



01178,
1
24

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

**Construcción de Espejos de Plata
de Primera Superficie para Aplicaciones
en la Energía Solar**

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERIA

ENERGETICA

MARINA RAMIREZ ENSASTIGUE

CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO 1990

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

INTRODUCCION

OBJETIVO

CAPITULO 1 FUNDAMENTOS DE ENERGIA SOLAR

1

- 1.1 QUE ES LA ENERGIA SOLAR
- 1.2 RADIACION SOLAR INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA
- 1.3 CAPTACION SOLAR
 - 1.3.1 *Posición del sol*
 - 1.3.2 *Radiación solar sobre una superficie*
- 1.4 TIPOS DE CONCENTRADORES
 - 1.4.1 *Concentradores estacionarios*
 - 1.4.2 *Concentradores con seguimiento continuo*
 - 1.4.3 *Concentradores con curvatura sencilla*
- 1.5 APLICACIONES DE LOS CONCENTRADORES SOLARES

CAPITULO 2 ESPEJOS USADOS EN ENERGIA SOLAR

25

- 2.1 TIPOS DE ESPEJOS
 - 2.1.1 *Espejos de primera superficie*
 - 2.1.2 *Espejos de segunda superficie*
- 2.2 MATERIALES USADOS EN ESPEJOS PARA SU USO EN ENERGIA SOLAR
 - 2.2.1 *Película reflectora*
 - 2.2.2 *Sustrato*
 - 2.2.2.1 *Vidrio*
 - 2.2.2.2 *Plásticos*
 - 2.2.3 *Películas protectoras*
- 2.3 OBTENCION DE ESPEJOS
 - 2.3.1 *Proceso húmedo o depositado químico*
 - 2.3.2 *Evaporación térmica*
 - 2.3.3 *Erosión catódica*

CAPITULO 3 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CAÑON DE ELECTRONES 37

- 3.1 CAÑON DE ELECTRONES TIPO TRABAJO-ACELERADO
- 3.2 CAÑONES DE ELECTRONES AUTOACELERADOS
- 3.3 CAÑON DE ELECTRONES CON TRAYECTORIA CURVA DEL HAZ
- 3.4 CRISOLES Y MATERIALES EVAPORANTES CON CAÑON DE ELECTRONES
- 3.5 DISEÑO DE UN CAÑON DE ELECTRONES
- 3.6 CONSTRUCCION Y PUESTA EN MARCHA DE UN CAÑON DE ELECTRONES

CAPITULO 4 CAMARA DE EVAPORACION (ALTO VACIO) PARA LA FABRICACION DE PELICULAS DELGADAS 65

- 4.1 EQUIPOS PARA PRODUCIR VACIO Y SISTEMAS DE MEDICION
- 4.2 DESCRIPCION DEL EQUIPO UTILIZADO Y DETERMINACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION

CAPITULO 5 DESARROLLO DE ESPEJOS DE PLATA DE PRIMERA SUPERFICIE 81

- 5.1 SELECCION DEL SUSTRATO
- 5.2 LIMPIEZA DEL SUSTRATO
 - 5.2.1 *Métodos químicos*
 - 5.2.2 *Métodos físicos*
- 5.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL DE ESPEJOS
 - 5.3.1 *Limpieza del sustrato*
 - 5.3.2 *Evaporación del material protector y reflector*
 - 5.3.2.1 Evaporación de aluminio
 - 5.3.2.2 Evaporación de plata
 - 5.3.2.3 Evaporación de SiO_2 y Al_2O_3
 - 5.3.3 *Espejos desarrollados*

- 5.3.3.1 Evaporación de Alúmina, Ag, Alúmina y SiO (muestra 1)
- 5.3.3.2 Evaporación de Al (99.9% puro), Ag, Al₂O₃ y SiO (muestra 2)
- 5.3.3.3 Evaporación de Al, Ag, Al₂O₃ y SiO (muestra 3)
- 5.3.3.4 Evaporación de Nicromel (muestra 4)
- 5.3.3.5 Evaporación de Al, Ag, Al₂O₃ y SiO (muestra 5)

CAPITULO 6	PRUEBAS PRELIMINARES DE INTEMPERISMO Y REFLEJANCIA DE ESPEJOS DE PLATA DE PRIMERA SUPERFICIE	97
6.1	PROPIEDADES DE LOS ESPEJOS	
6.1.1	<i>Propiedades ópticas</i>	
6.2	METODOS DE DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES	
6.3	DEGRADACION POR EFECTO DEL MEDIO AMBIENTE	
CAPITULO 7	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	104
REFERENCIAS		108
AGRADECIMIENTOS		111

INTRODUCCION

La creciente demanda de energía, la gran dependencia a nivel mundial de una fuente no renovable de energía como son los hidrocarburos y el aumento de los precios de los energéticos fósiles, y en primer lugar del petróleo, en la década de los setentas, elevó el interés por desarrollar tecnologías que logren el aprovechamiento de fuentes alternas de energía como son la nuclear, solar y biomasa entre otras.

Estas no podrán sustituir a los hidrocarburos, pero en una gran proporción ayudarán a satisfacer la demanda mundial de energía. A nivel nacional se han realizado diversas investigaciones para el aprovechamiento de nuevas fuentes de energía, entre las que destaca el uso de energía solar. La investigación y desarrollo de la energía solar tiene como meta principal, avanzar en la ciencia, en la ingeniería y en el entendimiento de la tecnología solar, así como establecer la tecnología base, para lo cual la industria pueda desarrollar energía solar, y además producir opciones para introducirla como energía competitiva al mercado ya que ésta, tiene las ventajas de ser limpia, segura y abundante, aunque difusa e intermitente.

La energía solar se basa en la radiación proveniente del sol que puede transformarse directamente en energía eléctrica o mecánica, y también se puede convertir en energía térmica mediante los captadores solares, ya sean planos o de concentración.

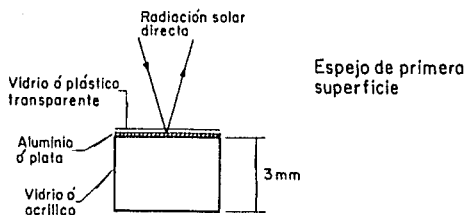
La conversión de la energía solar en calor mediante concentradores es una tecnología conocida. La complejidad de los dispositivos de conversión depende del nivel de temperatura que se desea alcanzar; para obtener altas temperaturas, mayores de 373°K , es necesario concentrar la radiación solar para lo cual se utiliza un equipo captador-concentrador solar. Estos equipos están compuestos de un sistema óptico y un sistema absorbedor. El sistema óptico es un espejo en el cual incide la componente directa de la radiación solar, reflejándola hacia el sistema absorbedor.

Uno de los aspectos que requiere más apoyo para su desarrollo y sobre todo en las aplicaciones de la energía solar para poder lograr temperaturas mayores de 100°C en los fluidos es el de espejos. Este aspecto es importante, ya que se utilizan estos dispositivos en concentradores solares como son:

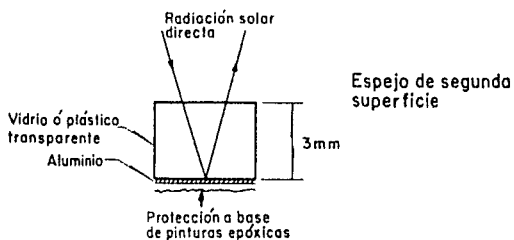
- Concentradores parabólicos compuestos
- Concentradores planos con dos espejos planos
- Concentradores de curvatura simple o concentradores cilíndricos
- Concentradores cilíndricos parabólicos.

Los espejos usados en aplicaciones solares deben tener las siguientes características: alta reflectancia, alta durabilidad y costo razonable. Para ello es necesario desarrollar espejos tanto de primera superficie como los de segunda superficie.

Los primeros son aquellos materiales reflejantes que usan como sustrato un material transparente u opaco, ya sea flexible o rígido y sobre el se deposita una capa delgada de aluminio o plata en la parte anterior para lograr un espejo con alta reflectancia; esta capa debe protegerse del ambiente con otra película muy delgada y transparente y donde prácticamente no existen pérdidas por absorción de la radiación solar.



Por lo que respecta a los espejos de segunda superficie, estos son los elementos reflejantes más conocidos, usan un sustrato grueso y transparente, generalmente vidrio o plástico, en el que se deposita una capa de aluminio o plata por la parte posterior del sustrato, o sea la segunda superficie de este material transparente, causando que una parte de la radiación solar que incide sobre este se absorba al atravesarla.



El desarrollo de espejos de plata de primera superficie es el objetivo de este estudio, ya que permitirá un avance en el desarrollo de estos materiales. Además ofrece varias ventajas sobre los de segunda superficie, como las siguientes:

- 1) No es necesario el uso de vidrios de baja absorción y por lo tanto el contaminante de óxido de fierro no es importante. Es bueno aclarar que estos tipos de vidrio de baja abrasión no se fabrican en México.

- 2) La protección de la película de plata se realiza automáticamente, esta es muy importante ya que permite proteger al espejo tanto de una degradación física como química. Esta última puede ocurrir debido a una sulfatación ya que los contaminantes que existen en el medio ambiente contienen azufre o compuestos de este elemento.
- 3) Se pueden obtener más altas reflejancias, ya que la radiación solar tiene un camino medio óptico mucho menor.
- 4) Mejores adherencias al sustrato y a la película protectora frontal pueden ser obtenidas, respecto a los de segunda superficie.
- 5) Se reducen los problemas de corrosión ya que la adherencia al sustrato y película protectora son mejores.

El desarrollo de espejos de plata en concentradores solares es de primordial importancia, ya que son los que alcanzan más alta reflejancia (mayor de 0.90); si se desea trabajar a temperaturas de más de 100 °C por medio de concentradores solares, estos espejos son los que alcanzan mayor eficiencia óptica. Sin embargo, la fabricación y la vida media de estos espejos son aspectos que no han sido resueltos satisfactoriamente hasta ahora por ningún fabricante nacional o extranjero. Por lo que respecta a su fabricación, el aspecto que más falla en los de segunda superficie es la adherencia entre el sustrato de vidrio y la película de plata, mientras que referente a su vida media, no se ha logrado que ésta sea de más de cinco años, debido principalmente al ataque por corrosión.

En este trabajo se presentan los avances obtenidos en espejos de plata de primera superficie con los que se ha logrado una buena adherencia entre el sustrato de vidrio y la plata, así como la evaporación del Al₂O₃ y SiO₂ (para proteger a la plata de una deterioración con el medio ambiente), usando un cañón de electrones para evaporar directamente la alumina y el vidrio sobre la plata, en una evaporadora de 1.5 m de diámetro al alto vacío (10⁻⁵ Torr).

OBJETIVO

La obtención de espejos de plata de primera superficie es el objetivo de ésta tesis, por lo cual se diseñó un cañón de electrones para evaporar directamente vidrio y alumina sobre plata, ésto permitirá lograr espejos de plata de primera superficie con tamaños hasta de 70 x 70 cm con películas protectoras de Al_2O_3 y SiO_2 ; debido a que el SiO_2 es el vidrio más resistente a la abrasión, es deseable proteger el espejo con este material. Sin embargo no se puede evaporar mediante procesos térmicos. Es necesario el uso de un cañón de electrones, ya que con este dispositivo es posible fundir estos materiales (temperaturas del orden de 2000 °C).

En esta tesis se presentan la investigación y desarrollo de espejos de plata de primera superficie, así como sus aplicaciones en la energía solar. Se exponen en su primera parte, capítulos 1 y 2, los fundamentos de la energía solar, así como el desarrollo de espejos de primera y segunda superficie que se utilizan en concentradores solares.

En la segunda, capítulos 3 y 4, se contempla el diseño y construcción de un cañón de electrones (como herramienta indispensable) en la ob-

tención de espejos de plata, y se describe en forma breve la cámara de evaporación (alto vacío) para la obtención de películas delgadas. En los últimos capítulos, 5 a 7, se describe el desarrollo de espejos de plata de primera superficie, su reflejancia y pruebas preliminares de intemperismo, así como algunas aplicaciones de estos.

CAPITULO 1

FUNDAMENTOS DE ENERGIA SOLAR

CAPITULO 1 FUNDAMENTOS DE ENERGIA SOLAR

1.1 QUE ES LA ENERGIA SOLAR

La potencialidad económica de un país depende de la disponibilidad de recursos energéticos, y es bien sabido que el mundo se acerca inexorablemente al agotamiento de las existencias de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. Ante la avaricia de energía que manifiesta la vida actual, resulta necesario tener conciencia plena de lo que significan las investigaciones de nuevas fuentes de energía para satisfacer las demandas presentes y futuras.

Una de las nuevas fuentes que se investigan es la energía solar. La energía solar es la radiación proveniente del sol. Para su aprovechamiento se requiere colocar una superficie (colector- absorbedor) que, por efecto de la radiación que recibe, esta absorbe y así aumenta su temperatura. El calor así ganado se transfiere a algún fluido (aire, agua, aceites, fluidos de alto peso molecular entre otros), empleado para proporcionar energía útil (calorífica, mecánica y eléctrica entre otras). La conversión termodinámica de la energía solar en energía calorífica de acuerdo con la definición de la eficiencia de Carnot, será más eficiente a altas temperaturas (de 200 a 500 °C).

El sol es la estrella más grande y cercana a la tierra en promedio se encuentra a 1.496×10^{11} m (distancia media tierra sol) y presenta la

forma de un disco brillante de diámetro angular igual a 32 grados de arco (0.0093 radianes); con un diámetro aproximado de 1.4×10^6 km; más de cien veces el diámetro de la tierra, promediada entre el perihelio y el afelio. La estructura del sol es muy compleja, está constituida por cinco principales regiones:

- Núcleo central:** En esta región se genera casi el 90% de la energía total, se estima que la temperatura varía entre 8 y 40 de millones °K, tiene una densidad entre 80 y 100 veces la del agua (refs 1 y 2).
- Fotósfera:** En esta capa se origina la mayor parte de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, y tiene una temperatura aproximada de 600 °K.
- Atmósfera:** Es un capa más o menos transparente que puede observarse durante los eclipses de sol. En esta región existe una capa de gases más fríos que constituye la capa inversora o de inversión.
- Cromósfera:** Es una capa de aproximadamente 10,000 km de espesor. Aquí los gases se encuentran a una temperatura mayor y tiene una densidad menor que los de la fotósfera.
- Corona:** Capa que envuelve a todo el sistema, de bajísima densidad y alta temperatura. Su espesor es del orden de 1×10^6 km.

A pesar de esta estructura tan compleja, será suficiente para fines de estudio y aplicaciones en ingeniería considerar que el sol se comporta como un cuerpo negro a una temperatura de 5762 °K, que emite energía por unidad de tiempo como una constante solar de 1353 W/m^2 . Esta constante solar I_{cs} se define como la cantidad de energía por unidad de tiempo que recibe una superficie perpendicular a la radiación, en el espacio extraterrestre, y a la distancia media del sol a la tierra.

1.2 RADIACION SOLAR INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

No toda la radiación solar extraterrestre que interseca la tierra llega a la superficie de la misma, aun en condiciones de cielo despejado. La disminución de la radiación solar al atravesar la atmósfera terrestre es debida a la absorción de radiación por los constituyentes atmosféricos.

La atmósfera terrestre está constituida por una masa gaseosa estratificada, entre los principales gases se tienen: nitrógeno, oxígeno, argón, bióxido de carbono y restos de otros gases, además de ozono y vapor de agua, que se encuentran concentrados en la vecindad del suelo.

El ozono absorbe la radiación ultravioleta de longitud de onda inferior a $0.35 \mu\text{m}$. El vapor de agua y el bióxido de carbono absorben fuertemente la radiación solar en las bandas infrarrojas con longitudes de onda mayores de $2.3 \mu\text{m}$, sólo llega a la superficie de la tierra la radiación con longitudes de onda entre 0.29 a $2.3 \mu\text{m}$.

La figura 1.1 muestra (1) el espectro de radiación solar para un cuerpo negro a $5762 \text{ }^\circ\text{K}$, (2) la radiación solar extraterrestre, y (3) la radiación solar al nivel del mar.

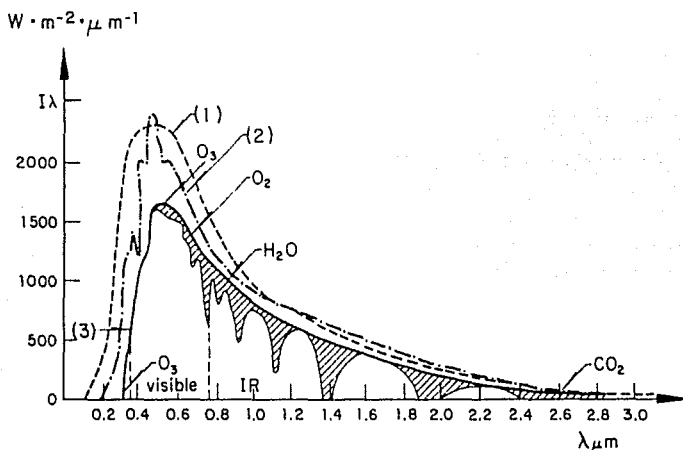


Fig 1.1

Las regiones sombreadas corresponden a las bandas de absorción.

La radiación solar, conocida como radiación total, puede descomponerse en directa y difusa.

- 1.- Radiación directa: Se refiere al flujo de rayos solares recibidos desde la dirección del disco solar, y además no experimenta cambios en su dirección al atravesar la atmósfera terrestre.

2.- Radiación difusa: Es la que llega a la superficie terrestre desde el resto del cielo y es producto de la dispersión que sufre la luz solar a través de la atmósfera terrestre.

La proporción de cada una de ellas en la radiación total depende de la nubosidad, humedad, presencia de partículas suspendidas en la atmósfera y otras condiciones ambientales, pudiendo llegar a corresponder a la radiación difusa un 10% hasta un 100% de la total, siendo esta proporción menor en zonas tropicales.

La radiación total es la suma de las componentes directa y difusa y su promedio anual sobre la superficie de la tierra varía entre 2000 y 2500 kWh/m² en zonas de alta insolación y hasta de 1:10 en zonas de alta latitud (ref 3). A pesar de esto, comparada con los combustibles fósiles, la energía solar está mejor distribuida desde el punto de vista geográfico.

Existe un gran número de instrumentos para medir la radiación solar total o sus componentes directa o difusa, tanto en sus valores instantáneos como de los integrados a lo largo de un cierto intervalo de tiempo. Entre los instrumentos de medición pueden distinguirse genéricamente los pirheliómetros de incidencia normal (radiación directa), los piranómetros (radiación total), y los difusómetros (radiación difusa). Figs 1.2 y 1.3.

Otro aspecto importante es la transmitancia atmosférica que relaciona la cantidad de radiación que se trasmite en la atmósfera; se define por la ecuación (refs 1 y 4).

$$T_{atm.} = I_b/I_o \quad (1.1)$$

donde;

I_b = Radiación solar directa terrestre

I_o = Radiación solar directa extraterrestre



Fig 1.2 Pirheliómetro

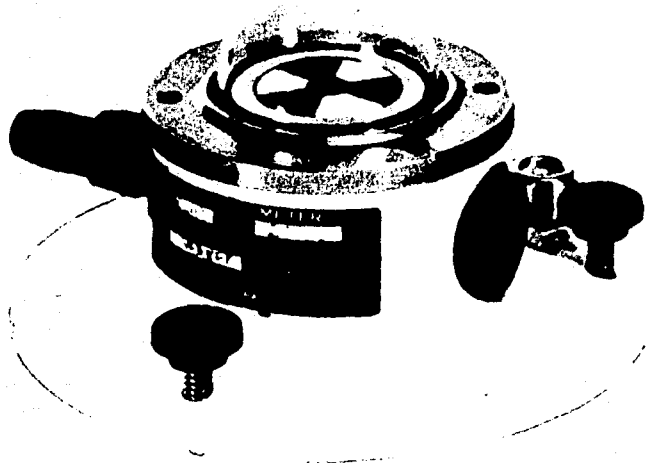


Fig 1.3 Piranómetro

Bajo condiciones de cielo despejado:

$$T_{atm} = 0.5 \left(\exp(-0.65) + \exp(-0.095m) \right) \quad (1.2)$$

donde

m = masa de aire.

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

$$m = \sec \theta_z \quad (1.3)$$

A nivel del mar

$$m = \left(1.229 + (614 \operatorname{sen} \alpha)^2 \right)^{0.5} - 614 \alpha \quad (1.4)$$

donde

θ_z = Angulo cenital. Es el ángulo formado por la posición del sol con respecto al cenit.

α = Altura solar. Es el ángulo que forma el sol con respecto al horizonte, éste ángulo es el complemento del ángulo cenital.

1.3 CAPTACION SOLAR

La captación solar se lleva a cabo mediante concentradores, los cuales deberán estar orientados continuamente hacia el sol para concentrar la mayor cantidad de energía. Los concentradores solares son fijos o con movimiento continuo (siguiendo la trayectoria del sol), por lo que es requisito indispensable conocer la posición del sol en el firmamento, para orientar adecuadamente los concentradores solares.

1.3.1 Posición del sol

Si se considera a la tierra fija y al sol moviéndose alrededor de ésta, el sol tendrá únicamente dos grados de libertad en su

movimiento, por tanto, su posición queda determinada mediante dos variables angulares; altura solar α y el acimut solar γ .

La altura solar es el ángulo complementario del cenit solar.

El acimut solar es la desviación que tienen los rayos solares con respecto al sur verdadero.

Estas dos variables dependen de tres parámetros:

- 1) Latitud del lugar ϕ , que es el ángulo formado entre el ecuador y el sitio de interés, siendo positivo hacia el norte y negativo hacia el sur.
- 2) Declinación δ , es el alejamiento que experimenta el sol hacia el norte ó hacia el sur, y se calcula con la ecuación:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 (284 + n) / 365 \right) \quad (1.5)$$

donde

$$n = \text{día del año}$$

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

La altura solar se calcula mediante la ecuación:

$$\operatorname{sen} \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos w + \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta \quad (1.6)$$

y el acimut solar por:

$$\operatorname{sen} \gamma = \cos \delta (\operatorname{sen} w / \cos \alpha) \quad (1.7)$$

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

$$\cos w_s = -\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta \quad (1.8)$$

donde

w_s es el ángulo horario calculado a la puesta del sol.

$$T_d = 2/15 w_s \quad (1.9)$$

se tiene que:

$$T_d = 2/15 \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (1.10)$$

1.3.2 Radiación solar sobre una superficie

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

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

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos S - \sin \delta \cos \phi \sin S \cos \gamma_s + \cos \delta \\ & \cos \phi \cos S \cos w + \cos \delta \sin \phi \sin s \cos \gamma_s \cos w + \cos \delta \\ & \sin s \sin \gamma_s \sin w \end{aligned} \quad (1.11)$$

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

1) Radiación sobre una superficie horizontal.

en este caso $s = 0$ y $\theta = \theta_z$ entonces

$$\cos \theta_z = \sin \alpha \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos w \quad (1.12)$$

2) Radiación en una superficie inclinada hacia el sur.

