible en el laboratorio para completar el equipo auxiliar que se necesitaba. En este caso se construyó un mecanismo para mover el sustrato a distancia y sin romper el vacío; comprende un carro para mover la placa de enfriamiento y soporte del sustrato. El carro se construyó a partir de los desperdicios de una máquina de escribir. La placa de enfriamiento y soporte también fueron hechos en nuestro laboratorio empleando tubería de cobre de 3/8" y una placa de 57x30cm del mismo material. Aprovechando el motor de un sistema de control de flujo ya en desuso, se hizo el mecanismo móvil a control remoto acoplando la flecha de acero y el motor al ya mencionado carro.

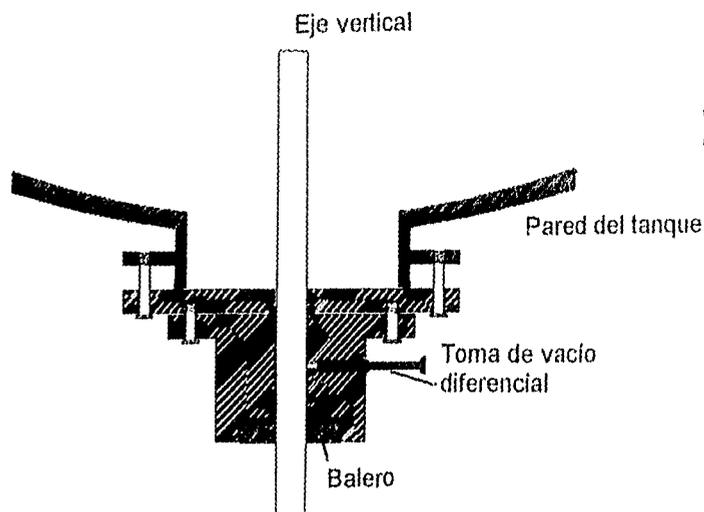


Figura 3.4. Diagrama de la brida de aluminio para el acoplamiento del motor que mueve al sustrato.

Fabricación de 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 contracción). 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 [González, 1989].

Un tipo de vidrio que se recomienda ampliamente por sus características es el vidrio flotado [Richmond 1984]. 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 ambas caras esencialmente planas. sin embargo, la que está en contacto con el estaño queda impregnada con algo de este material.

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, y así eliminarle esfuerzos.

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 y planas.

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 [Richmond, 1984].

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 [Czanderna, 1985]. 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 desarrollos anteriores sobre este campo [Almanza, 1991], 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.

Así también, en la fase previa a la actual y en donde se utilizaron cañones de electrones [Correa, 1993], quedó comprobado que los resultados que brindaba el vidrio flotado eran comparables a aquellos obtenidos con el vidrio especial Corning 7090, y cuya característica principal es una total transparencia a las radiaciones solares.

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 [Ramírez, 1990]. 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.

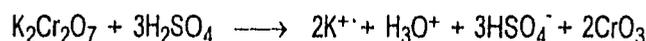
Esta limpieza es esencial tanto para aumentar la adhesión entre las películas y el vidrio, como para minimizar la corrosión de los espejos. Se debe remover de las hojas de vidrio polvo, grasa, algún gel (capa del gel natural del vidrio, depositada en la superficie del cristal durante su fabricación), 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.

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 [Almanza, 1992].

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.

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 una descarga luminosa utilizando argón u oxígeno. Dicha descarga es establecida entre un ánodo (las paredes de la cámara evaporadora) y un cátodo circular de aluminio, muy próximo al sustrato para que la limpieza sea más eficiente. 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: [Brawn, 1970]

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 600x300x3mm 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:

$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	24g
H_2SO_4	408mL
H_2O	144mL

- ▲ 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; al terminar se colocan los vidrios dentro de un recipiente con alcohol isopropílico. Por último, se secan con aire caliente a una temperatura de 90-110°C por 10 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" [Maissel, 1970]: "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.

Erosión iónica del aluminio y bióxido de silicio

La erosión iónica es una de las varias técnicas utilizadas para la deposición de materiales metálicos sobre sustratos de vidrio; las otras son el depósito químico y la evaporación.

De estas técnicas, la que más se utiliza para producir espejos de una manera comercial es el depósito químico. La evaporación es la que le sigue en importancia de uso, pero es más común encontrarla como el método preferido en laboratorios de investigación por su sencillez y pequeño tamaño de las piezas elaboradas. 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.

Puesto que no es objeto de esta tesis profundizar en las variantes tecnológicas que existen para fabricar y evaluar espejos, se describirá, de modo general, el proceso de depósito con magnetrones planos desarrollado en este trabajo.

Una vez instalado el vidrio frente a los magnetrones y habiéndosele hecho la limpieza con descarga luminosa, se procede a depositar la película de aluminio. Para ello se introduce argón al interior del tanque hasta una presión de 6×10^{-4} Torr y con la fuente de corriente directa se le aplica al sistema un voltaje de 810V, con baja potencia (200W). De esta forma se genera una corriente eléctrica que produce la ionización del gas; manifiesta por la aparición de luminosidad sobre la superficie del magnetrón con el blanco de aluminio; se dice entonces que "encendió el magnetrón"¹.

La mencionada descarga eléctrica, recibe el nombre de descarga luminosa y al gas ionizado se le dice plasma. Hay situaciones en que a la presión de 6×10^{-4} Torr no se produce la formación del plasma, entonces hay que elevar la presión a valores mayores de hasta un orden de magnitud. Como hay una mayor cantidad de moléculas expuestas a la corriente que se alimenta, la probabilidad de ionización aumenta y por el efecto cascada -donde la ionización de los primeros átomos de argón genera más electrones que ionizan a más átomos- explicado en el capítulo anterior, se verifica rápidamente la ionización. Esto generalmente ocurre cuando, por prolongados periodos de tiempo, se han dejado expuestos al aire atmosférico los magnetrones con los blancos y el interior del tanque en general. Los óxidos que se forman y la adsorción de otra clase de contaminantes presentes en el aire son las causas directas, para eliminarlos es necesario que la descarga eléctrica sea mayor.

Una vez formado el plasma, el voltaje baja hasta valores entre 200 a 300V, mientras que la corriente pasa de casi cero a ~ 0.5 A. Este valor de corriente indica que se ha establecido un flujo de electrones entre los electrodos que mantiene "encendido" al plasma. Se deja el sistema bajo estas condiciones por unos minutos para asegurar que sean eliminadas las sustancias indeseables que se encuentren en la superficie del blanco (óxido de aluminio principalmente). La manifestación de que esto ocurre se observa conforme transcurren los minutos, pues el voltaje se incrementa gradualmente a expensas del descenso en la corriente (ya que la potencia suministrada permanece constante).

En estos momentos, se puede aumentar la potencia de la fuente hasta casi 400W o dejar en 300W, dependiendo de la velocidad de depósito de aluminio que se desee. La erosión iónica inicia cuando el potencial entre los electrodos alcanza valores de 400-500V. Como el blanco de aluminio está negativamente polarizado —también se le denomina cátodo—, los iones Ar^+ lo bombardean arribando con energías del orden de 100-500eV. Los átomos en la superficie del aluminio están unidos por energías de 2-10eV (energía de sublimación) y la energía promedio de aquellos que son desprendidos es de 10-40eV, el resto de la energía se disipa en el magnetrón

¹ La energía de ionización para el átomo de argón es 15.7eV, la radiación ultravioleta del plasma de argón tiene una energía de 12eV y la radiación visible de 2eV. Los átomos adsorbidos tienen una energía de enlace inferior a 0.5eV.

en forma de calor, por ello es muy importante el enfriamiento en estos aparatos para asegurar su durabilidad, evitar la fusión del blanco y el daño a los imanes que conforman el magnetrón.

La velocidad de la erosión se determinó experimentalmente con los datos de espesor de la película formada y tiempo de depósito. El ritmo de depósito depende también del ángulo de incidencia de los iones respecto a la normal de la superficie del blanco; a ángulos superiores a 80° hay mayor probabilidad que el ion sea reflejado, mientras que un golpe a ángulos de $60-80^\circ$ respecto a la normal produce el máximo desprendimiento de partículas del cátodo [Rosnagel,1990]. Figura 3.6. Las partículas desprendidas llegan al sustrato después de sufrir varias colisiones. El resultado neto es el arribo de átomos a un ángulo sólido máximo (abarcando todo un hemisferio) [Gambino, 1978].

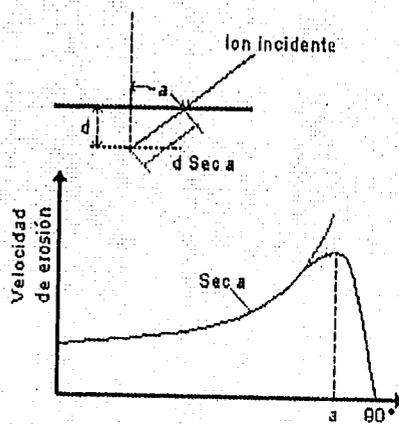


Figura 3.6. Dependencia de la cantidad de partículas desprendidas del blanco con el ángulo de incidencia de los iones.

Se observa que se sigue una distribución secante en ángulos inferiores a $\sim 60^\circ$ con respecto a la normal a la superficie.

Las tablas 3.1 y 3.2 presentan los valores típicos de las condiciones de operación a las cuales se trabaja durante el depósito del aluminio y el cuarzo.

Tabla 3.1. Corrida típica para el depósito de aluminio por medio de erosión con corriente directa.

Presión del sistema (Torr)	Potencia alimentada(W)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo real	Tiempo efectivo (min)
$P_{base} = 4.4 \times 10^{-5}$					
7.4×10^{-4}	160	0.6-0.7	269-280	11:17	0
7.8×10^{-4}	200	0.72	274	11:22	0
7.5×10^{-4}	250	0.86	287	11:27	0
7.3×10^{-4}	250	0.46	528	11:30	0*
7.2×10^{-4}	300	0.55	539	11:32	2
7.2×10^{-4}	350	0.64	545	11:34	4
7.4×10^{-4}	350	0.65	535	11:48	18
* Se coloca el espejo frente al magnetrón con cuarzo e inicia el recubrimiento				Espesor de la película: $\sim 1000 \text{ \AA}$	

Cuando se alcanza el espesor deseado de la película de aluminio, se procede con el depósito del cuarzo. Como se explicó ya, al ser el cuarzo un dieléctrico se requiere que la erosión iónica se realice con radiofrecuencia en vez de corriente directa.

Se observó que el plasma de argón no garantizaba el depósito del cuarzo, pues la potencia necesaria para asegurar una velocidad de evaporación aceptable, y hacer viable la aplicación industrial de esta tecnología, provocaba el rompimiento en alguno de los enlaces Si-O, esta descomposición de algunas moléculas de cuarzo (SiO_2) se hacía evidente por la coloración amarillenta—típica de las películas de monóxido de silicio—de los espejos.

Esto hizo que se introdujera un porcentaje de oxígeno al gas de trabajo para asegurar que las moléculas de SiO reaccionaran y eliminar esta coloración indeseable puesto que disminuye la reflejancia de los espejos. Entonces, el oxígeno asegura por conducto de una evaporación reactiva el depósito de la película de cuarzo [Hass, 1982].

Sin embargo, la presencia de oxígeno hace que la velocidad de erosión iónica disminuya, pues este gas al ser reactivo, se adsorbe y recubre la superficie del blanco de cuarzo, lo que provoca que para poder arrancar una molécula de SiO_2 , hay que gastar un ion para quitar de enmedio al oxígeno que se interpone. Esta cinética fue estudiada por Jones(1968) y se explica con más detalle en el capítulo 6.

Elevadas concentraciones de oxígeno—35% a 50%—hacían muy lento el proceso y se perdía estabilidad del plasma con pequeñas oscilaciones en la presión. Esto hacía que la impedancia del sistema variara constantemente y por ende la potencia reflejada aumentaba. Las fuentes de radiofrecuencia para operar de manera continua y sin problemas requieren prácticamente potencia reflejada nula. Como el ajuste del flujo de gas se hace manualmente siempre existen variaciones de presión y esto hacía que al trabajar a dichas concentraciones de oxígeno, la fuente de radiofrecuencia interrumpiera su operación para protegerse de súbitos aumentos de potencia reflejada.

Las concentraciones de 15% a 30% de oxígeno mostraron ser las óptimas. El "encendido del magnetron" se presentaba a presiones de 6.8×10^{-3} Torr. La presión de trabajo fue 2 a 2.5×10^{-3} Torr y el tiempo de depósito de 1 hora a una potencia de 800W a 850W.

Al momento de realizar la erosión iónica de ambas sustancias, el sustrato de vidrio se mantiene en continuo movimiento con ayuda de un motor adaptado para tal fin y abarcar un área mayor. Esto permite fabricar espejos de 60x30cm con un depósito prácticamente uniforme. El tamaño del espejo fue determinado por las limitaciones de espacio que impone la cámara de evaporación.

Al momento de realizar la erosión iónica de ambas sustancias, el sustrato de vidrio se mantiene en continuo movimiento con ayuda de un motor adaptado para tal fin y abarcar un área mayor. Esto permite fabricar espejos de 60x30cm con un depósito prácticamente uniforme. El tamaño del espejo fue determinado por las limitaciones de espacio que impone la cámara de evaporación.

Tabla 3.2. Corrida típica para el depósito de cuarzo por erosión iónica con radiofrecuencia.

Presión del sistema (Torr)	Potencia (W)			Polarización de electrodos (V)	Tiempo real	Tiempo efectivo (min)
	Seleccionada	Reflejada	Alimentada			
$P_{base}: 1.9 \times 10^{-5}$						
7.8×10^{-3}	3	1	5	0	12:21	0
2.2×10^{-3}	100	1	102	-12	12:23	2:20
2.1×10^{-3}	200	1	202	-23	12:25	4:40
2.0×10^{-3}	300	1	302	-31	12:27	6:40
2.1×10^{-3}	400	1	402	-39	12:29	8:40
2.3×10^{-3}	500	1	503	-47	12:31	10:40
2.5×10^{-3}	600	1	603	-54	12:33	12:40
2.5×10^{-3}	700	1	703	-59	12:35	14:40
2.2×10^{-3}	800	1	803	-59	12:37	16:40
2.5×10^{-3}	800	1	803	-59	12:39	18:00
2.4×10^{-3}	800	1	803	-64	12:49	28:00
2.1×10^{-3}	790	1	792	-65	12:59	38:00
2.6×10^{-3}	790	1	792	-64	13:19	58:00
2.7×10^{-3}	790	1	792	-64	13:29	68:00
2.1×10^{-3}	790	1	793	-63	13:39	78:00
3.2×10^{-3}	790	1	793	-63	Espesor de la película: ~5000Å	
25% O ₂						

* Se coloca el espejo frente al magnetrón con cuarzo e inicia el recubrimiento

Es importante señalar que la velocidad de erosión en radiofrecuencia depende de la polarización negativa que presentan los electrodos con respecto al plasma (Figura 3.8). Mientras más grande sea la polarización más se verán atraídos los iones y en el trayecto adquirirán mayor energía cinética. Así, durante el experimento, a polarizaciones de -65V, la velocidad de depósito del cuarzo era prácticamente el doble que a -40V.

El origen de esta polarización surge de la gran movilidad de los electrones con respecto a la de los iones. El elevado flujo de electrones hacia los electrodos hace que el plasma adquiera un potencial positivo puesto que en él quedan un exceso de iones positivos.

En nuestro caso se tiene que, el cátodo está conectado a la fuente de radiofrecuencia a través del capacitor en serie del acoplador de impedancias, y que el área del sustrato es mayor que la del cátodo.

Al aplicar a los electrodos un potencial de magnitud V_1 , el potencial del plasma se hace también V_1 pero tiende a disminuir conforme el capacitor adquiere carga. (Figura 3.7). En la otra mitad del ciclo, cuando el voltaje es $-V_1$, nuevamente el capacitor extrae carga del plasma, pero esta vez con la corriente de los iones. Por consiguiente, el decaimiento en el potencial es más lento, pues está asociado con la alta resistencia efectiva al flujo de los iones.

Este proceso va ocurriendo hasta el momento en que la corriente promedio de iones y electrones, que llegan a los electrodos, es la misma, condición que se cumple si los electrodos

adquieren una polarización negativa que disminuya la velocidad del electrón y aumente la de los iones.

La magnitud de la polarización dependerá de la presión del sistema. Si la presión aumenta manteniendo la potencia constante, la polarización disminuye, en parte por el descenso en el voltaje, ocasionado por el aumento de las partículas neutras que reducen la impedancia del plasma.

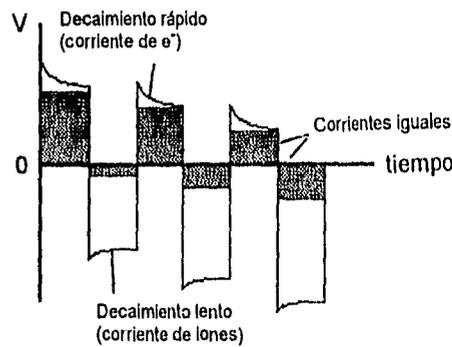


Figura 3.7. Comportamiento del voltaje en un sistema operado con radiofrecuencia (para más claridad se supone una onda cuadrada). Se observa como se va estableciendo la polarización en el electrodo para producir corrientes iguales de iones y electrones. En la parte positiva del ciclo fluye la corriente de electrones y el descenso del potencial del plasma es más rápido a causa de la movilidad electrónica.

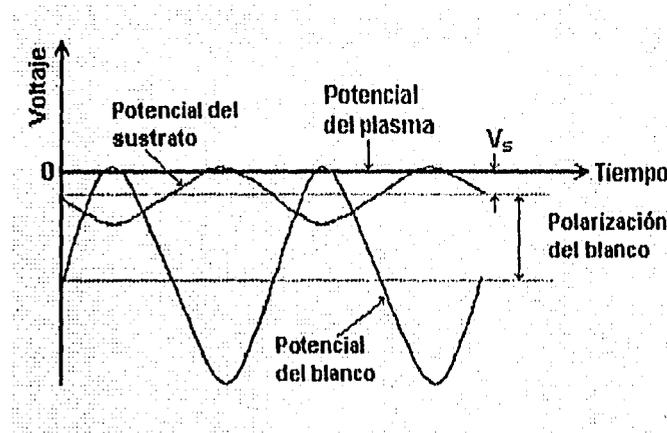


Figura 3.8. Representación aproximada de los voltajes en función del tiempo respecto al potencial del plasma para un sistema de erosión iónica por radiofrecuencia. V_s es el potencial de bombardeo del sustrato.

Mecanismo de formación de las películas

En la erosión iónica con magnetrones, el sustrato está alejado del grueso del plasma, que se halla confinado cerca de la superficie del blanco por el campo magnético del magnetrón, sufriendo poco bombardeo por parte de electrones con elevadas energías o de algún ion del plasma, además, la presencia del campo magnético permite trabajar a presiones más bajas pues confina las partículas en una pequeña región facilitando las colisiones entre ellas; al haber bajas presiones, el camino libre medio de los átomos erosionados aumenta y llegan al sustrato con muy poca pérdida de su energía cinética (15 a 25eV para metales ligeros hasta 50eV para metales pesados).

Existen varios procesos atómicos que determinan el crecimiento de las películas en su fase inicial, condensación, adsorción, difusión superficial, difusión hacia el interior y nucleación [Lüth, 1993]. Figura 3.9.

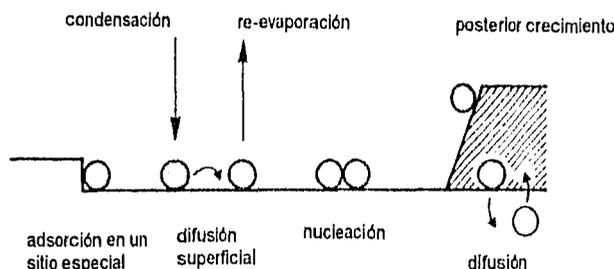


Figura 3.9. Representación de los procesos que intervienen en el crecimiento de las películas sobre una superficie sólida. Los átomos del sustrato son los círculos blancos

El depósito de las películas se realiza por medio de una condensación de los átomos incidentes en el sustrato de vidrio. La condensación de un nuevo material está dada por la cantidad de partículas/cm² por segundo que llegan. Se puede dividir en tres etapas. La primera en donde los átomos al llegar le transfieren energía cinética a la red de átomos del sustrato y se le incorporan con enlaces débiles (adsorción).

