

01178
3



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**AHORRO DE ENERGÍA USANDO FILTROS
SOLARES CON BASE EN HIERRO
EN VENTANAS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA (ENERGÍA)
P R E S E N T A:
JESÚS CHÁVEZ GALÁN

DIRECTOR: DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO

MÉXICO, D.F.

2003

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

"Fue el hombre quien, para sobrevivir, empezó a infundir valor a las cosas. Por eso se llama hombre: es decir, el ser que mide y valora"

Friedrich Nietzsche

A mis padres: Jesús Chávez y Graciela Galán

***A mis hermanos: Graciela, Cesar, Gladis,
Faride, Leslie y Helder***

"Allí donde termina la especulación comienza en la vida real la ciencia real y positiva, la exposición de la actividad práctica, del proceso práctico de los hombres"

Karl Marx

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	3
1. ANTECEDENTES	6
1.1. Demanda energética nacional	7
1.1.1 Crecimiento de la demanda energética	7
1.1.2 Predominio de los combustibles fósiles en la demanda energética	8
1.2. Ventanas: confort y ahorro de energía	10
1.2.1. El confort térmico dentro de una edificación	10
1.2.2. La radiación térmica	13
1.2.3. La ventana y el vidrio	14
1.2.4. Propiedades ópticas	17
1.2.5. Propiedades ópticas de un sistema vidrio-película delgada	19
1.2.6. Propiedades promedio	19
1.2.7. Uso de filtros solares en las ventanas para el ahorro de energía	20
1.3. El hierro como material selectivo a la radiación	23
1.3.1. Propiedades ópticas de los óxidos de hierro	23
1.3.2. Últimos avances sobre películas delgadas de óxidos de hierro	25
2. EROSIÓN IÓNICA O "SPUTTERING"	27
2.1 Clasificación de las tecnologías de depósito de películas delgadas	27
2.2 El proceso físico de erosión iónica o "sputtering"	29
2.2.1 El plasma	29
2.2.2 Descarga luminosa	30
2.2.3 Erosión iónica tipo diodo	33
2.2.4 Erosión iónica asistida con radiofrecuencia	35
2.2.5 Erosión iónica asistida con magnetrones	36
3. DESARROLLO DE LOS FILTROS SOLARES	40
3.1 Descripción del equipo	40
3.2 Fabricación de los filtros solares con base en hierro	46
3.2.1 Proceso de limpieza del sustrato de vidrio	46
3.2.2 Erosión iónica del hierro	47
3.2.3 Reducción en atmósfera de H_2+N_2 de las películas obtenidas	49
4. PROPIEDADES DE LOS FILTROS SOLARES CON BASE EN Fe	52
4.1 Propiedades ópticas de los filtros solares con base en hierro	52
4.2 Análisis por RBS de los filtros solares con base en hierro	57
4.3 Análisis por XRD de los filtros solares con base en hierro	58

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5. EVALUACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO POR EL USO DE LOS FILTROS SOLARES	61
5.1 Caso Cd. de México	62
5.2 Caso Mexicali, B.C.	63
5.3 Caso Chihuahua, Chi.	64
5.4 Caso Veracruz, Ver.	64
5.5 Caso Mérida, Yuc.	65
5.6 Caso Mexicali B.C. usando vidrios Reflectasol-Vitro	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	70

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

D

AGRADECIMIENTOS

A los Instituto de Ingeniería y de Física de la UNAM, que proporcionaron toda la infraestructura utilizada en el desarrollo de este proyecto.

Un especial agradecimiento al Dr. Rafael Almanza por la confianza y libertad concedida a mi persona durante la realización de este trabajo.

A los Sres. Alejandro Núñez y Víctor H. Orozco por su enorme ayuda durante la fabricación de los filtros solares, al igual que por su apreciable amistad.

Al Dr. Luis Rodríguez del Instituto de Física-UNAM por el gran apoyo ofrecido durante la etapa de reducción de las películas y los análisis RBS, así como también por sus valiosos comentarios.

Al M. en I. Iván G. Martínez y a los Drs. David Morillón y Marcos Mazari, agradezco ampliamente sus observaciones y sugerencias durante la revisión del presente trabajo.

Al Fis. Juan Carlos Pineda Santamaría por su ayuda y oportunos comentarios en los análisis RBS, realizados en el acelerador Van de Graff de 0.7 MeV del Instituto de Física-UNAM.