El ángulo de incidencia es idéntico al ángulo acimutal, si la latitud del lugar es $(\phi - s)$

se tiene:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin (\phi - s) + \\ & \cos \delta \cos (\phi - s) \cos w \end{aligned} \quad (1.13)$$

3) Radiación en una superficie vertical orientada hacia el sur.

$$\begin{aligned} \text{En este caso } s = 90 \text{ y } \gamma_s = 0 \text{ entonces} \\ \cos \theta = - \sin \alpha \cos \phi + \cos \delta \sin \phi \cos w \end{aligned} \quad (1.14)$$

1.4 TIPOS DE CONCENTRADORES

Existe una gran variedad de concentradores. Sin embargo, prácticamente todos ellos pueden clasificarse como de enfoque y fijos. Los primeros, aunque permiten concentrar la radiación e incrementar la temperatura de operación del sistema de manera muy significativa, presentan varias dificultades técnicas desde el punto de vista de ingeniería. Es decir, deben orientarse continuamente con gran exactitud para seguir al sol y dirigir de manera precisa la radiación directa hacia el receptor. Por otra parte, el acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico no sólo debe ser de alta calidad, sino que deben mantener sus cualidades por largos periodos sin ser deteriorados por el polvo, la lluvia y la oxidación. Análogamente, las demandas de calidad sobre las propiedades de los materiales son mayores: altas temperaturas en el absorbedor, en el fluido de trabajo y en los aislantes.

Los concentradores fijos, por otra parte, no tienen las desventajas de los de enfoque, aunque sólo permiten incrementar moderadamente la intensidad de la radiación solar.

Los concentradores se pueden clasificar según las siguientes características:

Temperatura de operación

Exactitud en el seguimiento aparente del sol

Tipo de seguimiento, que puede ser de un solo eje o biaxial.

1.4.1 Concentradores estacionarios

Los concentradores menos complejos son los que no requieren seguimiento continuo del sol; éstos tienen un ángulo de aceptación muy

grande, concentración baja y diseño con base en alguna curvatura sencilla; su orientación debe ser en dirección este - oeste (E -W) a fin de obtener mejor aprovechamiento de los ángulos de aceptación grandes; las concentraciones pueden llegar hasta 10 con un tiempo de captación del orden de 7 h, con ajuste una vez al día. Los concentradores más simples se muestran en las figs 1.4a y 1.4b.

Los concentradores estacionarios de mayor concentración son llamados parabólicos compuestos (CPC), desarrollados por Welford y Winston (1978) y Rabl (1976) (ref 5). Están formados por dos segmentos simétricamente colocados alrededor de un eje; el foco de cada parábola se localiza en el extremo de la superficie absorbidora coincidente con la parábola opuesta. El ángulo de cada eje de la parábola proporciona el ángulo de aceptación del concentrador. El (CPC) se muestra en la fig 1.5.

1.4.2 *Concentradores con seguimiento continuo*

Cuando se necesitan concentraciones mayores de 10 por periodos diarios de 6 hr. o más a lo largo de todo el año, se requieren sistemas con seguimiento al sol. Existen dos tipos diferentes de concentradores al respecto: los de curvatura circular o parabólica, y los de curvatura compuesta, o tipo platillo como los paraboloides de revolución y los casquetes semiesféricos. Los concentradores de curvatura simple necesitan mecanismo seguidor con un grado de libertad (foco lineal), y los de curvatura compuesta dos grados de libertad mecánico (foco puntual).

En estos sistemas, el seguimiento del sol se hace generalmente a través de sensores fotosensibles que envían una señal de naturaleza eléctrica a un sistema electrónico y a un servomecanismo fig 1.6a y 1.6b.

1.4.3 *Concentradores con curvatura sencilla*

Uno de los sistemas que más se ha desarrollado en los últimos años es el concentrador cilíndricoparabólico. En general, en los sistemas que

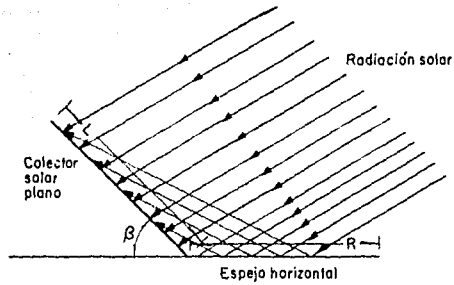


Fig 1.4a Colector plano con un espejo plano

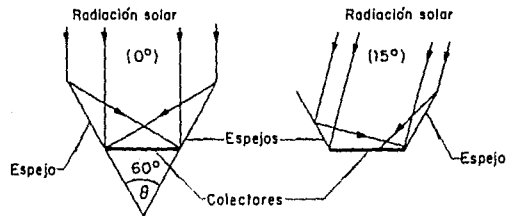


Fig 1.4b Colector plano con dos espejos planos

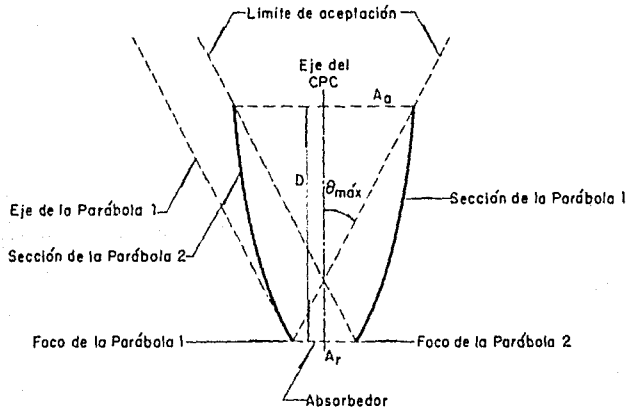


Fig 1.5 Concentrador parabólico compuesto

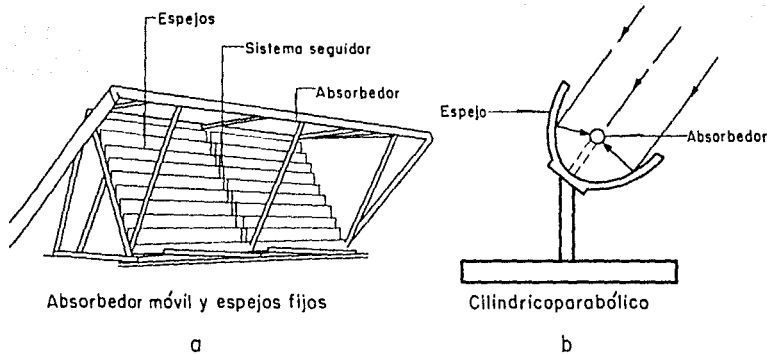


Fig 1.6 Concentradores de seguimiento continuo

están operando actualmente, el absorbedor y el concentrador pueden o no girar simultáneamente; el objetivo principal es que exista un buen enfoque sobre el tubo absorbedor que se encuentra a lo largo del foco de la parábola.

Los concentradores en dichos sistemas están en el intervalo de 15 a 50, y las temperaturas de trabajo alcanzables entre 200 y 400 °C ver fig 1.7.

1.5 APLICACIONES DE LOS CONCENTRADORES SOLARES

La conversión de la energía solar en calor mediante concentradores es una tecnología muy conocida. La complejidad de los dispositivos de conversión depende del nivel de temperatura que se desea alcanzar. En forma muy general, un concentrador solar es un dispositivo que transforma la energía solar en calor para transferirlo a un fluido apropiado.

Los concentradores solares tienen amplias aplicaciones como son; calentamiento de agua para uso doméstico, calefacción doméstica, obtención de agua pura, secado de alimentos y materiales diversos, cocinas solares y refrigeración solar entre otras.

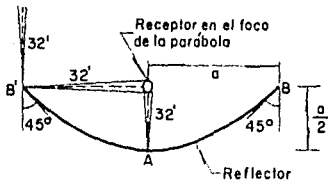
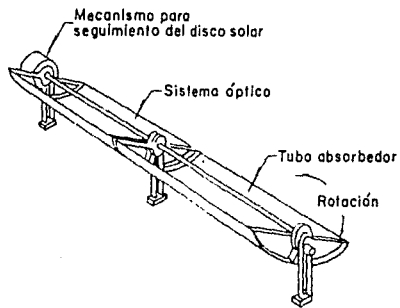
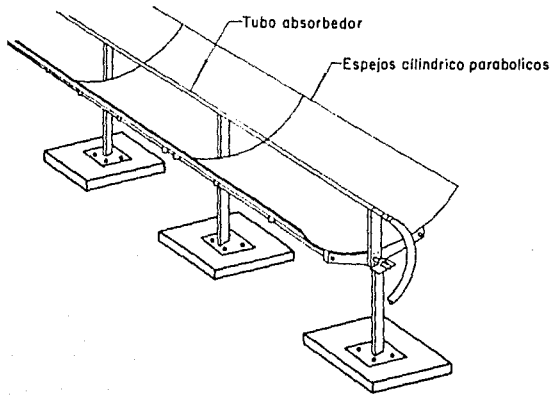


Fig 1.7 Concentradores cilíndricoparabólicos

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

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

- 1.- Sistemas pasivos
- 2.- Sistemas activos.

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

En los sistemas clasificados como activos, la energía solar es captada mediante concentradores planos donde se calienta aire o agua. Después, el fluido caliente procedente del concentrador se deja correr por los radiadores de las habitaciones, fig 1.8.

c).- Obtención de agua pura; (Destiladores Solares). Se denotan destiladores solares a aquellos aparatos que empleando energía solar, transforman el agua contaminada o salobre en agua pura. Su construcción se fundamenta exclusivamente, en el efecto inversadero y no exige otro tipo de tecnología.

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

d).- Secado de alimentos y materiales diversos. El secado por radiación solar se puede producir directamente, exponiendo el material

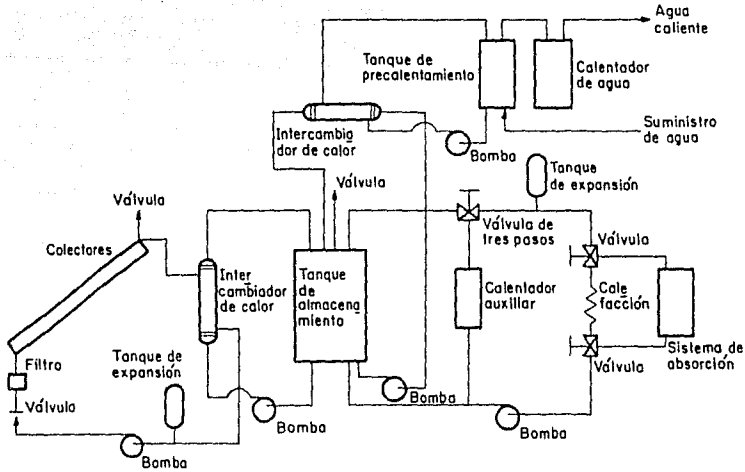


Fig 1.8 Sistema de enfriamiento, calefacción y agua caliente para un tipo de casa solar

sólido a la radiación solar, con o sin cubierta transparente. También se puede realizar indirectamente por calentamiento a través de una corriente de aire de baja humedad relativa, la cual se calienta en los concentradores. fig 1.9.

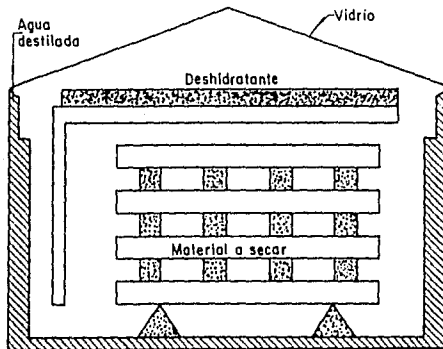


Fig 1.9 Secador solar

- e).- Cocinas Solares. Una de las aplicaciones más sencillas de la energía solar consiste en hervir o calentar alimentos con la radiación solar, que es captada por medio de un concentrador solar. En un concentrador solar parabólico provisto de un recipiente, se calienta agua a altas temperaturas, aceite o cocción de alimentos.
- f).- Refrigeración solar. La refrigeración es un proceso o procesos acoplados, formando ciclos cerrados o abiertos, que permiten obtener o mantener un espacio o un campo a una temperatura inferior al ambiente.

El enfriamiento puede producirse en forma natural a través de procesos de pérdidas de calor, debido principalmente, a la radiación de los cuerpos (enfriamiento radiactivo) y a la evaporación (enfriamiento evaporativo). Un refrigerador es un dispositivo mecánico, térmico, termo-mecánico o termoelectrónico, que bombea calor de un lugar en donde no se requiere (espacio a enfriar) a otro en donde no afecta (medio ambiente).

El fenómeno de enfriamiento, se produce en la mayoría de los casos, mediante la absorción, fusión y sublimación, los cuales se desarrollan a bajas temperaturas (ref 6).

El término de refrigeración solar se aplica a aquellos ciclos cuya energía de operación proviene de la conversión térmica o eléctrica de la energía solar. La energía térmica de origen solar se obtiene a través de dispositivos conversores llamados concentradores solares térmicos. fig 1.10.

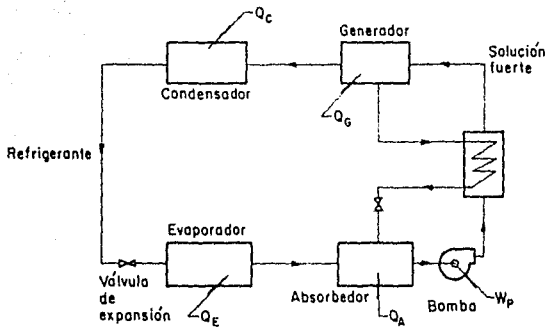


Fig 1.10 Sistema de refrigeración por absorción

CAPITULO 2

ESPEJOS USADOS EN ENERGIA SOLAR

CAPITULO 2 ESPEJOS USADOS EN ENERGIA SOLAR

Uno de los desarrollos más necesarios en las aplicaciones de la energía solar para poder lograr temperaturas mayores de 100°C en los fluidos es el uso de espejos. Este aspecto es importante al utilizar concentradores solares, los cuales funcionan con espejos, y poder lograr eficiencias aceptables, las reflejancias de los espejos deben ser mayores de 0.8 Las principales características de espejos concentradores son:

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

Para satisfacer estas características es necesario que el espejo tenga altas reflejancias y una alta especularidad. La reflejancia del espejo es la relación que existe entre la radiación solar reflejada y la radiación solar incidente.

Reflejancia

del = Radiación reflejada/Radiación incidente

Espejo

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

1. Espejos de primera superficie

2. Espejos de segunda superficie

La principal diferencia entre los dos tipos de espejos es que en los de primera superficie los rayos solares inciden directamente sobre una película reflectora y en los de segunda superficie deben atravesar un sustrato transparente y grueso, para incidir en el material reflector.

La especularidad; son las irregularidades en una superficie, que causan que la luz del sol se disperse, (ref 19).

2.1 TIPOS DE ESPEJOS

2.1.1 Espejos de primera superficie

Los espejos de primera superficie se caracterizan por tener al material reflector sobre la cara frontal de un sustrato, además la radiación solar sólo atraviesa una película delgada protectora transparente para incidir sobre el material reflector reflejándose hacia el sistema absorbedor, atravesando nuevamente la película protectora.

En la figura 2.1 se muestra un esquema de un espejo de primera superficie con sus constituyentes principales. Este tipo de espejos tiene la ventaja de que la radiación solar no atraviesa el sustrato, por lo que no hay absorción de radiación en sus componentes. Estos espejos tienen una mayor reflejancia.

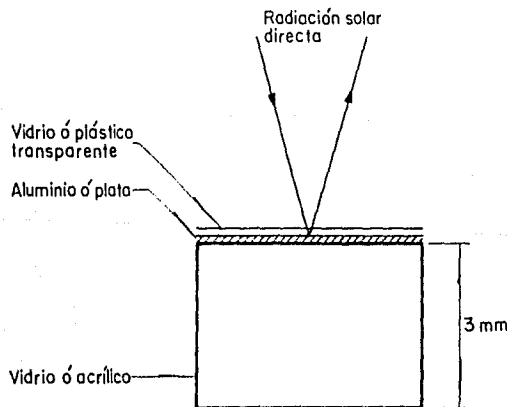


Fig 2.1 Espejo de primera superficie

2.1.2. Espejos de segunda superficie

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

Para minimizar el ataque de los agentes atmosféricos, la película reflectora de plata es protegida por medio de cuatro capas de diferentes materiales; cobre, pintura, polímero y adhesivo. Otra capa de adhesivo puede ser aplicada entre las capas de pintura y polímero para aumentar la protección y unión del sistema. En la figura 2.2 se muestra un esquema de un espejo de segunda superficie con todas sus partes constitutivas.

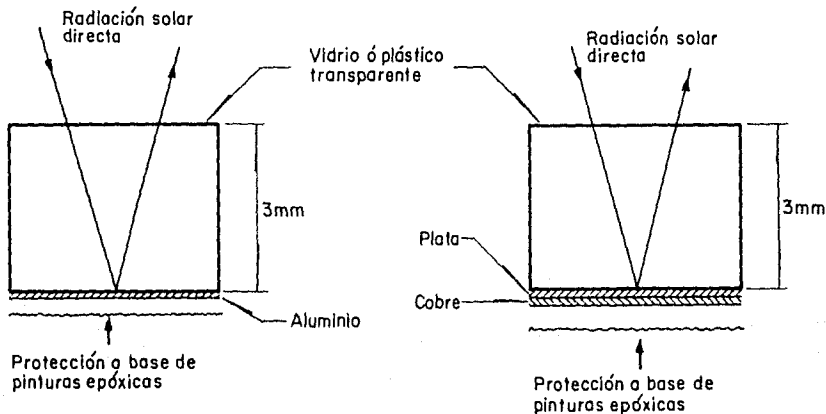


Fig 2.2 Espejo de segunda superficie

2.2 MATERIALES USADOS EN ESPEJOS PARA SU USO EN ENERGIA SOLAR

Las partes constitutivas de un espejo para la captación-concentración de la radiación solar son:

1. Película reflectora
2. Sustrato
3. Películas protectoras

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

2.2.1 Película Reflectora

Los elementos químicos con alta reflejancia, y los más comunmente usados en energía solar son plata y aluminio; existen estos y otros elementos que pueden ser usados como superficies reflectoras, como por ejemplo el rodio. Otra forma de obtener una superficie reflectora es puliendo un metal, de manera manual o mecánica, hasta tener un acabado a espejo, como podría ser el cobre o el acero inoxidable, en este caso no existe el sustrato, debido a que el propio metal es superficie reflectora y sustrato. Comunmente se utiliza plata y aluminio, ya que estos tienen una mayor reflejancia, y además el proceso de depositado sobre el sustrato se realiza con mayor facilidad; el costo del material y su proceso de manufactura son relativamente bajos.

Las películas de aluminio y plata que se depositan sobre el sustrato tienen un espesor aproximado de 4000 Å.

2.2.2 Sustrato

El sustrato es el elemento sobre el cual se deposita la película reflectora. Este material es normalmente vidrio o acrílico delgado en los espejos de segunda superficie. Una característica importante del sustrato es que debe ser transparente para obtener una alta transmitancia y evitar pérdidas de radiación por absorción, además debe tener buena textura para que la radiación solar se refleje en el ángulo correcto.

El espesor del sustrato es aproximadamente de 3 mm.

2.2.2.1 Vidrio

El vidrio es uno de los materiales más usados en la elaboración de espejos. Existen varios procesos para la producción de vidrio. Para aplicaciones solares, es preferible el que se obtiene mediante el proceso de flotación, por la alta calidad del vidrio así obtenido. El vidrio "flotado" tiene alta calidad, bajo contenido de hierro y se obtiene con espesores del orden de 1.5×10^{-3} a 12×10^{-3} m, con superficie totalmente lisa, con lo que se puede lograr buenas especularidades.

El proceso consiste en la flotación de un silicato de calsosa sobre un baño de estaño fundido. Este proceso tiene como consecuencia que se obtienen dos caras distintas para el vidrio; una con retención de estaño y la otra relativamente libre de estaño. Esta última se prefiere en la producción de espejos.

El vidrio usado en la captación de la radiación solar, debe tener bajo contenido de iones Fe^{3+} y Fe^{2+} , porque estos iones absorben la radiación solar. El Fe^{3+} absorbe la radiación ultravioleta y su efecto se desprecia en aplicaciones solares. Por lo que respecta a el Fe^{2+} , este tiene una ancha banda de absorción centrada a los 1000 nm, una región en donde es considerable la radiación solar.

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

2.2.2.2 Plásticos

Otro de los materiales más comúnmente usados como sustratos en aplica-

ciones solares son diferentes tipos de plásticos, entre los más comunes se encuentran:

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

De todos ellos el que más se utiliza para aplicaciones solares es el acrílico delgado ó grueso, para espejos de primera y segunda superficie, respectivamente.

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

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

2.2.3 Películas Protectoras

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

Los compuestos normalmente usados para espejos de primera superficie, con película reflectora de aluminio, son SiO , SiO_2 , Si_2O_3 , MgF_2 y plásticos transparentes. Estos compuestos son transparentes y con despreciable absorción en el espectro visible. Cada una de estas películas se deposita con diferentes condiciones de operación, mediante procesos de evaporación térmica, evaporación con cañón de electrones y evaporación por erosión iónica (sputtering). Se requiere de un control del depositado porque debe hacerse en forma uniforme y controlando el espesor de la película.

Para espejos de primera superficie con película reflectora de plata, la película protectora es de Al_2O_3 y sobre esta una de SiO_2 . Ambas películas son transparentes, debido a que la plata debe protegerse con estas, tanto de una degradación física como química.

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

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

Pintura: Debe ser de secado rápido. La capa de pintura también debe ser curada a una temperatura de 120°C . Cuando se usan sustratos de acrílico, el curado se realiza a 50°C , para evitar deformaciones porque el acrílico no resiste altas temperaturas. Estas dos capas no son suficientes para una protección adecuada de los espejos usados en energía solar, por lo cual es necesario cubrir con otros materiales que son; polímero y adhesivo ó adhesivo- polímero-adhesivo; esta última protege más eficientemente.

Polímero: Se vende en diferentes presentaciones y dependiendo de estas de estas se deposita de tres maneras distintas. El primer proceso se denomina de vaciado, la segunda forma es de rocío y la última es de fijación de la capa plástica a la superficie. En la tabla 2.1 se muestran los principales polímeros usados y su respectivo nombre comercial.

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

Tabla 2.1 Principales polímeros usados en el recubrimiento de espejos.

<u>Nombre genérico</u>	<u>Abreviación</u>	<u>Nombre comercial</u>	<u>Fabricante</u>
Politetrafluoretileno	T	Teflón	Du Pont
Policlorotrifluoretileno	CT	Aclar ó Kel F	Quim. Allied ó Comp. 3 M
Fluoruro de polivinilo	FV	Tedlar	Du Pont
Fluoruro de polivinilideno	FVA	Kynar	Pennwalt
Copolímero de tetrafluoretileno y hexafluorpropileno	FEP	Teflón FEP	Du Pont
Perfluoralcoxi-sustituido con politetrafluoretileno	PFA	Teflón PFA	Du Pont
Copolímero de etileno y tetrafluoretileno	E-TFE	Tefzel	Du Pont
Copolímero de etileno y clorotrifluoretileno	E-CTFE	Halar	Quim. Allied
Polimetilmetacrilato	PMMA	Lucite ó Plexiglas	Du Pont ó Rohm e Haas
Acetato de etilenvinilo	AEV	Elvax	Du Pont
Copolímero de etileno y propileno	E-P	Vistalon	Quim. Exxon
Poliisobutileno	IB	Vistanex	Quim. Exxon
Poli-etilentereftalato	ETF	Llumar	ICI
Cloruro de polivinilideno	CVD	Saran	Quim. Dow
Copolímero de estireno y butadieno	E-B	Kraton	Quim. Shell
Poliéster	E	Mylar	Du Pont
Policarbonatos			
Resinas de silicón			
Resinas Epóxicas			

En la tabla 2.2 se enlistan diferentes adhesivos en su presentación comercial.

Los espesores de las distintas capas protectoras son:

Cobre:	3×10^{-8} m
Pintura:	2.5×10^{-5} m
Polímero:	$5-1000 \times 10^{-6}$ m
Adhesivo:	3×10^{-7} m

2.3 OBTENCION DE ESPEJOS

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

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

2.3.1 Proceso húmedo o depositado químico

Esta técnica es utilizada para la obtención de espejos de plata y operativamente es intermitente. Para la obtención del espejo se usan dos soluciones reactivas, (refs 13 y 14).