En la segunda etapa, se difunden sobre la superficie, intercambiando energía con la red estructural del sustrato y algunas otras especies que estén adsorbidas, hasta que son atrapados en sitios favorables o de baja energía y que son generalmente defectos de la superficie del sustrato; en estos sitios se empiezan a acumular más átomos que van llegando iniciándose la formación de pequeñas islas. A este fenómeno se le llama nucleación. Los núcleos crecen y coalescen para dar origen a una capa continua de la sustancia. La densidad y tamaño de las islas poseen gran influencia en la interacción con el sustrato y por tanto en la adhesión de la película. El bombardeo de algún ion y también la elevada energía cinética de los átomos erosionados que llegan, favorece la creación de zonas de nucleación y así mejoran la adhesión al haber más zonas de crecimiento y menos aglomeración en un solo sitio; lo que disminuye también la cantidad de microagujeros [Mattox, 1978]; se dice que la interacción de la película es más continua o de "grano fino". En cambio, si las zonas de nucleación son pocas, la interacción tendrá una estructura de "grano grueso". Una vez que la película es continua, el crecimiento se sucede con la difusión en la superficie de los átomos que arriban.

Finalmente, en la tercera etapa los átomos incorporados se reacomodan por procesos de difusión. Sustrato y película intercambian átomos y la interfase entre ambas sustancias se vuelve gradual, lo que además mejora la adhesión de la película y disminuye las tensiones en la red del sólido originadas por la creación de la interfase entre las dos sustancias. En otras palabras, los átomos de ambos materiales se reacomodan para ubicarse en sitios más favorables energéticamente.

Las tres etapas descritas están determinadas entonces por los siguientes procesos: *la rugosidad del sustrato, energías de difusión y energía de adsorción*. Para metales puros, las energías de activación y enlace son proporcionales a su punto de fusión [Brophy, 1964] y los defectos en el

crecimiento de la película, a causa de la rugosidad y la dirección de arriba, son superados por su facilidad de difusión en la superficie.

Para esta tesis esto se cumple en el caso del aluminio, no así con el cuarzo (SiO_2), donde la difusión superficial de los átomos es casi nula; el fenómeno se manifiesta en la variación del espesor de la película, a lo largo del espejo, en función de su posición con respecto al blanco (dirección de arriba). Otra consecuencia es la aparición de huecos o hasta zanjas en la película —a nivel microscópico—, originados por fenómenos de sombreado debidos a ángulos de incidencia oblicuos. Esto lleva a la producción de películas menos densas y porosas con bajo índice de refracción.

Películas con estructuras granulares resultan en sistemas con bajas temperaturas del sustrato y presiones relativamente altas y donde los caminos libres medios son cortos. Esto provoca los ángulos de incidencia oblicuos que favorecen crecimiento sobre las cimas de los defectos de la superficie del sustrato, lo que a su vez induce un efecto de sombreado que acentúa la poca uniformidad a lo largo de la película.

Estos defectos se reducen cuando la polarización de electrodos es mayor véase Figura 3.8, dado que aumenta el bombardeo de partículas sobre blanco y sustrato; al ser más importante este bombardeo sobre la superficie recién formada induce un *re-sputtering* que posibilita que las nuevas partículas incidentes del material a depositar llenen los huecos dejados, además, algunos choques provocan desplazamientos atómicos con los mismos efectos [Müller, 1987].

Las películas llegan a tener diferentes estructuras dependiendo de cuál de los tres procesos, durante la formación de las mismas, es más importante. Esta importancia está dada por la relación T/T_m , donde T es la temperatura del sustrato y T_m el punto de fusión del material erosionado en grados absolutos [Thornton, 1974]. Figura 3.10.

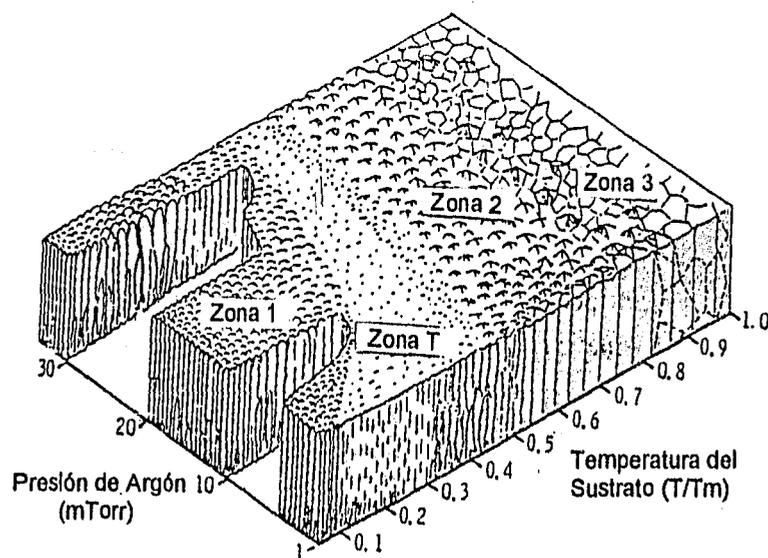


Figura 3.10. Representación de la influencia de la temperatura del sustrato y presión de trabajo en la estructura de películas depositadas por erosión iónica usando magnetrones. Thornton, 1977.

La estructura de la zona 1 resulta cuando la difusión superficial del átomo débilmente enlazado (adsorbido) es insuficiente para superar los defectos de la rugosidad del sustrato. Entonces la película se forma a una baja T/T_m . Altas presiones favorecen este tipo de estructura. Como se aprecia en la figura, consiste en cristales estrechos con puntas redondeadas y separados por pequeños huecos. El diámetro del cristal se incrementa con T/T_m . La rugosidad provoca estos huecos puesto que las partes más prominentes en la superficie reciben más material que las zonas bajas —crecimiento preferencial— y sobre todo a grandes ángulos de incidencia del material erosionado. Cuando el sustrato está en movimiento continuo, se favorece a dicha componente oblicua en los flujos de incidencia. La estructura interna del cristal no está muy definida y presenta zonas más densas que otras.

Existe una zona de transición, llamada zona T. Consiste en un arreglo denso de cristales muy delgados con una apariencia fibrosa y sin huecos. Se originan cuando el sustrato no posee imperfecciones en su superficie, lo cual facilita el mecanismo de difusión, y a mismos T/T_m que la zona 1.

La zona 2 se define como en rango de T/T_m donde el proceso de crecimiento está dominado por la difusión superficial del átomo incidente. Presenta el aspecto de columnas separadas por fronteras desarregladas, poco homogéneas y con diferente densidad. El tamaño de las columnas aumenta con T/T_m y su continuidad puede abarcar todo el espesor de la película a altos valores de T/T_m . La superficie es plana.

Cuando la difusión no se limita a las capas superficiales, y la temperatura del sustrato es elevada, se presentan las condiciones para el crecimiento de la película con estructura tipo zona 3. Las elevadas temperaturas favorecen la formación de grandes cristales siguiendo un crecimiento epitaxial, producto del reacomodo de los átomos para disminuir la tensión en sus energías de enlace (recristalización). Este tipo de estructura es difícil de lograr con la erosión iónica por las altas energías de las partículas que intervienen y que tienden a crear numerosas zonas de nucleación, lo que lleva a estructuras finamente granulares.

Capítulo 4

Propiedades de los espejos

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 la región de longitud de onda y, 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 intensidad de la radiación solar reflejada (I) y la intensidad de la radiación solar incidente (I_0). A esta relación comúnmente se le identifica como ρ_s , y es igual a I/I_0 . La intensidad de la radiación depende de la longitud de onda y la dirección (su distribución espacial).

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. Cuando una superficie es muy rugosa, su componente difusa refleja hacia todos lados con diferentes intensidades.

Existen diferentes tipos de reflexiones según la superficie del material. Las características ópticas de dichas superficies se aplican 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 $32'$ de arco, 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.

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 4.1 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.

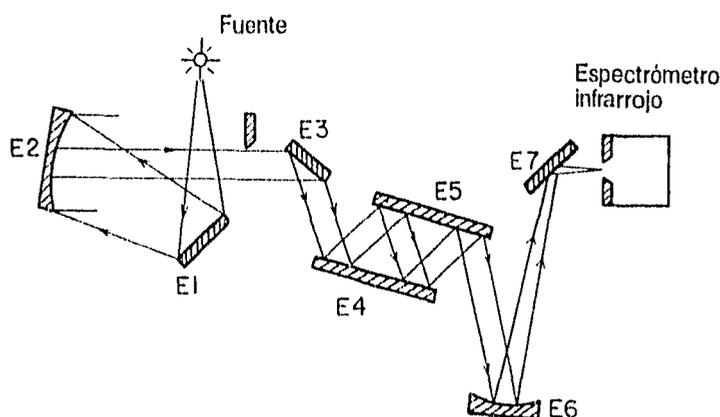


Fig. 4.1. Reflectómetro absoluto de múltiples pasos. E4 y E5 son siempre paralelos, variando la distancia entre ellos es posible modificar el número de reflexiones. Al cambiar su orientación el ángulo de incidencia es diferente.

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

La figura 4.2 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 reflejancia 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.

Para los reflectómetros que manejan una muestra patrón, se utiliza el arreglo conocido como esfera integrante, que permite medir en un mismo aparato la reflejancia especular o la reflejancia direccional hemisférica

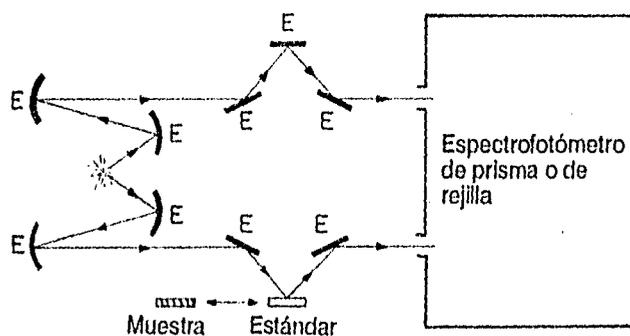


Figura 4.2. Diagrama de un espectrofotómetro de doble haz.

Reflejancia especular

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

Reflejancia direccional hemisférica

Resulta de coleccionar la radiación reflejada en todas direcciones cuando la superficie de la muestra es irradiada en una dirección particular o viceversa. Figura 4.3. Para la gran mayoría de estos equipos, y cuando es el caso, el haz incidente se dirige con una inclinación de alrededor de 7° respecto de la normal a la superficie de la muestra a medir. Existen detectores dispuestos alrededor de la esfera, para medir ya sea el haz reflejado a un ángulo definido o bien, integrar los haces dispersos.

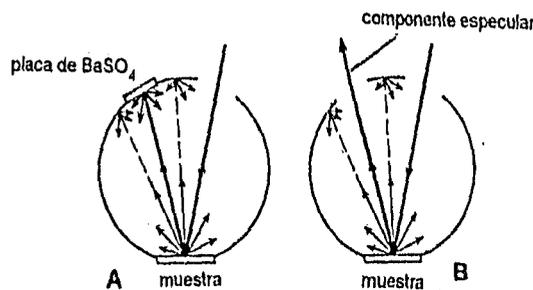


Figura 4.3. Diagrama de una esfera integradora. (A) reflejancia especular y direccional hemisférica. (B) medición de reflejancia direccional hemisférica, la componente especular no se cuantifica. Los detectores no están representados

Todas estas reflejancias se miden a diferentes longitudes de onda, es por ello que genéricamente se les denomina reflejancias espectrales (ρ_λ). 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:

$$\rho = \frac{\int \rho_\lambda E_\lambda d\lambda}{\int E_\lambda d\lambda} \tag{1}$$

- Siendo: ρ la reflejancia
- 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 disponible.

Reemplazando las integrales por sumatorias:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_{\lambda_i} E_{\lambda_i} \Delta \lambda_i}{\sum_{i=1}^N E_{\lambda_i} \Delta \lambda_i} \quad (2)$$

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:

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_{\lambda_i} \frac{E_{\lambda_i} \Delta \lambda_i}{\sum_{i=1}^N E_{\lambda_i} \Delta \lambda_i} \quad (3)$$

Dado que E_{λ_i} es la irradiancia solar directa espectral, es decir, la irradiancia que se recibe en un intervalo de longitud de onda. Considerando la suma de todos estos valores tenemos el valor de E_s , como la irradiancia solar directa normal. Y entonces:

$$\frac{E_{\lambda_i} \Delta \lambda_i}{\sum_{i=1}^N E_{\lambda_i} \Delta \lambda_i} = \frac{E_s / N}{E_s} = \frac{1}{N}$$

Obteniéndose finalmente la ecuación (4):

$$\rho = \frac{1}{N} \sum \rho_{\lambda_i} \quad (4)$$

Hay que recordar que los nombres de reflejancia direccional-hemisférica y reflejancia especular son diferentes nombres derivados de diversos métodos empleados para evaluar una única propiedad óptica, la reflejancia. 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.

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.

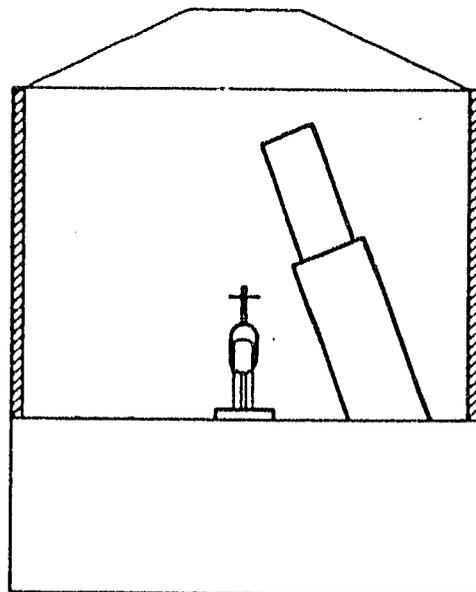
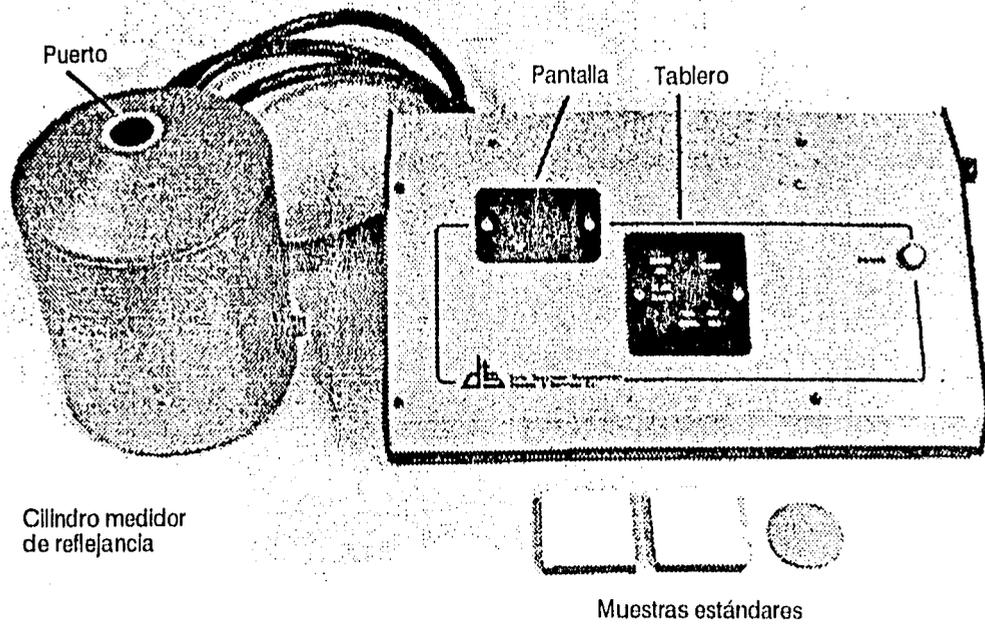


Figura 4.4. Fotografía y esquema del interior del reflectómetro SSR-ER

Medición de la reflejancia solar especular

Se empleó un reflectómetro de espectro solar (SSR) de la compañía Devices & Services.

La medición resulta sumamente simple: una vez calibrado el aparato con un patrón, 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, con una lámpara de halógeno. La cavidad cubierta con sulfato de bario la refleja en todas direcciones y asegura que sea radiación difusa. Parte es reflejada en un ángulo determinado hacia un 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 por un procesador para así generar un valor de la reflejancia especular con una aproximación del orden de 95% al espectro solar real. Figura 4.5.

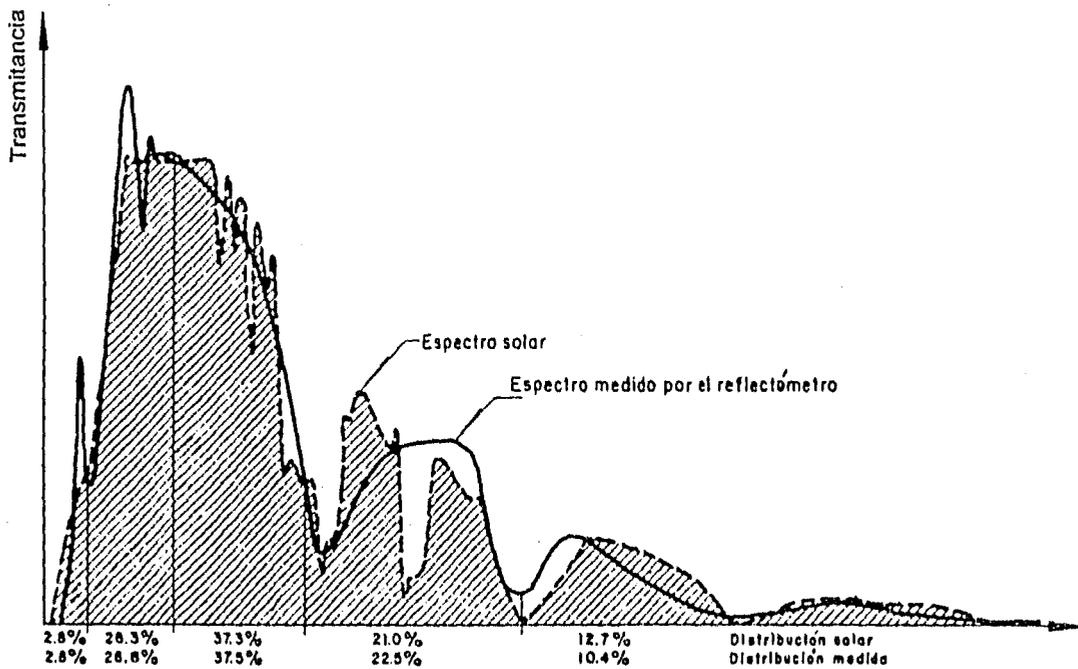


Figura 4.5. Comparación del espectro solar y el medido por el reflectómetro.

Para calibrar el aparato se emplearon espejos de referencia, y un patrón de sulfato de bario; proporcionados por el fabricante del equipo. Todos con reflejancias conocidas.

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

Medición de la reflectancia espectral

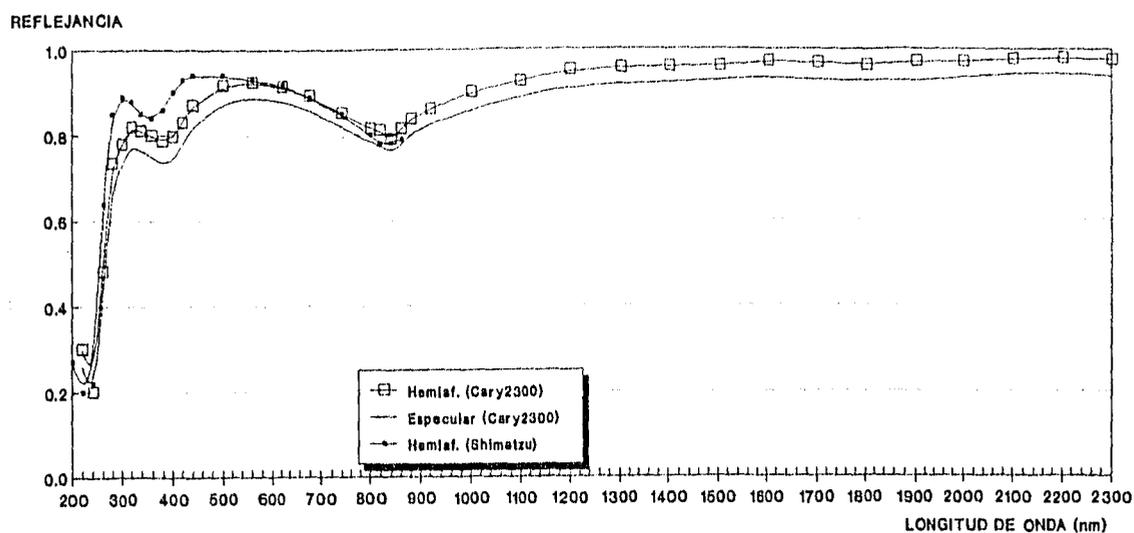


Figura 4.6. Gráfico de ρ_λ , la reflectancia a diferente longitud de onda. Valores en la Tabla 3.