Al Dr. Adolfo Cordero Borboa del Instituto de Física-UNAM por todo el apoyo y asesoría en los análisis XRD.

Al Dr. Aarón Sánchez del Centro de Investigaciones en Energía-UNAM por las facilidades proporcionadas para la medición de transmisividades y reflectividades de los filtros solares.

A mis compañeros de celda: Gerardo Silva, Genaro Correa, Vicente Flores, Oscar Callejas, Álvaro Lentz, y Arturo Sáez por su ayuda, amistad y compañía.

A mis estimados amigos y compañeros de la Maestría: Santiago, Hilda, Joel, Paloma y Lavinia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero.

A todos los impulsores e instauradores de la educación pública, uno de los peldaños necesarios para alcanzar la casi utópica igualdad social.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

Para las temporadas calurosas, la radiación emitida por el Sol y que se introduce a través de las ventanas, provoca una ganancia térmica grande en las edificaciones, por lo que el interior de ellas experimenta un calentamiento excesivo. Para los periodos de frío, el exterior se encuentra a una temperatura baja y la ventana es el principal elemento a través del cual la edificación pierde el calor generado en el interior. Lo anterior resulta en un elevado consumo de energía (electricidad principalmente) para conseguir las condiciones de confort térmico humano, y que aunado a la creciente demanda energética que experimenta el sector residencial, comercial y público en México, constituye un serio problema.

Como una propuesta de solución al problema de desconfort térmico generado al interior de las edificaciones por las inadecuadas propiedades de los materiales de construcción, se desarrollaron en este trabajo filtros solares con base en hierro por medio de los cuales se logra un control selectivo de la radiación solar que se transmite a través de las ventanas. Estos filtros solares consisten en películas delgadas de FeO depositadas sobre sustratos de vidrio cal-sosa (el más usado en nuestro país para las edificaciones) de 600x300x3 mm, por medio de la técnica de sputtering asistida con radiofrecuencia y magnetrones planos, partiendo de un blanco de hierro puro de 127x254 mm y usando un plasma de argón. Para obtener el grado de oxidación deseado en el hierro, pequeñas muestras (45 x 22 mm) fueron sometidas a un proceso de calentamiento en una atmósfera reductora constituida de 50% H₂ + 50% N₂, durante un período de tiempo de 10 minutos a una temperatura de 400°C.

Los filtros solares con base en FeO presentan una transmisividad de 30.2% para el intervalo visible del espectro electromagnético (radiación con longitud de onda de 380-780 nm), y de 39.9% para el infrarrojo cercano (radiación con longitud de onda de 780-2500 nm); mientras que su reflectividad es de 17.5 y 19%, para los intervalos visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético respectivamente. Se realizó una simulación, a través del software Energy 10, del comportamiento energético de una casa-habitación cuando utilizan en las ventanas vidrios simples (una lámina) tipo cal-sosa, así como también cuando esta misma edificación usa en las ventanas los filtros solares con base en FeO desarrollados. Ambos casos se comparan obteniéndose así los posibles ahorros de energía por el uso de dichos filtros solares en las ventanas. Las simulaciones fueron llevadas a cabo para diferentes localidades del país, obteniéndose que los filtros solares con base en FeO desarrollados, permiten ahorros de energía principalmente por concepto de acondicionamiento de aire (calefacción y enfriamiento). Las simulaciones efectuadas para los lugares con climas cálidos extremos (Mexicali y Chihuahua) y cálido-húmedos (Mérida y Veracruz) presentan los más grandes porcentajes de ahorro energético, llegando estos a ser de hasta 16.4%; mientras que las cifras más pequeñas son para climas templados (Cd. de México), en donde se observan ahorros del 9.1%. Se simuló también el caso en que se utilizan los vidrios Reflectasol ©AP Tintex de Vitro para la Cd. de Mexicali, resultando tener un mejor desempeño los filtros solares con base en FeO desarrollados. Cuando son consideradas estrategias tales como el uso de aleros y control de la iluminación, junto con los filtros solares con base en FeO, los ahorros de energía se incrementan, como se mostró para el caso de Mexicali.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN

Las cantidades de energía utilizadas con el fin de alcanzar las condiciones de confort térmico humano dentro de las edificaciones no son nada despreciables, principalmente para las zonas norte y costera de nuestro país, donde el mayor consumo de energía del subsector residencial es por el concepto de acondicionamiento de aire, mientras que para muchas otras zonas el consumo por este concepto no llega a ser tan considerable. El diseño de un edificio, por lo tanto, deberá considerar la comodidad de los ocupantes de la edificación con el mínimo consumo de energía, procurando que sea la misma construcción la que regule los intercambios de materia y energía con el medio ambiente y propicie las condiciones que determinan la sensación de confort al interior.