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

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

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

2.3.2 Evaporación térmica

Por el proceso de evaporación térmica se obtienen espejos de alta calidad, aplicables en los equipos solares. El proceso consiste en la

Tabla 2.2 Formas disponibles de adhesivos

<u>Adhesivo</u>	<u>Forma disponible</u>
<u>Termofijo</u>	
Caseína	1,2
Epóxico	2,3,5
Melamina formaldehído	1,2
Fenol formaldehído	1,2
Poliéster	1,2
Poliuretano	1,2,3,4
Resorcínol formaldehído	1,2,3,4
Silicón	1,4,5
Urea formaldehído	1,2,3
<u>Termoplástico</u>	
Acetato de celulosa	1,2,4,6
Butirato de celulosa	1,2,4
Carboximetil celulosa	1,4
Etil celulosa	1,4,6
Hidroxietil celulosa	1,4
Metil celulosa	1,4
Nitrato de celulosa	1,4
Poliáamida	2,6
Poliétileno	6
Polimetilmetacrilato	4
Poliestireno	1,6
Acetato de polivinilo	3,4,7
Alcohol polivinílico	1,3,4
Cloruro de polivinilo	1,4,5

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

evaporación de un metal, depositándose los vapores sobre un blanco (sustrato), el proceso se realiza en una cámara de alto vacío.

El material a evaporar se coloca en crisoles, constituido por filamentos de tungsteno, por los cuales se hace pasar una alta densidad de corriente. La intensidad de la corriente es variable en el crisol, esta depende del material a evaporar y de la rapidez requerida en la evaporación. El proceso se lleva a cabo dentro de una cámara especial, evacuada a una presión aproximada de 5×10^{-5} Torr.

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

Esta técnica tiene mayores ventajas que el proceso químico como son: mayor adherencia de la película reflectora en el sustrato, mayor control sobre la rapidez de evaporación del material reflector, lográndose los espesores requeridos, y un depositado uniforme. También se logra que la humedad ambiental no influya en el depositado como sucede en el proceso químico.

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

2.3.3 *Erosión catódica*

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

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

partículas del material, debido a un cambio de momentum, recolectándose en el sustrato.

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

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

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

Cada uno de los aspectos aquí mencionados, son considerados para el proceso de elaboración de espejos que han sido desarrollados para su aplicación en colectores-concentradores solares.

CAPITULO 3
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CAÑON
DE ELECTRONES

CAPITULO 3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CAÑÓN DE ELECTRONES

En lugar de calentamiento por resistencia o inducción existe otra técnica para suministrar energía a una substancia para evaporarla en vacío, la cual es por medio del bombardeo de electrones.

En un cañón de electrones existe un flujo de estos que se aceleran aplicándoles campos eléctricos que van de 4 a 10 kV y enfocándose sobre la superficie de la substancia a evaporar.

Al chocar los electrones sobre la substancia, la mayoría de la energía cinética de las partículas se convierten en calor, y por tanto se pueden alcanzar temperaturas que exceden los 3000 °C. Debido a que la energía cedida se realiza con partículas cargadas, entonces es posible concentrarlas al incidir sobre la substancia de manera que otras porciones del evaporante quedan a baja temperatura. Por esto, las interacciones que pudieran existir entre el evaporante y el crisol pueden reducirse grandemente.

Estas técnicas pueden ser muy versátiles desde el punto de vista experimental. En la literatura existe una gran variedad de arreglos, por ejemplo se pueden consultar las referencias (7 y 8). Estos dispositivos pueden clasificarse de acuerdo a la manera en que los electrones son acelerados o de acuerdo a la técnica usada para sostener al evaporante.

En la literatura se conoce a los dispositivos que operan con el principio de bombardeo de electrones para el calentamiento de sustancias como cañones de electrones.

Como fuente de electrones se emplea un cátodo caliente que generalmente es un alambre de tungsteno que mantiene su forma y solidez a las altas temperaturas requeridas para una emisión eficiente de electrones. La vida media del filamento está limitada por las reacciones posibles con los vapores del evaporante y por la erosión iónica debido a la incidencia de iones positivos de alta energía. Por esto se recomienda que los cañones de electrones se construyan de manera que el filamento se pueda reemplazar fácilmente.

Se necesita un potencial de algunos kilovoltios para acelerar los electrones emitidos desde el cátodo. Si un campo eléctrico se establece, entre el cátodo y el evaporante conocido como el *trabajo* se dice que la estructura del cañón es de tipo trabajo-acelerado. Otra alternativa son los cañones autoacelerados; en estos existe un ánodo separado con una apertura a través de la cual el haz de electrones pasa hacia el *trabajo*.

La energía del electrón es suficiente para ionizar el gas residual o moléculas encontradas a lo largo de su trayectoria. Ya que la ionización causa pérdidas de la energía del haz y enfoque, la presión en la cámara de vacío debe ser menor que 10^{-4} Torr.

3.1 Cañón de electrones tipo trabajo-acelerado

Estos tipos de cañón tienen un cátodo caliente en la forma de un aro que se encuentra muy cerca del evaporante de manera que los electrones convergen radialmente sobre el *trabajo*. El arreglo más simple es la configuración gota-colgante (pendant-drop) ref (9) como se muestra en la fig 3.1a. El metal que se desea evaporar es una barra o alambre que se centra dentro del anillo (cátodo). La evaporación se lleva a cabo en la extremidad fundida, estando el sustrato abajo de la fuente. La gota del metal fundido está adherida a la barra debido a su tensión superficial y requiere un control cuidadoso de la energía eléctrica

suministrada. Si la temperatura de la gota llega a exceder el punto de fusión, entonces la gota puede llegar a caer. Por esto, la aplicabilidad de este método se limita a metales que tengan una tensión superficial alta y con presiones de vapor mayor de 10^{-3} Torr en sus puntos de fusión. Otras desventajas de este cañón es que existe una limitante en la rapidez de evaporación, la cual depende del material que se desea evaporar; otra es que el filamento está expuesto directamente a la substancia que se está evaporando, es decir se encuentra dentro de altas densidades de vapor provenientes del evaporante, lo que conduce a una erosión del cátodo debida al fenómeno de erosión iónica (sputtering) y conduce además a una contaminación de la película que se está evaporando. Con el fin de evitar estas dificultades se ha propuesto cambiar de posición al filamento, protegiéndolo con una coraza; conviene que esta protección se encuentre a un potencial igual

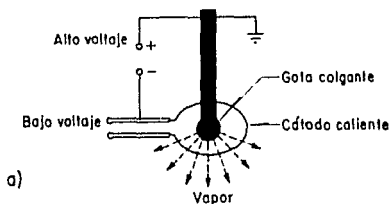


Fig 3.1a Cañón de electrones tipo trabajo acelerado. Método de gota colgante

a la del cátodo para que los electrones se repelan y se forcen a tener trayectorias curvadas para que terminen sobre el evaporante.

Aunque estos cañones con protección del cátodo y enfoque electrostático se han usado junto con la gota-colgante, se ha encontrado una aplicación más amplia en cañones del tipo trabajo-acelerado con soportes enfriados por agua. Como se muestra en las figs 3.1b y 3.1c, el aro catódico puede estar arriba o abajo del trabajo. Se han usado estos sistemas para evaporar Ta, Si y Mo. El alto voltaje generalmente se aplica al cátodo de manera que la fuente de alimentación debe quedar eléctricamente aislada y el soporte de evaporante conectado a tierra. Si el cátodo se conecta a tierra, entonces el campo eléctrico más intenso coincide con la región de mayor densidad de vapor que rodea al trabajo, lo que puede conducir a una descarga luminosa.

Otra desventaja de este sistema, aun con el potencial aplicado al cátodo, es que están limitadas en la rapidez de evaporación ya que la densidad de vapor disminuye muy moderadamente en las distancias que son cortas entre fuente y filamento. La ionización del vapor dentro del campo electrostático produce una carga espacial que reduce el

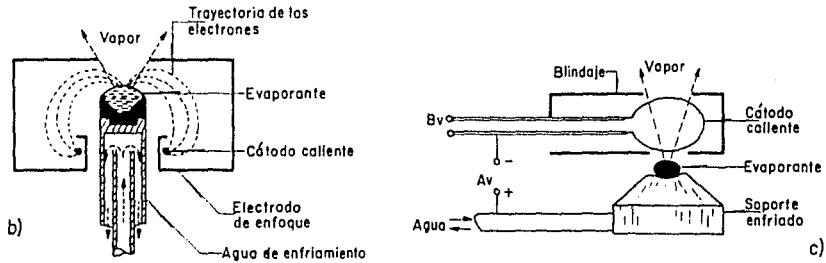


Fig 3.1b y 3.1c Cañones de electrones tipo trabajo acelerado. b) Filamento protegido c) Filamento blindado

voltaje de aceleración. Para valores altos en la rapidez de evaporación se puede ocasionar una descarga luminosa entre cátodo y las paredes de la campana de la evaporadora. Esta inestabilidad produce dificultades en el control del voltaje y por tanto, en la rapidez de evaporación. También se ha observado que debido a la proximidad de la fuente de vapores y la coraza del filamento se producen grandes acumulaciones de depósitos en las partes de la coraza, por lo que es necesario una limpieza con mayor frecuencia o cambiarse la coraza. Es por estas razones que se ha optado por otros diseños, en los que el cátodo y la estructura de aceleración están en partes remotas de la fuente evaporante.

3.2 Cañones de electrones autoacelerados

Esta clase de cañones tiene una similitud con los tubos de rayos X. Un pequeño filamento helicoidal de tungsteno constituye la fuente de electrones. Puede realizarse un enfoque electrostático burdo por medio de una coraza cilíndrica y un ánodo en la forma de disco como se muestra en la fig 3.2a. El espacio entre el ánodo y el trabajo está libre de campo. Sin embargo, puede ocurrir un aumento de presión de-

bido a la gasificación de la región comprendida entre el ánodo y el cátodo, lo cual conduce a ionización y desenfoque. Si el haz tiene que viajar grandes distancias o si se desea un enfoque en una pequeña zona, esto puede llevarse a cabo con lentes magnéticas. Un ejemplo se muestra en la fig 3.2b, donde el haz de electrones se enfoca por un blindaje del filamento, un ánodo cónico y una bobina magnética. Con fines de evaporación generalmente se usan manchas focales de algunos milímetros de diámetro. Cañones de tele-enfoque del tipo mostrado en la fig 3.2b han sido empleados con éxito para evaporar metales refractarios tales como Nb^{109} o Ta^{110} que requieren temperaturas arriba de $3000^{\circ}C$.

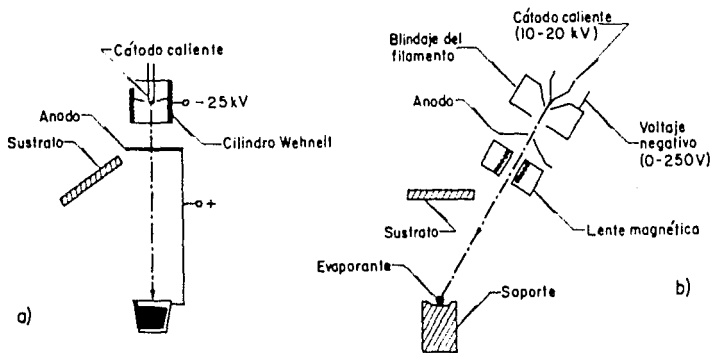


Fig 3.2 Cañones de electrones autoacelerados. a) Enfoque electrostático. b) Enfoque electrostático y magnético

Contrario a los cañones trabajo-acelerado, los cuales operan con voltajes menores a 10 kV, los voltajes para cañones de tele-enfoque son mucho mayores, por lo que se recomienda tener cuidado con los rayos X que pudieran producirse hasta alrededor de 10 keV de energía. Radiación generada por electrones más energéticos son solo parcialmente absorbidos con paredes de acero inoxidable. Se aconseja monitorear la radiación cerca de los cañones de alta energía.

3.3 Cañón de electrones con trayectoria curva del haz

En los cañones mostrados en las figs 3.2a y 3.2b la trayectoria del

haz de electrones es una línea recta. Por esto, el cañón o el sustrato deben estar montados a un lado. Esta restricción en los arreglos de fuente de electrones y sustrato puede ser eliminada produciendo una trayectoria curva del haz por medio de un campo magnético transverso. Si se fuerza a los electrones a tener una trayectoria curva, esto también permite que la separación efectiva entre la estructura del cañón y la fuente de vapores no requiera de grandes distancias, con lo cual pueden lograrse cañones de electrones muy compactos.

Un ejemplo de un cañón de electrones del tipo con trayectoria curva se muestran en la fig 3.3a y 3.3b. El campo magnético se suministra por un electroimán o un imán permanente; la ventaja de usar un electroimán es que permite enfoque durante la operación. También puede unirse una fuente de voltaje variable que permite realizar ajustes en el enfoque. Los cátodos usados generalmente son alargados para permitir una área grande y poder lograr una emisión de electrones con altas corrientes.

Esto permite la operación de cañones con voltaje por debajo de 10 kV sin sacrificio de potencia. Aunque el cátodo está cerca del evaporante se encuentra en una posición desalineada respecto del haz, y además se protege de depósitos y erosión debidos a los iones. Este tipo de cañones son los que más se han comercializado debido a que son muy compactos y no están limitados en la rapidez de evaporación. Existen en el comercio cañones que van de 2 a 10 kW con voltaje de aceleración de 3 a 10 kV. Usan un crisol de cobre enfriado por agua y están horneados para evitar el desprendimiento de gases. Estos cañones pueden alcanzar temperaturas hasta de 3500 °C de manera que metales refractarios así como óxidos pueden ser evaporados.

Uno de los problemas encontrados en los cañones de electrones es el monitoreo de la rapidez de evaporación. La generación incontrolada de iones positivos interfiere con el funcionamiento de los monitores de rapidez de ionización. Los monitores que funcionan con un cristal-oscilador también tienden a dar valores erróneos debido a la acumulación de cargas. Sin embargo, es posible eliminar partículas cargadas de los vapores que entran al dispositivo monitor por medio de una

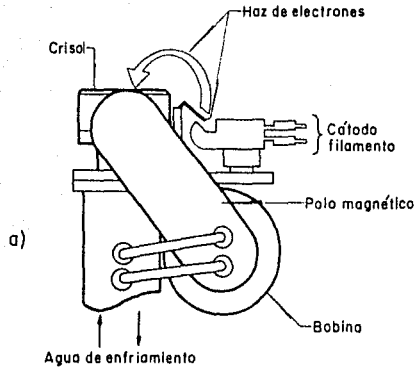


Fig 3.3a Cañón de electrones con trayectoria curva del haz y enfriado con agua. Enfoque con bobina

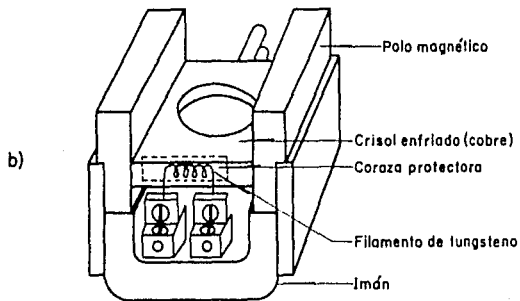


Fig 3.3b Cañón de electrones con trayectoria curva del haz y enfriado con agua. Enfoque con imán permanente

mallá electrostática. Los electrones desviados también pueden ser conectados por el sustrato y si este es un aislante, se pueden alcanzar potenciales de algunos cientos de voltios. Se ha llegado a observar descargas que son catastróficas ya que dañan la superficie donde se está depositando la película. Esto puede evitarse permitiendo que el sustrato flote eléctricamente o que se mantenga el potencial del filamento. La última situación lleva a un bombardeo moderado del sustrato por iones positivos, que pueden mejorar la fuerza de adhesión de la película pero puede afectar la nucleación o crecimiento de la película.

3.4 *Crisoles y materiales evaporantes con cañón de electrones.*

Los diferentes métodos que sirven como sostén de los materiales en el calentamiento por bombardeo de electrones se han mostrado en las figs 3.1, 3.2 y 3.3. Debido a las limitaciones con el método de gota colgante, el tipo preferido de sostén es el cobre enfriado con agua. Aunque el evaporante está en contacto con la superficie de soporte, la interacción química es despreciable. Esto se debe a que un casco de evaporante sólido se mantiene en la interfase y separa el material fundido del soporte. Un sobrecalentamiento y diseminación de tal material fundido sobre la base del soporte puede conducir a pérdidas excesivas de calor y por tanto a una rapidez de evaporación reducida. En la fig 3.1b se muestra como evitarse este problema evaporando de una barra pequeña para separar la superficie fundida del pedestal. También se ha usado un sumidero de calor masivo de tungsteno sin enfriamiento con agua, pero la duración del experimento se limita solo a algunos minutos. Otra alternativa para reducir pérdidas de calor es el empleo de compuestos refractarios en lugar de metales.

La ventaja de evaporación sin interacción con el soporte se puede perder si el contenedor se llega a calentar mucho o si la energía de vaporización se suministra indirectamente por medio de un bombardeo al crisol. La selección de los materiales del soporte para un evaporante dado está sujeto a las mismas reglas que el calentamiento por resistencia o inducción.

El calentamiento por medio de un haz de electrones ofrece otras ventajas como son mayor simplicidad de construcción, un suministro de más calor en la forma direccional o menor agitación de la sustancia fundida. Como ejemplos para el uso de esta técnica pueden mencionarse la evaporación de Ni y Fe usando crisoles de molibdeno recubiertos con Al_2O_3 o ZrO_2 , la de Ge con crisoles de SiO_2 o tungsteno y de Be, Cu, Au con crisoles de BeO , Al_2O_3 o ZrO_2 . También se puede mencionar el uso de crisoles de grafito, tantalio o molibdeno usando el bombardeo de electrones para calentamiento.

Esta técnica de cañón de electrones también puede ser usada para evaporar compuestos, con la condición de que estos no se descompongan al calentarse. Para un conocimiento más amplio en este tema puede consultarse la ref (7). Como ejemplos pueden citarse la evaporación de SiO_2 , SiO , MgF_2 , Al_2O_3 , CeO_2 , TiO_2 , ZrO_2 y ZnS . Cuando se desean evaporar materiales dieléctricos, se recomienda usar soportes que sean eléctricamente conductivos para evitar acumulación de cargas y deflexión de los electrones provenientes del haz.

Aunque esta técnica es universal y muy versátil para evaporación, se recomienda no usarse si existen alternativas que sean más fácilmente controladas como lo es el calentamiento por resistencia. Este método es de importancia práctica en aquellos casos donde se desea una alta pureza de la película y que no puedan encontrarse materiales que puedan usarse como crisoles. Algunos ejemplos son la evaporación de películas de sílice epitaxial y metales refractarios de alta pureza como Ta, Nb, W y Mo, los cuales requieren temperaturas entre 3000 y 3500 °C. La evaporación de carbón y boro son casos donde esta técnica es muy conveniente. Por último puede mencionarse que los crisoles enfriados se usan para evaporar platino, Al, Ni y Fe.

3.5 Diseño de un cañón de electrones

La obtención de espejos de primera superficie es el objetivo de esta tesis, por lo cual se diseñó un cañón de electrones para evaporar directamente vidrio sobre plata, esto permitirá lograr espejos de plata de primera superficie con tamaños hasta de 70 x 70 cm, con película

protectora de SiO_2 , debido a que con el SiO_2 la abrasión es más desfavorable y no se puede evaporar con procesos térmicos.

Para llevar a cabo el diseño del cañón de electrones se hicieron las siguientes pruebas:

- Se hizo el estudio de 2 tipos de imanes, los cuales deberían cubrir las características necesarias para el funcionamiento del cañón, es decir que el campo magnético al interactuar con los electrones, tuviera un valor adecuado para enfocarlos sobre el crisol.

Se contaba con un imán gris y uno rojo del tipo comercial (Alnico) con diferentes campos magnéticos cada uno.

IMAN GRIS

Este imán tiene las siguientes características:

- Resultó ser más grande de lo necesario
- Su campo es demasiado fuerte (450 Gauss) por lo que el radio de curvatura del haz sería muy pequeño y saldría del centro del crisol.

IMAN ROJO

Este imán tiene las siguientes características:

- tiene el tamaño adecuado y requerido para el diseño.
- Su campo es el adecuado para el funcionamiento del cañón (161 Gauss), ya que haciendo los cálculos del campo requerido se obtienen 152 Gauss, lo que significa que un campo de 161 Gauss sirve perfectamente y da una tolerancia $\pm 10\%$ (más adelante se da información para obtener los cálculos de los campos y su tolerancia). Ver fig 3.4.

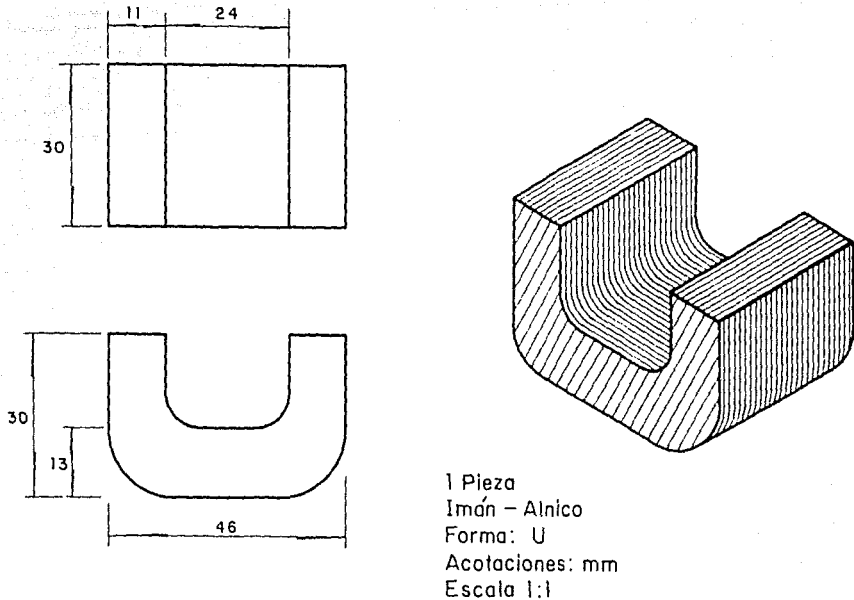


Fig 3.4

A los 2 imanes se les midió el campo por efecto Hall (EFECTO HALL): Hall descubrió que cuando una placa metálica por la que pasa una corriente I se coloca en un campo magnético perpendicular a ella, aparece una diferencia de potencial entre los puntos opuestos en los bordes de la placa. Este fenómeno se denomina efecto Hall, ref (10)).

Esta medición fué hecha en un Gaussmetro que se encuentra en el Instituto de Física, el cual es muy preciso ($\pm 2\%$).

Para poder realizar esta medición se diseñaron separadores especiales para que no se pegaran las placas y para que se quedaran perfectamente paralelas; dado que estas son de fierro, y ya que deben quedar en forma perpendicular al imán es necesario sujetarlas.

El cañón de electrones consta de:

- 2 placas de fierro perpendiculares al imán, de 12.5 mm de ancho, 51.5 mm de profundidad y 39 mm de altura, este tamaño se dedujo al estimar el campo necesario entre las 2 placas.

- Una placa de cobre de 12.5 x 71.5 x 70.0 mm
- Un soporte de aluminio de 10.0 x 71.5 x 70.0 mm (para la placa de cobre).
- Un imán de 46.0 x 30.0 x 30.0 mm
- Un soporte para el imán de 11.0 x 15.0 x 70.0 mm
- Crisoles de grafito de 5.0 x 11.0 x 16.0 mm
- Un dispositivo de enfriamiento (a base de agua), que consiste en 3 orificios. Dos que atraviesan la placa de cobre en forma longitudinal y el tercero en forma transversal, los cuales llevan a cabo todo el recorrido en donde se encuentra el crisol.