Otra técnica para la determinación de ρ_s fue la medición de la reflectancia espectral [Haas, et al, 1982; Richmond, 1984; ASTM,12.02,1983]. Ésta se realizó con un espectrofotómetro Shimatzu. La figura 4.7 muestra un diagrama del interior del aparato.

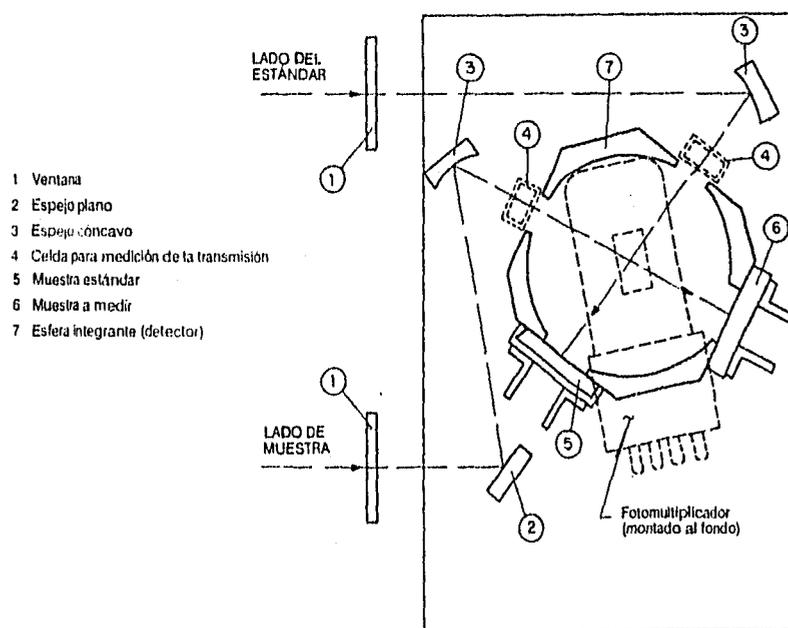


Figura 4.7. Diagrama del arreglo de esfera integradora para medir reflectancia direccional hemisférica en el espectrofotómetro Shimatzu.

La medida de la reflejancia espectral nos brinda la posibilidad de determinar la reflejancia solar con gran precisión, además de proporcionar información detallada acerca del comportamiento de los materiales en función de la longitud de onda. Puede ser reflejancia espectral *direccional hemisférica* o reflejancia espectral *especular*.

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 patrón también de sulfato de bario. Fig 4.8 y 4.9.

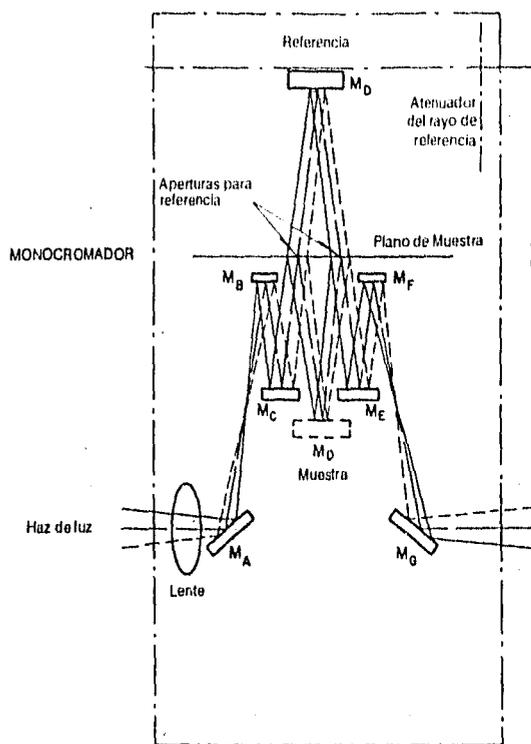
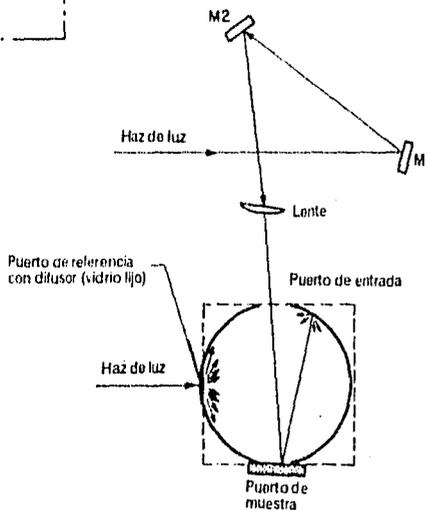


Figura 4.8. Diagrama del arreglo para medir reflejancia especular en el espectrofotómetro Cary 2300.

Figura 4.9. Diagrama del arreglo de esfera integrante para medir reflejancia direccional hemisférica en el espectrofotómetro Cary 2300.



Se hicieron mediciones de la reflejancia espectral de los espejos para comparar el desempeño del reflectómetro SSR-ER y para compararla con algunos espectros reportados en la literatura para espejos similares. Para ello se evaluaron dos espejos, seleccionados por sus altos valores de reflejancia en el reflectómetro SSR-ER, 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, donde se dividió el rango de longitud de onda (220 a 2600 nm) en 25 intervalos de igual energía.

Tabla 3. Reflejancias espectrales de dos espejos de primera superficie.

Longitud de onda (nm)	Reflejancia espectral ρ_s			
	ρ_H	ρ_H'	ρ_s	ρ_s'
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
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
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
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	0.800	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
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

ρ_H es la reflejancia direccional hemisférica; ρ_s es la reflejancia espectral.

Tabla 4. Resultados del cálculo de la reflectancia solar a partir de la espectral con los datos medidos en el espectrofotómetro Cary 2300.

Longitud de onda (nm)	Reflectancia espectral ρ_{λ_i}		
	ρ_H	ρ_e	ρ_e'
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
Reflectancia Solar	0.893	0.856	0.875

Adhesión entre el vidrio y las películas

El desprendimiento de las películas, ya sea reflectante 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 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 [Maissel, et al, 1970]. 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.

El empleo de erosión iónica asegura películas con mejor adherencia que las que se pueden obtener por otros métodos de depósito debido tanto al mecanismo de limpieza de la superficie provocado por el permanente bombardeo de partículas sobre el sustrato, como por la cantidad de energía de los átomos incidentes (decenas de eV en promedio) que aumenta la fuerza de sus enlaces con el sustrato.

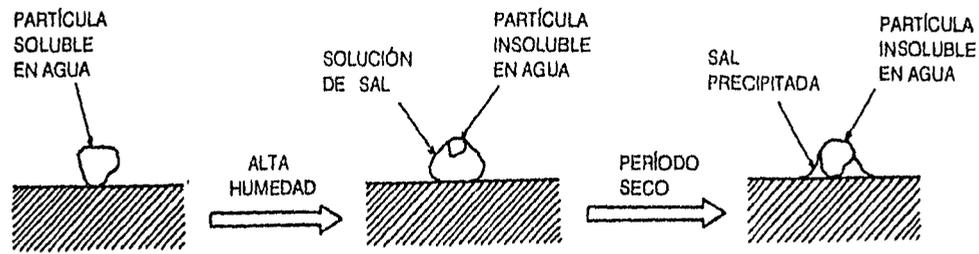
El aporte de energía de las partículas incidentes al bombardear la superficie del material proporciona mayor movilidad a los átomos adsorbidos previamente para que se alojen en sitios preferenciales de baja energía; éstos sitios son generalmente imperfecciones como escalones o valles. Al estar los átomos situados en sitios estables energéticamente, será difícil desprenderlos, esto es lo que hace que películas producidas con esta técnica tengan buena adherencia. Además, existirán algunas partículas que por la elevada energía con que llegan, literalmente se incrusten en el sustrato o la película en crecimiento. Todas las colisiones aportan su energía vía transferencia de momento, sin embargo, la manifestación principal de este aporte energético es el calentamiento del sustrato varios cientos de grados; y es también este calentamiento el que favorece el crecimiento de la película hacia estructuras más continuas y por ende con mejores propiedades ópticas. En el capítulo anterior, así como en el de discusión de resultados se tratan más a detalle estos fenómenos.

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 [González, 1989] 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; con el paso del tiempo, aumenta la adherencia pero de manera más gradual.

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 4.10)



REFUERZO PAULATINO DE CAPAS DE PARTICULAS CEMENTADAS

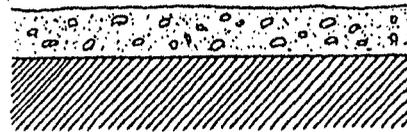


Figura 4. 10.
Mecanismo de adhesión del polvo

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 [Cuddihy, 1980]. En zonas industriales se debe añadir, 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.

Capítulo 5

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 Al-SiO₂ y asegurarse de la protección a la corrosión que debe brindar la película de SiO₂. 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 y con lo sugerido por la literatura [Masterson, 1983; Dennis, 1980], se seleccionaron las siguientes pruebas:

HUMEDAD

CICLO TÉRMICO

ALTA TEMPERATURA

INMERSIÓN EN SOLUCIÓN SALINA

PRUEBAS DE ABRASIÓN

Todos los espejos fueron fabricados a una tasa de depósito mas o menos similar, en el aluminio 1 y más Å/s, y para el cuarzo silicio (menos de 1 Å/s). La principal diferencia entre las muestras fue la variación de espesores de la película de SiO₂(de 1500 a casi 4000 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. Se encontró que no influye en la reflejancia ni en la resistencia de las películas al medio ambiente.

Pruebas con Humedad

Cámara de Intemperismo

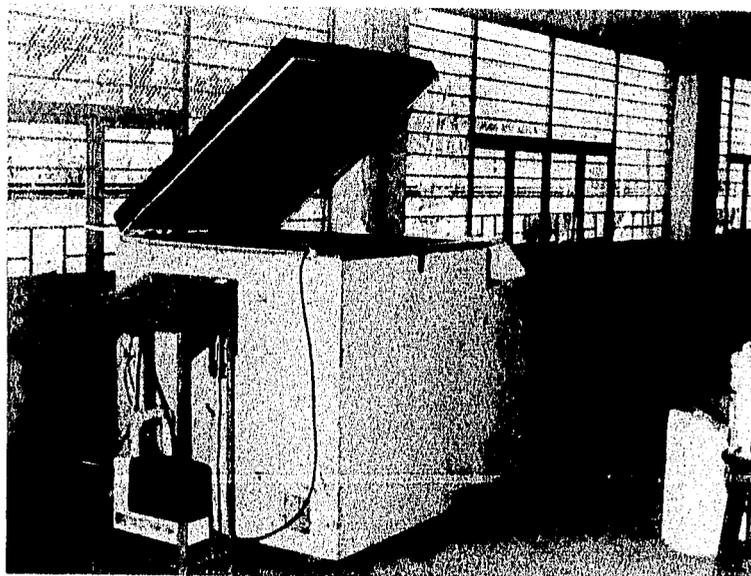


Figura 5.1. Cámara de Intemperismo

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.

Procedimiento

Se sometieron los espejos a un medio con 100% de humedad relativa y temperatura ambiente durante 4 semanas

Los espejos completamente limpios se colocan dentro de la cámara de intemperismo, en el fondo y el centro.

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.

La Tabla 1 presenta los resultados de esta prueba:

Tabla 1. Resultados de prueba de 100%HR a temperatura ambiente.

Muestra	Espesor (Å)		$\rho_s(\pm 0.001)$		Comentarios
	Al	SiO ₂	inicial	Después de 4 semanas	
24-06	1728	5460	0.846	0.841	
11-06	1177	4488	0.841	0.837	
05-07	1326	4725	0.825	0.825	
06-06	1440	2886	0.826	0.825	
22-05	1127	5422	0.682	0.680	

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, ya que cada material presenta un diferente coeficiente de expansión térmico. Las películas al estarse contrayendo y expandiendo por efecto de las variaciones de temperatura llegan a experimentar esfuerzos mecánicos capaces de romper los enlaces entre superficies, lo que se traduce en el desprendimiento de las películas del vidrio.

El primer paso es colocar las muestras dentro de la cámara de intemperismo 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 en una charola dentro de una mezcla de nitrógeno líquido y alcohol isopropílico durante 20 minutos. La temperatura de la mezcla es de -50°C. 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 y a continuación se presentan los resultados.

A continuación se dan los resultados:

Tabla 2. Reflejancias después del ciclo térmico.

Muestra	Reflejancia ρ_s (± 0.001)			Comentarios
	Previa	Después de 1 ciclo	Después de 5 ciclos	
06-08	0.849	0.848	0.849	Se partió en dos pedazos
08-08	0.824	0.824	0.824	
16-07	0.866	0.865	0.864	
20-06	0.820	0.820	-----	Se partió en vario pedazos
03-09-4	0.841	0.842	0.840	

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 [Masterson,1983], en este tipo de pruebas la temperatura no debe exceder 80°C. Películas de cuarzo cuya composición sea muy deficiente en oxígeno al someterse a elevadas temperaturas sufre un cambio en su estructura, pues el silicio captura parte del oxígeno que le hacía falta, lo que se traduce en cambios de propiedades ópticas, índice de refracción principalmente [Pliskin,1967; Pliskin,1965]. Asimismo, si el aluminio no está totalmente protegido, al calentarse puede sufrir oxidación disminuyendo la reflejancia del espejo.

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 la cámara de intemperismo; a intervalos de 24 horas se medía su reflejancia y revisaba su apariencia. La duración del experimento fue de 72 horas.

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

Tabla 3. Reflejancias después de exposición a 70°C

Muestra	Reflejancia ρ_s (± 0.001)			Comentarios
	Previa	24h	72h	
24-06	0.862	0.862	0.861	
18-07	0.835	0.833	0.832	
03-09-2	0.840	0.842	0.842	Ligero aumento en reflejancia
06-09-2	0.824	0.824	0.824	

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 24h, previo enjuague con agua destilada para eliminar restos de sal. Con esta prueba se simulan condiciones de ataque salino similares a las que ocurrirían en zonas costeras.

Salvo un espejo que sufrió apreciable corrosión (figura 5.2), en el resto no hubo gran daño. Se observó que existía un ataque preferencial en la zona del espejo en contacto con la interfase aire-agua. Se hizo la suposición que como se trata de una zona donde existe un equilibrio entre la evaporación y la condensación del agua la concentración de sal es mayor que en el seno del líquido además, el vapor de agua presente se introduce entre las películas a través de alguna imperfección microscópica resultado de la porosidad de la película del cuarzo, y se difunde entre las dos capas despegándolas permitiendo así la entrada de más vapor e inclusive de la solución. Uno de los espejos se sumergió por completo y únicamente presentó el ataque de la sal en un punto a partir del cual se propagó con rapidez. Nuevamente, suponemos que el ataque inició por la presencia de algún microagujero en la película protectora. Esto puede evitarse si se incrementa el espesor del cuarzo.

Tabla 4. Reflejancias después de inmersión en solución salina.

Muestra	Reflejancia ρ_s (± 0.001)			Comentarios
	Previa	24h	72h	
05-07	0.808	0.808	0.794	Corrosión en la zona en contacto con el aire
18-07	0.835	0.833	0.832	
03-09-1	0.854	0.854	0.852	Corrosión local
06-09	0.820	0.820	0.819	
10-09	0.822	0.821	0.818	



Figura 5.2. Espejo sumergido completamente en la solución salina. La corrosión inició en un solo sitio y a partir de un microagujero desde donde se extendió con rapidez; No apareció en el resto de la superficie. El espesor de la película protectora en este caso fue de $\sim 3000\text{\AA}$.

Pruebas de Abrasión

Una vez en operación, los espejos acumularán polvo, se erosionarán por efecto del paso de partículas arrastradas por el viento y por la necesidad de limpiarlos con cierta frecuencia. Estas partículas absorben y dispersan la luz, afectando a la especularidad del espejo. Las rayaduras que pudiera provocar su limpieza es también causa de pérdida de reflejancia. Así pues, es importante conocer la dureza de la película protectora y considerar su resistencia a la abrasión provocada por este tipo de condiciones.

La abrasión y resistencia a la abrasión son difíciles de cuantificar. En este caso, se llevaron a cabo pruebas sencillas. Consistieron en limpiar con un trapo suave en seco y bajo condiciones de 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 5. Reflejancias después de las pruebas de abrasión.

Muestra	Frotamientos		Reflejancia $\rho_s (\pm 0.001)$	
	Seco	Húmedo	Previa	Posterior
11-06	200	---	0.842	0.842
06-09-1	---	200	0.839	0.839
03-09-3	200	---	0.850	0.850

Capítulo 6

Discusión de resultados

En los últimos años, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se han realizado intensas investigaciones para el desarrollo de espejos de aluminio de primera superficie. Los esfuerzos se han concentrado en 3 áreas principales. Para la película reflejante de aluminio, un énfasis en la dependencia de la reflejancia solar especular es el espesor, velocidad de depósito y adhesión de la película al sustrato de vidrio. Para la película protectora, su transparencia, adhesión al aluminio y durabilidad en función de su espesor, composición y velocidad de depósito. Finalmente, una vez analizadas las películas por separado, se estudia el comportamiento conjunto y su desempeño en forma de espejo bajo condiciones climáticas adversas.

Se ha escogido al cuarzo como capa protectora; resulta la sustancia idónea para tal fin, puesto que es más fácil de manejar al momento de fabricar los blancos que los magnetrones requieren. Está disponible para este tipo de uso y es comercializado por compañías especializadas. Otra sustancia que ha demostrado ser apropiada para fabricar la película protectora es el monóxido de silicio, sin embargo, presenta el inconveniente de que está disponible en gránulos y prensarlo para fabricar el blanco correspondiente no resulta muy práctico.

No absorbe radiación en el UV y visible y hay abundante literatura acerca de sus propiedades como película, las diferentes técnicas para producirlo y sus aplicaciones. Tradicionalmente se emplea al cuarzo para proteger las superficies de semiconductores y en algunos recubrimientos ópticos.

Características de los espejos

La reflejancia solar especular de un espejo típico de Al-SiO₂ de primera superficie producido por erosión iónica es de alrededor de 0.86, medida con el reflectómetro SSR-ER, a masa de aire 2 (M=2). En la Tabla 1 aparecen los resultados de algunos de los espejos fabricados. La figura 6.1 presenta la reflejancia espectral de uno de esos espejos, obtenida con un espectrofotómetro Cary 5E. Con estos datos (Tabla 2) y siguiendo el método descrito en el capítulo 4, se obtuvo la Tabla 3 y con ella su reflejancia solar.

Tabla 1. Reflejancia especular de espejos de Al-SiO₂ de primera superficie.

Muestra	Espesor de película (Å)		Velocidad de depósito (Å/s)		ρ _s (±0.001)
	Al	SiO ₂	Al	SiO ₂	
06-08	1440	3518	1.2	1.17	0.853
20-06	1224	5544	1.2	1.4	0.820
24-06	1728	5460	1.6	1.3	0.846
11-06	1177	4488	1.5	1.1	0.841
05-07	1326	4725	1.3	1.05	0.825
06-06	1440	2886	1.5	1.29	0.826
03-07	1257	2293	1.3	0.90	0.841
16-07	1518	3264	1.2	0.84	0.866
18-07	1386	4428	1.1	0.82	0.856
03-09-3	1183	2840	1.2	0.79	0.850
03-09-1	1183	2840	1.2	0.79	0.849
10-09	1450	1920	1.2	0.78	0.822

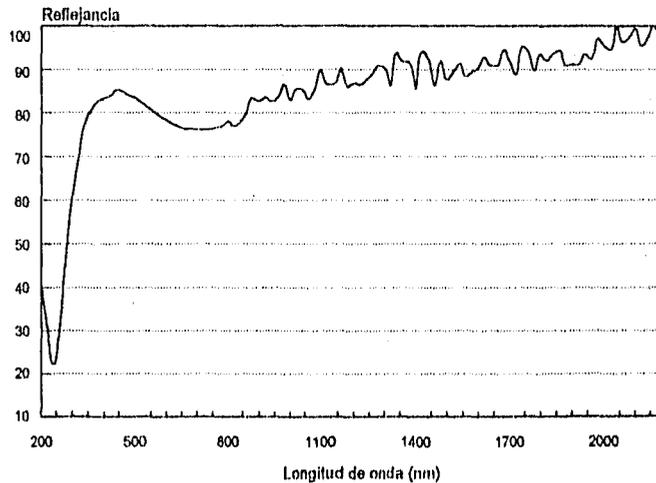


Figura 6.1. Reflejancia espectral de un espejo de Al-SiO₂ de primera superficie. Producido con erosión iónica.