Uno de los principales mecanismos por medio del cual aumenta la ganancia térmica de una edificación (y con ello el nivel de disconfort térmico humano) es la radiación, emitida por el Sol, que se introduce a través de las ventanas de dicha edificación. Tal radiación solar es absorbida (transformándose en calor) y reflejada por los cuerpos del espacio interior, mientras que la radiación solar térmica (infrarrojo cercano) provocará un calentamiento directo del aire, resultando así en una elevación de la temperatura del medio.

Como consecuencia, para las temporadas calurosas la edificación tendrá una ganancia térmica grande a través de las ventanas, por lo que el interior experimentará un aumento considerable de temperatura y, en consecuencia, un calentamiento excesivo. Por otro lado, para los periodos del año de temperaturas bajas el exterior se encontrará a una temperatura muy baja, y por lo tanto la ventana será el principal elemento mediante el cual la edificación perderá el calor generado en el interior. Para los grandes edificios modernos con fachadas cubiertas casi por completo por vidrios, este mecanismo se convierte en el más importante obstáculo para conseguir el confort térmico en su interior. Este problema normalmente se soluciona mediante el uso de equipos de aire acondicionado y sistemas de calefacción.

Dentro de las alternativas para remediar el problema de disconfort en el interior de las edificaciones, surgido a raíz de las inadecuadas propiedades ópticas y térmicas de las ventanas, se encuentra una propuesta que consiste en colocar a los vidrios recubrimientos de materiales selectivos a la radiación, a través de los cuales se puede regular la entrada de la radiación solar que incida sobre las ventanas, es decir, lo que actualmente se conocen como *filtros solares*. Para este caso se necesita que los filtros solares impidan el paso de la radiación solar cuyas longitudes de onda están dentro del intervalo del infrarrojo cercano, y lo permitan para el caso de la radiación solar visible.

Distintas compañías fabricantes de vidrios, tales como Vitro, Pilkington y Saint Gobain, han ya puesto en el mercado nacional una amplia variedad de vidrios con propiedades ópticas muy peculiares. Este tipo de vidrios son denominados como *arquitectónicos*, los cuales consisten en vidrios con diversas coloraciones producto de la adición de diferentes elementos en la composición del vidrio, o bien en vidrios con recubrimientos de diversos materiales con ciertas características de selectividad a la radiación solar.

Buena parte de los vidrios con recubrimientos que se encuentran actualmente en el mercado, presentan la peculiaridad de que absorben hasta el 80% de la radiación solar, la

cual posteriormente es reirradiada por el mismo vidrio hacia el interior y exterior de la edificación, sólo que lo hace en forma de radiación de onda larga (radiación térmica o infrarroja). Otros se caracterizan por tener altos valores de reflectividad, por lo cual aunque si disminuyen ciertamente la transmisividad en el infrarrojo cercano, hacen lo mismo para el caso del intervalo visible del espectro. Ello por lo tanto ocasiona una disminución de la iluminación en el interior del edificio.

Algunos autores [Pulker H. K., 1984; Salmang H., 1962] reportan al Fe_2O_3 y el FeO como los responsables de la absorción de radiación solar del vidrio en los intervalos ultravioleta e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, respectivamente. La transmisividad del vidrio disminuye de forma importante para el intervalo del infrarrojo cuando aumenta el porcentaje de óxidos de hierro contenido en dicho vidrio. En virtud de las propiedades ópticas que proporciona al vidrio su contenido de FeO , surge la necesidad de investigar el comportamiento de una película delgada de FeO depositada sobre un sustrato de vidrio cal-sosa. Considerando lo anterior, es posible que el "dispositivo" propuesto actúe como un filtro solar selectivo a la radiación, con miras a su utilización como ventanas en las edificaciones para lograr el confort térmico humano en el interior de ellas, disminuyendo de esta forma el consumo energético destinado para tal fin.