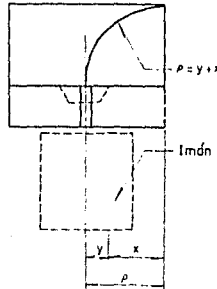
El diseño de la parte definitiva del cañón de electrones se muestra al final de este capítulo.

Para el funcionamiento del cañón se requiere de una fuente de voltaje con variación de 3.5 kV a 4.5 kV con 60 mAmp mínimo de corriente del haz debido a lo siguiente:

Cuando al filamento se le induce corriente empieza a liberar electrones pero necesitan que se les transfiera energía de movimiento; para esto se requiere un alto voltaje, que va a partir de cero hasta llegar al voltaje requerido $\cong 4$ kV. Una vez liberados los electrones del filamento, adquieren una energía cinética que va a ser constante al llegar al campo magnético entre las placas de fierro, de ahí, la velocidad del electrón se vuelve constante hasta llegar al centro del crisol, en donde va a evaporar al material en experimentación. En el instante en que los electrones tienen contacto con el material toda su energía cinética se transforma en energía calorífica, la cual a estas energías permite que se logren temperaturas del orden de 3000 °C.

Con esta energía de 4 keV se logrará la evaporación del SiO_2 sin embargo, es conveniente dejar una tolerancia para hacer ajustes posteriormente (se obtendrá más adelante) para el funcionamiento del cañón.

Conociendo que el campo del imán es de 161 Gauss (medición directa del Gaussmetro del Instituto de Física) y para una variación de 3.5 kV a 4.5 kV, el radio de curvatura de los electrones dentro del campo se encontrará en el siguiente intervalo.



De las tablas Energía Cinética vs rigidez magnética $B\rho$ para electrones (ver apéndice), encontramos que para una energía de 3.5 keV, la:

$$B\rho = 202 \text{ y ya que } B = 161 \text{ Gauss, entonces}$$

$$\rho = \frac{202}{161} = 1.25466 \text{ cm (radio de curvatura)}$$

Para $E = 4.5 \text{ keV}$

$$B\rho = 228$$

Por lo que $\rho = \frac{228}{161} = 1.41615 \text{ cm}$, esta permitirá que si se cuenta con una fuente de alto voltaje de 3.5 kV a 4.5 kV se tendrá una tolerancia de $\pm 10\%$.

De manera mas formal estos cálculos se pueden obtener como sigue: ya que los electrones con carga eléctrica "e" adquirirán una energía cinética E de 4 kV, entonces la rigidez magnética ($B\rho$) se puede conocer de (ref 11):

$$E = m_0 C^2 \left(\sqrt{(e/m_0 C)^2 B \rho^2 + 1} - 1 \right) \quad (3.1)$$

donde

$$m_0 C^2 = (510.976 \pm 0.007) \text{ keV}$$

$$e/m_0 = (1.75890 \pm 0.000 02) \times 10^7 \text{ e.m.u g}^{-1}$$

$$C = (2.997930 \pm 0.000 003) \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

B campo magnético, en Gauss

ρ radio de curvatura del haz de electrones dentro del campo magnético, en cm

Se fijó como un parámetro de diseño el campo magnético del imán permanente como ya se mencionó anteriormente. En el comercio se consiguen estos con un material de Alnico, con campos magnéticos del orden de 160 Gauss. De la ec (3.1) para una energía de 4 keV la $B\rho = 214$, de manera que si $B = 160$ Gauss, entonces $\rho = 1.3$ cm, siendo este valor apropiado para el diseño de un cañón de electrones.

3.6 Construcción y puesta en marcha de un cañón de electrones.

Teniendo construido el cañón, hubo que hacer pruebas del mismo, percibiéndose que se tenían que afinar ciertas partes.

- Los soportes de aluminio en donde se hace la conexión del filamento y el alto voltaje.
- El cátodo que tiene que ser de acero inoxidable y además de un espesor de 0.5 mm.

Estos cambios se realizaron para lograr la máxima eficiencia en el funcionamiento del cañón.

Para poder hacer las pruebas del funcionamiento del cañón de electrones se requirió lo siguiente:

- Encontrar aisladores de cerámica que soporten alto voltaje (3.5 a 4.5 kV).
- Diseño de un aislador de alto vacío para la cámara evaporadora de 1.1 m de ϕ que existe en el Instituto de Física. (Para conectar alto voltaje al cañón de electrones).
- Comprar, hacer o localizar rondanas de cerámica de 9.5 mm de ϕ exterior y 1/8" de ϕ interior. (Para aislar alto voltaje \pm 4.5 kV)
- Búsqueda del filamento con las características necesarias para el funcionamiento del cañón.

La palabra cerámica se toma en sentido tal que comprende aquellos productos que se fabrican a partir de sustancias inorgánicas, primero moldeados y después endurecidos por el fuego. Antiguamente eso era tanto como decir artículos fabricados a partir de arcilla. En este siglo se han encontrado los medios para emplear los métodos de producción de cerámica con un cierto número de sustancias física y químicamente diferentes, pero la industria cerámica tiene como base un conocimiento más profundo de la arcilla. Químicamente, las materias primas clásicas, arcillas, pedernal y feldespato, son compuestas de sílice. Las propiedades que los hacen adecuados para la cerámica son precisamente aquellos por los cuales se diferencian de las restantes sustancias. Por lo tanto, es muy conveniente considerar las estructuras básicas y propiedades de los silicatos antes de estudiar las materias primas propiamente dichas.

Las mejores cerámicas para altos voltajes son:

	Rigidez dieléctrica (V/mm)	Constante dieléctrica
Porcelana	250 - 400	6.0 - 7.0
Zircon	250 - 350	8.0 - 7.9

Y por sus características se está usando una cerámica con compuestos de titanio que es para capacitores y piezas eléctricas (aisladores).

Ya modificadas las partes esenciales se buscaron aisladores de cerámica que soportaran alto voltaje (± 4 kV), dificultándose esto, debido a que en México no existen con las medidas que requiere el cañón.

El Instituto de Física, proporcionó material (cerámica) el cual se tuvo que adaptar al cañón de electrones (ver tablas ref 11).

Características de la cerámica

Propiedades

- Gravedad específica (g/cm^3)	3.5 - 5.5
- Absorción de agua (%)	0.0
- Coeficiente de expansión térmica 1°C (20 - 700) adimensional long/long	7.0-10.0x10 ⁻⁶
- Conductividad térmica ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{cm}/\text{s}/^\circ\text{C}$)	0.008 - 0.01
- Resistencia a la tensión (Psi)	4.000 - 10.000
- Resistencia a la flexión (Psi)	10.000 - 22.000
- Resistencia al impacto (ft-lb; 1/2-1n)	0.3 - 0.5
- Módulo de elasticidad (Psi)	10 - 15 x 10 ⁶
- Resistencia térmica de choque	Pobre
- Rigidez dieléctrica (volts/mm) ambiente (Ω/cm^3)	50 - 300
- Resistividad a temperatura	10 ⁸ - 10 ¹⁵
- Factor de pérdida (Psi)	0.0002 - 0.050
- Constante dieléctrica (adimensional)	15 - 10.000

Para probar el funcionamiento de la cerámica adquirida se calculó su voltaje máximo el cual se muestra a continuación.

Primero se sabe que el $E_{\text{rup}} = 0.08 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ del aire (ref 12). Esto no se toma en cuenta debido a que las pruebas se hacen en alto vacío, por lo que pasamos al cálculo directo del $V_{\text{máx}}$, de tablas (ref 11).

sabemos que

$$V = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = Ed \text{ (voltios)}$$

de donde

Voltaje = Erup d donde d = distancia entre placas

De tablas de propiedades eléctricas de materiales.

$$\text{Erup mín} = 50 \text{ V/mm}$$

$$\text{Erup máx} = 300 \text{ V/mm}$$

Entonces

$$V_{\text{mín}} = \text{Erup mín} d = 50 \frac{\text{V}}{\text{m/m}} 35 \text{ m/m}$$

$$V_{\text{mín}} = 1,750 \text{ V}$$

de la misma manera obteniendo el $V_{\text{máx}}$ se tiene

$$V_{\text{máx}} = \text{Erup máx} d = 300 \frac{\text{V}}{\text{m/m}} 35 \text{ m/m}$$

$$V_{\text{máx}} = 10,500 \text{ V}$$

Por lo que se concluye que la cerámica que utilizamos es correcta ya que resistió una diferencia de potencial de ($\pm 4.5 \text{ kV}$).

Ya teniendo la cerámica requerida para aislar alto voltaje, se buscó información sobre rondanas de cerámica. Con el material proporcionado por el Instituto de Física y con la ayuda de un microtomo (corta desde 0.5 mm de espesor) que se encuentra también en dicho Instituto se pudo cortar las rondanas que necesitábamos ($\phi \text{ ext} = 9.5 \text{ mm}$; $\phi \text{ int} = 1/8"$; $\text{Esp} = 1.5 \text{ mm}$), ya verificado todo el aislamiento, hubo la necesidad de medir nuevamente el campo requerido para el funcionamiento del cañón en el Gaussmetro. Después de esta medición se tuvieron que soldar las barras de fierro, las cuales deben estar totalmente paralelas entre sí y perpendiculares a la pieza de cobre donde está el crisol; estas deben estar paralelas para que el campo entre ambas sea uniforme y para deflectar el haz de electrones sobre el crisol en donde se encontrará la sustancia a evaporar.

Nuevamente se midió el campo, ya que este no debe cambiar su magnitud en lo calculado.

Otro de los problemas que se han tenido, es el de conseguir el filamento que requiere el cañón de electrones, pero tampoco hay en existencia en el mercado nacional, ya que es de importación, por lo que se acondicionó un filamento de un faro de halógeno de coche con las características apropiadas (Marca Flosser; tipo tungsteno (12 V, 100 W) que se requieren para la suficiente producción de electrones en el cañón. Para las pruebas finales del funcionamiento total del cañón de electrones se requiere de una fuente especial de alto voltaje (no se cuenta con una fuente de este tipo ± 4 kV, en el Instituto de Ingeniería), por lo que fué proporcionada una en el Instituto de Física.

- La primera prueba que se realizó en ambas entradas se llevó a cabo con un aparato (meguer), el cual dió una resistencia casi infinita en los aisladores de cerámica. Es un medidor de aislamiento con las siguientes características. 500 voltios a 1000 Megohms
- Para la segunda prueba se diseñó un atravesador para la cámara evaporadora (en alto vacío) con aisladores de cerámica que soportaron alto voltaje (4 500 V), y haciendo buen vacío, esto se logró adaptando dos bujías de automóvil, en las cuales se hicieron suficientes pruebas para probar su eficiencia y resistencia y comprobando su aislamiento en alto vacío; esto se llevó a cabo utilizando las rondanas de las bujías como sellos de vacío, funcionando estas perfectamente fig 3.5
- Para la tercera prueba de aislamiento en las entradas de alto voltaje se cambiaron las dos piezas de cerámica, debido a que se fracturaron y además solo aguantaron 2 700 voltios; siguiendo con la prueba de aislamiento ya cambiadas ambas piezas, funcionó perfectamente, tendiendo la resistencia a la ruptura requerida en la cerámica (± 4.5 kV)
- Finalmente se hizo la prueba de encendido del filamento con una fuente de corriente directa que trabaja a 12 voltios con 10 Amp, el

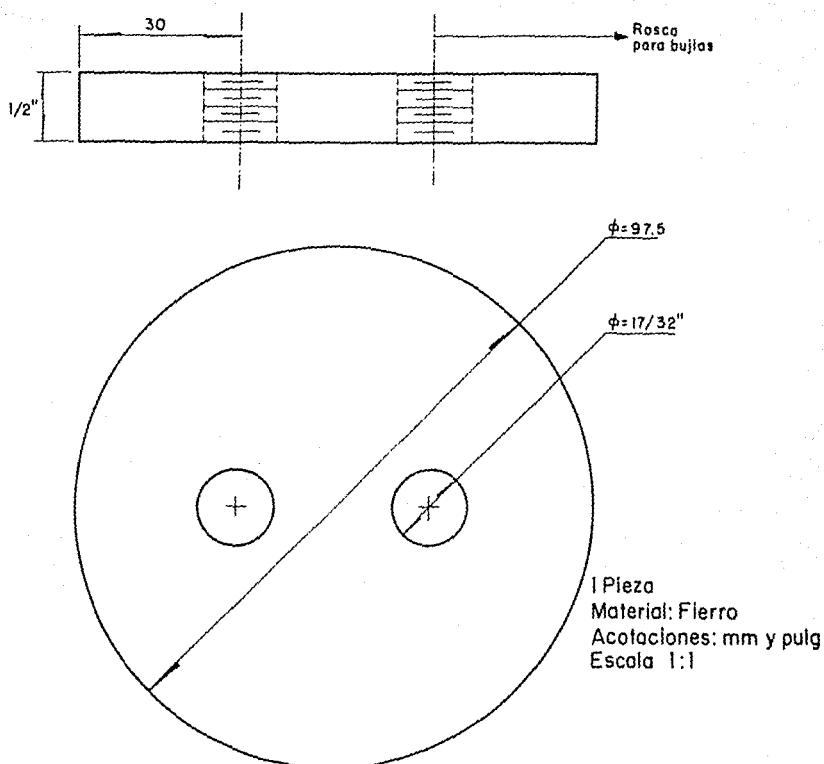


Fig 3.5 Brida (Aislador de alto vacio) para colocar bujias y conectar fuente de 4 kV

filamento encendió con los requerimientos mínimos, 4.5 voltios a 1.5 Amp.

Por último se realizó la prueba del cañón con una fuente de 4 kV. El vacío dentro de la cámara fue de 5.6×10^{-5} Torr.

Al prender la fuente de 4 kV hubo una descarga al empezar a meter corriente en el filamento. Posteriormente se volvió a encender pero se puso un voltmetro a la entrada de las bujias; se midió un voltaje de

5.9 kV, y al empezar a meter corriente al filamento este baja a 3.9 kV.

El filamento se encendió otra vez, alcanzándose una corriente de haz máximo de 60 mA.

Al abrir la cámara evaporadora se notó que el papel que se había colocado entre el campo magnético estaba quemado. (En la preparación del cañón de electrones, para su prueba de funcionamiento, se le colocó un papel filtro entre el campo magnético sobre la placa de cobre, para saber donde caía el haz, así como también su tamaño. Cualquier papel tiene la ventaja de no quemarse por completo ya que hay ausencia de oxígeno y si se dejar marcado el lugar exacto de caída del haz). Esto indicó que el haz de electrones llegó a donde se colocará el crisol. Se notó una mancha como se indica en la figura 3.6. Con esto se demuestra que el haz está disperso pero no se sabe que tanto, por lo que será necesario instalarle un sistema de refrigeración y poner un vidrio tipo Vycor para ver el tamaño del haz.

Finalmente se diseñó el sistema de refrigeración del cañón, el cual funciona perfectamente, así como también se hicieron pruebas para reducir el tamaño del haz de electrones, percibiéndose que la única forma de reducir el haz es disminuyendo la distancia entre el filamento y el cátodo.

El cañón de electrones construido se muestra en la fig 3.7. Este está trabajando actualmente en una cámara evaporadora de 1.1 m de diámetro con la que se alcanzan vacíos del orden de 10^{-5} Torr, y se alcanzan corrientes del haz de 60 hasta de 150 mAmp.

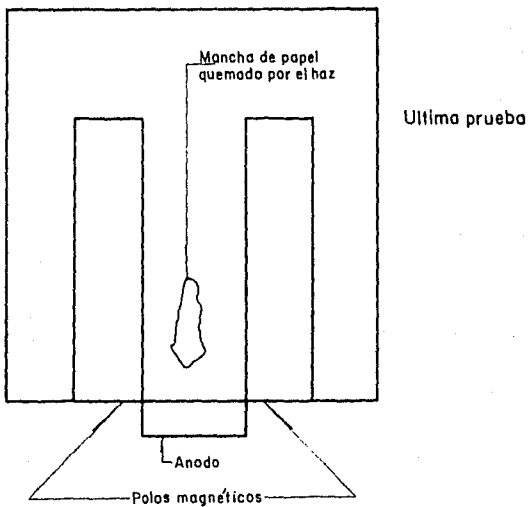
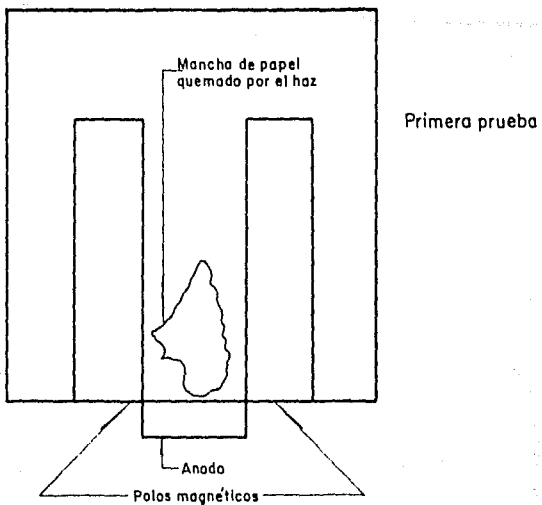


Fig 3.6 Manchas dejadas sobre papel filtro, por el haz de electrones

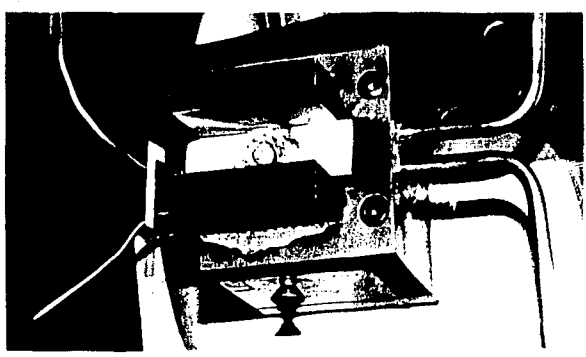
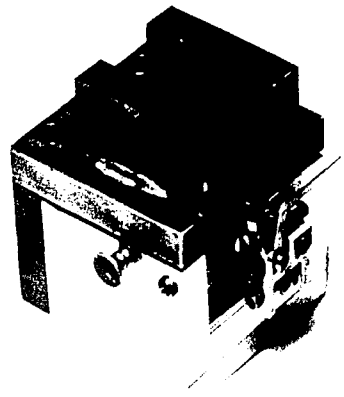
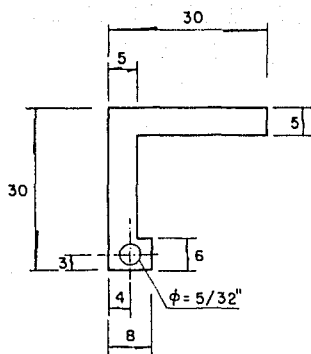


Fig 3.7 Cañón de electrones



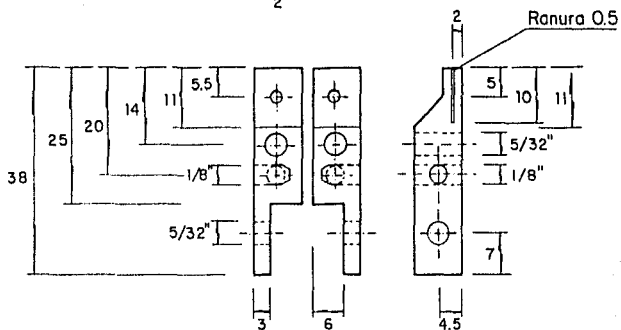
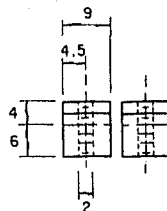
1 Pieza

Material: Acero inoxidable

Acotaciones: mm y pulg

Escala 1:1

Deflector



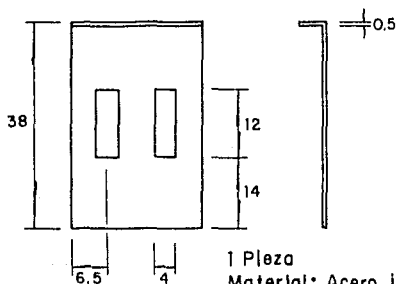
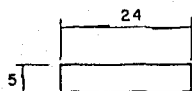
2 Piezas

Material: Aluminio

Acotaciones: mm y pulg

Escala 1:1

*Soportes para alto voltaje, filamento, deflector
y cátodo*



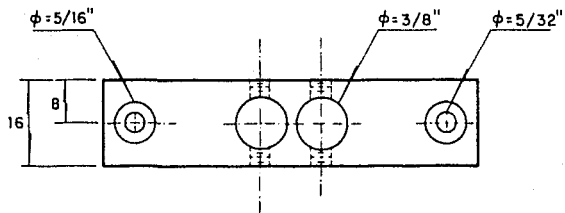
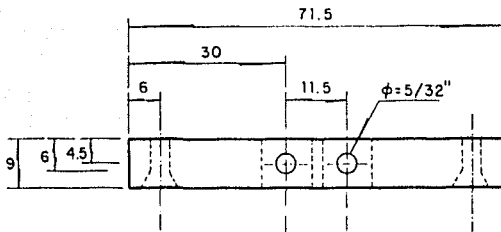
1 Pieza

Material: Acero inoxidable

Acotaciones: mm

Escala 1:1

Cátodo



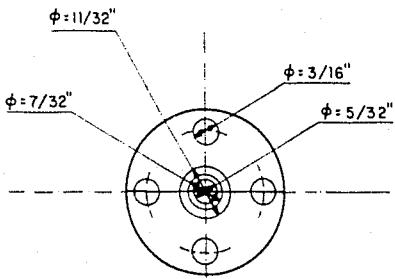
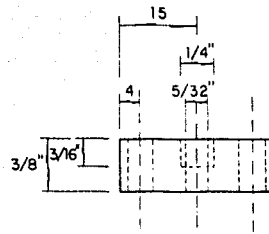
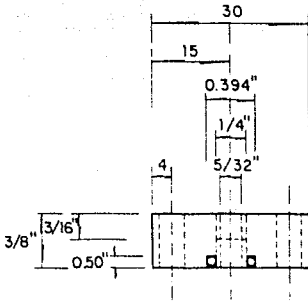
1 Pieza