Tabla 2. Reflejancia espectral del espejo de la figura 6.1

Longitud de onda (nm)	Reflejancia espectral ρ_λ	Longitud de onda (nm)	Reflejancia espectral ρ_λ	Longitud de onda (nm)	Reflejancia espectral ρ_λ
220	0.303	900	0.826	1580	0.893
260	0.310	940	0.825	1620	0.928
300	0.610	980	0.865	1660	0.908
340	0.760	1020	0.855	1700	0.917
380	0.826	1060	0.831	1740	0.953
420	0.839	1100	0.899	1780	0.897
460	0.849	1140	0.866	1820	0.920
500	0.834	1180	0.860	1860	0.944
540	0.812	1220	0.864	1900	0.911
580	0.790	1260	0.889	1940	0.935
620	0.774	1300	0.903	1980	0.970
660	0.765	1340	0.938	2020	0.945
700	0.762	1380	0.915	2060	0.963
740	0.762	1420	0.941	2100	0.994
780	0.769	1460	0.863	2140	0.974
820	0.769	1500	0.876	2160	0.969
860	0.797	1540	0.913	2220	0.922

Tabla 3. Cálculo de la reflejancia solar a partir de las reflejancias espectrales de la tabla 2.

Longitud de onda (nm)	Reflejancia espectral ρ_λ	Longitud de onda (nm)	Reflejancia espectral ρ_λ	Longitud de onda (nm)	Reflejancia espectral ρ_λ
228	0.304	344	0.805	696	0.763
237	0.305	364	0.820	786	0.770
247	0.304	387	0.825	902	0.825
257	0.300	414	0.840	1058	0.829
268	0.378	444	0.865	1279	0.895
281	0.467	478	0.853	1618	0.921
294	0.567	519	0.820	2200	0.940
309	0.680	567	0.797		
325	0.750	625	0.770		$\rho_s = 0.820$

Para evaluar la fuerza de enlace de las películas se siguieron pruebas de ciclo térmico¹ y adhesión² —utilizando cinta adhesiva sobre ellas—. los resultados mostraron que ambas películas están fuertemente enlazadas entre sí y el sustrato. Esto es particularmente importante dado que se busca que estos materiales reflejantes posean una prolongada vida útil. Manifiesta por su resistencia a las condiciones adversas del medio ambiente.

Se hicieron varias pruebas para determinar el espesor óptimo de la película de cuarzo. En proyectos anteriores donde se utilizaba evaporación térmica con cañones de electrones, se obtuvieron

¹ En el capítulo 5 se presenta la metodología seguida.

² Véase capítulo 4

resultados que indicaban un valor de aproximadamente 3200Å, este fue el parámetro inicial a partir del cual se fabricaron los primeros espejos con la ayuda de magnetrones. Se encontró que para películas depositadas por medio de plasma de argón-oxígeno, el espesor que aseguraba la mayor reflejancia solar especular era ~3,300Å a ~3,500Å.

Por su parte la, película de aluminio siguió mostrando elevadas reflejancias. Se tomó el valor de 1000Å como el más apropiado, pues películas con espesores inferiores presentaban cierta transparencia mientras que espesores más grandes no producen cambio en la reflejancia y en cambio consumen más material a la vez que se emplea más tiempo de evaporación. Figura 6.2.

Hacia el final del experimento, y bajo mejores condiciones de limpieza en la cámara, así como varias corridas realizadas se fabricaron dos espejos únicamente con aluminio; las reflejancias fueron de 0.90 y 0.91, valores que coinciden totalmente con los reportados en la literatura para películas de aluminio puro [Mar, 1976].

Tabla 4. Variación de la reflejancia especular en función del espesor de la película de aluminio

Muestra	Espesor (Å)		$\rho_s(\pm 0.001)$
	Al	SiO ₂	
13-02	400	-----	0.732
19-02	600	-----	0.867
22-02	600	-----	0.868
27-02	1000	-----	0.870
29-03	1000	-----	0.871
08-04	2000	-----	0.864
11-04	4000	-----	0.850

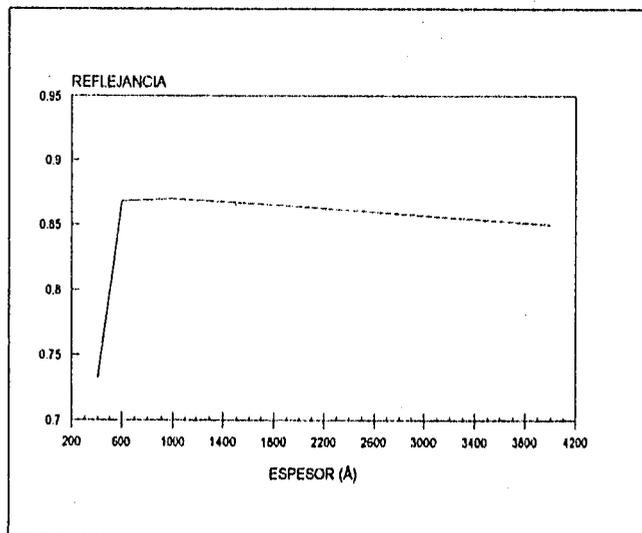


Figura 6.2. Reflejancias a diferentes espesores de aluminio

Resulta importante optimizar los espesores para que los costos de fabricación no se eleven y para que los esfuerzos mecánicos en las interfaces aluminio-vidrio y aluminio-cuarzo no provoquen desprendimientos en las películas al deslizarse una superficie sobre otra³. Sabido es que el comportamiento de las películas se va modificando conforme sus espesores son mayores puesto que se aproxima al que tendría una porción masiva del mismo (bulk).

La apariencia física de las películas mostró menos número de microagujeros —precursores de la corrosión de los espejos— que en aquellas producidas con cañones de electrones. Tal y como se citó en capítulos anteriores, los mecanismos que favorecen este fenómeno también aseguran una mayor adherencia al sustrato de vidrio.

En el Instituto de Física de la UNAM se hicieron análisis de los espesores de muestras representativas por una técnica de análisis de superficies conocida como *Rutherford Backscattering* (RBS). Consiste en bombardear la película a analizar con partículas α de 2MeV. Se obtiene un espectro en función de la masa de la especie presente en la muestra. Como cada elemento químico tiene una masa definida es posible así estimar la composición de la película, así como su espesor en función de la penetración de las partículas.

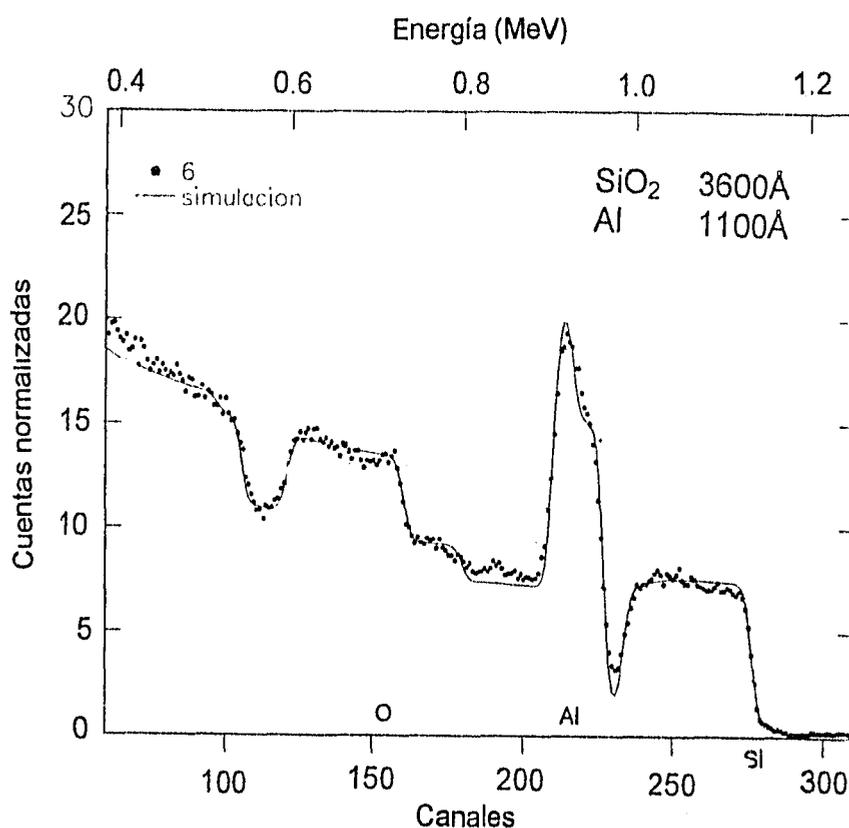


Figura 6.3. Análisis del espesor del centro de un por Rutherford backscattering. Al compararse con la Figura 6.4 se aprecia la diferencia de espesores que existen entre el centro y la orilla si no se tiene cuidado con el movimiento del espejo al momento del depósito.

³Estos 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. Si las capas son más gruesas, se pierde flexibilidad por ser más rígidas.

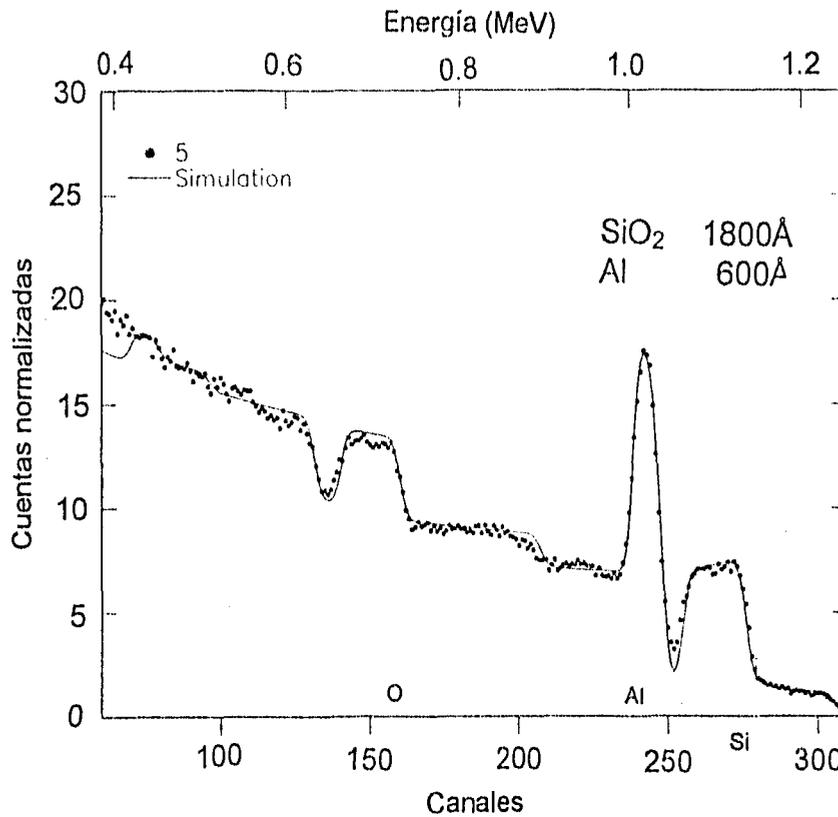


Figura 6.4. Análisis del espesor de una muestra de la orilla de un espejo por Rutherford backscattering (RBS).

Influencia de las condiciones del sistema en las propiedades de las películas

Contaminantes y formación de arcos

Cuando se ha alcanzado estabilidad en el sistema, el proceso de depósito es controlable y predecible, sin embargo, esa estabilidad toma varios minutos y depende de la velocidad de evacuación por parte de la bomba de difusión y del ritmo al cual se va aumentando la potencia de las fuentes de alimentación. Estos factores en realidad determinan la cantidad de partículas y energía del plasma, los cuales deben permanecer casi sin variación para que haya éxito en el depósito; en otras palabras, se dice que debe haber un régimen permanente.

En la erosión de aluminio, si el vacío previo no resulta muy bueno, al encender la fuente de corriente directa, aparecerán muchos arcos al iniciar la descarga luminosa por la presencia de sustancias adsorbidas en el blanco (por ejemplo, Al₂O₃) y la superficie metálica del magnetrón; si en esos momentos se intenta acelerar la eliminación de esas sustancias —con el bombardeo de partículas del plasma recién formado— aumentando la potencia de la fuente, el número de descargas se incrementa notablemente pudiendo contaminar el sustrato con sustancias indeseables que son desprendidas por estas descargas o bien la fuente se apaga automáticamente para protegerse de

algún gran pico de corriente. Por eso se recomienda iniciar a baja potencia para luego aumentarla gradualmente, de esta manera la desorción de los contaminantes es gradual y las descargas desaparecen rápidamente. Los contaminantes más comunes son generalmente vapor de agua, nitrógeno, oxígeno que reaccionó con los compuestos del cátodo para formar algún óxido, solventes orgánicos utilizados en la limpieza, partículas de polvo y partículas de aceite provenientes de la bomba de difusión.

Por su parte en radiofrecuencia, debido al constante cambio en la polaridad de los electrodos, no hay tiempo suficiente para la acumulación de las cargas que originan estos arcos de corriente; pero en cambio, estos contaminantes impiden parcialmente el acoplamiento entre el plasma y la fuente de radiofrecuencia, fenómeno que se manifiesta en una oscilación en la potencia reflejada de entre 3 y 20W. Parecerían valores bajos, pero parte de esta energía se disipa en la fuente provocando que actúe el switch de temperatura que trae incorporada, —puesto que con el tiempo resulta insuficiente la refrigeración con agua del equipo—. No se puede depositar cuarzo si se corta la corriente con frecuencia.

La física de los arcos de plasma y su origen, ha recibido atención los últimos años. Los arcos son corto circuitos de elevada energía, que tienen el efecto de una explosión en miniatura. Cuando ocurre uno cerca de la superficie del blanco o de la cámara de evaporación, causan una pequeña fusión local del material; este material en parte es expulsado y puede dañar a la sustancia que está siendo depositada, además de acumularse sobre cualquier otra superficie.

Los principales tipos de arcos son:[Scholl, 1993]

Interacciones entre el plasma y el blanco. Cuando el espacio oscuro es saltado por un flujo muy grande de electrones que pudo haberse originado por la desaparición de una región aislante sobre el blanco debido a la desorción de algún gas de la superficie. También por la presencia de una zona puntual de emisión de electrones en la superficie de dicho blanco. La inversión del voltaje eliminará de inmediato estos arcos.

Arcos homopolares. Se producen cuando grandes campos eléctricos se forman a lo largo de una superficie de una región del blanco aislada eléctricamente. Se crea un flujo de corriente a lo largo de dicha superficie o entre la parte aislada y las regiones conductoras de sus alrededores.

Interacciones entre el escudo del magnetrón y el sustrato. Aparecen si la diferencia de potencial entre ellos es crece súbitamente.

Interacciones entre el blanco y el escudo del magnetrón. Estos arcos suceden cuando se forma una ruta de baja impedancia entre el blanco y tierra física. El blanco en condiciones normales debe estar aislado de la conexión a tierra, la cual generalmente se hace desde el escudo del magnetrón. Los arcos los origina alguna hojuela del material erosionado que actúa de conexión o por la presencia de gas conductor en el espacio que existe entre el blanco y el escudo. Estos arcos pueden conducir en ambas direcciones.

Presión

Es deseable trabajar a la mínima presión posible para asegurar un proceso óptimo; así disminuye la presencia de contaminantes y, los átomos erosionados pueden desplazarse hacia el sustrato sin perder su energía con colisiones intermedias. Esto asegura una mayor adherencia de la película.

En las primeras experiencias con el depósito de las películas, las presiones de trabajo resultaron ser elevadas. Para iniciar la descarga del gas con la fuente de corriente directa se requerían presiones de argón del orden de 6×10^{-3} Torr, mientras que con radiofrecuencia hasta de 1×10^{-2} Torr. Las impurezas adsorbidas en las paredes del tanque, del magnetrón y la falta de mantenimiento a la bomba de difusión resultaron ser las causas más inmediatas. El tanque había permanecido abierto a la atmósfera cerca de un mes mientras se adaptaban los soportes para los magnetrones y los sistemas de enfriamiento y movimiento del sustrato de vidrio.

Como contraste, en las corridas realizadas para fabricar las versiones finales de los espejos, para corriente directa, no había que elevar la presión para facilitar la formación del plasma y se trabajó el argón a 5×10^{-4} Torr. En radiofrecuencia, la presión de "encendido" del plasma fue de $5-7 \times 10^{-3}$ Torr y la presión de trabajo 2.5×10^{-3} Torr. Las referencias en la literatura para erosión iónica con magnetrones planos reportan valores similares a los obtenidos en nuestro laboratorio [Dobrowolski, 1992; Davidse, 1966]. Hay que aclarar que en radiofrecuencia se subía un poco más la presión para disminuir la resistencia inicial que presenta el gas para ionizarse; fenómeno no importante cuando se trabajaba con argón puro sino cuando el gas de trabajo era una mezcla argón-oxígeno; la presencia del oxígeno modificaba las propiedades eléctricas del plasma [Jones, 1968], la necesidad de presiones iniciales elevadas es un ejemplo de esto, otro lo fueron los constantes ajustes en el acoplador de impedancias para controlar las oscilaciones de la potencia reflejada a lo largo del proceso de depósito del SiO_2 .

Si durante la fabricación del espejo no se tiene cuidado de controlar la presión del sistema en un valor constante y se presentan oscilaciones, la velocidad de la erosión del SiO_2 disminuye incluso hasta desaparecer. Así, hubo espejos que después de 1 hora trabajando con radiofrecuencia, a valores elevados de potencia (700W) y polarización entre electrodos (-55V) con 5 a 10% de oxígeno, presentaban trazas de cuarzo junto a una película de aluminio degradada y parcialmente oxidada a causa de la temperatura alcanzada por el sustrato por lo prolongado del tiempo de evaporación.

También, si la presión de trabajo se mantiene constante a 1×10^{-3} Torr, porcentaje de oxígeno de 5 a 10%, con duración del experimento por 1 hora y a valores de potencia y polarización de electrodos similares a los recién mencionados, el espejo presentará intacta la película de aluminio pero una ausencia de cuarzo. Al ser baja la presión no hay suficiente número de partículas para establecer y mantener la erosión iónica. Ahora bien, se observó durante pruebas en atmósfera de argón que la erosión iónica inicia cuando hay suficiente energía para mantener una polarización entre blanco y sustrato de -41V (y presiones de 1×10^{-3} a 2×10^{-3} Torr), sin embargo, si se mantienen estas condiciones el proceso es sumamente lento y se requieren tiempos superiores a dos horas para alcanzar espesores aceptables. Las mejores películas se lograron a presiones de 2.5×10^{-3} y 3×10^{-3} Torr y polarización entre electrodos de -58V a -63V con 15 a 30% de oxígeno.

Temperatura

El empleo de magnetrones permite que el sustrato no alcance elevadas temperaturas (hasta 400°C) y se tengan tasas de depósito elevadas. Pliskin(1967), trabajando erosión iónica con radiofrecuencia, señala que es la temperatura del sustrato quien más incide sobre las propiedades de la película de cuarzo. Películas de SiO₂ producidas sobre sustratos a ~450°C fueron muy similares a las obtenidas por crecimiento térmico. Incluso aquellas producidas a baja temperatura (100°C) —y que presentaban mayor porosidad, es decir, enlaces Si-O cortados y por tanto tensión en la estructura de red— resultaron ser de mejor calidad que las obtenidas por otras técnicas a baja temperatura como evaporación o pirólisis.

Películas de cuarzo depositadas a bajas temperaturas con erosión iónica poseen índices de refracción mayores que las películas depositadas a altas temperaturas. Un tratamiento térmico, en las primeras, produce que disminuyan sus índices de refracción, sobre todo en las más delgadas. Esto se debe a que les son removidas impurezas volátiles o gases adsorbidos [Pliskin, 1967].

En el mismo trabajo, se concluye que las películas de SiO₂ producidas sobre sustratos a 100 y 450°C, por erosión iónica con radiofrecuencia, pueden ser virtualmente idénticas a aquellas resultado de un crecimiento térmico, si se les somete a un tratamiento de alta temperatura en atmósfera oxidante. Los espectros infrarrojos e índices de refracción de las películas después del tratamiento fueron prácticamente idénticos.