El planteamiento del presente trabajo es que puede propiciarse un ahorro en el consumo de energía en una vivienda por calefacción y aire acondicionado, cuando son utilizados filtros solares con base en FeO (películas delgadas de óxido ferroso FeO depositadas sobre sustratos de vidrio) en las ventanas, donde actuaran como elemento selectivo a la radiación solar con una transmisividad baja en el infrarrojo, evitando el calentamiento excesivo en el interior de la edificación provocado por ganancias térmicas grandes a través de las ventanas para las temporadas calurosas; así como la pérdida de calor generado en el interior durante las temporadas de clima frío.

El objetivo de este trabajo es fabricar filtros solares con base en FeO , de tamaños relativamente grandes ($300 \times 600 \times 3$ mm), y que consisten en películas de óxido ferroso FeO depositadas sobre sustratos de vidrio cal-sosa a partir de la erosión iónica (sputtering) asistida con magnetrones planos y radiofrecuencia, de un blanco de hierro puro; así como mostrar los posibles ahorros en el consumo energético de una vivienda cuando estos son utilizados en las ventanas. Esto último deberá realizarse a través del uso de herramientas especializadas como el software para simulación Energy-10, consiguiendo así una correcta caracterización del desempeño de los filtros solares en la edificación.

En el capítulo 1 se presenta cómo está constituida la demanda energética actual en México, especialmente en el sector residencial, comercial y público. Se analiza el concepto del confort térmico al interior de las edificaciones, mostrándose la importancia de las ventanas como uno de los elementos reguladores de dichas condiciones de confort a través de sus mismas propiedades físicas. Se describen las principales propiedades ópticas: transmisividad, reflectividad y absorptividad de un material, así como también dichas propiedades para sistemas compuestos tales como lo son los filtros solares desarrollados en este trabajo. Después de ello es indicado el uso actual de filtros solares en las ventanas de edificaciones con el fin de disminuir las condiciones de desconfort, citándose algunos ejemplos tanto a nivel comercial como a nivel investigación. Por último, se examinan las propiedades ópticas de los óxidos de hierro con miras a ser utilizados en el desarrollo de filtros solares mediante una película delgada de óxido ferroso depositada sobre sustratos de

vidrio; así como también los avances más recientes sobre películas delgadas de óxidos de hierro.

En el capítulo 2 se realiza una descripción del proceso físico de bombardeo iónico o "sputtering", incluyendo los casos de erosión iónica asistida con radiofrecuencia y con magnetrones.

La descripción del equipo utilizado así como también de las diferentes etapas del proceso de fabricación de los filtros solares con base en FeO, es presentada en el capítulo 3. Los espectros de transmisividad, reflectividad, las propiedades ópticas promedio, así como los análisis RBS y XRD de los filtros solares fabricados con base en FeO, están contenidos en el capítulo 4.

Por otra parte, el capítulo 5 contiene los resultados de la simulación realizada mediante el software Energy-10, del comportamiento térmico de un departamento de interés social que utiliza en las ventanas los filtros solares con base en FeO fabricados, así como también se compara con un caso base en el cual se considera que el departamento utiliza en las ventanas vidrios tipo cal-sosa, cuantificando de esta forma los ahorros de energía en la edificación a lo largo del año. Tales simulaciones se realizan para localidades del país en las cuales se presentan diferentes condiciones climatológicas, tales como la Cd. de México, Mexicali, Chihuahua, Veracruz y Mérida. Tal simulación se realizó también considerando que se utilizan los vidrios Reflectasol ©AP Tintex de Vitro para la Cd. de Mexicali, resultando tener un mejor desempeño los filtros solares con base en FeO desarrollados. Además, también para Mexicali se presenta el caso en que, junto con los filtros solares con base en FeO, son consideradas estrategias tales como el uso de aleros y control de la iluminación en la edificación.

Por último se presentan las conclusiones del trabajo de tesis.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 1

ANTECEDENTES

Hoy en día la situación del sector energético nacional se torna complicada. Por un lado, se debe lidiar con la creciente demanda de energía que experimenta el mercado interno, producto del crecimiento económico y demográfico del país; mientras que por otro lado, existe el problema relacionado con el deterioro ambiental originado por la propia explotación y consumo de los recursos energéticos, ello en virtud de la gran participación que tienen los combustibles fósiles, generadores de los principales gases contaminantes emitidos a la atmósfera cuando se queman.