Material: Aluminio

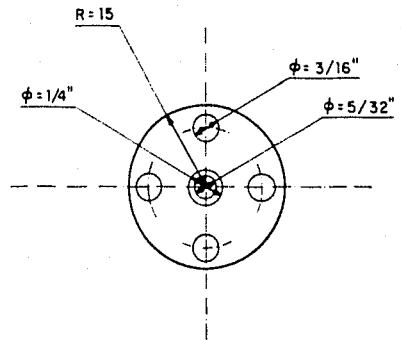
Acotaciones: mm y pulg

Escala 1:1

Soporte para deflector, soportes, filamento y cátodo

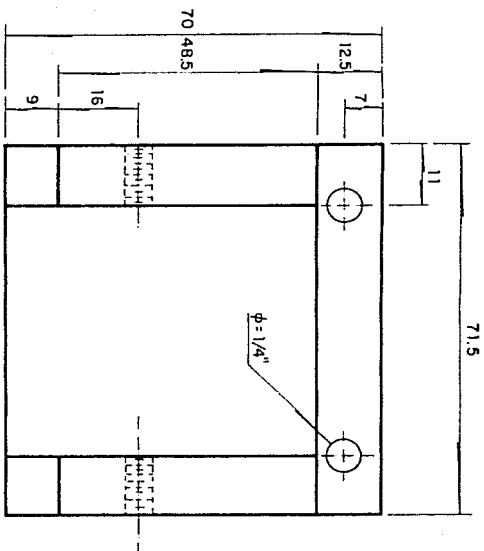


2 Piezas
 Material: Latón
 Acotaciones: mm, pulg, mil de pulg
 Escala 1:1

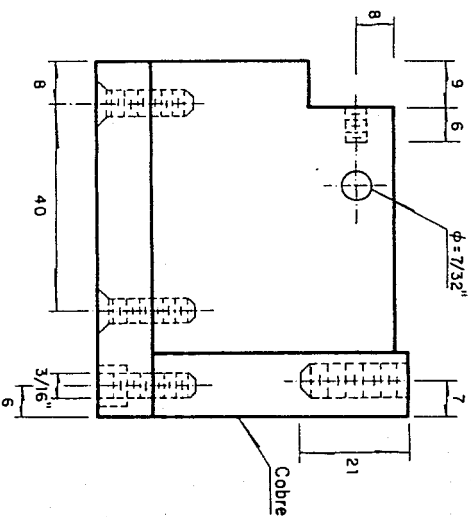
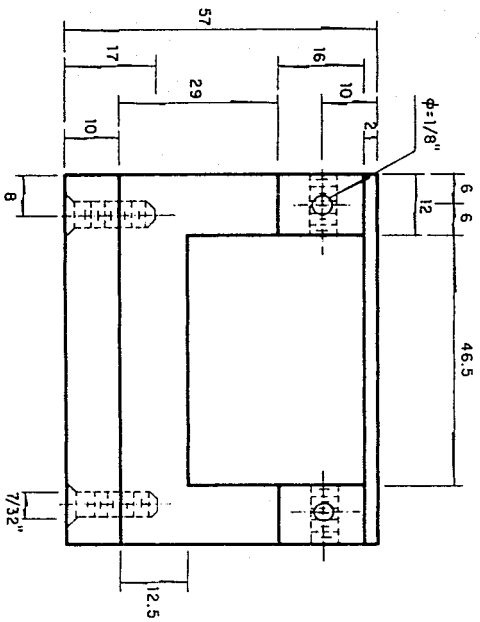


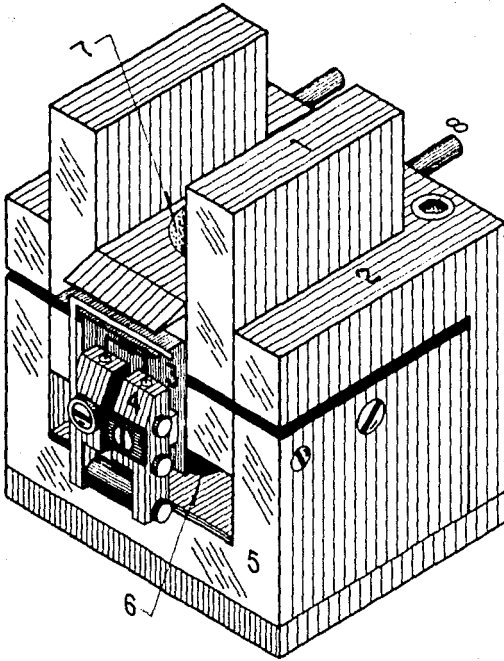
2 Piezas
 Material: Latón
 Acotaciones: mm y pulg
 Escala 1:1

Bridas para sujetar los tubos del sistema de enfriamiento del cañón de electrones



1 Pieza
 Material: Aluminio y Cobre
 Acotaciones: mm y pulg
 Escala 1:1





- 1 Acero (polo magnético)
- 2 Cobre
- 3 Acero inoxidable (cátodo)
- 4 Aluminio (montura para filamento de tungsteno)
- 5 Aluminio
- 6 Imán permanente de Alnico
- 7 Crisol
- 8 Tubería para refrigeración

Materiales utilizados para la fabricación del cañón de electrones

CAPITULO 4
CAMARA DE EVAPORACION (ALTO VACIO) PARA LA
FABRICACION DE PELICULAS DELGADAS

CAPITULO 4 CAMARA DE EVAPORACION (ALTO VACIO) PARA LA FABRICACION DE PELICULAS DELGADAS

4.1 EQUIPOS PARA PRODUCIR VACIO Y SISTEMAS DE MEDICION

La presión de un gas es una característica de la acción de sus moléculas sobre las paredes del recipiente que lo contiene y depende del número y de la velocidad promedio con que chocan, y como la presión depende de la energía cinética de las moléculas, también depende de su temperatura. Por lo que se observa que si el número de moléculas en el recipiente disminuye, la presión será menor, aumentando la distancia de separación entre ellas y haciendo mayor el camino o trayectoria media libre, la cual es inversamente proporcional a la presión. Por lo tanto, en un volumen se tendrá alto vacío si la trayectoria media libre de sus moléculas es mayor que las dimensiones del recipiente, (ref 17).

Un vacío ideal es un espacio que no contiene partículas, gases, vapores u otra materia, y que consecuentemente no tiene presión. Debido a que esta condición no existe, no se puede obtener un vacío ideal. Por lo tanto, un vacío fabricado es expresado en términos relativos comparados 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

presión atmosférica la cual a nivel del mar tiene un valor de 760 Torr. Para medidas de vacío o presión parcial, las unidades de uso más común son los Torr y mTorr, y 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.

El principal objetivo en el diseño, construcción y operación de una cámara de vacío, es la prevención de pérdidas de vacío.

Para fijar límites sobre tolerancia de pérdidas en Torr/h, se debe tomar en cuenta el material que se va a tratar y la duración del ciclo de tratamiento. Una forma de probar si existen pérdidas de vacío, es evacuar la cámara a 10^{-4} Torr por lo menos en una hora, cerrar la válvula de vacío que conecta la cámara con la bomba y medir la elevación de la presión en un intervalo de tiempo especificado.

Una vez que una cámara de vacío ha sido instalada y puesta en operación, usualmente solo se corrigen las pérdidas de vacío en los sellos alrededor de cualquier punto del recipiente que esté sujeto a operaciones de abrir y cerrar, deslizamiento, rotación o sobrecalentamiento.

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 la atmósfera se vuelven a oxidar rápidamente, lo que afecta la eficiencia del sistema de bombeo.

La velocidad de bombeo, S, es la velocidad con que se evacúa un cierto recipiente, sin tomar en cuenta las pérdidas. Su cálculo se puede realizar de dos formas, suponiendo presión constante y volumen constante.

La velocidad de bombeo real es igual a la velocidad de bombeo menos las pérdidas ocasionadas por la resistencia de los conductos por los que se hace la evacuación, la desgasificación superficial y la vaporización de los materiales, necesitando por ello incrementar la velocidad de bombeo de 10 a 100 veces.

La velocidad de bombeo es función de la presión existente dentro del recipiente por evacuar y por lo tanto se caracteriza por no ser un número fijo. A mayor presión la cantidad de moléculas por extraer será mayor que cuando se tenga una presión mucho menor.

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 a la presión y volumen de gas, o velocidad de bombeo requerida para un proceso específico y tamaño de la cámara de vacío.

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

La fig 4.1 muestra una comparación de intervalos de presiones en relación con la presión atmosférica y los intervalos de operación de las bombas más usuales.

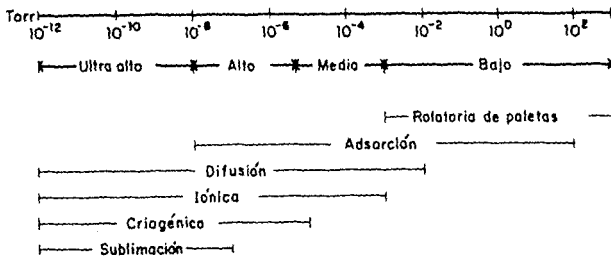


Fig 4.1 Comparación de rangos de vacío e intervalos de operación de las bombas más usuales

Las bombas de prevacío o primarias son bombas 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. La más común de este tipo es la bomba mecánica rotatoria de paletas en aceite fig 4.2

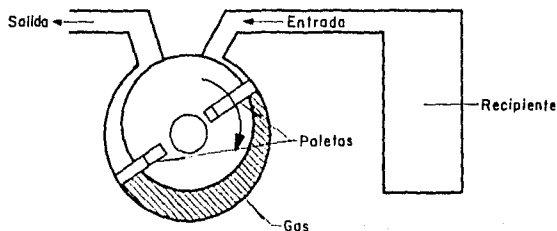


Fig 4.2 Diagrama esquemático de una bomba mecánica tipo rotatoria

En cada ciclo, un volumen de gas del sistema cerrado se expande y es atrapado dentro de una cámara de la bomba.

Entonces es comprimido por el movimiento de las aspás, paletas o pistón que se encuentra en el interior de la bomba y es expelido a través de una entrada equipada con una válvula de descarga. La presión de vapor del aceite de la bomba debe ser cercana a 1 mTorr y debe evitarse la condensación de agua, pues contamina el aceite afectando el valor final de la presión.

En las bombas de alto vacío normalmente no se tienen partes mecánicas móviles. A altas presiones se llena cualquier volumen creado rápidamente, pero a bajas presiones este efecto desaparece y el gas es difícil de extraer con bombas mecánicas, 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 (ref 17).

Para lograr niveles de vacío menores de 10^{-3} Torr generalmente se usan bombas de difusión de vapor que basan su funcionamiento en que un

chorro de moléculas pesadas (de aceite de baja tensión superficial o mercurio) golpean a las moléculas de gas empujándolas en la dirección de salida de la bomba ver fig 4.3

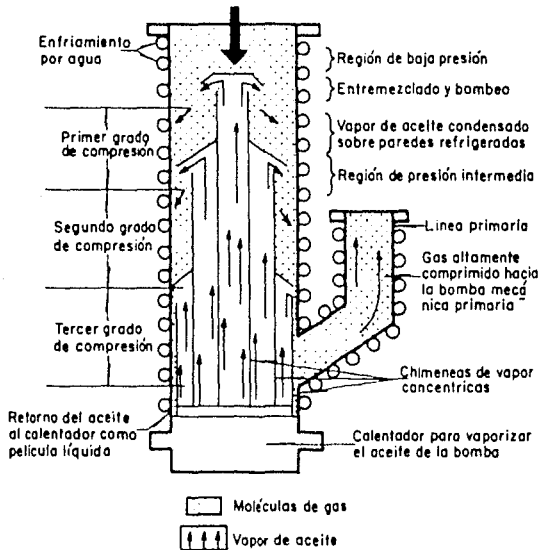


Fig 4.3 Bomba de difusión de vapor de aceite

El ciclo de operación consiste en que el líquido es calentado en la parte inferior y el vapor formado es forzado a subir dentro del calentador hasta las toberas, donde es expulsado y cae atrapando 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 primaria.

El enfriamiento de las paredes generalmente se hace con agua o con aire.

Las moléculas del líquido deben ser muy estables y pesadas para lograr transmitir una velocidad máxima a las moléculas de gas. Los factores principales que afectan el funcionamiento de cualquier bomba de vapor son del tipo de fluido que debe bombearse y el calor interior en el calentador.

Los aceites especiales son muy útiles para trabajar a bajas presiones de vapor (10^{-7} Torr), no son tóxicos y presentan un buen comportamiento al estar en contacto con diversos materiales usados en la construcción de sistemas de vacío, pero pueden romperse molecularmente cuando se calientan y se exponen al aire. El mercurio puede enfriarse rápidamente y no se descompone, pero presenta una elevada presión de vapor a temperatura ambiente, es tóxico y se contamina fácilmente.

Para reducir el regreso de las partículas de la bomba hacia la cámara se usa una trampa fría, que consiste de un arreglo de pantallas y paredes enfriadas con aire líquido o con agua, que tienen la función de condensar las moléculas de vapor, y que está colocada antes de la garganta de la bomba. La eficiencia de la trampa de condensación aumenta a medida que la temperatura del refrigerante disminuye.

Un sistema de vacío no solo cuenta con bombas para extraer el gas contenido en un recipiente, sino que requiere de elementos que permitan el control y medición de las presiones alcanzadas, tales como válvulas, medidores de presión y de temperatura. El flujo de gas del sistema de bombeo es controlado por válvulas de alto vacío que aíslan la bomba de difusión de aceite de la cámara y válvulas primarias de mariposa y de entrada que deben tener sellos especiales para servicio en vacío ver fig 4.4

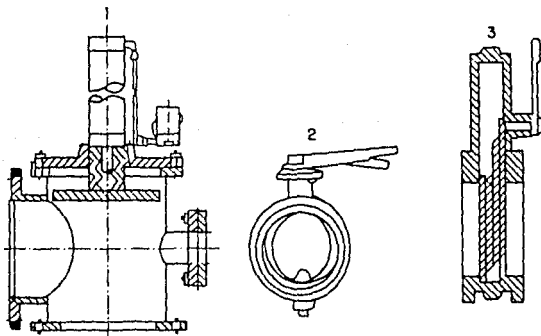


Fig 4.4 Tipos de válvulas usadas en un sistema de bombeo. 1) Válvula de alto vacío, 2) Válvula de mariposa y 3) Válvula de entrada

Los aparatos usados para medir la presión en sistemas de vacío son llamados manómetros, de los cuales existen varios tipos comerciales que se pueden usar entre la presión atmosférica y valores menores de 10^{-12} Torr. Para medir altas presiones se usan manómetros que registran la fuerza ejercida por el gas, mientras que para medir bajas presiones los manómetros basan su funcionamiento en propiedades como la conductividad térmica y la composición del gas entre otras.

Los manómetros más usados son el de conductividad térmica (tipo termopar) y los de ionización (tipo termiónico y tipo cátodo frío).

Los manómetros de conductividad térmica operan sobre el principio de que las pérdidas de calor de un objeto calentado continuamente en vacío dependen de la presión. Esto es verdad solo cuando la trayectoria media libre de las moléculas es comparable a las dimensiones del recipiente en el cual se coloca el objeto calentado. Este objeto puede perder calor a través de los conductos y por radiación hacia los alrededores (ref 17).

En el manómetro de termopar se mide el voltaje producido por un termopar soldado a un alambre que es calentado fig 4.5

Como la temperatura del alambre cambia en función de la presión, el termopar registra voltajes que se convierten en unidades de presión (usualmente mTorr). Los manómetros de este tipo, para producir el calentamiento pueden operar con corriente alterna rectificadas o con baterías, necesitan bajo voltaje y una corriente de calentamiento del orden de miliamperes. Con este tipo de manómetros se puede medir continuamente, puede ser expuesto al aire por años sin ningún peligro y la señal puede ser usada para activar otros controles, sin embargo requiere calibración para cada tipo de gas y su escala no es lineal, el intervalo de presiones que abarca es de 1 a 1000 mTorr.

Los manómetros de ionización sirven para medir valores menores de 1 mTorr. El manómetro de ionización termiónico basa su funcionamiento en la ionización de un gas por los electrones, emitidos de un filamento caliente, que son acelerados por un campo eléctrico, y producen un

número de iones positivos que depende del número de moléculas de gas presentes y por lo tanto de la presión.

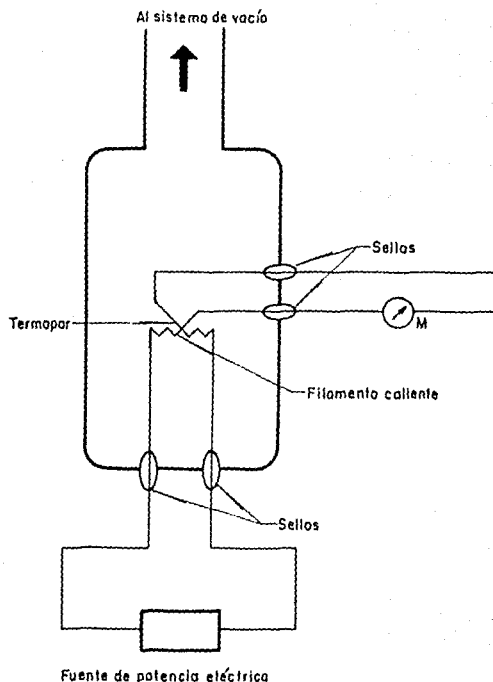
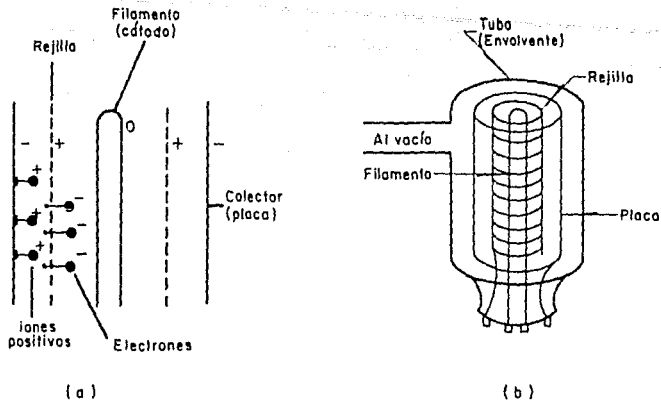


Fig 4.5 Principio de operación del manómetro de termopar

El principio básico de operación y su arreglo se muestra en la fig 4.6 en la que aparece el filamento, la rejilla y el colector, los cuales están montados en un tubo conectado al sistema de vacío. La rejilla que está a un voltaje positivo con respecto al filamento atrae a los electrones que se aceleran e ionizan las moléculas produciendo una corriente proporcional a la presión, pero solo cuando esta es baja. Los iones formados son recolectados y se mide la corriente producida. Este indicador es muy delicado pero bueno a bajas presiones, sin embargo su tiempo de vida es corto y es necesario desgasificar solo cuando se desea hacer la medición.



*Fig 4.6 a) Elementos de un manómetro de ionización termiónico
b) Arreglo físico*

El manómetro de ionización de cátodo frío (manómetro de Penning) ver fig 4.7, opera con el mismo principio básico del manómetro termiónico, pero la diferencia es que los electrones no son producidos por un filamento caliente, sino que se originan en los cátodos (C), mediante un campo magnético, perpendicular a los planos catódicos y anódicos, producido por el magneto (M), los electrones son forzados a moverse haciendo espirales para producir una mayor cantidad de iones, simplificando su medición.

Este tipo de manómetros tiene un circuito electrónico sencillo, construcción resistente, cubre un intervalo amplio de presiones, puede exponerse a la atmósfera, tiene una vida larga, es fácil de limpiar y lee la presión total. Sin embargo su precisión no es tan grande como la del manómetro termiónico. Además requiere un campo magnético y alto voltaje.

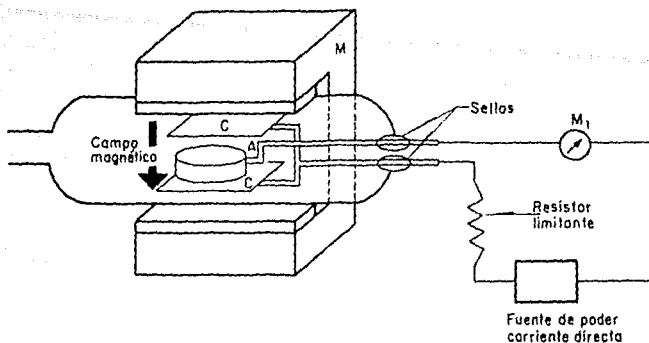


Fig 4.7 Montaje físico de un manómetro de cátodo frío

4.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO Y DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

El equipo utilizado está basado en una cámara de acero al carbono sin recubrimiento interno con un volumen de 1.7 m^3 , que originalmente fue diseñada para implantación de iones pesados y aluminizado, equipada con un sistema de bombas de vacío.

El sistema de bombeo para producir el vacío consiste en una bomba mecánica de paletas en aceite marca Sargent-Welch modelo 1397 que tiene una capacidad de 500 l/min y alcanza una presión de 10^{-2} Torr en una hora.

Para alcanzar una presión menor a 10^{-2} Torr, se cuenta con una bomba de difusión de aceite marca Leybold que tiene una capacidad de 4000 l/s y que utiliza aceite de baja tensión superficial tipo D.G.704. Como medio de enfriamiento de las paredes de la bomba se usa agua.

El sistema de vacío tiene una válvula de plato localizada en la línea primaria y otra válvula de plato que conecta a la bomba de difusión con la bomba mecánica. En la línea primaria, entre la válvula y la bomba de difusión existe una trampa criogénica enfriada con aire líquido que sirve para evitar el regreso de gases y vapores del aceite a la cámara condensándolos.

Al inicio del proceso de evacuación del tanque, se abre la válvula 1; al llegar a una presión aproximada de 10^{-2} mmHg, se abre la válvula 2 con la que se procede a realizar un mejor vacío en el tanque, ver fig 4.8

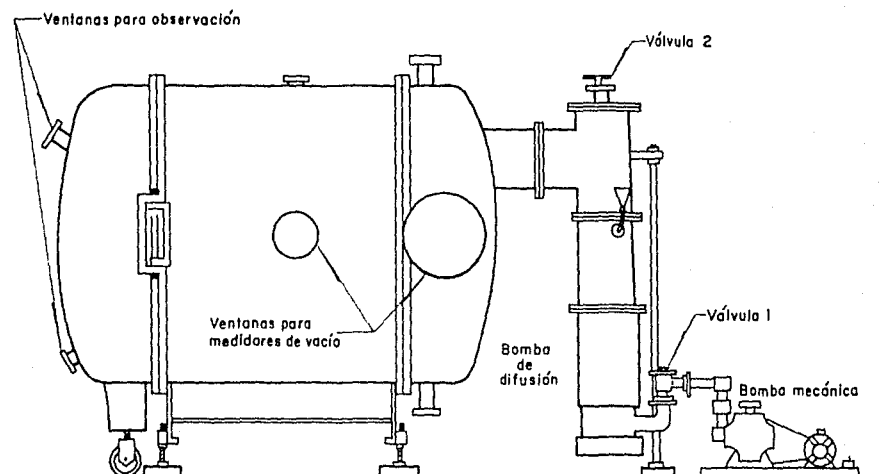


Fig 4.8

La cámara cuenta con ventanas que sirven para observar el desarrollo de las pruebas, así como también para colocar dispositivos y medidores de vacío entre otros, y con una puerta de acceso que cuenta con sellos que evitan la entrada de gas de la atmósfera al sistema.

En la fig 4.9 se muestra el sistema de vacío de 1.5 m^3 , en el cual se puede efectuar erosión iónica o descarga luminosa. En esta cámara evaporadora es posible obtener muestras de 0.5 m^2 ($70 \times 70 \text{ cm}$), (ref 14).

Para poder efectuar las evaporaciones con las cuales se obtienen los espejos de plata de primera superficie, se tuvieron que construir algunos aditamentos necesarios para la evaporadora de 1.5 m^3 ; estos se describen a continuación.