Este hecho se explica en otros trabajos desarrollados por Ritter [1962, 1966] y el mismo Pliskin [1965] donde se dice que las películas de SiO₂ presentan porosidad y deficiencia de oxígeno. Su estructura contiene numerosos enlaces "cortados" (≡Si-O· ·Si≡ en lugar de ≡Si-O-Si≡), los cuales pueden ser parcialmente hidrogenados si hay hidrógeno en el gas residual o también vapor de agua; sin embargo, esta absorción se presenta sobre todo al exponerse la película a la atmósfera —por ello, como se cita en el párrafo anterior, al exponerse al oxígeno la película se termina de oxidar—.

A excepción del crecimiento térmico, las películas de cuarzo obtenidas por cualquier otro método, incluyendo la erosión iónica, tendrán una estequiometría incompleta. Los espectros de estas películas presentan bandas de absorción en el infrarrojo corridas y más anchas que los de aquellas donde no hay deficiencia de oxígeno y su estequiometría corresponde exactamente a dos átomos de oxígeno.

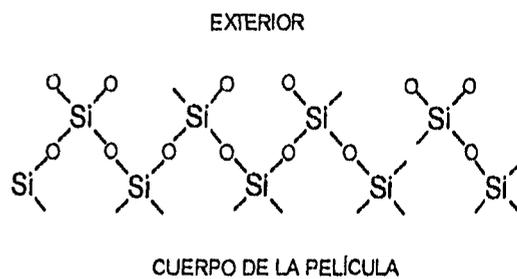


Figura 6.5. Estructura de la película de SiO₂

En el diagrama se aprecia la deficiencia de oxígeno; no es total el grado de polimerización del tetraedro de SiO₂ y esto provoca tensión en la estructura de red de la película.

El tratamiento térmico reduce esta tensión, manifiesta algunas veces por disminución en el espesor de la misma [Pliskin, 1967].

Finalmente, la determinación del contenido de oxígeno para la película SiO_2 por erosión iónica reveló una fórmula $\text{SiO}_{1.95}$ [Pliskin, 1967]. Esto se aprecia en el corrimiento de la banda que señala el enlace Si-O en el infrarrojo ($\sim 1100\text{cm}^{-1}$); es el menor, si se le compara con el de aquellas producidas con cañón de electrones o pirólisis de $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$.

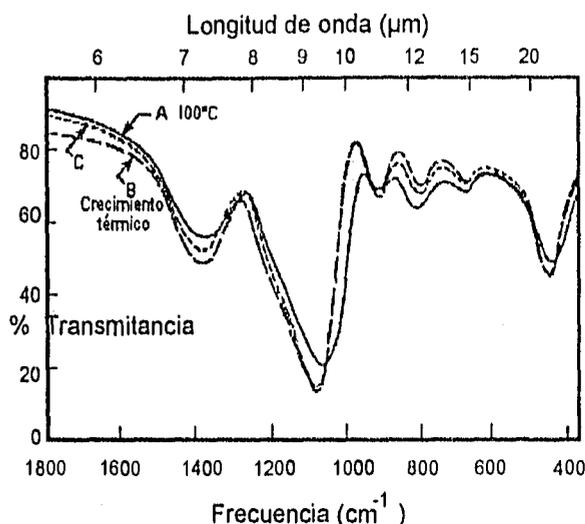


Figura 6.5. Gráfica de espectro Infrarrojos. Obtenido de: "Properties of insulating thin films deposited by RF sputtering" [Pliskin, 1967].

- A. Película de SiO_2 @ 100°C
- B. Crecimiento térmico de sílica
- C. A después de calentamiento @ 965°C , 5 min.

Porcentaje de oxígeno en el gas de trabajo

Se podría pensar que por los valores de energías de los iones (decenas de eV), causantes de la erosión iónica del cuarzo, se pueden producir películas con composición idéntica a la del blanco, sin embargo en nuestro caso, los primeros experimentos realizados en el laboratorio y en los cuales se utilizaban atmósferas de argón puro revelaron un cierto contenido de monóxido de silicio.

En proyectos anteriores, donde se produjeron películas de cuarzo con evaporación térmica del mismo material, hubo que tener mucho control de la presión y velocidad de evaporación, pues si se evaporaban las películas rápidamente aparecía una coloración amarillenta en el espejo, indicando la presencia de monóxido de silicio producto de la descomposición de la molécula de cuarzo. Este problema se solucionó incorporando una atmósfera de oxígeno y disminuyendo la velocidad de evaporación lo que permitió la reacción con el oxígeno de las moléculas de SiO que se producían.

Se decidió trabajar una mezcla de argón-oxígeno. Para ello se estudiaron los efectos de diferentes proporciones de estos gases en la apariencia y reflejancia de los espejos. Se encontró que proporciones de oxígeno entre 15 y 30% eran las apropiadas. A valores mayores de oxígeno, la estabilidad del plasma se volvía más dependiente de la presión y la velocidad de depósito disminuía apreciablemente. Porcentajes inferiores a 12% de oxígeno no resultaban suficientes para eliminar la coloración amarilla de los espejos.

Jones, et.al, [1968], demostraron que la velocidad de erosión iónica empleando radiofrecuencia de SiO_2 disminuye con rapidez al agregar oxígeno al gas de trabajo. El descenso en la tasa de depósito se podía compensar incrementando la potencia suministrada por la fuente. Este fenómeno se pudo comprobar en nuestro laboratorio, sin embargo, hubo que recurrir a presiones parciales de oxígeno inferiores al 30% para proteger el equipo, por los elevados valores de potencia requeridos; a cambio de eso aumentó el tiempo de la corrida experimental para asegurar el espesor deseado.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Obviamente, esto se puede superar para futuras aplicaciones incorporando controles de flujo más precisos y fuentes de poder de mayor capacidad.

El fenómeno que provoca la disminución en la tasa de depósito se puede explicar en términos de mecanismos de adsorción y desorción del oxígeno a la superficie del blanco de cuarzo. El balance de materia sería:

$$(\text{oxígeno proveniente del gas}) + (\text{oxígeno proveniente del blanco}) = (\text{oxígeno removido total}).$$

La ecuación que describe este comportamiento es [Jones, 1968]:

$$\frac{r(p)}{r(0)} = 1 - \beta \frac{G}{G + (A+B)\alpha^{-1}} \quad (1)$$

Donde: $r(p)$ y $r(0)$ son las velocidades de erosión a las presiones parciales de oxígeno p y 0. [átomos/cm² s]

α es la probabilidad de adsorción de oxígeno en algún sitio deficiente en oxígeno

β una medida del porcentaje de oxígeno presente

A es la velocidades de exposición del oxígeno presente en la molécula de SiO₂ resultado del desprendimiento del silicio de capas superiores. [átomos/cm² s]

B es la velocidad de remoción de todo el oxígeno presente en la superficie. [átomos/cm² s]

G es la velocidad a la cual llegan los átomos y moléculas de oxígeno. [átomos/cm² s]

Para nuestro caso, la potencia suministrada fue de 2.5W/cm², se observó que la velocidad de depósito del cuarzo disminuía a aproximadamente la mitad si se pasaba de una porcentaje de oxígeno de 5% a 20%, cifra que coincide con lo reportado por Jones en su trabajo. A presiones superiores al 35% de oxígeno, el aumento en la potencia suministrada no influye en la velocidad de depósito. Fenómeno también predicho por la ecuación, pues en ese caso, G se hace mucho mas grande que el término $(A+B)\alpha^{-1}$ y el fenómeno entonces solo depende de la presión.

El oxígeno presente en el gas tiende a reemplazar en la superficie del blanco a los átomos de O₂ que han sido desprendidos. Entonces, de la energía suministrada, prácticamente la mitad se utiliza en quitar el oxígeno. La saturación ocurre cuando la tasa de reemplazo es superior a la de remoción, de tal forma que la superficie del blanco es siempre una monocapa de oxígeno; y aquí el incremento en la potencia no es suficiente para aumentar la tasa de remoción.

Uniformidad de las películas

Los magnetrones planos al carecer de simetría radial como en el caso de los magnetrones circulares, requieren más energía para producir la tasa de depósito debido a que aunque la energía fluye por toda la superficie del blanco, el plasma no llega a tocar las esquinas y esa energía se desaprovecha [Davidse, 1966].

Como se busca producir espejos con áreas grandes, se introdujo un mecanismo de movimiento para el sustrato, así, es posible depositar las películas en un sustrato de vidrio de gran tamaño con solo desplazarlo continuamente frente al magnetron.

La gran ventaja de la erosión iónica para vaporizar materiales refractarios se revierte al momento del depósito debido a la poca movilidad de las sustancias, lo que restringe su difusión desde el punto de arribo hacia sitios energéticamente más favorables. Consecuentemente, los depósitos llegan a tener gran desorden estructural y propiedades anómalas.

Frente al magnetrón se halla confinado el plasma, que produce la erosión iónica, en una forma similar a la de una dcna elipsoidal. Es precisamente en los sitios ubicados exactamente frente a este toroide donde se desprende el material que se deposita en el sustrato. Como al salir las partículas adquieren una dirección preferencial normal a la superficie del cátodo y la presión de trabajo es pequeña, no tienen mucha probabilidad de desviarse, por tanto, el patrón de depósito en la superficie del sustrato tiene la misma forma elipsoidal. Es deseable que las partículas tengan un gran camino libre medio —quien depende de la presión del sistema—, pues así no pierden su energía en las colisiones y mejora la adherencia de la película al sustrato, sin embargo, la forma final o patrón de depósito que se obtiene en el sustrato produce espesores muy delgados en los costados. El continuo movimiento del sustrato frente al magnetrón disminuye estas diferencias pero no las elimina. Otra desventaja de esta simetría elíptica es que no se aprovecha el material del blanco que queda a los lados y el centro de la zona donde está confinado el plasma.

Al inducir movimiento al sustrato durante el depósito de las películas se favorecen ángulos de incidencia oblicuos que son causa de desórdenes estructurales y alteración de propiedades físicas en las películas hacia tales como: aparición de mayor porosidad y en general estructuras similares a las de una esponja; tensión mecánica, que favorece su degradación posterior; diferente índice de refracción; pérdida de las propiedades dieléctricas o conductoras, según sea el caso; disminución en la reflectividad, entre otras [Frerichs,1962; Maissel,1965; Klokholm,1968; Thornton,1977]. En general, se dice que la película adquiere propiedades direccionales incluso en materiales amorfos. Simulaciones del crecimiento de películas utilizando este tipo de ángulos de incidencia han mostrado que aparecen microhuecos alargados y orientados en dirección normal a la superficie del sustrato.

Al estar incidiendo las partículas sobre el sustrato, tenderán a depositarse sobre la parte superior de alguna rugosidad, y a su vez sobre ellas las que lleguen posteriormente. Este tipo de crecimiento deriva en estructuras "columnares" o de grano fino, con interconexiones entre ellas. Una forma sencilla de visualizarlas es imaginar a un coral arborescente o una esponja, si la película fuese más densa.

Existen métodos para disminuir estos huecos y densificar las películas consiguiendo hacerlas más continuas; favorecer una polarización negativa con respecto al plasma en el sustrato es uno de ellos, con ella, se hacen incidir iones que aporten energía a la superficie. De esta manera se producen rearrreglos moleculares y también desprendimiento de parte del material depositado con lo cual se rellenan algunos huecos con las partículas nuevas que vayan llegando. Otro método es bombardear a la película en crecimiento con un haz de iones proveniente de algún otro dispositivo; como el bombardeo es más enérgico con esta técnica, es posible incluso desplazar grupos de moléculas uniformizando la superficie [Davis,1963; Müller,1987; Teer,1977].

Entonces resulta primordial hacer un balance de los beneficios y perjuicios que el movimiento del sustrato ocasiona. Eliminarlo nos impediría producir espejos al tamaño deseado con el magnetrón disponible, por lo que se decidió analizar qué tanto afectaba en las propiedades especulares de los espejos este tipo de estructuras porosas o columnares.

En la zona central del espejo se localiza el mayor espesor, cubriendo aproximadamente un 30% del área del sustrato de vidrio. El espesor desciende gradualmente desde la parte central hacia los costados presentando una variación de hasta $\pm 5\%$ si se considera una área del 70%-80%. Se puede decir que vista de costado, la película de cuarzo presentaría una forma similar a la de una meseta de poca altura; de esta forma, se explicaría la presencia de halos de diferente color en

función del espesor. Los rayos de luz son refractados en diferentes ángulos dependiendo de la pendiente de la meseta, apareciendo un color distinto se va haciendo más pronunciada. A mayores espesores y menos uniformidad en la película, la intensidad de los colores y el número de franjas aumenta.

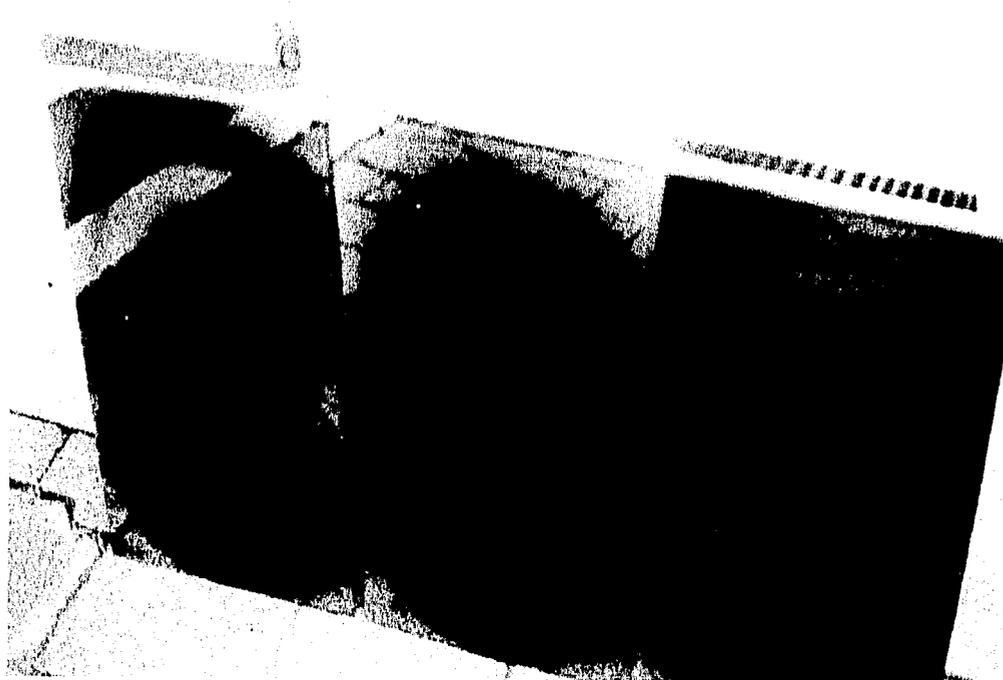


Figura 6.7. Imagen que presenta a la derecha y al centro espejos degradados, por el sobrecalentamiento de la película de aluminio, y sin recubrimiento de cuarzo ocasionado por la baja presión del sistema. A la izquierda es evidente el patrón de depósito no uniforme, visible en este caso por la refracción de la luz. La intensidad de los colores va asociada con la presencia de monóxido de silicio, resultado de una deficiencia de oxígeno en el gas de trabajo.

Se puede disminuir este efecto alejando el sustrato del blanco, pero la tasa de depósito descende y es necesario consumir más energía y gas —esto solo se hace aparente cuando la separación es grande, más de 20cm—. Otra solución consiste en colocar a unos centímetros del sustrato una placa con ranuras a través de las cuales pasa el material erosionado [Dobrowolski, 1992], de esta forma, la uniformidad en sentido de la ranura (vertical) es mayor. Mientras menor sea la abertura de las ranuras, mejor la uniformidad.

Debido al gran número de variables involucradas, y la dificultad que implicó eliminar la deficiencia de oxígeno, no se hicieron pruebas tendientes a disminuir la diferencia de espesores; incluso, no representa gran problema para las aplicaciones reflectivas que se les piensa dar a los espejos, siempre y cuando la coloración no resulte tan evidente. Además, se obtuvieron reflejancias de hasta 0.86, comparadas contra las de 0.89 obtenidas con evaporación térmica. Esta diferencia constituye entonces el efecto del tipo de crecimiento de la película de cuarzo, es la contribución de la porosidad. En ese sentido, las variables que resultaron determinantes fueron el control de la potencia, el tiempo de depósito y la concentración de oxígeno. Se observó que a un mismo valor de

polarización⁴ ($\sim 60V$), bajo porcentaje de oxígeno (10 a 15%) y potencias cercanas a 900W ($2.88W/cm^2$), los contornos se hacían más evidentes e iban acompañados de la coloración característica del monóxido de silicio, esto sugiere la presencia de iones incidentes de elevada energía y descomposición de la molécula de SiO_2 , acompañada de elevadas tasas de depósito. Al aumentar la cantidad de oxígeno a 20% y disminuir la potencia a 800W ($2.56W/cm^2$), desapareció el monóxido de silicio y las líneas coloridas resultaron visibles solo vistas desde cierto ángulo.

Cuando se trabajó únicamente argón a potencias de 600W ($1.92W/cm^2$), polarización entre electrodos de $\sim 50V$ y presión de $1.5 \times 10^{-3} Torr$, había gran variación de espesores (indicio de elevadas tasas de depósito), la película de cuarzo era amarillenta y tenía un aspecto negruzco. Es posible, empleando únicamente argón obtener películas transparentes, bajando la potencia y aumentando el número de iones presentes, pero los tiempos de depósito deben superar las dos horas (a $P \sim 2 \times 10^{-3} Torr$, polarización $\sim 45V$ y 500-600W) y no se consiguen mejoras significativas en la uniformidad.

Entonces, se concluye que la presencia del oxígeno es vital para asegurar la transparencia de la película de cuarzo, que disminuye la velocidad de erosión del blanco y provoca mayores requerimientos de energía para obtener tasas de depósito adecuadas y, por otro lado, que el movimiento del sustrato para abarcar grandes áreas de depósito ocasiona estructuras porosas que impiden alcanzar las máximas reflejancias especulares de los espejos de $Al-SiO_2$ de primera superficie producidos con evaporación térmica ($0.866_{\pm 0.001}$ vs $0.880_{\pm 0.001}$). El objetivo de la tesis, y que se considera ya cubierto, era mostrar la viabilidad de este tipo de materiales ópticos para su aplicación en Energía Solar. El 2% restante en reflejancia deseable en alcanzar, es posible haciendo una evaluación más exhaustiva de las propiedades estructurales y físicas de la película protectora.



Figura 6.8. Espejos obtenidos con y sin oxígeno en el gas de trabajo. Se aprecia la transparencia del espejo de la izquierda, fabricado a condiciones óptimas, mientras que a la derecha la imagen está oscurecida; aparece la coloración amarilla que delata la presencia de SiO_2 .

⁴ La polarización entre electrodos es un indicio de la energía de las partículas en el plasma. Se debe a la elevada movilidad de los electrones respecto a la de los iones del gas y que producen una carga negativa en la superficie del blanco, que a su vez atrae más a los iones.

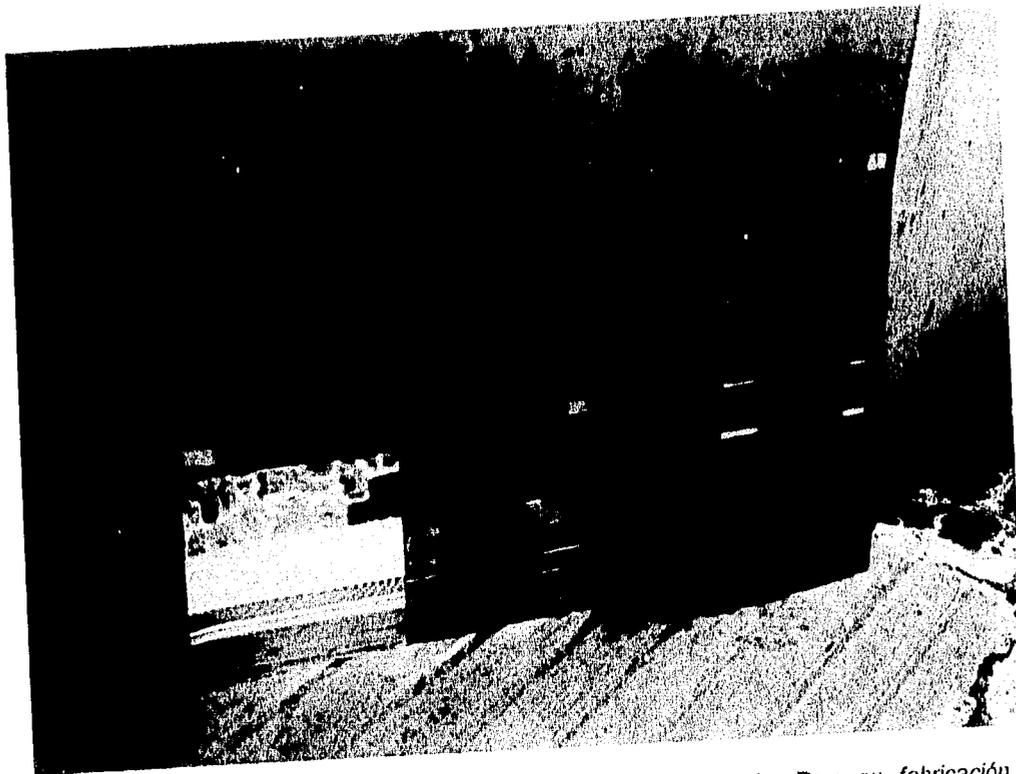


Figura 6.9. La repercusión del oxígeno en la calidad del espejo. Para su fabricación, la concentración de oxígeno en el plasma fue mayor en el espejo de la izquierda, en el del centro cercana a 1mTorr y prácticamente nula en el de la derecha. La deficiencia de oxígeno en la película de cuarzo se manifiesta por el grado de obscuridad del espejo. Espejos claros poseen estequiometría Si:O cercana a 1:2.