Lo último es, en gran parte, consecuencia de las mismas características de los recursos energéticos con que cuenta nuestro país, ya que éste es uno de los principales productores de petróleo crudo, ubicándose en segundo lugar de todo el continente americano, solamente por debajo de los Estados Unidos de América y el octavo en el ámbito mundial; así como también posee las segundas reservas más grandes de petróleo del continente y el octavo lugar a nivel mundial dentro del mismo rubro [Secretaría de Energía, 1999].

Actualmente la tendencia mundial hacia los mercados libres, unida al inevitable fenómeno de la globalización, influyen en demasía sobre los sectores energéticos de todos los países, y el sector energético mexicano no es la excepción, proponiendo la apertura de los mercados nacionales a la libre competencia y ajustándose también a las nuevas condiciones de financiamiento del crecimiento económico; por lo tanto el problema se debe atacar desde muchos frentes y no sólo desde el estrictamente técnico, con el fin de lograr un sector eficiente que permita alcanzar un crecimiento suficiente y un desarrollo pleno de la economía nacional, evitando el detrimento de nuestro medio ambiente y la extrema polarización de las clases sociales del país, esto es, un desarrollo sustentable.

El escenario se presenta aún más difícil ya que se debe también luchar contra la idiosincrasia de una población acostumbrada a la abundancia de recursos energéticos y, por lo general, bastante ajena a cualquier medida que implique un uso racional de la energía, por lo que todo esto deberá realizarse en un marco de concientización de la sociedad acerca de la importancia que representa el uso racional de la energía.

El tema del ahorro y uso eficiente de la energía no es nuevo, de hecho cobró gran fuerza durante las crisis petroleras de los setentas, desarrollándose paralelamente al concepto de ahorro de energía las llamadas fuentes alternas de energía, que derivaron en varias formas de aprovechar estas fuentes alternas como lo podrían ser los calentadores solares, los aerogeneradores, las fotoceldas solares, etc.; sin embargo, el hallazgo de numerosas reservas de petróleo en algunas partes del mundo, incluyendo las halladas en el territorio mexicano, disminuyó en parte el interés mostrado por los gobiernos, instituciones y

empresas por dicho tema. Debido al preocupante panorama que se vislumbra, surgido a raíz del implacable carácter finito de las reservas petroleras mundiales, unido a los enormes problemas ambientales surgidos de la misma explotación de los recursos energéticos y, además, apoyado en el interés que podría despertar un ahorro energético, desde el punto de vista monetario, para los sectores industriales y empresariales, el tema del ahorro y uso eficiente de la energía resurge y se convierte en parte esencial del tan anhelado desarrollo sostenible.

1.1 Demanda energética nacional

1.1.1 Crecimiento de la demanda energética

Las cifras del consumo de energía en México pueden analizarse con el fin de entender la importancia que adquiere en estos momentos el ahorro de energía. Para muestra se presentan los siguientes datos publicados por la Secretaría de Energía: el consumo nacional final total de energía en el año 2000 fue de 4038.6 PJ, cifra de la cual 3801 PJ (94.1%) fueron de consumo final energético y el resto (5.9%) corresponde al consumo final no energético. En la figura 1.1 se presenta la participación porcentual de cada uno de los sectores, así como del consumo no energético, dentro del consumo nacional final total de energía durante el 2000.

El sector que presenta el mayor porcentaje de participación es el de Transporte, alcanzando los 1614.2 PJ (40%). En segundo término encontramos al sector Industrial con 1234.4 PJ (30.6%); mientras que el sector Residencial, Comercial y Público contribuye con 837.3 PJ (20.7%). Para finalizar, en el mismo orden descendente, tenemos al sector Agropecuario con 115.5 PJ (2.9%) de consumo energético.

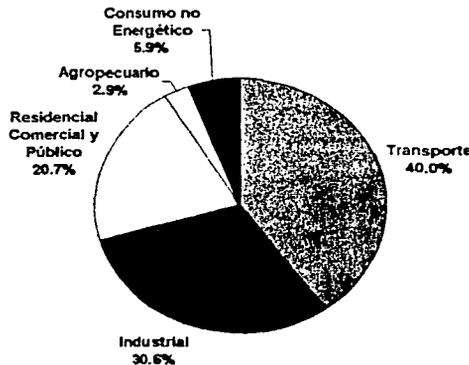


Figura 1.1 Estructura porcentual del consumo nacional final total de energía para el año 2000 (4,038.581 petajoules totales). [Secretaría de Energía, 2000].