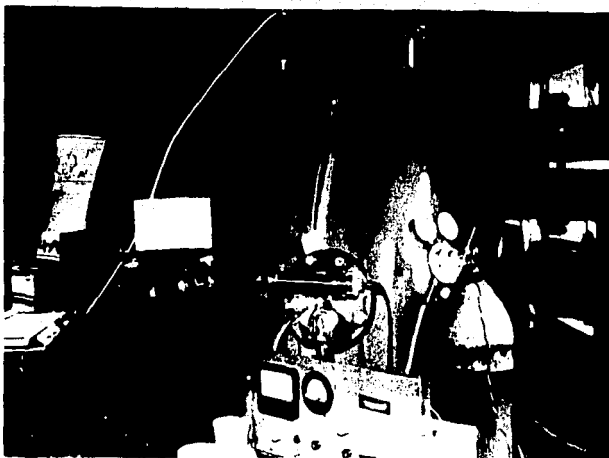


Fig 4.9 Evaporadora grande (1.5m³)

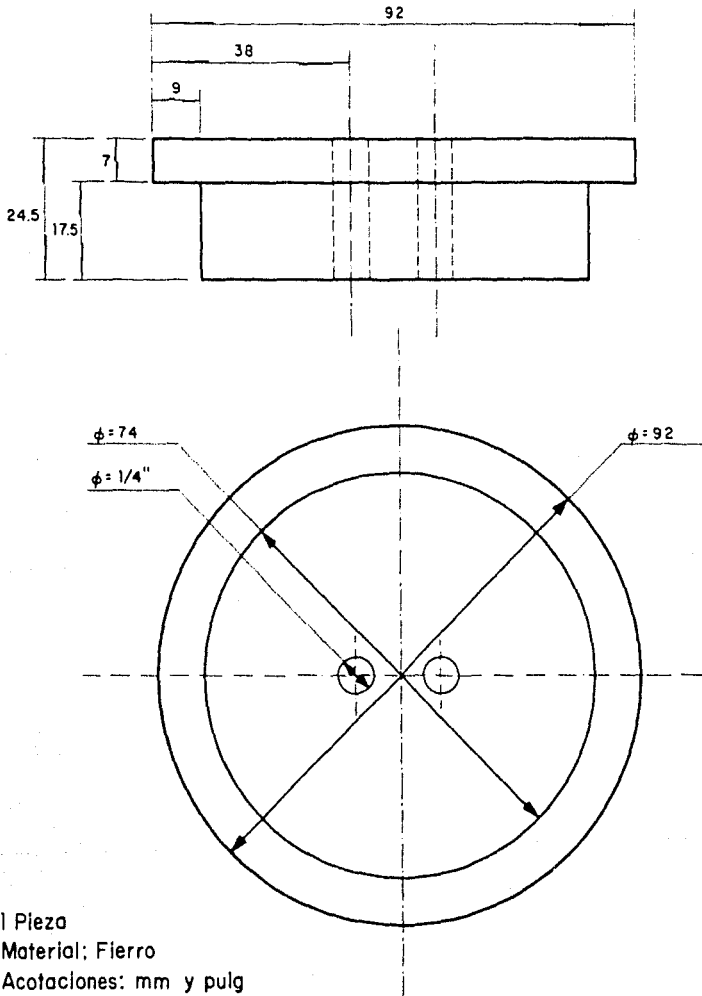
BRIDAS. Estas se ajustaron a las medidas de las ventanas, ya existentes en la evaporadora. Las dimensiones fueron las mismas de las ventanas, teniéndose cuidado con el diseño de la caja del "oring" para evitar fugas de vacío.

Una de las bridas se diseñó y acondicionó para conectar el alto voltaje, haciendo a su vez la función de atravesador de alto vacío, en su parte interior se conecta la alimentación de alto voltaje al cañón de electrones, así como en el exterior sus conectores tienen medidas específicas (1/4") para la fuente de alto voltaje que nos fue proporcionada en el Instituto de Física.

La otra brida se diseñó para la adaptación del sistema de enfriamiento del cañón de electrones, y su conexión dentro de la cámara evaporadora, ver figs 4.10a y 4.10b.

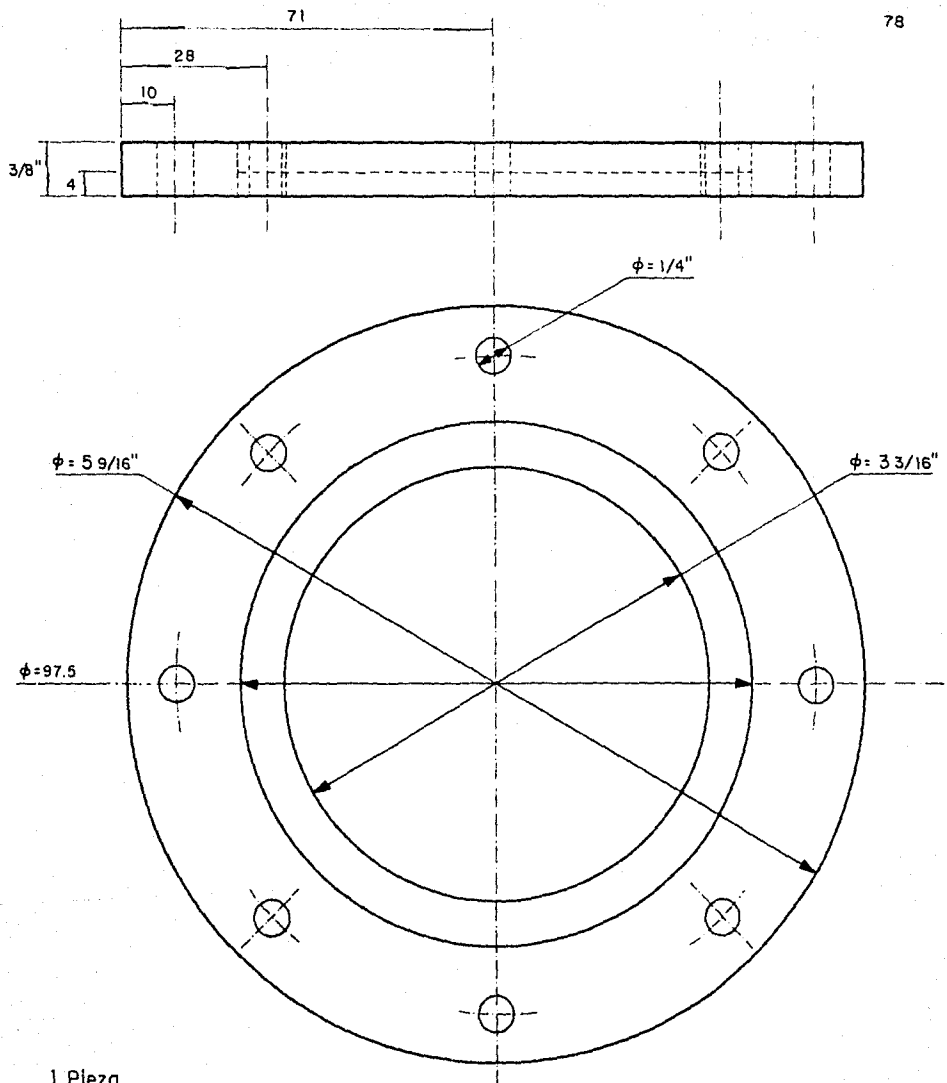
ESTRUCTURA SOPORTE. Se diseñó una estructura soporte para poder distribuir, y colocar adecuadamente el cañón de electrones, el medidor de

espesores y el sustrato de vidrio, ya que con esta distribución (colocando estos con medidas ya especificadas) la obtención de los espejos de plata será posible, ver fig 4.11.



1 Pieza
 Material: Fierro
 Acotaciones: mm y pulg
 Escala 1:1

Fig 4.10a Atravesador de vacío para el sistema de enfriamiento del cañón de electrones



1 Pieza
 Material: Aluminio
 Acotaciones: mm y pulg
 Escala 1:1

Fig 4.10b Brida de sujeción (travesador) de la cámara de alto vacío

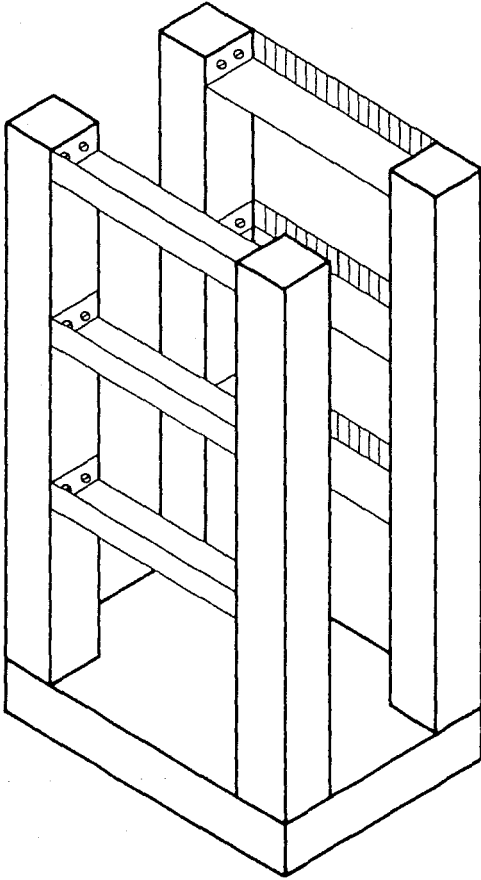
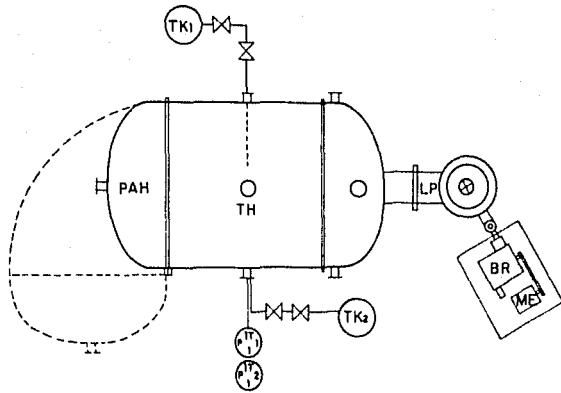
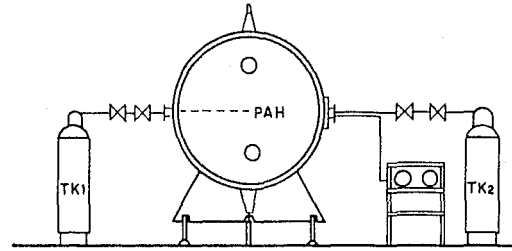


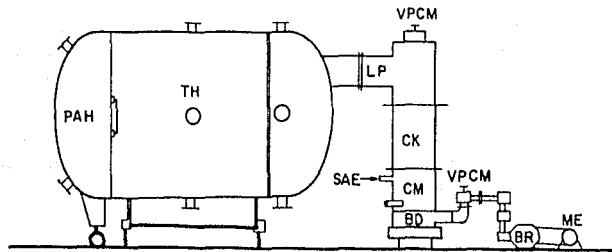
Fig 4.11 Estructura soporte



PLANTA



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

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

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

CAPITULO 5
DESARROLLO DE ESPEJOS DE PLATA
DE PRIMERA SUPERFICIE

CAPITULO 5 DESARROLLO DE ESPEJOS DE PLATA DE PRIMERA SUPERFICIE

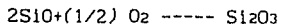
En el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. se están desarrollando espejos de plata de primera superficie para aplicaciones solares, el principal objetivo de esta investigación es desarrollar espejos de alta reflejancia, buena especularidad y que resistan las condiciones ambientales como la de la Ciudad de México, ya que es la mas agresiva en el país.

En todos se utiliza vidrio como sustrato, el material reflector es principalmente plata; también se han obtenido espejos de aluminio, (ref 15) La película protectora se obtiene evaporando Al_2O_3 y SiO en atmósfera de oxígeno, y aluminio en atmósfera de oxígeno, ya que se requiere lograr un avance en la obtención de una mejor adherencia de la plata al sustrato de vidrio. Se conoce de la literatura que la adherencia de la plata a cualquier vidrio no es buena, pero la adherencia de ésta a la alumina (Al_2O_3) si es buena.

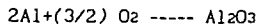
Se hace una evaporación de Al dentro de una atmósfera de O_2 para obtener una evaporación reactiva y lograr formar Al_2O_3 y lo mismo con el SiO si se desea formar Si_2O_3 , el cual es mas transparente que el SiO .

Las evaporaciones reactivas son las siguientes:

Para el SiO se tiene:



y para el Al.



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

1. Selección del sustrato.
2. Limpieza del sustrato.
3. Depositado del material de buena adherencia para el vidrio y la plata.
4. Depositado del material reflector.
5. Depositado del material de buena adherencia entre plata y película protectora.
6. Depositado del material protector.

Cada uno de los puntos anteriores es muy importante, debido a que de ellos dependen las características necesarias del espejo como son: alta reflejancia, alta durabilidad y costo razonable. Además de sus propiedades ópticas, el espejo debe tener una buena adherencia de la película reflectora en el sustrato y alta resistencia al ataque del medio ambiente. Para el depositado del material reflector y protector se usa el proceso de evaporación con cañón de electrones, que se realiza en una cámara de alto vacío, esta se encuentra en el Instituto de Física de la U.N.A.M.

5.1 SELECCION DEL SUSTRATO

Los espejos fueron elaborados usando un vidrio comercial (soda-lime), que tiene alto contenido de fierro, de 3 mm de espesor; se eligió este material como sustrato, porque en investigaciones anteriores se demostró que los espejos hechos con un sustrato de acrílico aluminiza-

do se degradan rápidamente al ser expuestos al medio ambiente y que los espejos de vidrio son más resistentes al deterioro mecánico y a los fenómenos de intemperismo. (ref 14).

Se usaron tamaños de 15x10 cm, éstos son más accesibles para su estudio al microscopio.

5.2 LIMPIEZA DEL SUSTRATO

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

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

5.2.1 METODOS QUIMICOS

1. Soluciones alcalinas. Las soluciones alcalinas se emplean para eliminar contaminantes grasosos y manchas sólidas o semisólidas. Los principales constituyentes de las soluciones alcalinas son compuestos de sodio (carbonatos, fosfatos, silicatos e hidróxidos), eliminan los contaminantes por uno o más de los siguientes mecanismos, (ref 15).

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

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

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

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

2. Soluciones ácidas. La limpieza con ácido emplea una solución de un ácido mineral u orgánico o una sal ácida en combinación con un agente humectante y detergente para eliminar óxido, aceite, grasa y otras impurezas de la superficie.

Para incrementar el poder de limpieza, se pueden agregar agentes antiespumantes, inhibidores y solventes.

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

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

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

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

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

5.2.2 METODOS FISICOS

1. Limpieza por calentamiento. Un método efectivo de limpieza es, calentando el sustrato, si la geometría lo permite, se puede realizar directamente con la flama de un mechero. Para vidrio y cerámica vidriada se requieren temperaturas menores a 1273 °K, energía suficiente para desorber las moléculas contaminantes de la superficie del sustrato, esto es debido a que la materia orgánica es oxidada y transformada en constituyentes volátiles.

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

2. Limpieza por descarga luminosa. De los diferentes procesos físicos usados en la limpieza de sustratos, la técnica por descarga luminosa es la más usada y la que mejores ventajas ofrece. Este proceso consiste en la exposición del sustrato a un plasma conocido como descarga luminosa; la descarga es establecida entre dos electrodos situados muy próximos al sustrato, de tal manera que la superficie quede dentro del plasma. Los voltajes usados en el proceso de descarga luminosa varían desde 500 a 3000 Voltios. Se usan electrodos de aluminio, porque éste material se erosiona lentamente en presencia de gases oxidantes y por lo tanto no hay un significativo depositado del material en la superficie del sustrato. Se pueden usar voltajes de corriente alterna o de corriente directa.

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

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

- a) Calentamiento directo debido al choque de partículas cargadas.
- b) Desorción de impurezas por el bombardeo continuo de electrones.
- c) Desorción de impurezas resultado del bombardeo de iones de baja energía o partículas neutras.
- d) Modificación de la superficie del vidrio por la adición continua de oxígeno.
- e) Aumento de la nucleación durante la subsecuente depositación de la película.

Los mecanismos d) y e) son los más importantes, de particular importancia para el sustrato de vidrio con alto contenido de SiO_2 , es el mecanismo e); ayuda a la formación de puentes oxidantes entre el vidrio y metales reactivos como el aluminio o el cromo.

Se ha demostrado en diversas investigaciones que la descarga luminosa es efectiva sólo en presencia de oxígeno, (ref 13).

5.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL DE ESPEJOS

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

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

5.3.1 LIMPIEZA DEL SUSTRATO

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

El desengrase de los sustratos se llevó a cabo, primero con un lavado de agua y detergente, usando un detergente comercial marca "ROMA", seguido de un desengrase con alcohol isopropílico, inmediatamente después el sustrato se introduce a una cámara de alto vacío para realizar una limpieza por descarga luminosa. La limpieza por descarga luminosa se efectúa en una atmósfera de oxígeno durante 20 min, con un voltaje de 3 kV a 0.5 Amp, para todos los espejos.

Se evaluarán nuevas técnicas para la eliminación de contaminantes, previa a la limpieza con descarga luminosa, estas consisten en:

Lavado del sustrato con una solución.

• Metanol- KOH

- 1) Se prepara una solución saturada de KOH en metanol.
- 2) Se introduce el vidrio durante 2h, en la solución.
- 3) Se saca el vidrio y se lava con agua destilada y alcohol isopropílico, también se puede usar acetona.
- 4) Se introduce el vidrio en una estufa o en un horno de microondas, durante 15 seg, aproximadamente.
- 5) Inmediatamente después de sacarlo de la estufa se coloca en el desecador, para así evitar el contacto con el medio ambiente.

• Lavado con HF.

Se sigue la misma técnica descrita anteriormente.

• Mezcla crómica.

- 1) La mezcla crómica la proporciona el laboratorio de la Facultad de Química.
- 2) Se introduce el vidrio en la mezcla durante 2h, aproximadamente.

Los puntos 3), 4) y 5) son los descritos en el lavado con metanol-KOH.

• Pulido con óxido de cerio.

- 1) Se prepara una pasta de óxido de cerio + agua y se coloca en el vidrio.
- 2) Con un pulidor que contiene resina, se frota la superficie del vidrio cuidando que la pasta no se seque demasiado. Es conveniente que la superficie del vidrio se mantenga caliente, con el objeto de mejorar el pulido.

Los puntos 3), 4) y 5) son los mismos descritos anteriormente.

Después de utilizar alguna de éstas técnicas de lavado, el sustrato se introduce en la cámara evaporadora para iniciar un espejo de plata o aluminio.

En estas condiciones se considera que el sustrato de vidrio se encuentra totalmente libre de impurezas y, por lo tanto la adherencia del aluminio al sustrato debe ser mejor, y también para la plata si esta se evapora después de la evaporación reactiva de aluminio.

5.3.2 EVAPORACION DEL MATERIAL PROTECTOR Y REFLECTOR

Para la evaporación del material protector y reflector se usa una cámara de alto vacío, de $1,5 \text{ m}^3$, que se encuentra en el Instituto de Física de la U.N.A.M. En ésta cámara también se realiza la limpieza por descarga luminosa. Tiene capacidad para obtener espejos hasta de 70×70 cm. La cámara tiene conectadas una bomba mecánica para obtener vacíos hasta de 10^{-3} Torr, y una bomba de difusión para obtener vacíos del orden de 10^{-5} Torr, un termopar para lecturas de temperaturas, un equipo para medir espesores de películas y una fuente de poder. Esta última permitirá un alto potencial (kV), para poder usar el cañón de electrones.

El medidor de espesores es un dispositivo que opera, ya sea determinando el peso del depositado o por medio de la detección del cambio de la frecuencia oscilatoria de un cristal pequeño de cuarzo sobre el que se condensa el evaporante. Este da lecturas en Å.

5.3.2.1 EVAPORACION DE ALUMINIO

Existen diferentes tipos de crisoles para evaporar sustancias, los más idóneos para evaporar aluminio son los mostrados en la fig 5.1. Estos crisoles están contruidos con tungsteno. El aluminio se evapora cuando se tiene una presión de vacío en la cámara de 5×10^{-5} Torr y una corriente de 40 a 80 Amp, para obtener la temperatura de 1100°C necesarios para que el aluminio se evapore.

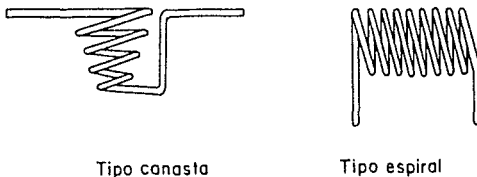


Fig 5.1

5.3.2.2 EVAPORACION DE PLATA

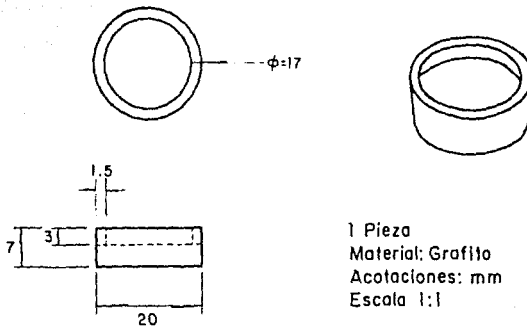
En investigaciones previas se demostró que la plata tiene una pobre adherencia al vidrio; para incrementar ésta es necesario depositar antes sobre el sustrato una película de Al_2O_3 o Al en una atmósfera de oxígeno a 10^{-4} Torr (para que éste se oxide, y así la plata pueda tener adherencia al sustrato de vidrio), y posteriormente evaporar la plata, (ref 14).

Esta evaporación se realiza utilizando crisoles de grafito a una presión de 10^{-5} Torr, Fig 5.2 y un cañón de electrones.

5.3.2.3 EVAPORACION DE SiO_2 Y Al_2O_3

Para poder evaporar SiO_2 se requiere de un cañón de electrones y un crisol de grafito. Para la alumina (Al_2O_3), es necesario evaporarla lentamente, a una velocidad aproximada de $180 \text{ \AA}/\text{min}$.

Se requiere evaporar lentamente la alumina, debido a que ésta solo se encuentra en polvo; si se evapora rápidamente, ésta empieza a saltar,



1 Piezo
 Material: Grafito
 Acotaciones: mm
 Escala 1:1

Fig 5.2

y no se consigue evaporarla, por otro lado, se han hecho pastillas de éste material, pero la compactación no ha sido lo suficientemente fuerte, por lo que se necesita evaporarla lentamente.

Se hace primero la limpieza con descarga luminosa durante 20 min, a 3 kV con 0.5 Amp, y se deposita la película con un vacío de inicio de 5×10^{-5} Torr.

5.3.3 ESPEJOS DESARROLLADOS

A continuación se describen los espejos que se han desarrollado hasta el momento.

5.3.3.1 EVAPORACION DE ALUMINA, AG, ALUMINA Y SiO (MUESTRA 1)

Sustrato: (30) vidrio de 15x10 cm, y 0.3 cm, de espesor. Limpieza: Mezcla crómica. Descarga luminosa durante 20 min, a 3 kV con 0.5 Amp, en atmósfera de aire.

Evaporación de (Al_2O_3) (Crisol 1).

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
11:54	550	6.6×10^{-5}	150
12:00	1050	6.2×10^{-5}	150

Evaporación de la Ag (Crisol 2)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
13:30	2000	5.8×10^{-5}	20
13:35	3800	5.7×10^{-5}	20
13:37	4387	5.6×10^{-5}	20

Evaporación de (Al₂O₃) (Crisol 1)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
11:25	124	6.0×10^{-5}	120
11:30	425	6.8×10^{-5}	120

Evaporación del (SiO) (Crisol 3)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
13:00	2443	5.6×10^{-5}	130

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

En el crisol uno se inicia la evaporación a una velocidad de 180 Å/min, finalizándose con un espesor de 1050 Å y alcanzando una rapidez de hasta 550 Å/min. En el crisol dos inicia a 180 Å/min, teniéndose un máximo de 2000 Å/min y se terminó con espesor de 4393 Å.

La tonalidad de la película de SiO es amarillenta y tiene un espesor aproximado de 2443 Å. Según la literatura el espesor necesario para proteger al espejo contra la abrasión es del rango de 1000 a 2000 Å.

El espejo tiene una reflejancia promedio de 0.87. Las mediciones de reflejancias se efectúan con un reflectómetro de espectro solar tipo SSR de la compañía Devices and Services (E.U.A.), Con las siguientes

características: Este aparato simula el espectro solar a través de una lámpara de halógeno de tungsteno y un sistema de detectores con filtro que reproducen el espectro solar en diferentes intervalos. La medición que se obtiene resulta de la suma de los 4 detectores. Tres de estos son fotovoltaicos y se usan en el intervalo del ultravioleta hasta cerca del infrarrojo mientras que una celda de sulfuro de plomo es usada para el infrarrojo hasta la longitud de onda de $2.5 \mu\text{m}$. Por métodos electrónicos y con filtros usados se tienen 4 intervalos que abarcan el espectro solar, a los cuales en este aparato se conoce como uv, azul, rojo e IR, fig 5.3.