Conclusiones

- ❑ Los espejos de aluminio de primera superficie con una película protectora de SiO_2 , son candidatos muy factibles para ser empleados como materiales reflejantes en energía solar.
 - ❑ Están constituidos por una película reflejante (aluminio) y una protectora (SiO_2), depositadas en sucesión sobre un sustrato de vidrio.
 - ❑ En el ultravioleta los espejos de aluminio tienen una reflejancia mayor que los de plata [ASTM, vol12.02, 1983], por lo tanto para procesos de purificación donde se manejan radiaciones UV se constituyen como una buena opción.
 - ❑ La película de cuarzo producida vía erosión iónica con un porcentaje de oxígeno al gas de trabajo, en este caso argón, tuvo un buen comportamiento como capa protectora. Es importante señalar que la presencia de oxígeno asegura la composición de la película, y con ello altas reflejancias.
 - ❑ La erosión iónica en atmósfera exclusiva de argón produce películas conformadas por diferentes especies químicas (SiO_2 y SiO), con propiedades reflectivas de menor calidad a las que se buscan en este tipo de materiales.
 - ❑ Los espejos de Al- SiO_2 producidos con erosión iónica tuvieron reflejancias de 0.86. Espejos de segunda superficie, a base de plata, llegan hasta valores de 0.95 (9% más).
 - ❑ El espesor óptimo para la película reflejante es de $1000 \text{ \AA} (\pm 200 \text{ \AA})$. Para la película protectora va de 3000 a 3500 \AA .
 - ❑ Para obtener valores adecuados de reflejancia, se deposita el aluminio a 1 \AA/s o más, y cuarzo, bajo una presión del gas de trabajo (mezcla de argón y oxígeno) de 2×10^{-3} a 2.5×10^{-3} Torr, a menos de 1 \AA/s .
 - ❑ La limpieza de los vidrios es vital. Permite una buena adherencia de la película de aluminio al vidrio y con ello, disminuye las posibilidades de su degradación.
-

-
- ▣ Los resultados de las pruebas de intemperismo mostraron la resistencia de los espejos a condiciones climáticas adversas. La prueba de ataque salino indicó que espesores superiores a 3000Å son apropiados.
 - ▣ En los espejos donde hubo degradación, esta se presentó en pequeñas áreas donde no existía protección suficiente por parte del SiO₂. Esto significa que el ataque depende del proceso de depósito de esta capa, y particularmente, de su espesor y uniformidad. Es importante proteger los costados de los espejos pues en esas zonas se inicia generalmente el proceso de corrosión.
 - ▣ Para esta investigación se eligió vidrio flotado comercial por su mínima rugosidad, bajo costo y disponibilidad comercial. El aluminio se depositó en 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 (a base de borosilicatos) y que tienen la propiedad de absorber el mínimo de radiación, los espejos de primera superficie soportan casi cualquier tipo; por ello se sugiere el manejo de vidrio flotado, pues, por las características ya citadas, los costos de fabricación disminuyen.
 - ▣ El uso de la erosión iónica como método de depósito permite la fabricación de espejos de grandes áreas (superiores a 1 m²) y estándares de calidad que aseguran largos periodos de vida a costos sustancialmente menores comparados con otras técnicas, si los volúmenes de producción son importantes.
 - ▣ Hasta aquí se han conjuntado y resumido todas las experiencias y resultados derivados a lo largo de 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 resulta 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. Ya existen grupos de investigación en Alemania y España que inician el desarrollo de recubrimientos de primera superficie para aplicaciones en energía solar, por otras técnicas y es de esperar que haya progresos en los próximos años.
-

-
- Así, el avance que se logre alcanzar por todas las partes (al menos en la parte óptica), contribuirá a facilitar la introducción al mercado energético de las tecnologías fototérmicas.
 - Por ello, se hace necesario continuar las investigaciones y el desarrollo de esta técnica, particularmente con vidrios curvos y a velocidades de depósito mayores para establecer un nivel de costos de producción atractivo para fabricación en mayor escala.
 - Precisamente esa es la ventaja y desventaja de la erosión iónica, pues para tener un costo competitivo requiere importantes volúmenes de producción.
 - El tamaño actual de los espejos permite su aplicación directa en concentradores cilíndrico-parabólicos colocándolos en forma de mosaico para cubrir el área óptima que requiere este tipo de tecnología fototérmica, sin embargo, es deseable escalarlos a un mayor tamaño por cuestiones económicas. Este punto no se pudo realizar por las limitaciones de infraestructura del laboratorio y constituye otro punto de mejora para el futuro.
 - Se observó que un tratamiento posterior con descarga luminosa (bombardeo de iones de argón y radicales oxígeno) disminuye la porosidad de la película y permite que átomos de silicio de la superficie con enlaces sueltos reaccionen con el oxígeno presente. También el impacto de los iones provoca reacomodos estructurales que hacen la película más uniforme. Esto produce espejos con mayor reflejancia.
 - Este fenómeno sugiere una forma para mejorar la calidad de los espejos: disminuir la porosidad de la película bombardeándola; para lo cual se sugiere enfriar al sustrato más eficientemente y así estar en condiciones de alcanzar potencias más elevadas sin riesgo de romper el vidrio por un calentamiento diferencial excesivo.
 - Elevadas potencias garantizan la incidencia de partículas (átomos, iones, conjunto de átomos, electrones, etc.) con mayor energía, este aporte de energía permite a los átomos de la superficie viajar hasta alojarse en sitios preferenciales. Así se obtiene también una mayor adhesión de la película y crecimiento en estructuras más continuas. Se puede inducir una polarización al sustrato para favorecer este bombardeo, a esta técnica se le conoce como re-erosión o *re-sputtering*.



Bibliografía

- Almanza, R., Soriano, R. 1990. *Terminación y Puesta en Marcha de una Cámara de Intemperismo*; Informe Interno Instituto de Ingeniería, Proyecto 0101, UNAM.
- Almanza, R., Mazari, M., Soriano, R. 1991. *Uso de una Cámara de Intemperismo para probar la Segunda Generación de Espejos Solares*. Informe Interno Instituto de Ingeniería, Proyecto 0118, UNAM.
- Almanza, R., Jiefeng, Ch., Correa, G., Mazari, M. 1992. 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 Superwindows*; SPIE Proc. Series; Vol. 1727: 325-330.
- Almanza, R., Muñoz, F., Mazari, M. 1992. Development of Aluminum First Surface Mirrors for Solar Energy Applications. *Solar Energy* Vol. 48, No. 5; Pergamon Press; Tarrytown, N.Y, USA.
- Almanza, R., Muñoz, F. 1994. *Ingeniería de la Energía Solar*, El Colegio Nacional, México.
- Almanza, R., Chen, J.F., Correa, G., Mazari, M., Further options of solar concentrators: aluminum first surface mirrors. *Solar Energy*. 54(5)
- Aringhoff, R. 1992. From my Point of View. *Sun World*; Vol. 16, No. 4. International Solar Energy Society (ISES); Birmingham, U.K.
- Bacuchi, A.W. 1983. *Preparation and Properties of a Multilayer Reflector Stack Consisting of Glass/Al₂O₃/Al/Ag*, Tesis de Maestría; Universidad de Denver, EUA.
- Bazán, J.L. 1989. *Intemperización de Espejos para uso en Energía Solar*, Tesis de Licenciatura. FQ, UNAM.
- Beauchamp, W.T. 1990. High throughput sputtering meets production demands, *Photonics spectra*, p 99, Agosto.
- Brawn, R. 1970. Thin Film Substrates. *Handbook of Thin Film Technology*. McGraw Hill, USA.
- Brophy, J.H., et.al. 1964. *The structure and properties of materials*, 2, Wiley, New York, p. 192.
- Campbell D.S., Mechanical Properties of Thin Films, En Maissel, L., y Glang, C. Capítulo 12.
- Chopra, K.L. 1979. *Thin Film Phenomena*. Robert H. Krieger Publish. Co. Huntington, N.Y., USA.
- Coburn, J.W., Kay, E. 1972. *J.Appl.Phys*, 43:4965.
- Collins, R.E. 1992. Evacuated glazing, *SPIE Proceedings series*, Vol.1727:358.

- Considine, D. 1989. *Tecnología de las energías: solar, hidráulica, geotérmica y combustibles químicos*, Vol. 5., Publicaciones Marcombo, México.
- Correa, W., Fuentes, R., Fuentes, G. 1982. *Proyecto de un Laboratorio de Implantación de lones*; Tesis de Licenciatura; FC, UNAM.
- Correa, G. 1993. Fabricación de espejos de primera superficie para plantas solares generadoras de electricidad, Tesis, Facultad de Química, UNAM.
- Cuddihy, E.F. 1980. Theoretical Considerations of Soil Retention. *Solar Energy Materials*. Vol. 4. North-Holland Publishing Co.
- Czandema, A.W., Masterson, K., Thomas, T. 1985. *Silver/glass Mirrors for Solar Thermal Systems*; SERI/SP-271-2293 DE 85 000537.
- Davidse, P.D. y Maissel, L.I. 1966. Dielectric thin films through rf sputtering, *J. Appl. Phys.*, 37(2):574.
- Dennis, W.E., McGee, J.B. 1980. Silicone Resins for Protection of First Surface Reflectors; *Solar Energy Materials*. Vol. 3, No.2.
- Dobrowolski, J.A., Pekelsky, J.R., et.al. 1992. Practical magnetron sputtering system for the deposition of optical multilayer coatings, *Applied optics*, 31(19):3784.
- Drummetter, L.F. and Hass, G. 1964:305-361. Solar Absorptance and Thermal Emittance of Evaporated Coatings. *Physics of Thin Films*, Academic Press, USA.
- Duffie, J.A., y Beckman, W.A., 1991, *Solar engineering of thermal processes*, 2a. ed., Wiley, Nueva York, E.U.A.
- ECO Northwest Ltd.; Shapiro and Associates Inc.; Seton, Johnson y Odell Inc.; Estimating environmental costs and benefits for five generating resources. Preparado para Bonneville Power Administration bajo un contrato múltiple con el Departamento de Energía de Estados Unidos, Marzo, 1986.
- Este, G. y Westwood, W.D. 1988. Quasi-direct-current sputtering technique for the deposition of dielectrics at enhanced rates, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 6(3):1845.
- Gambino, R.J. y Cuomo, J.J. 1978. *J. Vac. Sci. Technol.*, 15:296.
- Glang, R. Reactive Evaporations. En Maissel, L. y Glang, R. Capítulo 1.
- González, G.R., Olvera, R. 1989. *Evaluación de Superficies Reflectivas*; Proyecto Terminal de Ingeniería Física; UAM Azcapotzalco.
- Griffin, R.N. 1980. Thin Film Solar Reflectors, *Solar Energy Materials*, Vol. 3, No. 1, 2:227.
- Hartsough, L.D. y McLeod, P.S. 1977. High-rate sputtering of enhanced aluminum mirrors, *J. Vac. Sci. Technol.*, 14(1):123.
- Hass, G., Heaney, J.B., Hunter, W.R. 1982. 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, E.U.A.
- Hoffman, D.W., A sputtering wind. 1985. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 3(3):561.
- Imdad H. K. The Growth and Structure of Single-crystal Film, En Maissel, L. y Glang, R., Capítulo 10.
- Jiefeng, Ch., Almanza, R., Mazari, M., et.al. 1992. *Avances de la Segunda Generación de Espejos de Al-SiO₂ de Primera Superficie*. Informe Interno Instituto de Ingeniería, Proyecto 1117, UNAM.
- Jiefeng, Ch., Almanza, R., Mazari, M., et.al. 1992. *Pruebas de Espejos en Atmosferas Corrosivas y bajo Condiciones Abrasivas*. Informe Interno Instituto de Ingeniería, Proyecto 2118, UNAM.
- Jones, R.E. 1968. et.al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 5:84.
- Jones, R.E., Winters, H.F. y Maissel, L.I., 1968. Effect of oxygen on the rf-sputtering rate of SiO₂, *J. Vac. Sci. Technol.*, 5(3):84.

- Jorgensen, G. y Govindarajan, R. 1991. Ultraviolet reflector materials for solar detoxification of hazardous waste, *SPIE Proceeding series: Optical materials technology for energy efficiency and solar energy conversion X*, 1536:194.
- Keamey, D. Washom, B., Dracker, R. 1995. ISCCS Parabolic trough facilities for Mexico -a pro-feasibility study. *Proceedings of the 1995 Annual Conference American Solar Energy Society, Technical Papers*.
- Kiyotaka Wasa, Shigeru Hayakawa (eds.). 1992. *Handbook of sputter deposition technology: principles, technology and applications*. Noyes Publications.
- Lotker, M. 1991. *Barriers to comercialization of large-scale solar electricity: lessons learned from the LUZ experience*, Sandia National Laboratories, NTIS; E.U.A., Noviembre.
- Lundberg, G., 1990. 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.
- Lüth, H. 1993. *Surfaces and interfaces of solids*. Segunda Ed., pp95, Springer-Verlag, Berlín.
- Maissel L. I., Glang, R. (eds), 1970. *Handbook of Thin Film Technology*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Maniv, S., Miner, C. y Westwood, W.D. 1981. High rate deposition of transparent conducting films by modified reactive planar magnetron sputtering of Cd₂Sn alloy, *J. Vac. Sci. Technol.*, **18**(2):195.
- Maniv, S. y Westwood, W.D. 1980. Surface oxidation kinetics of sputtering targets, *Surface science*, **100**:108.
- Mar, H.Y.B., Peterson, R.E., Zimmer, P.B. 1976. Low cost coatings for flat-plate solar collectors. *Thin Solid Films*. **39** (95).
- Masterson, K., Czandema, A.W., Blea, J., et al. 1983. *Matrix Approach to Testing Mirrors*; Parte 2, SERI/TR-255-1627 DE 83 011996.
- Mattox, D.M. 1978. Thin film adhesion and adhesive failure-A perspective. *Adhesion measurements of thin films, thick films and bulk coatings*, Mittal, K.L. (editor), ASTM STP640, American Society for Testing Materials, pp54, 1978.
- Milburn, D.I. y Hollands, K.G. 1995. The directional response error in integrating-sphere transmittance measurements at solar wavelengths, *Solar energy*, **55**(2):85.
- Müller, K.H. 1987. *Phys. Rev. B*, **35**(15):7906.
- Pliskin, W.A., Lehman, H.S. 1965. Structural evaluation of silicon oxide films, *J. Electrochem. Soc.*, **112**(10):1013.
- Pliskin, W.A. 1968. Phase-shift corrections in determining the thicknesses of transparent films on reflective substrates, *Solid state electronics*, **11**(957).
- Pliskin, W.A., Davide, P.D., et al. 1967. Properties of insulating thin films deposited by rf sputtering, *IBM Journal*, p461, Julio.
- Pulker, H.K. 1984. *Coatings on Glass; Thin Films Science and Technology*, Vol. 6; Elsevier, Amsterdam.
- Pulker, H.K. 1988. Modern optical coating technologies, *SPIE Proceedings series: Thin film technologies III*, Vol. 1019:138.
- Ramírez, M. 1990. *Construcción de Espejos de Plata de Primera Superficie para Aplicaciones en la Energía Solar*, Tesis de Maestría; DEPII, UNAM.
- Richmond, J.C. 1984. *Measurement Techniques for Evaluating Solar Reflector Materials*; (US) National Bureau of Standards, PB 85-119469 NBS-GCR-84-475.
- Ritter, E. 1962; Zur Kenntnis der SiO- und Si₂O₃-phase in dünnen schichten; *Optica Acta*; Vol. 9:197.
- Ritter, E. 1966; Deposition of oxide films by reactive evaporation; *J. Vacuum Sci. Technol.*; Vol. 3: 225.
- Roos, A. 1993. Use of an Integrating sphere in solar energy research, *Solar energy materials and solar cells*, **30**:77.
- Rossnagel, S.M., Cuomo, J.J., Westwood, W.D. (eds.). 1990. *Handbook of plasma processing technology*;

Uno de los aspectos centrales para conseguir la transición propuesta son la política de precios y tarifas de los energéticos; se deben incluir costos de externalidades y otros instrumentos de política económica que orienten el uso y sustitución de energéticos hacia los objetivos de largo plazo.

La Comisión Federal de Electricidad operaría un sistema nacional interconectado mucho más complejo. Por un lado, el Centro Nacional de Control de Energía (Cenace) asignaría niveles de generación con criterios de despacho económico a las grandes centrales, pero la generación distribuida quedaría a nivel subtransmisión y distribución y la administración de la demanda se enfocaría a maximizar la aportación energética local y suavizar la curva de demanda diaria. También son esenciales tarifas regionales y horarias que reflejen el carácter excedentario o deficitario en la generación eléctrica en cada estado, así como los correspondientes a las tecnologías de conversión, sin que falten sus costos externos asociados por impacto ambiental.

Así se estarán estableciendo instrumentos de política energética que incentiven o penalicen determinadas prácticas y sirvan para orientar el desarrollo del sector.

A un nivel más a detalle, lo más importante a analizar para que este tipo de esquema se lleve a cabo es el análisis de las diferentes alternativas para determinar la rentabilidad y prioridad de los posibles proyectos.

Para los productores independientes o los autoabastecedores, la definición del criterio relativo al precio de la energía es hoy en día un gran obstáculo. Esto resulta primordial para la venta de excedentes en un caso y en total de la producción para el otro. Actualmente la CFE no está comprando potencia sino energía y su valor depende de la disponibilidad de las plantas, lo que complica el esquema de la venta de excedentes que se pudieran tener no solo a corto plazo sino también a largo plazo, puesto que los inversores deben tener una certeza de la rentabilidad de los proyectos. Esto es particularmente importante hoy en día con la cogeneración.

Resulta importante seguir con el desarrollo y mejoras de las tecnologías renovables con el objetivo de hacer más factible su utilización siguiendo los criterios económicos del mercado, que finalmente son los que determinan cuál energético se aprovecha a gran escala y cual no. Es por ello que se incluye este capítulo en el trabajo de tesis; de esta manera, se aprecia más claramente donde están las desventajas y si se pueden superar o si únicamente son barreras de mercado las que no permiten la introducción, en este caso de la tecnología termosolar con canal parabólico.

No es objetivo presentar un estudio de factibilidad exacto sino proporcionar una idea somera de cómo se analizaría el proyecto desde el punto de vista de un inversionista y cuáles serían las variables que influirían en las decisiones de aceptar el proyecto o no.

El siguiente análisis económico propone comparar una planta termosolar híbrida de 80MW contra una de ciclo combinado-termsolar de 316MW, suponiendo en ambas que la tecnología para el sistema de óptica (espejos) es la desarrollada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM; el resto de los costos se tomaron de plantas similares a la propuesta, pues en México no existe un antecedente.

Los costos de operación y mantenimiento, así como de el resto de las instalaciones provienen de las diversas publicaciones que existen respecto a las plantas SEGS (Solar Electric Generating Systems) en Kramer Junction, en el desierto de Mojave al sur de California así como de los

"Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión en el sector eléctrico" (COPAR), publicación de la Gerencia de evaluación y programación de inversiones de la Comisión Federal de Electricidad.