El consumo en el sector Agropecuario está evidentemente muy lejos del consumo de cualquiera de los tres primeros; por lo tanto, donde se centran los principales esfuerzos en aras de encontrar y desarrollar los diferentes programas y mecanismos de ahorro de energía,

es dentro de los tres primeros sectores. El sector hacia el que se enfoca el presente trabajo es el residencial, comercial y público.

El consumo del sector residencial, comercial y público para el año 2000 se describe en forma detallada en la figura 1.2. El subsector residencial tiene una participación del 84.5% (707.5 PJ) del total del consumo energético en todo el sector, dejando en segundo término al subsector comercial con el 13% (108.9 PJ) y en el final el subsector público con un consumo de solo el 2.5% del total (20.9 PJ).

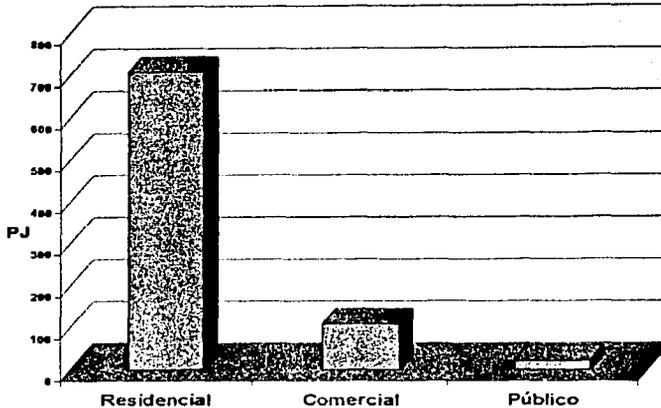


Figura 1.2 Participación porcentual por sector en el consumo de energía del sector residencial, comercial y público para el año 2000 (837.315 petajoules totales). [Secretaría de Energía, 2000].

En la anterior figura queda claramente evidenciada la enorme importancia de reducir el consumo energético en el subsector residencial, ya que esto repercute de forma substancial en el consumo de todo el sector. El consumo energético del sector debe satisfacer principalmente las necesidades de cocción de alimentos, iluminación, calefacción, aire acondicionado, calentamiento de agua y alumbrado público. Es prudente señalar aquí que el consumo de energía en este sector registró un incremento del 4% con respecto al año de 1999, cifra que resulta alarmante si consideramos que tal crecimiento de la demanda continúa en el sector.

1.1.2 Predominio de los combustibles fósiles en la demanda energética

Las cifras anteriores ayudan a entender el problema de la creciente demanda de energía existente en nuestro país, sin embargo, analizando el consumo energético desde otra perspectiva, es decir, considerando los tipos de combustibles que son utilizados, podemos entonces empezar a entender el grave problema ambiental que representa ello. La figura 1.3 advierte tal situación, las gasolinas y naftas representan el 26.3% del total (997.9 PJ), el diesel contribuye con el 15.2% (577 PJ), le sigue la electricidad con 14.7% (559.2 PJ), el gas natural participa con 12.3% (467.4 PJ), el gas licuado con 11.9 % (451.4 PJ), la leña con 6.7% (253.9 PJ), el combustóleo con 5.2% (197.3 PJ), los querosenos con 3.1% (118 PJ), el coque con 2.5% (96.5 PJ) y el bagazo de caña con 2.2% (82.6 PJ).

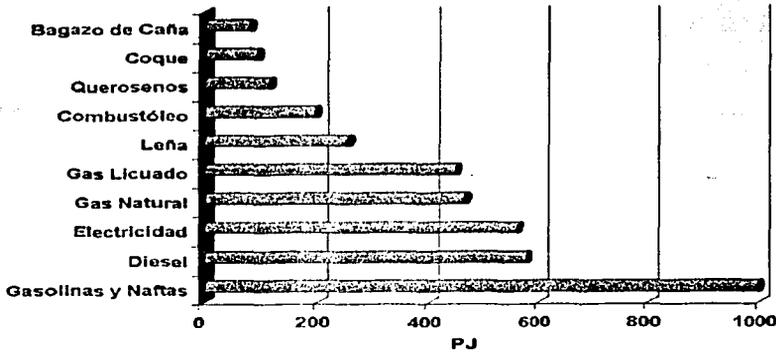


Figura 1.3 Consumo final energético nacional por tipo de energético para el año 2000 (3801.406 petajoules). [Secretaría de Energía, 2000].