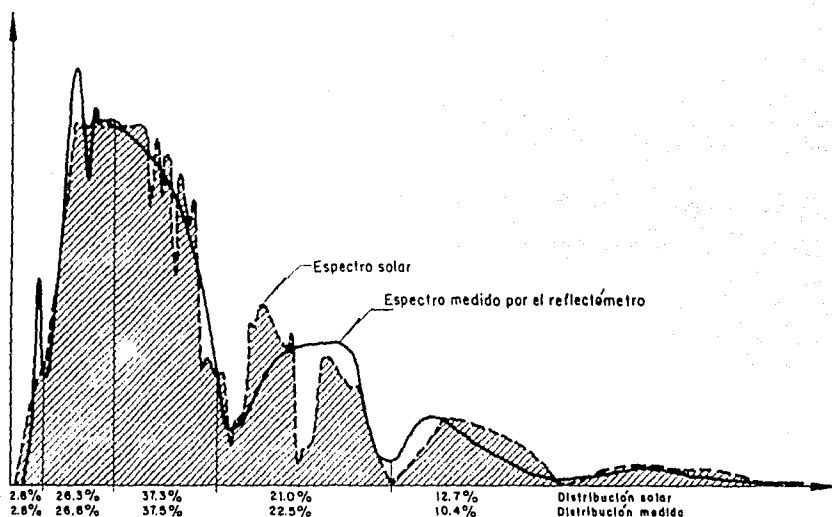


Fig 5.3 Comparación del espectro solar y el espectro medido por el reflectómetro

5.3.3.2 EVAPORACION DE AL(99,9% PURO), AG, Al_2O_3 Y SiO (MUESTRA 2)

Sustrato: (36) vidrio de 15×10 cm, y espesor de 0.3 cm.

Limpieza: Mezcla crómica. Descarga luminosa durante 20 min, con un voltaje de 3 kV a 0.5 Amp, y un vacío de inicio en la cámara de 5.6×10^{-5} Torr.

Evaporación de Al (99.9% puro) en atmósfera de aire (Crisol 1)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacio (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
11:35	2000	1×10^{-4}	40

Evaporación de la plata (Crisol 2)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacio (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
13:31	5000	5.8×10^{-5}	50

Evaporación de (Al₂O₃) (Crisol 3)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacio (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
14:36	300	5.8×10^{-5}	30

Terminadas las evaporaciones del aluminio, la plata y la alumina se observó, a través de una de las ventanas de la cámara evaporadora que la plata se estaba despegando, por lo que se suspendió la elaboración de éste espejo.

Una vez que se sacó el espejo se tuvo bajo observación durante algunos días, se procedió a su análisis y hubo una parte que no se despegó, se le tomó reflejancia, llegando a ser esta bastante buena (0.85 en promedio), a pesar de no tener adherencia la plata al aluminio.

5.3.3.3 EVAPORACION DE AL, AG, Al₂O₃ Y SiO (MUESTRA 3)

Sustrato: (37) vidrio de 15x10 cm, con espesor de 0.3 cm.

Limpieza: Lavado con HF al 0.5%. Descarga luminosa durante 20 min, con O₂ a 3 kV con 0.5 Amp.

Evaporación de Aluminio con una atmósfera de O₂ a 10^{-4} Torr (Crisol 1)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacio (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
11:25	800	1.0×10^{-4}	60
11:27	1000	1.0×10^{-4}	70
11:29	2000	1.0×10^{-4}	70

Evaporación de la plata (Crisol 2)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
13:50	3000	5.6×10^{-5}	30
13:55	6000	5.6×10^{-5}	30

Evaporación de la alumina (Crisol 3)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
11:29	27	5.5×10^{-5}	20
11:31	50	5.5×10^{-5}	110
11:32	120	5.6×10^{-5}	120
11:33	210	5.8×10^{-5}	130
11:35	310	5.7×10^{-5}	130

Evaporación del SiO en atmósfera de O₂ a una presión de 10^{-4} Torr, (Crisol 4).

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
12:58	2000	1.0×10^{-4}	20
12:59	2500	1.0×10^{-4}	20
13:00	3000	1.0×10^{-4}	20
13:01	3250	1.0×10^{-4}	20
13:02	3500	1.0×10^{-4}	20

Este espejo tiene una buena apariencia y su reflejancia promedio es de (0.92). Este espejo será estudiado al microscopio, para analizar el efecto de los contaminantes atmosféricos en las películas, protectora y reflectora.

5.3.3.4 EVAPORACION DE NICROMEL (MUESTRA 4)

Sustrato: (33) vidrio de 15x10 cm, y 0.3 cm, de espesor.

Limpieza: Lavado con HF al 0.5%. Descarga luminosa durante 20 min, a 3 kV con 0.5 Amp, en atmósfera de O₂.

Evaporación Nicromel (Crisol 1)

Tiempo (h)	Espesor (\AA)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
13:12	3000	5.0×10^{-5}	60
13:13	3000	5.5×10^{-5}	90
13:14	3000	5.7×10^{-5}	100

Terminada la evaporación del nicromel se observó, a través de una de las ventanas de la cámara evaporadora, que el depositado del nicromel no fué uniforme, por lo que se suspendió la elaboración de éste espejo.

Cuando se sacó el espejo se tuvo bajo observación durante algunos días, se analizó y tomó reflejancia, llegando a ser ésta bastante baja (0.42 en promedio), lo cual indica al no haber sido uniforme el depositado, y además no tener adherencia, que su reflejancia es mala.

5.3.3.5 EVAPORACION DE AL, AG, Al_2O_3 Y SiO (MUESTRA 5)

Sustrato: (28) vidrio de 15×10 cm, con espesor de 0.3 cm.

Limpieza: Lavado con metanol-KOH. Descarga luminosa con O_2 durante 20 min, con un voltaje de 3 kV a 0.5 Amp.

Evaporación del Al, con una atmósfera de O_2 a 10^{-4} Torr (Crisol 1)

Tiempo (h)	Espesor (\AA)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
11:25	3045	1.0×10^{-4}	90

Evaporación de la Ag (Crisol 2)

Tiempo (h)	Espesor (\AA)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
13:19	5238	5.5×10^{-5}	30
13:21	7847	5.7×10^{-5}	40

Evaporación de la Al_2O_3 (Crisol 3)

Tiempo (h)	Espesor (\AA)	Vacío (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
12:13	666	5.8×10^{-5}	15-80

Evaporación del SiO (Crisol 4)

Tiempo (h)	Espesor (Å)	Vacio (Torr)	Corriente del cañón (mAmp)
13:40	2140	5.5×10^{-5}	20

Se puede observar que éste espejo tiene una reflejancia promedio mayor que los anteriores (reflejancia promedio 0.95) por lo que se estudiará detenidamente al microscopio.

Los espejos aquí descritos son analizados en su totalidad, tomando su reflejancia, y además serán intemperizados, en donde se verificará de manera diferente, su comportamiento óptico y mecánico.

CAPITULO 6
PRUEBAS PRELIMINARES DE INTEMPERISMO Y
REFLEJANCIA DE ESPEJOS DE PLATA DE
PRIMERA SUPERFICIE

CAPITULO 6 PRUEBAS PRELIMINARES DE INTEMPERISMO Y REFLEJANCIA DE ESPEJOS DE PLATA DE PRIMERA SUPERFICIE

Los constituyentes atmosféricos, tienen un efecto nocivo sobre los materiales con que están contruidos los equipos solares, principalmente los espejos. Este ataque es mas enérgico en zonas con altos índices de contaminación, afectando primordialmente las propiedades ópticas del espejo, deteriorando las películas protectora y reflectora, siendo ésta última la que refleja la radiación solar hacia el sistema absorbedor y, por tanto, debe mantener una reflejancia promedio de 0.90, para alcanzar altas temperaturas y una buena eficiencia.

Para mantener funcionando el sistema solar adecuadamente es necesario que, los espejos usados en esta energía, estén bien protegidos, con un depositado uniforme del material reflector y una orientación tal que a toda hora incida sobre el equipo radiación solar, por lo que es necesario investigar el proceso de elaboración mas eficiente, así como los materiales adecuados para su manufactura.

6.1 PROPIEDADES DE LOS ESPEJOS

Las propiedades de los espejos son de gran importancia, ya que de éstas depende, una gran parte del buen funcionamiento de los sistemas

solares. No obstante, no todas las propiedades son de interés en ésta investigación, por lo que ésta se centra en la propiedad llamada reflejancia, sin embargo es necesario mencionar otras de esas propiedades, las cuales se deben analizar al desarrollar los diferentes sistemas que trabajan con radiación solar, además de las propiedades mecánicas de los materiales.

6.1.1 PROPIEDADES OPTICAS

Las propiedades ópticas más importantes para los espejos en aplicaciones solares son:

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

Todas las propiedades son función de la longitud de onda de la radiación incidente y del flujo de ésta. Otras propiedades ópticas de los materiales que se deben considerar son: índice de refracción, y el coeficiente de extinción, los que a su vez son función de la longitud de onda de la radiación. La especularidad es otra propiedad que ya se ha mencionado anteriormente.

Cada una de éstas propiedades es importante, no obstante su análisis se debe realizar dependiendo del equipo solar a utilizar, y en cada parte constitutiva del equipo por separado, porque no afectan de la

misma manera a los constituyentes del sistema solar. Por ejemplo para sistemas que trabajan con espejos de primera superficie, solo importa la propiedad llamada reflejancia, porque aún cuando se presentan los fenómenos de transmitancia y emitancia, éstos son mínimos y se pueden despreciar. Para concentradores en donde se utilizan los espejos de segunda superficie, además de alta reflejancia se requiere de máxima transmitancia.

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

6.2 METODOS DE DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES

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

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

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

Existen en la literatura tablas en donde se muestran los datos de las diferentes propiedades ópticas, como se muestra en la tabla 6.1.

Las propiedades ópticas se calculan por medio de relaciones desarro-

Tabla 6.1 Reflejancias de diferentes superficies

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

lladas por diferentes investigadores.

Para superficies pulidas, Fresnel (ref 13) ha derivado expresiones para determinar la reflejancia de la radiación que pasa de un medio uno, con un índice de refracción n_1 , a un medio dos, con un índice de refracción n_2 .

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{[\sin^2(\theta_2 + \theta_1)]} \quad (6.1)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{[\tan^2(\theta_2 + \theta_1)]} \quad (6.2)$$

$$r = I_r/I_i = 0.5(r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (6.3)$$

La ecuación 6.1 representa la componente perpendicular de la radiación. La ecuación 6.2 representa la componente paralela de la radiación. La ecuación 6.3 es, entonces la reflejancia de la radiación como el promedio de las dos componentes.

Los ángulos θ_1 y θ_2 son relacionados por la ley de Snell de los índices de refracción.

$$n_1/n_2 = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (6.4)$$

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

$$r(0) = I_r/I_i = \left\{ \frac{(n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)} \right\}^2 \quad (6.5)$$

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

$$r(0) = I_r/I_i = \left\{ \frac{(n-1)}{(n+1)} \right\}^2 \quad (6.6)$$

En aplicaciones solares, la transmitancia de radiación es a través de una placa plana o de una película de material. La transmitancia está dada por la siguiente expresión:

$$T = (1 - r_1)^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_1^{2n} = (1 - r_1)^2 / (1 - r_1^2) = (1 - r_1) / (1 + r_1) \quad (6.7)$$

La expresión anterior es para la componente perpendicular.

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

$$T_r = 0.5 \left[\frac{(1-r_{\perp})}{(1+r_{\perp})} + \frac{(1-r_{\parallel})}{(1+r_{\parallel})} \right] \quad (6.8)$$

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

$$T_{rN} = 0.5 \left[\frac{(1-r_{\perp})}{(1+(2N-1)r_{\perp})} + \frac{(1-r_{\parallel})}{(1+(2N-1)r_{\parallel})} \right] \quad (6.9)$$

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

$$dI = -kI dx \quad (6.10)$$

donde k es la constante de proporcionalidad, llamada coeficiente de extinción, y se supone que es constante en el espectro de radiación solar. Integrando la ecuación 6.10 de I_0 a I_t y de 0 a $L/\cos\theta_2$.

$$t_a = I_t/I_0 = \exp(-kL/\cos\theta_2) \quad (6.11)$$

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

La absorptancia se calcula con la siguiente ecuación:

$$\psi = 0.5 \left[(1-t_a) \left[\frac{(1-r_{\perp})}{(1-r_{\perp} t_a)} + \frac{(1-r_{\parallel})}{(1-r_{\parallel} t_a)} \right] \right] \quad (6.12)$$

6.3 DEGRADACION POR EFECTO DEL MEDIO AMBIENTE

La degradación que sufren los espejos al ser expuestos al medio ambiente es la parte medular de la investigación. Para analizar éste

fenómeno todos los espejos desarrollados en el Instituto de Ingeniería son expuestos a la radiación solar en una estructura metálica, orientada hacia el sur y con 20° de inclinación, que corresponde a la latitud de la Ciudad de México.

Los espejos descritos en el capítulo anterior, son resumidos en la tabla 6.2, en donde se indican sus principales características, así como su denominación y su número correspondiente.

Tabla 6.2 Características de los espejos evaporados

Muestra No.	Denominación	Sustrato	Película de Adhesión	Película Refleitora	Película Protectora
1	V-30	Vidrio	Al_2O_3	Plata	$Al_2O_3 - SiO$
2	V-36	Vidrio	$Al - Al_2O_3$	Plata	$Al_2O_3 - SiO$
3	V-37	Vidrio	$Al - Al_2O_3$	Plata	$Al_2O_3 - Si_2O_3$
4	V-33	Vidrio	Nicromel	Plata	—
5	V-28	Vidrio	$Al - Al_2O_3$	Plata	$Al_2O_3 - SiO$

En análisis del fenómeno de intemperismo se realizará en tres formas:

1. Inspección física. Se describen los daños ocasionados al espejo durante su período de exposición.
2. Reflejancia. A todos los espejos seleccionados para intemperizarlos se les toma su reflejancia, por el anverso y reverso, sucios y limpios, la lectura se realiza periódicamente y se grafica la reflejancia contra el tiempo de exposición.
3. Inspección al microscopio. Las muestras de 10x15 cm, serán analizadas una vez al mes.

CAPITULO 7

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

CAPITULO 7 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En esta tesis se realizaron diferentes etapas que permitieron avanzar en el desarrollo de espejos de plata de primera superficie.

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

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

- Impurezas del material reflector, que no tienen adherencia en el sustrato.
- Suciedad depositada al momento de instalar, dentro de la cámara de alto vacío, la plata, el aluminio, la alumina, el monóxido de silicio y el sustrato.

Estos contaminantes grasosos se evaporan primero, depositándose sobre el vidrio y por tanto evitan que se adhiera el material reflector.

- Una mala evaporación (no haciendolo en el orden indicado).

- En el sustrato (30) se puede observar una película amarillenta, esto se debe a que se oxidó la plata, ya que ésta se evaporó en una atmósfera de O_2 (10^{-4} Torr). Esto se hizo por error.

Otro avance obtenido fue la buena adherencia de la plata al sustrato de vidrio. Esto se logró oxidando el aluminio que se está evaporando en una presión de 10^{-4} Torr con oxígeno.

En el aspecto de corrosión se detectó que ésta se inicia al aparecer agujeritos en las películas depositadas, por lo que será necesario lograr una mejor uniformidad de las diferentes películas que conforman los espejos. Otro aspecto es que la limpieza y pulido de los sustratos debe efectuarse con mas rigidez ya que si no se lleva a cabo en forma cuidadosa ocasiona que haya corrosión.

En el análisis llevado a cabo anteriormente para los espejos de aluminio se detecto que:

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

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

- Ozono. Que ataca al material en presencia de humedad. A bajas concentraciones, el ataque a este es débil y se presenta en forma de picaduras. A mayores concentraciones, este ataque se intensifica.
- Cloro. El cloro gaseoso seco, así como el cloro líquido no tienen acción sobre el metal, pero en presencia de humedad el ataque se hace muy fuerte, con formación de picaduras importantes, (la presencia del

cloro en el medio ambiente se puede encontrar en zonas costeras y en zonas industriales).

- Dióxido de azufre. A temperatura ambiente, el gas húmedo solo provoca un ligero ataque del metal. El anhídrido sulfuroso es muy soluble en agua formando el ácido sulfuroso, que ataca el material.
- El SO_2 y/o el SO_3 en combinación con H_2O generan ácido sulfúrico, que es el que provoca la lluvia ácida, y esta es la que disuelve los materiales a temperatura ambiente.

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

Por lo que respecta al uso y funcionamiento del cañón de electrones, éste está trabajando con refrigeración de manera que el haz de electrones no caliente el cañón, además se logró localizar la posición del haz. En su funcionamiento dicho cañón procede a la fabricación de espejos de plata de primera superficie, los cuales obtienen reflejancias mayores de 0.9. Este dispositivo permite evaporar Al_2O_3 y SiO_2 con facilidad (puntos de fusión: 2020 y 1730 °C respectivamente). Los valores iniciales de reflejancia, son de 0.90 o mayores, ya que se utilizó plata como película reflectora.

Sin embargo la plata tiene como mayor problema su pobre adhesión al sustrato de vidrio, es por eso que se evapora primero Al (el cual se oxidó) o Al_2O_3 y después la Ag, para obtener buenos resultados.

Algunas muestras, por ejemplo la 1 y 2, mostraron una pobre adherencia, lo cual se sabe es ocasionado por una deficiente limpieza del sustrato; para superar esta se utilizan nuevas técnicas, como son: el lavado con una mezcla crómica y el lavado con metanol-KOH, las que resultaron efectivas y de gran utilidad. No es recomendable el lavado con detergente Roma y/o Vel-Rosita, porque estos eliminan superficialmente los contaminantes grasosos, por lo cual se deben

evitar completamente. El lavado con ácido fluorhídrico tampoco se recomienda porque es probable que queden residuos en los orificios de la estructura del vidrio, que con el tiempo dañen a la película.

Se sugiere que la limpieza con descarga luminosa se realice con oxígeno y/o argón, dependiendo del material a evaporarse, ya que se ha comprobado que los mecanismos de limpieza son más efectivos en presencia de estos gases.

La técnica de evaporación con cañón de electrones se considera un gran avance para la fabricación, tanto de espejos de plata como de aluminio, ya que, además de permitir evaporar (SiO_2 y Al_2O_3), sustancias de alto punto de fusión, también permite evaporar el aluminio y la plata sin contaminación del crisol como sucede al evaporarlas por medios térmicos. Con esta metodología se espera que la corrosión de los espejos disminuya.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- 1 Manrique José A. "ENERGIA SOLAR" Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas. Editorial Harla, México 1984.
- 2 Leyva A. " PRINCIPIOS FISICOS DE LA RADIACION SOLAR", Instituto de Investigaciones en Materiales. Temixco Morelos. Marzo 1989.
- 3 Alonso A. Viqueira L. "ALTERNATIVAS ENERGETICAS".
- 4 Duffie JA, and Beckmann WA. " SOLAR ENERGY THERMAL PROCESSES", John Wiley and Sons. New York. 1974.
- 5 Almanza R. Valdez A. López S. " CONCENTRADORES SOLARES ", Series del Instituto de Ingenieria, Junio. 1981.
- 6 Pilatowsky I. " REFRIGERACION SOLAR ", Instituto de Investigaciones en Materiales Temixco Morelos, Marzo. 1989.
- 7 Glang R. " VACUUM EVAPORATION ", Handbook of Thin Film Technology. Editado por Maissel LI. y Gland R. Mc Graw Hill Book Company. 1970.
- 8 Chopra KL. "THIN FILM PHENOMENA", Mc Graw Hill. 1969.

- 9 Holland L. " VACUUM DEPOSITION OF THIN FILMS ", Chapman and Hall, 1970.
- 10 Alonso M, y Finn EJ, Física Vol.II, " CAMPOS Y ONDAS ", Fondo Educativo Interamericano.
- 11 Siegbahn K, α , β and γ Ray Spectroscopy, North - Holland 1966.
- 12 Feynman, " ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO ", Tomo II, Fondo Educativo Interamericano.
- 13 Bazán JL. " INTEMPERIZACION DE ESPEJOS PARA USO EN ENERGIA SOLAR". Tesis UNAM 1989.
- 14 Almanza R, Mazari M, Muñoz F, " DESARROLLO DE ESPEJOS PARA APLICACIONES DE LA ENERGIA SOLAR ", Proyecto 6135, Informe interno del Instituto de Ingenieria, UNAM 1987.
- 15 Almanza R, Mazari M, Muñoz F , Ramirez M, " ESPEJOS DE PRIMERA SUPERFICIE CON PELICULAS DELGADAS ", Proyectos 7125 y 8112, Informe interno del Instituto de Ingenieria UNAM 1988.

- 16 Almanza R. Mazari M, Muñoz F. Ramirez M. Bazán JL.
" CONSTRUCCION Y PUESTA EN MARCHA DE UN CAÑON DE ELECTRO-
NES PARA EVAPORACION DE DIFERENTES VIDRIOS SOBRE ESPEJOS
SOLARES", Proyecto 8134, Informe interno del Instituto
de Ingenieria, UNAM 1989.
- 17 Correa W. Fuentes R. Fuentes G. " PROYECTO DE UN LABORA-
TORIO DE IMPLANTACION DE IONES", Tesis UNAM 1982.
- 18 Singer. " THE USE OF ION IMPLANTACION FOR MATERIAL ",
Processing Semiannual Report for the Period 10 Oct-31
Mar 1980, Naval Research Laboratory 1980.
- 19 Dennis W. E., Mc Gee J. B., "SILICONE RESINS FOR
PROTECCION OF FIRST SURFACE REFLECTORS " Solar Reflective
Materials: Proceedings of the Second Solar Reflective
Materials Workshop: San Francisco CAL. Febrero 1980.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Fernando Alba Andrade prestó su equipo para medir campos magnéticos, además nos asesoró en el entendimiento del cañón de electrones. Al Dr. Enrique Zironi quien nos asesoró en el equipo que tiene el cañón de electrones para evaporar SiO_2 .

Al Dr. Marcos Mazari asesoró y apoyó en todo lo relacionado con sistemas de vacío.

La participación de Gabriel Mendoza en la obtención de los diferentes espejos fue de gran ayuda para la elaboración de esta tesis.

La colaboración de Francisco Calderón del Instituto de Física fue valiosa en el desarrollo de la tesis.

En especial se agradece al Instituto de Física la colaboración prestada para la realización de los espejos.

Un especial reconocimiento al Dr. Rafael Almanza, Investigador del Instituto de Ingeniería por su apoyo y dirección en la realización del trabajo.

Al Profesor Gutiérrez A. por su apoyo y enseñanzas.

A la sala de dibujo del Instituto de Ingeniería por su apoyo en el material gráfico.

Al Ing. José Luis Bazán y Físico Hector Llamas, becarios del Instituto de Ingeniería, por su apoyo y compañerismo.

Mi agradecimiento al Instituto de Ingeniería por las facilidades otorgadas para la realización de mi Maestría y mi Tesis.

Maximino Reséndiz por su apoyo sistemático.

La ayuda prestada para la elaboración escrita de esta tesis de Rosevelia Ruenes, Rosa María Galindo y Adela Becerril fue muy útil para su buena presentación.