La tecnología de canales parabólicos que utilizan las plantas SEGS fue desarrollada originalmente por LUZ International en la década de los 80. Actualmente las plantas son operadas y mantenidas por la Kramer Junction Co. En conjunto, estas plantas suministran 354MW a la red eléctrica de Southern California Edison.

En los diferentes análisis económicos y estudios de factibilidad de las plantas fototérmicas de tipo canal parabólico que existen, aparecen varias cifras que resultan poco claras o cuyo origen no es posible deducir a priori. Por tal motivo se detallan los procedimientos de cálculo de los diferentes costos, capacidad de planta, factor de planta, consumo de combustible y criterios financieros para obtener los flujos de efectivo del proyecto.

Actualmente existe un estudio de prefactibilidad desarrollado por Spencer Management Associates [1994] para la instalación de una planta de ciclo combinado-termosolar en México utilizando la tecnología de canal parabólico; en base a ese estudio ha surgido otro más [Kearney, et.al.], que en realidad es la fase IB del ya citado y donde se presentan varias configuraciones y capacidades para el ciclo combinado. En él con ayuda de programas de computadora como el SOLERGY y el EPRI GateCycle se realizaron simulaciones de los flujos de materia y energía para cada arreglo para posteriormente obtener los costos nivelados de generación.

La integración del ciclo combinado con la generación por vía termosolar permite disminuir los costos nivelados de generación y por tanto hace más viable la utilización de la energía solar para la producción en firme de electricidad y a potencias altas. Además, se aprovecha más eficientemente la energía del combustible incrementando la eficiencia de los ciclos termodinámicos y es posible aumentar el factor de planta para hacerlo incluso similar al de una termoeléctrica convencional.

La tendencia futura de generación en México se basa precisamente en la instalación de plantas de ciclo combinado a gas. Es por ello que se decidió comparar la opción solar y la solar-ciclo combinado. Debido a la existencia de economías de escala se escogió la planta solar de mayor capacidad, en este caso 80MW nominales, de hecho es posible instalar una mayor capacidad aumentando el área de captación solar, pero esto representa abarcar áreas de terreno superiores al millón de metros cuadrados. De hecho, la selección de esta capacidad no es arbitraria surge por los límites establecidos para pequeños productores por la ley PURPA (Public Utility Regulatory Policies Act) en Estados Unidos en la década pasada cuando LUZ internacional empezó a desarrollar esta tecnología. Como resultado se han quedado los 80MW como la capacidad de una unidad de generación por canal parabólico, pues a ésta es la información de experiencia y costos disponible.

Por lo que al ciclo combinado respecta se seleccionó la turbina ABB GT24 de 236MW que es una de las opciones presentadas en el mencionado estudio de Spencer Management Assoc. y que permite, al incorporar la parte solar, obtener una planta generadora de 316MW; capacidad cercana a las de las unidades básicas de generación de CFE.

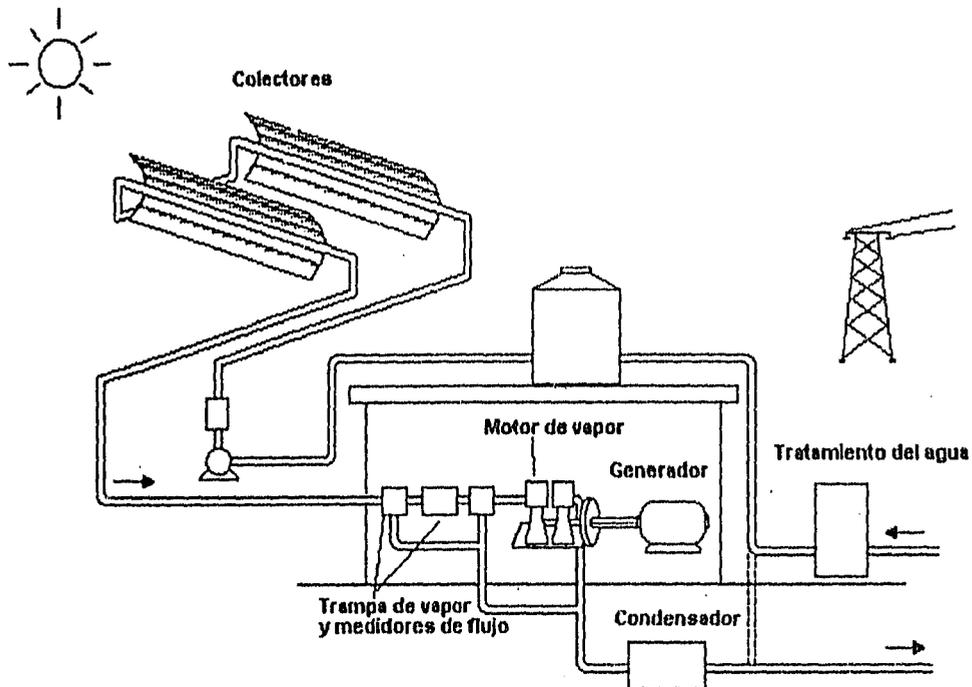


Diagrama de un arreglo típico de generación de electricidad con concentradores solares, con producción directa de vapor. En este caso se representa la configuración de la planta solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

PLANTA TERMOSOLAR DE 80MW

Tiempo total de operación	4200h/a		
Tiempo de generación solar	2445h/a	6.7h/día	(66.1%)
Tiempo de generación gas natural	1754h/a	4.8h/día	(33.9%)
Ubicación de la planta:	Sonora, México		
Radiación de diseño:	2772kWh/m ² a		
Radiación máxima:	3122 kWh/m ² a		
Eficiencia del concentrador	15%		
Area total de concentradores	470,265m ²		
Area de terreno requerida	1,316,741m ²		

Producción eléctrica solar:
$$2772 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \cdot 470,260\text{m}^2 \cdot 0.15 = 195,600\text{MWh}$$

Evaluación económica de dos proyectos de generación vi

Producción eléctrica con gas natural: 80MW · 1754h/a = 140,320MWh

Producción eléctrica total: 335,920MWh/a

Consumo de combustible: $(140,320,000 \text{ kWh}_e \cdot 2308.1 \text{ kcal/kWh}_e) \div 8457.9 \text{ kcal/m}^3 = 38,292,317 \text{ m}^3$

Tomando del COPAR la eficiencia de conversión para ciclo combinado a gas y el poder calorífico del gas natural

COSTO DE INVERSIÓN

	USD	Pesos (\$7.9/USD)
Concentradores	\$89,820,615 \$191.0/m ²	\$709,582,859
Sistema de generación ¹	\$56,431,800 \$120.0/m ²	445,811,220
Servicios ¹	\$11,051,228 \$23.5/m ²	\$87,304,697
Transporte ¹	\$26,522,946 \$56.4/m ²	\$209,531,273
Preparación del sitio ²	\$5,972,366 \$12.7/m ²	\$47,181,687
Contingencias ²	\$21,303,005 \$45.3/m ²	\$168,293,735
TOTAL	\$211,054,932 \$448.8/m²	\$1,667,333,963

1. Basado en Herlein, Klais y Nitsch, "Cost Analysis of Solar Power Plants", American Solar Energy Society, 1990.

2. Basado en Trieb, Franz, "Solar Electricity Generation", Institut für Technische Thermodynamik, 1995 y Kearney y Nava, "Assesment of performance and economics of parabolic through solar electric systems for Spain", American Solar Energy Society, 1994.

Costo de Concentradores^{3,4}

	USD	Pesos (\$7.9/USD)
Espejos	\$16,459,275 \$35/m ²	\$130,028,273 \$277/m ²
Estructura metálica	\$38,091,465 \$81/m ²	\$300,922,574 \$640/m ²
Receptores de calor	\$16,459,275 \$35/m ²	\$130,028,273 \$277/m ²
Instalación	\$15,518,745 \$33/m ²	\$122,598,085 \$261/m ²
Sistemas de control	\$3,291,855 \$7/m ²	\$26,005,655 \$55.3/m ²
TOTAL	\$89,820,615 \$191/m²	\$709,582,859 \$1509/m²

3. El fluido de trabajo es vapor, se genera directamente en el concentrador. Así al eliminar el manejo del aceite térmico, es posible trabajar a temperaturas superiores (500°C, 100bar) a la temperatura de degradación del aceite (370°C, 40-60bar).

4. Tomado de Spencer Management Assoc. 1994.

Servicios incluye: servicios de construcción, servicios de ingeniería, costos administrativos, supervisión y pruebas de arranque.

Preparación del sitio incluye: trabajos de limpieza y nivelación del terreno, compra del terreno, obra negra.

Transporte representa los costos de llevar el material, equipo y traslado del personal al sitio de construcción.

COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Costo del personal: Salario, prestaciones, seguro social \Rightarrow 5,841 pesos mensuales por persona. 53 personas \Rightarrow (1USD/m²)

Gastos de administración, operación, servicio técnico, mantenimiento, reserva para imprevistos:
 $0.75\text{¢USD/kWh} = \text{\$USD } 2,519,400/\text{año} = 5.35\text{USD/m}^2$ ¹
 $\text{\$pesos } 0.051/\text{kWh}_e = \text{\$USD } 2,499,322/\text{año} = 5.31\text{USD/m}^2$

Costo total de O&M: $\text{\$USD } 2,967,372 = \text{\$23,442,240}$

1. Tomado de Herllein, Klais y Nitsch, "Cost Analysis of Solar Power Plants", American Solar Energy Society, 1990.

2. Tomado del COPAR, CFE. El dato se obtuvo calculando el costo/MW (\\$USD31,241), a partir de una planta de ciclo combinado de 250MW, y luego multiplicar éste por 80 que es la capacidad de la planta solar.

PLANTA CICLO COMBINADO-TERMOSOLAR DE 316MW

Tiempo total de operación	4818h/a		
	(considerando factor de planta de 0.55, dado por el COPAR para planta de ciclo combinado de 250MW)		
Tiempo de generación solar	2445h/a	6.7h/día	(14.7%)
Tiempo de generación gas natural	4818h/a	13.2h/día	(85.3%)
	(el ciclo combinado trabaja siempre y solo durante 6.7 horas del día la planta está a toda su capacidad)		
Ubicación de la planta:	Sonora, México		
Radiación de diseño:	2772kWh/m ² a		
Radiación máxima:	3122 kWh/m ² a		
Eficiencia del concentrador	15%		
Area total de concentradores	470,265m ²		
Area de terreno requerida	1,316,741m ²		

Evaluación económica de dos proyectos de generación viii

Producción eléctrica solar: $2772 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \cdot 470,260\text{m}^2 \cdot 0.15 = 195,600\text{MWh}$

Producción eléctrica con gas natural: $236\text{MW} \cdot 13.2\text{h} \cdot 365 = 1,137,048\text{MWh}$

Producción eléctrica total: $1,332,648\text{MWh/a}$

Consumo de combustible:

$$(1,137,048,000\text{kWh}_e \cdot 2308.1\text{kcal/kWh}_e) \div 8457.9\text{kcal/m}^3 = 310,292,211\text{m}^3$$

Tomando del COPAR la eficiencia de conversión para ciclo combinado a gas y el poder calorífico del gas natural

Como en el ciclo combinado se aprovecha el calor de los gases de combustión a la salida de la turbina de gas para recalentar el vapor proveniente de la parte solar, la eficiencia de conversión térmica-eléctrica se incrementa 5%), entonces¹:

$$(1,137,048,000\text{kWh}_e \cdot 2198\text{kcal/kWh}_e) \div 8457.9\text{kcal/m}^3 = 295,490,784\text{m}^3$$

1. Tomado de Kearney, Byron, y Raymond, "ISCCS parabolic trough facilities for Mexico - a pre-feasibility study", American Solar Energy Society, 1995.

COSTO DE INVERSIÓN

Considerando un costo total de \$USD705.4/kW_e² para una planta de ciclo combinado convencional
 $(236,000\text{kW})(705.4) = \$\text{USD } 161,896,000$

A este costo se incluye el costo de inversión de la planta solar

$$161,896,000 + 211,054,032 = \$\text{USD } 372,950,932$$
$$\$2,946,312,363$$

2. Tomado de Kearney, Byron, y Raymond, "ISCCS parabolic trough facilities for Mexico - a pre-feasibility study", American Solar Energy Society, 1995.

COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Costo del personal: Salario, prestaciones, seguro social \Rightarrow 5,841 pesos mensuales por persona. 53 personas \Rightarrow (1USD/m²)
Suponiendo que están dedicados al cuidado de los concentradores.

Gastos de administración, operación, servicio técnico, mantenimiento, reserva para imprevistos:
 $\$ \text{pesos } 0.051/\text{kWh}_e = \$\text{USD } 9,872,322/\text{año} = 21\text{USD}/\text{m}^2$ ¹

Costo total O&M $\$ \text{USD } 10,345,830 = \$81,732,057$

1. Tomado del COPAR, CFE. El dato se obtuvo calculando el costo/MW (\$USD31,241), a partir de una planta de ciclo combinado de 250MW, y luego multiplicar éste por 316 que es la capacidad de la planta solar.

COSTOS NIVELADOS PARA LAS 2 OPCIONES

	SOLAR 80 MW	CICLO COMBINADO-SOLAR 316MW
Costo de Inversión	0.57 \$/KWh	0.25 \$/KWh
Costo Combustible	0.08 \$/KWh	0.163 \$/KWh
Costo de Operación y Mantenimiento	0.07 \$/KWh	0.061 \$/KWh
Costo Generación	0.7198 \$/KWh	0.478 \$/KWh

Financiamiento

Se sugiere el siguiente esquema de financiamiento:

- ☐ Comisión Federal de Electricidad 20%
- ☐ Del Fondo Global Ambiental (GEF) Administrado por World Bank Group 23% (\$USD50x10⁶)
- ☐ Banco Mundial 23%
- ☐ Países fabricantes del equipo como financiamiento a la exportación 32%
- ☐ Alguna empresa privada nacional 2%

Condiciones de los Préstamos:

El Banco Mundial cobrando 11% de interés
10 años para amortizar
y un año de gracia

Países Fabricantes en dos partes:

- 1.- 50% del préstamo al 8%, 30 años para pagar y 7 años de gracia.
- 2.- 50% del préstamo al 11%, 15 años para pagar y un año de gracia.

Consideraciones para el cálculo del Flujo de Efectivo.

- ❑ Todo el análisis supone pesos constantes (no se considera inflación).
 - ❑ Se supone un crecimiento anual de 14% a la tarifa eléctrica hasta el año 2006, los siguientes 6 años de 8%, del 2013 al 2016 de 5% y el resto indexado al crecimiento en el costo del gas natural.
 - ❑ Se tomó un crecimiento de 2% anual en el precio del gas natural, según las tendencias esperadas a nivel internacional. Como los contratos en el mercado de gas natural son a largo plazo, los precios son estables.
 - ❑ El costo de energía eléctrica corresponde al costo normal de generación. Se estimó en base a la política de precios de CFE y pronosticando que en el corto plazo disminuirá el subsidio al precio, acercándose al precio real.
 - ❑ Se consideró un seguro para las instalaciones de 1.1% sobre el costo de inversión.
 - ❑ Se consideran 34% por pago de impuestos
 - ❑ Se consideran 10 años para depreciación
 - ❑ Puesto que hay un donativo de 50 millones de dólares del Global Environmental Fund, el préstamo será por el 78% de la Inversión en el caso solar de 80MW y del 87% para el caso ciclocombinado-solar.
 - ❑ Por simplicidad, no se tomó el esquema de financiamiento propuesto, se hizo el cálculo con una tasa de interés real del 10% y 10 años para amortizar el préstamo, con 7 años de gracia. El esquema propuesto es lo más cercano a la realidad, sin embargo, el promedio de las tasas de interés se aproxima a diez.
 - ❑ Se considera TREMA=Tasa de descuento (10%)
 - ❑ El período de recuperación de la inversión se obtuvo dividiendo el valor presente entre la anualidad equivalente.
-

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA UNA PLANTA TERMOSOLAR DE 80 MW

AÑO	τ	PRECIO ENERGIA ELECTR. \$/kWh	CARGO DEMAN. ELECTR. \$/kW	PRECIO GAS NATURAL \$/m3	INGRESOS VENTA ELECTRICIDAD \$	INGRESOS DEMANDA POTENCIA \$	COSTO GAS NATURAL \$	COSTO OPERACION Y MANTENIM. \$	COSTO DEL SEGURO \$	INVERSION INICIAL \$	FLUJO DE EFECTIVO ANTES IMP. \$	DEPRECIACION \$
1996	-1	0.6621	33.48	0.5312						(1,666,900,550)		
1997	0	0.7554	38.30	0.5392						1.00	(1,833,590,605)	
1998	1	0.8620	43.82	0.5473	188,085,366	3,505,633	(16,636,568)	(18,762,500)	(18,335,906)		137,856,024	(183,359,061)
1999	2	0.9835	50.13	0.5555	214,605,402	4,010,444	(16,886,116)	(18,762,500)	(17,419,111)		165,548,119	(183,359,061)
2000	3	1.1222	57.35	0.5638	244,864,764	4,587,948	(17,139,408)	(18,762,500)	(16,548,155)		197,002,648	(183,359,061)
2001	4	1.2804	65.61	0.5723	279,390,695	5,248,612	(17,396,499)	(18,762,500)	(15,720,747)		232,759,561	(183,359,061)
2002	5	1.4609	75.06	0.5808	318,784,784	6,004,412	(17,657,447)	(18,762,500)	(14,934,710)		273,434,539	(183,359,061)
2003	6	1.6669	85.86	0.5895	363,733,438	6,869,048	(17,922,308)	(18,762,500)	(14,187,975)		319,729,703	(183,359,061)
2004	7	1.9020	98.23	0.5984	415,019,853	7,858,190	(18,191,143)	(18,762,500)	(13,478,576)		372,445,824	(183,359,061)
2005	8	2.1701	112.37	0.6074	473,537,652	8,989,770	(18,464,010)	(18,762,500)	(12,804,647)		432,496,265	(183,359,061)
2006	9	2.4761	128.55	0.6165	540,306,461	10,284,297	(18,740,970)	(18,762,500)	(12,164,415)		500,922,873	(183,359,061)
2007	10	2.6767	138.07	0.6257	584,071,284	11,045,335	(19,022,085)	(18,762,500)	(11,556,194)		545,775,840	(183,359,061)
2008	11	2.8935	148.28	0.6351	631,381,058	11,862,689	(19,307,416)	(18,762,500)			605,173,832	
2009	12	3.1279	159.26	0.6446	682,522,924	12,740,528	(19,597,027)	(18,762,500)			656,903,925	
2010	13	3.3812	171.04	0.6543	737,807,281	13,683,327	(19,890,983)	(18,762,500)			712,837,126	
2011	14	3.6551	183.76	0.6641	797,569,671	14,695,894	(20,189,348)	(18,762,500)			773,313,717	
2012	15	3.9512	197.29	0.6741	852,172,814	15,783,390	(20,492,188)	(18,762,500)			838,701,516	
2013	16	4.1922	211.89	0.6842	914,765,356	16,951,361	(20,799,571)	(18,762,500)			892,154,646	
2014	17	4.4479	227.57	0.6945	970,566,042	18,205,761	(21,111,564)	(18,762,500)			948,897,740	
2015	18	4.7193	244.41	0.7049	1,029,770,571	19,552,988	(21,428,238)	(18,762,500)			1,009,132,821	
2016	19	5.0071	262.50	0.7154	1,092,585,576	20,999,909	(21,749,661)	(18,762,500)			1,073,074,323	
2017	20	5.3126	281.92	0.7262	1,159,234,357	22,553,902	(22,075,906)	(18,762,500)			1,140,949,853	
2018	21	5.3923	281.92	0.7371	1,176,622,872	22,553,600	(22,407,045)	(18,762,500)			1,158,006,928	
2019	22	5.4731	281.92	0.7481	1,194,272,215	22,553,600	(22,743,150)	(18,762,500)			1,175,320,165	
2020	23	5.5552	281.92	0.7594	1,212,186,299	22,553,600	(23,084,298)	(18,762,500)			1,192,893,101	
2021	24	5.6386	281.92	0.7707	1,230,369,093	22,553,600	(23,430,562)	(18,762,500)			1,210,729,631	
2022	25	5.7231	281.92	0.7823	1,248,824,629	22,553,600	(23,782,020)	(18,762,500)			1,228,833,709	
2020	26	5.8090	281.92	0.7940	1,267,556,999	22,553,600	(24,138,751)	(18,762,500)			1,247,209,348	
2021	27	5.8961	281.92	0.8059	1,286,570,354	22,553,600	(24,500,832)	(18,762,500)			1,265,860,622	
2022	28	5.9846	281.92	0.8180	1,305,868,909	22,553,600	(24,868,345)	(18,762,500)			1,284,791,665	
2023	29	6.0743	281.92	0.8303	1,325,456,943	22,553,600	(25,241,370)	(18,762,500)			1,304,006,673	
2024	30	6.1655	281.92	0.8428	1,345,338,797	22,553,600	(25,619,990)	(18,762,500)			1,323,509,907	