Pasando al caso más específico que interesa, el sector residencial comercial y público, las cantidades no son muy diferentes de los datos anteriormente presentados, en cuanto se refiere al uso amplio de los combustibles fósiles.

El consumo de energía por tipo de energético, para el sector residencial, comercial y público es mostrado en la figura 1.4. En este caso el gas licuado es el energético mayormente utilizado, representando su consumo el 42.5 % del total (355.9 PJ), mientras que la leña alcanza el 30.3 % (253.7 PJ) y la electricidad el 23.1% (193.4 PJ); por último el gas natural, el diesel y los querosenos participan con 4.1% del total (5 PJ). Se puede afirmar que son tres los principales energéticos utilizados en el sector residencial, comercial y público, es decir, es menos amplia la gama de energéticos utilizados en este sector que en el total del mercado interno.

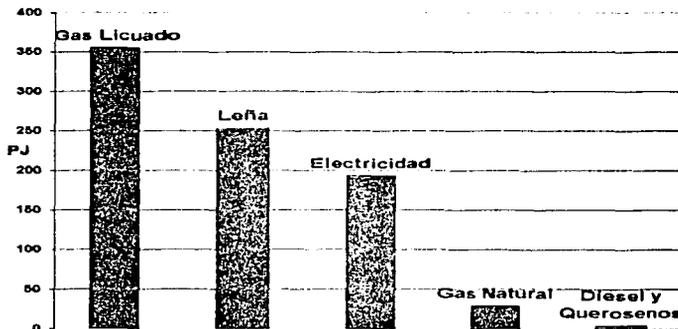


Figura 1.4 Consumo de energía en el sector residencial, comercial y público por tipo de energético para el año 2000 (837.315 petajoules). [Secretaría de Energía, 2000].

TEXTO CON FALLA DE ORIGEN

Es incuestionable que los combustibles fósiles representan la gran mayoría del consumo energético nacional, lo cual se traduce en una mayor emisión de gases contaminantes a la atmósfera y por tanto un deterioro del ambiente. De lo anterior, podemos afirmar que el ahorro de energía es fundamental para lograr un desarrollo sustentable, ya que no solamente contribuye en el aspecto económico a través del mismo ahorro monetario que implica un ahorro de energía para el usuario, sino que también conlleva a un menor dispendio de los combustibles responsables del deterioro ambiental.

1.2 Ventanas: confort y ahorro de energía

1.2.1 El confort térmico dentro de una edificación

Una parte importante del sector residencial comercial y público son las edificaciones, y por tanto son fundamentales los avances tecnológicos que se hagan para el ahorro de energía en éstas, ello con el fin de disminuir el consumo energético en todo el sector. Esta importancia de las edificaciones se subraya si recordamos que el subsector residencial (constituido esencialmente de casas-habitación) representa la mayor parte del consumo energético del sector.

A lo largo de la historia y del desarrollo humano, muchas veces la adaptación de la edificación a su entorno ha representado una lucha entre la arquitectura y el medio ambiente. El enorme crecimiento demográfico de las ciudades ha ocasionado serios problemas ambientales por el aumento en el consumo de recursos no renovables, por la emisión de más contaminantes y por la producción de desechos en cantidades mucho mayores.

Por otro lado, el surgimiento y expansión de una Arquitectura Internacional, con el objetivo de construir el mismo tipo de edificación sin importar las condiciones climáticas, ha ocasionado que muchas zonas urbanas presenten una disfuncionalidad bioclimática que aparece en un alto porcentaje de las construcciones que las forman. De esta forma, edificios creados en ciudades europeas, asiáticas, nórdicas, o en cualquier parte del mundo, son exportados sin el menor cuidado, a regiones que nada tienen que ver con el clima, la cultura o la población de origen.