APENDICE

(B) KINETIC ENERGY VERSUS MAGNETIC RIGIDITY FOR ELECTRONS

Kinetic energies of conversion electrons are usually obtained from measurements of the magnetic rigidity $B\rho$. The kinetic energies of the table were computed, with the aid of an IBM 1620, from the relation

$$E = m_0c^2 \left[\sqrt{(e/m_0c)^2 B\rho^2 + 1} - 1 \right]. \quad (1)$$

The 1955 least-squares adjusted values of the fundamental constants²² were used:

$$\begin{aligned} m_0c^2 &= (510.976 \pm 0.007) \text{ keV}, \\ e/m_0 &= (1.75890 \pm 0.00002) \times 10^7 \text{ e.m.u. g}^{-1}, \\ c &= (2.997930 \pm 0.000003) \times 10^{10} \text{ cm sec}^{-1}. \end{aligned}$$

The relative precision of measurements on electron momenta is frequently so high as to call for an interpolation in the table when the kinetic energy is evaluated. An interpolation may also be necessary in the inverse process in which the magnetic rigidity is calculated from the kinetic energy. Differentiation of the relativistic energy-momentum relation gives

$$dE = \frac{E}{B\rho} \frac{E + 2m_0c^2}{E + m_0c^2} d(B\rho) = F(B\rho) d(B\rho). \quad (2)$$

For each tabulated energy the corresponding interpolation factor $F(B\rho)$ is given. Interpolation to the second order is made from one of the relations

$$E = E_0 + xF_0 + \frac{1}{2}x^2 \left(\frac{F_0 - F_{-1}}{B\rho_0 - B\rho_{-1}} \right) \quad (3a)$$

$$B\rho = B\rho_0 + yF_0^{-1} - \frac{1}{2}y^2F_0^{-2} \left(\frac{F_0 - F_{-1}}{E_0 - E_{-1}} \right) \quad (3b)$$

in which x is the difference $B\rho - B\rho_0$, and y is $E - E_0$. In most cases an interpolation to the first order, i.e. neglecting the last term of eqs. (3), is sufficient.

One example of a procedure in which interpolation usually is necessary is the 'absolute' determination of the energies of two γ -transitions in cascade and the corresponding cross-over as described in Chapter III. It should be noticed that the accuracy is limited by the errors in the fundamental constants. The quoted errors are standard deviations, and the corresponding relative uncertainty in kinetic energy, E , on a 68% confidence level goes from 2.6×10^{-5} for $B\rho = 100$ gauss · cm to 1.8×10^{-5} for $B\rho = 100\,000$ gauss · cm. The 1955 values for m_0c^2 , e/m_0 and c differ from the 1952 values by -1.6×10^{-5} , $+1.1 \times 10^{-5}$, and $+0.03 \times 10^{-5}$ respectively. However, due to cancellation, the difference in kinetic energy calculated with the two sets of fundamental constants is as small as $+0.5 \times 10^{-5}$. The correction due to changes in the fundamental constants m_0c^2 and e/m_0 is obtained from the expression

$$\frac{dE}{E} = \frac{d(m_0c^2)}{m_0c^2} + \left[1 - \frac{E}{m_0c^2} \frac{1}{(e/m_0)^2 (B\rho)^2} \right]^{-1} \frac{d(e/m_0)}{e/m_0}. \quad (4)$$

The uncertainty in the calculated energies due to the errors in the fundamental constants is derived from the same expression by quadratic addition of the terms.

A new least-squares adjustment²⁴, adopted in 1963, gives the following values for the constants:

$$\begin{aligned} m_0c^2 &= 511.006 \text{ keV}, \\ e/m_0 &= 1.7587970 \times 10^7 \text{ e.m.u. g}^{-1}, \\ c &= 2.997925 \times 10^{10} \text{ cm sec}^{-1}. \end{aligned}$$

According to eq. (4) the corresponding change in the tabulated energies would be

$$\begin{aligned} dE/E &= -5.5 \times 10^{-5} \quad \text{for } B\rho = 100 \text{ gauss} \cdot \text{cm}, \\ dE/E &= -4.8 \times 10^{-5} \quad \text{for } B\rho = 1000 \text{ gauss} \cdot \text{cm}, \\ dE/E &= +0.1 \times 10^{-5} \quad \text{for } B\rho = 100\,000 \text{ gauss} \cdot \text{cm}. \end{aligned}$$

$B\rho$ gauss cm	E keV ($B\rho \times 1$)	F keV gauss cm	E keV ($B\rho \times 10$)	F keV gauss cm	E keV ($B\rho \times 100$)	F keV gauss cm
100	0.878692	0.017559	81.4527	0.15171	2530.18	0.29553
101	0.896335	0.017734	82.9754	0.15283	2559.74	0.29561
102	0.914159	0.017909	84.5093	0.15395	2589.30	0.29569
103	0.932155	0.018084	86.0543	0.15505	2618.87	0.29577
104	0.950326	0.018259	87.6103	0.15615	2648.46	0.29585
105	0.968672	0.018433	89.1773	0.15724	2678.04	0.29592
106	0.987193	0.018608	90.7551	0.15832	2707.64	0.29599
107	1.00589	0.018783	92.3437	0.15940	2737.24	0.29606
108	1.02476	0.018958	93.9430	0.16046	2766.85	0.29613
109	1.04381	0.019133	95.5529	0.16152	2796.47	0.29619
110	1.06303	0.019308	97.1723	0.16256	2826.09	0.29626
111	1.08242	0.019482	98.8041	0.16360	2855.72	0.29632
112	1.10199	0.019657	100.445	0.16463	2885.35	0.29638
113	1.12173	0.019832	102.097	0.16566	2914.99	0.29644
114	1.14165	0.020007	103.758	0.16667	2944.64	0.29650
115	1.16175	0.020181	105.430	0.16768	2974.29	0.29655
116	1.18202	0.020356	107.112	0.16867	3003.95	0.29661
117	1.20246	0.020531	108.804	0.16966	3033.62	0.29666
118	1.22308	0.020705	110.505	0.17065	3063.28	0.29671
119	1.24387	0.020880	112.216	0.17162	3092.96	0.29676
120	1.26484	0.021055	113.938	0.17258	3122.64	0.29681
121	1.28598	0.021229	115.668	0.17354	3152.32	0.29686
122	1.30730	0.021404	117.408	0.17449	3182.01	0.29691
123	1.32879	0.021578	119.158	0.17543	3211.70	0.29695
124	1.35045	0.021753	120.917	0.17637	3241.40	0.29700
125	1.37229	0.021927	122.685	0.17729	3271.10	0.29704
126	1.39431	0.022102	124.463	0.17821	3300.81	0.29709
127	1.41650	0.022276	126.249	0.17912	3330.52	0.29713
128	1.43886	0.022451	128.045	0.18003	3360.23	0.29717
129	1.46140	0.022625	129.850	0.18092	3389.95	0.29721
130	1.48411	0.022799	131.664	0.18181	3419.68	0.29725
131	1.50700	0.022974	133.486	0.18269	3449.40	0.29729
132	1.53006	0.023148	135.317	0.18356	3479.13	0.29732
133	1.55329	0.023322	137.157	0.18443	3508.87	0.29736
134	1.57670	0.023497	139.006	0.18529	3538.60	0.29740
135	1.60029	0.023671	140.863	0.18614	3568.35	0.29743
136	1.62404	0.023845	142.729	0.18698	3598.09	0.29747
137	1.64798	0.024019	144.603	0.18782	3627.84	0.29750
138	1.67208	0.024194	146.485	0.18865	3657.59	0.29753
139	1.69636	0.024368	148.376	0.18947	3687.35	0.29756
140	1.72082	0.024542	150.274	0.19028	3717.10	0.29759
141	1.74545	0.024716	152.181	0.19109	3746.86	0.29763
142	1.77025	0.024890	154.096	0.19189	3776.63	0.29766
143	1.79523	0.025064	156.019	0.19269	3806.40	0.29769
144	1.82038	0.025238	157.950	0.19347	3836.17	0.29771
145	1.84570	0.025412	159.889	0.19426	3865.94	0.29774
146	1.87120	0.025586	161.835	0.19503	3895.71	0.29777
147	1.89688	0.025760	163.789	0.19580	3925.49	0.29780
148	1.92272	0.025934	165.751	0.19656	3955.27	0.29782
149	1.94874	0.026108	167.720	0.19731	3985.06	0.29785
150	1.97494	0.026282	169.697	0.19806	4014.84	0.29788
152	2.02785	0.026630	173.673	0.19953	4074.42	0.29792
154	2.08146	0.026977	177.673	0.20098	4134.01	0.29797
156	2.13576	0.027325	181.712	0.20241	4193.61	0.29802

$B\rho$ gauss cm	E keV ($B\rho \times 1$)	F keV <u>gauss cm</u>	E keV ($B\rho \times 10$)	F keV <u>gauss cm</u>	E keV ($B\rho \times 100$)	F keV <u>gauss cm</u>
158	2.19076	0.027672	185.774	0.20381	4253.22	0.29806
160	2.24645	0.028019	189.864	0.20518	4312.84	0.29811
162	2.30283	0.028366	193.982	0.20653	4372.46	0.29815
164	2.35991	0.028713	198.126	0.20786	4432.10	0.29819
166	2.41769	0.029060	202.296	0.20917	4491.74	0.29822
168	2.47615	0.029407	206.492	0.21045	4551.39	0.29826
170	2.53531	0.029754	210.714	0.21171	4611.04	0.29830
172	2.59517	0.030100	214.960	0.21295	4670.70	0.29833
174	2.65571	0.030447	219.231	0.21416	4730.37	0.29836
176	2.71695	0.030793	223.527	0.21536	4790.05	0.29840
178	2.77888	0.031139	227.846	0.21653	4849.73	0.29843
180	2.84151	0.031485	232.188	0.21768	4909.42	0.29846
182	2.90482	0.031831	236.553	0.21882	4969.11	0.29849
184	2.96883	0.032177	240.940	0.21993	5028.82	0.29851
186	3.03353	0.032522	245.350	0.22103	5088.52	0.29854
188	3.09892	0.032868	249.781	0.22210	5148.23	0.29857
190	3.16500	0.033213	254.234	0.22316	5207.95	0.29859
192	3.23177	0.033559	258.708	0.22420	5267.67	0.29862
194	3.29924	0.033904	263.202	0.22522	5327.39	0.29864
196	3.36739	0.034249	267.716	0.22622	5387.12	0.29866
198	3.43623	0.034593	272.250	0.22721	5446.86	0.29869
200	3.50576	0.034938	276.804	0.22817	5506.60	0.29871
202	3.57598	0.035283	281.377	0.22913	5566.34	0.29873
204	3.64689	0.035627	285.969	0.23006	5626.09	0.29875
206	3.71849	0.035971	290.580	0.23098	5685.84	0.29877
208	3.79078	0.036316	295.208	0.23188	5745.60	0.29879
210	3.86375	0.036660	299.855	0.23277	5805.36	0.29881
212	3.93742	0.037003	304.519	0.23364	5865.12	0.29883
214	4.01177	0.037347	309.200	0.23450	5924.89	0.29885
216	4.08681	0.037691	313.899	0.23535	5984.66	0.29886
218	4.16253	0.038034	318.614	0.23617	6044.44	0.29888
220	4.23894	0.038377	323.346	0.23699	6104.21	0.29890
222	4.31604	0.038720	328.094	0.23779	6163.99	0.29891
224	4.39382	0.039063	332.857	0.23858	6223.78	0.29893
226	4.47229	0.039406	337.637	0.23935	6283.57	0.29894
228	4.55145	0.039749	342.431	0.24011	6343.36	0.29896
230	4.63129	0.040091	347.241	0.24086	6403.15	0.29897
232	4.71181	0.040434	352.066	0.24160	6462.95	0.29899
234	4.79302	0.040776	356.905	0.24232	6522.74	0.29900
236	4.87492	0.041118	361.759	0.24304	6582.54	0.29901
238	4.95749	0.041459	366.626	0.24374	6642.35	0.29903
240	5.04075	0.041801	371.508	0.24442	6702.16	0.29904
242	5.12470	0.042143	376.403	0.24510	6761.96	0.29905
244	5.20932	0.042484	381.312	0.24577	6821.78	0.29906
246	5.29463	0.042825	386.234	0.24642	6881.59	0.29908
248	5.38062	0.043166	391.169	0.24707	6941.41	0.29909
250	5.46730	0.043507	396.117	0.24770	7001.22	0.29910
252	5.55465	0.043847	401.077	0.24833	7061.05	0.29911
254	5.64269	0.044188	406.050	0.24894	7120.87	0.29912
256	5.73140	0.044528	411.034	0.24954	7180.69	0.29913
258	5.82080	0.044868	416.031	0.25014	7240.52	0.29914
260	5.91088	0.045208	421.040	0.25072	7300.35	0.29915
262	6.00163	0.045548	426.060	0.25130	7360.18	0.29916

$B\rho$ gauss cm	E keV ($B\rho \times 1$)	F keV gauss cm	E keV ($B\rho \times 10$)	F keV gauss cm	E keV ($B\rho \times 100$)	F keV gauss cm
264	6.09307	0.045888	431.092	0.25186	7420.01	0.29917
266	6.18518	0.046227	436.134	0.25242	7479.85	0.29918
268	6.27798	0.046566	441.188	0.25297	7539.68	0.29919
270	6.37145	0.046905	446.253	0.25351	7599.52	0.29920
272	6.46560	0.047244	451.328	0.25404	7659.36	0.29921
274	6.56042	0.047583	456.414	0.25456	7719.20	0.29921
276	6.65593	0.047921	461.511	0.25507	7779.05	0.29922
278	6.75211	0.048260	466.617	0.25558	7838.89	0.29923
280	6.84897	0.048598	471.734	0.25608	7898.74	0.29924
282	6.94650	0.048936	476.860	0.25657	7958.59	0.29925
284	7.04471	0.049273	481.997	0.25705	8018.44	0.29925
286	7.14359	0.049611	487.142	0.25753	8078.29	0.29926
288	7.24315	0.049948	492.298	0.25800	8138.14	0.29927
290	7.34338	0.050285	497.462	0.25846	8198.00	0.29928
292	7.44429	0.050622	502.636	0.25891	8257.85	0.29928
294	7.54587	0.050959	507.819	0.25936	8317.71	0.29929
296	7.64813	0.051296	513.010	0.25980	8377.57	0.29930
298	7.75106	0.051632	518.211	0.26023	8437.43	0.29930
300	7.85466	0.051968	523.420	0.26066	8497.29	0.29931
302	7.95893	0.052304	528.637	0.26108	8557.15	0.29932
304	8.06387	0.052640	533.863	0.26150	8617.02	0.29932
306	8.16949	0.052975	539.097	0.26190	8676.88	0.29933
308	8.27577	0.053311	544.339	0.26231	8736.75	0.29933
310	8.38273	0.053646	549.589	0.26270	8796.62	0.29934
315	8.65305	0.054483	562.749	0.26367	8946.29	0.29935
320	8.92755	0.055318	575.955	0.26460	9095.97	0.29937
325	9.20623	0.056152	589.208	0.26550	9245.66	0.29938
330	9.48907	0.056985	602.504	0.26636	9395.35	0.29939
335	9.77608	0.057817	615.843	0.26720	9545.05	0.29940
340	10.0672	0.058647	629.223	0.26800	9694.75	0.29942
345	10.3625	0.059476	642.643	0.26878	9844.47	0.29943
350	10.6620	0.060303	656.101	0.26953	9994.18	0.29944
355	10.9656	0.061129	669.596	0.27026	10143.9	0.29945
360	11.2733	0.061953	683.126	0.27096	10293.6	0.29946
365	11.5851	0.062776	696.691	0.27164	10443.4	0.29947
370	11.9010	0.063598	710.289	0.27229	10593.1	0.29947
375	12.2211	0.064418	723.920	0.27292	10742.8	0.29948
380	12.5452	0.065236	737.581	0.27354	10892.6	0.29949
385	12.8734	0.066053	751.273	0.27413	11042.3	0.29950
390	13.2057	0.066869	764.994	0.27470	11192.1	0.29951
395	13.5421	0.067683	778.743	0.27526	11341.8	0.29951
400	13.8826	0.068495	792.520	0.27580	11491.6	0.29952
405	14.2271	0.069306	806.323	0.27632	11641.4	0.29953
410	14.5756	0.070115	820.151	0.27682	11791.1	0.29953
415	14.9282	0.070922	834.005	0.27731	11940.9	0.29954
420	15.2848	0.071728	847.883	0.27779	12090.7	0.29955
425	15.6455	0.072532	861.784	0.27825	12240.4	0.29955
430	16.0102	0.073335	875.707	0.27870	12390.2	0.29956
435	16.3788	0.074136	889.653	0.27913	12540.0	0.29956
440	16.7515	0.074935	903.620	0.27955	12689.8	0.29957

B_p gauss cm	E keV ($B_p \lambda$)	F keV gauss cm	E keV ($B_p \times 10$)	F keV gauss cm	E keV ($B_p \times 100$)	F keV gauss cm
445	17.1282	0.075732	917.608	0.27996	12839.6	0.29957
450	17.5088	0.076528	931.616	0.28036	12989.3	0.29958
455	17.8935	0.077322	945.643	0.28074	13139.1	0.29958
460	18.2821	0.078114	959.690	0.28112	13288.9	0.29959
465	18.6746	0.078905	973.755	0.28148	13438.7	0.29959
470	19.0711	0.079694	987.837	0.28183	13588.5	0.29960
475	19.4715	0.080481	1001.94	0.28218	13738.3	0.29960
480	19.8759	0.081266	1016.05	0.28251	13888.1	0.29960
485	20.2842	0.082049	1030.19	0.28283	14037.9	0.29961
490	20.6964	0.082831	1044.34	0.28315	14187.7	0.29961
495	21.1125	0.083611	1058.50	0.28346	14337.5	0.29961
500	21.5325	0.084389	1072.68	0.28376	14487.3	0.29962
505	21.9564	0.085165	1086.88	0.28405	14637.1	0.29962
510	22.3841	0.085939	1101.09	0.28433	14787.0	0.29962
515	22.8158	0.086711	1115.31	0.28461	14936.8	0.29963
520	23.2512	0.087482	1129.55	0.28488	15086.6	0.29963
525	23.6906	0.088250	1143.80	0.28514	15236.4	0.29963
530	24.1337	0.089017	1158.06	0.28540	15386.2	0.29964
535	24.5807	0.089782	1172.34	0.28565	15536.0	0.29964
540	25.0316	0.090545	1186.63	0.28589	15685.9	0.29964
545	25.4862	0.091306	1200.93	0.28613	15835.7	0.29965
550	25.9446	0.092065	1215.24	0.28636	15985.5	0.29965
555	26.4068	0.092822	1229.56	0.28658	16135.3	0.29965
560	26.8728	0.093577	1243.90	0.28680	16285.2	0.29965
565	27.3426	0.094330	1258.24	0.28702	16435.0	0.29966
570	27.8161	0.095081	1272.60	0.28723	16584.8	0.29966
575	28.2934	0.095830	1286.97	0.28743	16734.6	0.29966
580	28.7744	0.096577	1301.34	0.28763	16884.5	0.29966
585	29.2592	0.097323	1315.73	0.28782	17034.3	0.29966
590	29.7476	0.098066	1330.13	0.28801	17184.1	0.29967
595	30.2398	0.098807	1344.53	0.28820	17334.0	0.29967
600	30.7357	0.099546	1358.95	0.28838	17483.8	0.29967
605	31.2353	0.100283	1373.37	0.28856	17633.6	0.29967
610	31.7385	0.101018	1387.80	0.28873	17783.5	0.29968
615	32.2455	0.101751	1402.24	0.28890	17933.3	0.29968
620	32.7560	0.102482	1416.69	0.28907	18083.2	0.29968
625	33.2703	0.103211	1431.15	0.28923	18233.0	0.29968
630	33.7881	0.103938	1445.61	0.28939	18382.8	0.29968
635	34.3096	0.104662	1460.09	0.28954	18532.7	0.29968
640	34.8348	0.105385	1474.57	0.28969	18682.5	0.29969
645	35.3635	0.106105	1489.06	0.28984	18832.4	0.29969
650	35.8958	0.106824	1503.55	0.28999	18982.2	0.29969
655	36.4317	0.107540	1518.06	0.29013	19132.1	0.29969
660	36.9712	0.108254	1532.57	0.29027	19281.9	0.29969
665	37.5143	0.108967	1547.08	0.29041	19431.7	0.29969
670	38.0609	0.109677	1561.61	0.29054	19581.6	0.29970
675	38.6110	0.110384	1576.14	0.29067	19731.4	0.29970
680	39.1647	0.111090	1590.67	0.29080	19881.3	0.29970
685	39.7219	0.111794	1605.22	0.29092	20031.1	0.29970
690	40.2827	0.112495	1619.77	0.29104	20181.0	0.29970
695	40.8469	0.113195	1634.32	0.29116	20330.8	0.29970
700	41.4146	0.113892	1648.88	0.29128	20480.7	0.29970

B_p gauss cm	E keV ($B_p \times 1$)	F keV gauss cm	E keV ($B_p \times 10$)	F keV gauss cm	E keV ($B_p \times 100$)	F keV gauss cm
705	41.9858	0.114587	1663.45	0.29140	20630.5	0.29970
710	42.5605	0.115280	1678.02	0.29151	20780.4	0.29971
715	43.1386	0.115970	1692.60	0.29162	20930.2	0.29971
720	43.7202	0.116659	1707.18	0.29173	21080.1	0.29971
725	44.3052	0.117345	1721.77	0.29184	21230.0	0.29971
730	44.8938	0.118029	1736.37	0.29194	21379.8	0.29971
735	45.4855	0.118711	1750.97	0.29204	21529.7	0.29971
740	46.0807	0.119391	1765.57	0.29214	21679.5	0.29971
745	46.6794	0.120069	1780.18	0.29224	21829.4	0.29971
750	47.2814	0.120744	1794.80	0.29234	21979.2	0.29971
760	48.4956	0.122089	1824.04	0.29253	22279.0	0.29972
770	49.7231	0.123424	1853.30	0.29271	22578.7	0.29972
780	50.9640	0.124751	1882.58	0.29288	22878.4	0.29972
790	52.2181	0.126069	1911.88	0.29305	23178.1	0.29972
800	53.4854	0.127378	1941.19	0.29321	23477.8	0.29972
810	54.7657	0.128679	1970.52	0.29337	23777.6	0.29973
820	56.0589	0.129970	1999.86	0.29352	24077.3	0.29973
830	57.3651	0.131253	2029.22	0.29366	24377.0	0.29973
840	58.6840	0.132527	2058.60	0.29380	24676.7	0.29973
850	60.0156	0.133792	2087.98	0.29394	24976.5	0.29973
860	61.3598	0.135048	2117.38	0.29407	25276.2	0.29973
870	62.7165	0.136295	2146.80	0.29420	25575.9	0.29973
880	64.0856	0.137534	2176.22	0.29432	25875.7	0.29974
890	65.4671	0.138763	2205.66	0.29444	26175.4	0.29974
900	66.8609	0.139984	2235.11	0.29456	26475.1	0.29974
910	68.2668	0.141196	2264.57	0.29467	26774.9	0.29974
920	69.6848	0.142399	2294.04	0.29478	27074.6	0.29974
930	71.1147	0.143593	2323.53	0.29488	27374.4	0.29974
940	72.5566	0.144778	2353.02	0.29498	27674.1	0.29974
950	74.0103	0.145955	2382.52	0.29508	27973.9	0.29974
960	75.4757	0.147123	2412.04	0.29518	28273.6	0.29974
970	76.9527	0.148282	2441.56	0.29527	28573.3	0.29975
980	78.4413	0.149432	2471.09	0.29536	28873.1	0.29975
990	79.9413	0.150574	2500.63	0.29545	29172.8	0.29975
1000	81.4527	0.151707	2530.18	0.29553	29472.6	0.29975