Tasa	14.1%	14.4%	1.5%					10.0%
Concepto	Crec. anual	Crec. anual	Crec. anual					Interés Real
Cantidad				218,206,000	80,000	30,400,000		1.1%
Unidad				kWh	kW	m3	\$/kWh	Prima seguro

INVERSION INICIAL
\$1,666,900,550

VPN sin incluir
inversión
Inicial

Tasa Rendimiento Mínima Atractiva		10.0%
Valor Presente Neto (VPN)	2,961,081,389	\$4,794,671,994
Anualidad Equivalente	314,109,288	
Relación Beneficio/Costo	2.61	
Tasa Interna de Recuperación	19.2%	
Periodo de Recuperación (años)	5.8	

GASTOS FINANCIEROS	INGRESO GRAVABLE	I.S.R. + P.T.U.	FLUJO DE EFECTIVO DESP. IMP.
\$	\$	\$	\$
(133,352,044)	(178,855,080)	0	(1,833,590,605)
(132,018,524)	(149,829,465)	0	137,856,024
(129,084,779)	(115,441,191)	0	165,548,119
(124,244,099)	(74,843,599)	0	197,002,648
(117,144,437)	(27,068,958)	0	232,759,561
(107,382,400)	28,988,242	(9,856,002)	273,434,539
(94,496,512)	94,590,252	(32,160,686)	309,873,700
(77,959,623)	171,177,582	(58,200,378)	340,285,139
(57,170,390)	260,393,422	(88,533,764)	374,295,887
(31,443,714)	330,973,065	(112,530,842)	412,389,109
	605,173,832	(205,759,103)	433,244,998
	656,903,925	(223,347,335)	399,414,729
	712,837,126	(242,364,623)	433,556,591
	773,313,717	(262,926,664)	470,472,503
	838,701,516	(285,158,515)	510,387,053
	892,154,646	(303,332,580)	553,543,001
	948,897,740	(322,625,231)	588,822,066
	1,009,132,821	(343,105,159)	626,272,508
	1,073,074,323	(364,845,270)	666,027,662
	1,140,949,853	(387,922,950)	708,229,053
	1,158,006,928	(393,722,355)	753,026,903
	1,175,320,165	(399,608,856)	764,284,572
	1,192,893,101	(405,583,654)	775,711,309
	1,210,729,631	(411,648,075)	787,309,447
	1,228,833,709	(417,803,461)	799,081,556
	1,247,209,348	(424,051,178)	811,030,248
	1,265,860,622	(430,392,611)	823,158,170
	1,284,791,665	(436,829,166)	835,468,010
	1,304,005,673	(443,362,269)	847,962,499
	1,323,509,907	(449,993,368)	860,644,404
			873,516,538

34.0%
Ingreso Gravable

Tasa Rendimiento Mínima Atractiva	10.0%
Valor Presente Neto (VPN)	1,790,688,914
Anualidad Equivalente	189,954,934
Relación Beneficio/Costo	1.98
Tasa Interna de Recuperación	16.8%
Periodo de Recuperación (años)	9.65

AMORTIZACIONES CON CAPITALIZACION DE INTERESES						
% FINANCIAMIENTO = 80%						
PLAZO (años) = 10						
PERIODO	SALDO INICIAL	MONTO INTERESES	SALDO ACUMULADO	PAGO	AMORTIZACION	SALDO FINAL
1	(1,333,520,440)	(133,352,044)	(1,466,872,484)	146,687,248	13,335,204	(1,320,185,236)
2	(1,320,185,236)	(132,018,524)	(1,452,203,759)	161,355,973	29,337,450	(1,290,847,786)
3	(1,290,847,786)	(129,084,779)	(1,419,932,565)	177,491,571	48,406,792	(1,242,440,994)
4	(1,242,440,994)	(124,244,099)	(1,366,685,093)	195,240,728	70,996,628	(1,171,444,366)
5	(1,171,444,366)	(117,144,437)	(1,288,588,802)	214,764,800	97,620,364	(1,073,824,002)
6	(1,073,824,002)	(107,382,400)	(1,181,206,402)	236,241,280	128,858,880	(944,965,122)
7	(944,965,122)	(94,496,512)	(1,039,461,634)	259,865,408	165,368,896	(779,596,225)
8	(779,596,225)	(77,959,623)	(857,555,848)	285,851,949	207,892,327	(571,703,899)
9	(571,703,899)	(57,170,390)	(628,874,288)	314,437,144	257,266,754	(314,437,144)
10	(314,437,144)	(31,443,714)	(345,880,859)	345,880,859	314,437,144	0

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA UNA PLANTA HIBRIDA CICLO COMBINADO-TERMOSESOLAR DE 316 MW

AÑO	t	PRECIO ENERGIA ELECTR. S/kWh	CARGO DEMAN. ELECTR. S/kW	PRECIO GAS NATURAL S/m3	INGRESOS VENTA ELECTRICIDAD S	INGRESOS DEMANDA POTENCIA S	COSTO GAS NATURAL S	COSTO OPERACION Y MANTENIM. S	COSTO DEL SEGURO S	INVERSION INICIAL S	FLUJO DE EFECTIVO ANTES IMP. S	DEPRECIACION S
1996	-1	0.6621	33.48	0.5312						(2,945,878,950)		
1997	0	0.7554	38.30	0.5392						1.00	(3,240,466,845)	
1998	1	0.8620	43.82	0.5473	1,004,830,934	13,847,249	(185,726,163)	(76,743,489)	(32,404,668)		723,803,862	(324,046,685)
1999	2	0.9835	50.13	0.5555	1,146,512,095	15,841,253	(188,512,055)	(76,743,489)	(30,784,435)		866,313,369	(324,046,685)
2000	3	1.1222	57.35	0.5638	1,308,170,301	18,122,393	(191,339,736)	(76,743,489)	(29,245,213)		1,028,964,256	(324,046,685)
2001	4	1.2804	65.61	0.5723	1,492,622,313	20,732,018	(194,209,832)	(76,743,489)	(27,782,953)		1,214,618,057	(324,046,685)
2002	5	1.4609	75.06	0.5808	1,703,082,059	23,717,428	(197,122,979)	(76,743,489)	(26,393,805)		1,426,539,214	(324,046,685)
2003	6	1.6669	85.86	0.5895	1,943,216,630	27,132,738	(200,079,824)	(76,743,489)	(25,074,115)		1,668,451,940	(324,046,685)
2004	7	1.9020	98.23	0.5984	2,217,210,175	31,039,852	(203,081,021)	(76,743,489)	(23,820,409)		1,944,605,107	(324,046,685)
2005	8	2.1701	112.37	0.6074	2,529,836,809	35,509,591	(206,127,237)	(76,743,489)	(22,629,389)		2,259,846,285	(324,046,685)
2006	9	2.4761	128.55	0.6165	2,886,543,799	40,622,972	(209,219,145)	(76,743,489)	(21,497,919)		2,619,706,218	(324,046,685)
2007	10	2.6767	138.07	0.6257	3,120,353,847	43,629,072	(212,357,433)	(76,743,489)	(20,423,023)		2,854,458,974	(324,046,685)
2008	11	2.8935	148.28	0.6351	3,373,102,509	46,857,623	(215,542,794)	(76,743,489)			3,127,673,849	
2009	12	3.1279	159.26	0.6446	3,646,323,812	50,325,087	(218,775,936)	(76,743,489)			3,401,129,474	
2010	13	3.3812	171.04	0.6543	3,941,676,041	54,049,143	(222,057,575)	(76,743,489)			3,696,924,120	
2011	14	3.6551	183.70	0.6641	4,260,951,800	58,048,780	(225,388,439)	(76,743,489)			4,016,868,652	
2012	15	3.9512	197.29	0.6741	4,606,088,896	62,344,390	(228,769,265)	(76,743,489)			4,362,920,531	
2013	16	4.1922	211.89	0.6842	4,887,060,318	66,957,875	(232,200,804)	(76,743,489)			4,645,073,900	
2014	17	4.4479	227.57	0.6945	5,185,170,998	71,912,757	(235,683,816)	(76,743,489)			4,944,656,450	
2015	18	4.7193	244.41	0.7049	5,501,466,429	77,234,301	(239,219,073)	(76,743,489)			5,262,738,168	
2016	19	5.0071	262.50	0.7154	5,837,055,881	82,949,640	(242,807,350)	(76,743,489)			5,600,454,672	
2017	20	5.3126	281.92	0.7262	6,193,116,289	89,087,913	(246,449,470)	(76,743,489)			5,959,011,244	
2018	21	5.3923	281.92	0.7371	6,286,013,034	89,086,720	(250,146,212)	(76,743,489)			6,048,210,053	
2019	22	5.4731	281.92	0.7481	6,380,303,229	89,086,720	(253,898,405)	(76,743,489)			6,138,748,055	
2020	23	5.5552	281.92	0.7594	6,476,007,778	89,086,720	(257,706,881)	(76,743,489)			6,230,644,128	
2021	24	5.6386	281.92	0.7707	6,573,147,894	89,086,720	(261,572,484)	(76,743,489)			6,323,918,641	
2022	25	5.7231	281.92	0.7823	6,671,745,113	89,086,720	(265,496,072)	(76,743,489)			6,418,592,272	
2020	26	5.8090	281.92	0.7940	6,771,821,290	89,086,720	(269,478,513)	(76,743,489)			6,514,686,008	
2021	27	5.8961	281.92	0.8059	6,873,398,609	89,086,720	(273,520,690)	(76,743,489)			6,612,221,149	
2022	28	5.9846	281.92	0.8180	6,976,499,588	89,086,720	(277,623,501)	(76,743,489)			6,711,219,318	
2023	29	6.0743	281.92	0.8303	7,081,147,082	89,086,720	(281,787,853)	(76,743,489)			6,811,702,459	
2024	30	6.1655	281.92	0.8428	7,187,364,288	89,086,720	(286,014,671)	(76,743,489)			6,913,692,848	

Tasa	14.1%	14.4%	1.5%					10.0%
Concepto	Crec. anual	Crec. anual	Crec. anual					Interés Real
Cantidad				1,165,748,000	316,000	339,377,413		1.1%
Unidad				kWh	kW	m3	S	Prima seguro

INVERSION INICIAL
\$2,945,878,950

VPN sin incluir
Inversión
Inicial
\$25,001,770,422

Tasa Rendimiento Mínima Atractiva	10.0%
Valor Presente Neto (VPN)	21,761,303,577
Anualidad Equivalente	2,308,422,724
Relación Beneficio/Costo	7.72
Tasa Interna de Recuperación	38.3%
Periodo de Recuperación (años)	1.4

CASTOS FINANCIEROS	INGRESO GRAVABLE	I.S.R. + P.T.U.	FLUJO DE EFECTIVO DESP. IMP.
\$	\$	\$	\$
(235,670,316)	164,086,862	(55,789,533)	(3,240,466,845)
(233,313,613)	308,953,072	(105,044,044)	668,014,329
(228,128,866)	476,788,705	(162,108,160)	866,856,096
(219,574,033)	670,997,339	(228,139,095)	986,478,962
(207,026,946)	895,465,584	(304,458,298)	1,122,080,916
(189,774,700)	1,154,630,555	(392,574,389)	1,275,877,551
(167,001,736)	1,453,556,686	(494,209,273)	1,450,395,834
(137,776,432)	1,798,023,169	(611,327,877)	1,648,518,408
(101,036,050)	2,194,623,483	(746,171,984)	1,873,534,233
(55,569,828)	2,474,842,462	(841,446,437)	2,013,012,537
	3,127,673,849	(1,063,409,108)	2,064,264,740
	3,401,129,474	(1,156,384,021)	2,244,745,453
	3,696,924,120	(1,256,954,201)	2,439,969,919
	4,016,868,652	(1,365,735,342)	2,651,133,311
	4,362,920,531	(1,483,392,981)	2,879,527,551
	4,645,073,900	(1,579,325,126)	3,065,748,774
	4,944,656,450	(1,681,183,193)	3,263,473,257
	5,262,738,168	(1,789,330,977)	3,473,407,191
	5,600,454,672	(1,904,154,588)	3,696,300,083
	5,959,011,244	(2,026,063,823)	3,932,947,421
	6,048,210,053	(2,056,391,418)	3,991,818,635
	6,138,748,055	(2,087,174,339)	4,051,573,716
	6,230,644,128	(2,118,419,003)	4,112,225,124
	6,323,918,641	(2,150,132,338)	4,173,786,303
	6,418,592,272	(2,182,321,373)	4,236,270,900
	6,514,686,008	(2,214,993,243)	4,299,692,765
	6,612,221,149	(2,248,155,191)	4,364,065,959
	6,711,219,318	(2,281,814,568)	4,429,404,750
	6,811,702,459	(2,315,978,836)	4,495,723,623
	6,913,692,848	(2,350,655,568)	4,563,037,280

34.0%
Ingreso Gravable

Tasa Rendimiento Mínima Atractiva	10.0%
Valor Presente Neto (VPN)	14,338,324,214
Anualidad Equivalente	1,520,998,654
Relación Beneficio/Costo	5.42
Tasa Interna de Recuperación	32.7%
Período de Recuperación (años)	2.13

AMORTIZACIONES CON CAPITALIZACION DE INTERESES						
% FINANCIAMIENTO = 80%			PLAZO (años) = 10			
PERIODO	SALDO INICIAL	MONTO INTERESES	SALDO ACUMULADO	PAGO	AMORTIZACION	SALDO FINAL
1	(2,356,703,160)	(235,670,316)	(2,592,373,476)	259,237,348	23,567,032	(2,333,136,128)
2	(2,333,136,128)	(233,313,613)	(2,566,449,741)	285,161,082	51,847,470	(2,281,288,659)
3	(2,281,288,659)	(228,128,866)	(2,509,417,525)	313,677,191	85,548,325	(2,195,740,334)
4	(2,195,740,334)	(219,574,033)	(2,415,314,368)	345,044,910	125,470,876	(2,070,269,458)
5	(2,070,269,458)	(207,026,946)	(2,277,296,404)	379,549,401	172,522,455	(1,897,747,003)
6	(1,897,747,003)	(189,774,700)	(2,087,521,703)	417,504,341	227,729,640	(1,670,017,363)
7	(1,670,017,363)	(167,001,736)	(1,837,019,099)	459,254,775	292,253,038	(1,377,764,324)
8	(1,377,764,324)	(137,776,432)	(1,515,540,757)	505,180,252	367,403,820	(1,010,360,504)
9	(1,010,360,504)	(101,036,050)	(1,111,396,555)	555,698,277	454,662,227	(555,698,277)
10	(555,698,277)	(55,569,828)	(611,268,105)	611,268,105	555,698,277	0

Comentarios

Aún cuando la tecnología de canal parabólico tiene aproximadamente 20 años de existencia, las plantas solares siguen siendo con respecto a la inversión, de mayor costo que las termoeléctricas convencionales. Sin embargo, no sólo ahí se encuentra la diferencia (hablando de plantas de capacidad similar), lo mismo ocurre con los costos de operación y mantenimiento, aunque en mucho menor medida. Un beneficio de las plantas solares es su corto tiempo de construcción, lo cual compensaría algo las elevadas inversiones.

El presente estudio económico se basa en una evaluación similar a la que realizó la empresa Luz International para CFE en 1991. En ella se sugiere la instalación de un proyecto de 925MW con un costo de 1,500 millones de dólares, considerando 2 unidades de 350 MW y una de 225MW.

La comparación entre las dos opciones (solar y solar-ciclo combinado) demuestra que siempre es más rentable producir electricidad con unidades de gran capacidad y factores de planta elevados. De esta forma se compensan los altos costos de inversión con el volumen generado y con costos de operación relativamente bajos por unidad de producción (economías de escala).

Los flujos de efectivo antes de impuestos son similares, pero el pago por impuestos es mucho menor en la solar sola, a causa de los costos que se deprecian y los intereses que se pagan por el préstamo de la inversión. El costo nivelado de generación (costo por unidad producida en valor presente) resulta superior en la solar respecto a la opción híbrida en 33%.

Si se considerara en el cálculo incentivos fiscales debidos al ahorro en consumo de combustibles o en general por usar energía solar, podría disminuir esta diferencia. Esto implicaría que el gobierno fomentará la entrada al mercado nacional de esta tecnología, absorbiendo algunos costos por ello. Sin embargo, la política de libre mercado restringe el uso de "subsidios", además de que el gobierno sigue una política restrictiva de gasto por lo que ésta sugerencia presenta complicaciones particulares.

Dado que el análisis de los costos de generación considerando externalidades (es decir costos ambientales), favorece mucho a una planta que utilice tecnología solar, resulta significativa la diferencia entre las opciones solares comparadas, que excluyendo el aspecto ecológico, sea cercano al 30%.

Como dije antes, si se absorbe la diferencia favoreciendo con ello a las tecnologías solares, se estará fomentando una conciencia ecológica y dando un paso definitivo hacia un desarrollo sustentable. La inversión para controlar las emisiones en las termoeléctricas se volverá obligatoria en el corto plazo ¿por qué no pensar a futuro?

La fabricación de los diferentes componentes de una planta solar no es a nivel comercial, principalmente en lo que concierne a la parte óptica y mecánica de los concentradores; esto provoca que el costo de inversión sea excesivo en las plantas solares de elevada capacidad de producción eléctrica. Si se desarrollan varios proyectos de este tipo, los volúmenes de producción aumentarían, con lo que el costo de producción por unidad bajaría.

Es imposible para cualquier planta solar producir electricidad todo el año sin el respaldo de algún sistema de combustión. Al incorporar este último se asegura la generación en firme, dada la naturaleza intermitente de recurso solar y su dependencia de las variables climatológicas. La tecnología de turbinas de gas ha evolucionado permitiendo alcanzar elevadas eficiencias. Su uso en sistemas de ciclo combinado posibilita aprovechar al máximo la energía contenida en el combustible y producir electricidad con bajos costos nivelados.

Los nuevos proyectos de generación por parte de la iniciativa privada se basan casi exclusivamente en turbinas de gas. CFE no está al margen en esta tendencia y una parte de sus nuevos proyectos son de este tipo. En gran parte, la variable ambiental ha sido la responsable, porque se ha obligado a los generadores de electricidad a utilizar combustibles más "limpios".

El gas natural cumple con este requisito y en el norte de nuestro país existe una provisión abundante del energético, así como una red de distribución en pleno desarrollo, subutilizada en algunas partes, sobre todo en la región noroeste. Existe aquí una gran ventaja al integrar la tecnología solar con la de ciclo combinado para la producción de electricidad, pues la mayor disponibilidad del recurso solar se encuentra también en la región geográfica antes señalada.

Combinando la abundante provisión de ambas fuentes de energía primaria junto con el potencial de reducción de emisiones por kW generado, obtenemos una oportunidad potencial y económicamente viable.

El principal problema en las instalaciones solares es la dependencia tecnológica, por lo que resultaría poco conveniente hacer la inversión para una planta solar de 900 MW. Resulta de mayor conveniencia a nuestro país instalaciones solares o solares-híbridas de menor tamaño (aunque las economías de escala representen un costo extra a considerar), con ello avanzamos en la curva de aprendizaje y se desarrolla tecnología propia con la cual será posible un proyecto de mayor envergadura.

Para una planta solar de 80MW los costos de inversión y operación son altos pero ya no de tal magnitud que sean prohibitivos. Su viabilidad es mayor si incluimos en las decisiones de inversión factores distintos al económico. Desde mi punto de vista, con los resultados obtenidos, la opción de construir una planta que incorpore tecnología solar es redituable, aún cuando en nuestro país sólo el sector gubernamental puede llevar a cabo este proyecto.

Desafortunadamente, como opción para la iniciativa privada sólo puede sobrevivir con tasas impositivas bajas y apoyos financieros por parte del gobierno (para reducir los costos de introducción al mercado ya que no es posible, ni sano, mantener por siempre estos subsidios).

Sin embargo, las conclusiones más importantes son que la tecnología solar de canal parabólico no es ya una opción económicamente inviable, con costos cercanos a los sistemas tradicionales y con mayores beneficios para ir abasteciendo la demanda eléctrica futura y comenzar a sustituir el consumo de combustibles fósiles.