La mayor parte de los modernos edificios son desatinadamente dependientes en su totalidad de la energía convencional; solo basta observar los grandes edificios con estructuras de acero y envolvente de vidrio, convirtiéndose así en los lugares más inhóspitos que pueda haber, edificios súper aislados, condicionados al uso de electricidad para lograr abatir sus enormes niveles de desconfort. En cuanto a las viviendas, la situación es bastante parecida, el diseño de las actuales unidades habitacionales toman muy poco en cuenta la idea de conseguir en el interior de las viviendas las condiciones necesarias para alcanzar la sensación de confort humano a través de un bajo consumo energético; después de todo las limitaciones no son pocas: el incesante crecimiento demográfico que desemboca en una gran demanda de vivienda y la necesidad de abatir costos en su construcción para permitirle su acceso a un mayor número de familias, entre otras.

La sensación humana de confort dentro de una edificación puede ser principalmente de tres tipos específicos: el confort higrotérmico, el acústico y el de iluminación. Indudablemente el más importante y más comúnmente fuera de los intervalos de tolerancia dentro de una edificación es el confort higrotérmico. La ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) define el confort térmico como: aquella

condición de la mente y el cuerpo que expresa satisfacción con la temperatura ambiente. Algunas veces se hace alusión al confort higrotérmico denominándolo únicamente térmico, pero aquí los consideraremos sinónimos. El confort térmico depende de la temperatura radiante de los cuerpos y de la temperatura, humedad y velocidad (o ventilación) del aire. Existen muchas formas de determinar los niveles de tolerancia del confort, por ejemplo, en la figura 1.5 vemos la gráfica bioclimática de Olgay. Se presenta una zona de confort térmico considerando las variables de temperatura de bulbo seco y humedad relativa del aire, incluyendo además ciertas medidas correctivas necesarias para recuperar la sensación de confort en cualquier punto situado fuera de la zona. Los datos de esta gráfica sólo pueden aplicarse directamente a los habitantes de Estados Unidos, con vestimenta normal para interior, vida sedentaria o con poco esfuerzo muscular y a una altitud no muy superior a los 1000 msnm. Para aplicarla a zonas alejadas de los 40° de latitud, la línea del perímetro de confort de verano debe elevarse aproximadamente 2/5°C cada 5° de latitud hacia latitudes inferiores.

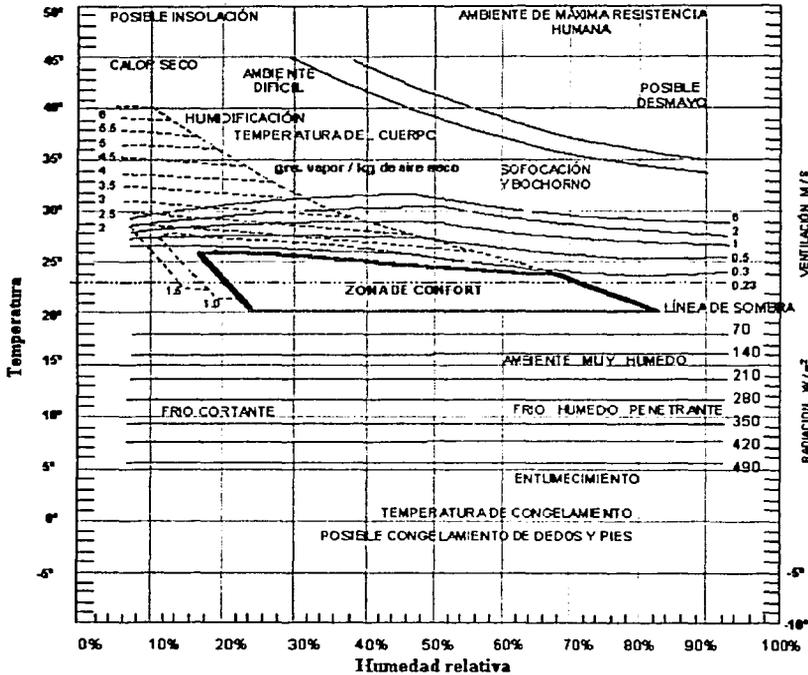


Figura 1.5 Gráfica Bioclimática de Olgay [Olgay V., 1963].

Cada método para determinar el confort térmico humano tiene sus particularidades y sus limitaciones en cuanto a las condiciones para su aplicabilidad. En la figura 1.6 el confort ahora es puesto en función de la temperatura ambiente y de la actividad física realizada en términos del calor disipado.

ESTE CON
FALLA DE ORIGEN

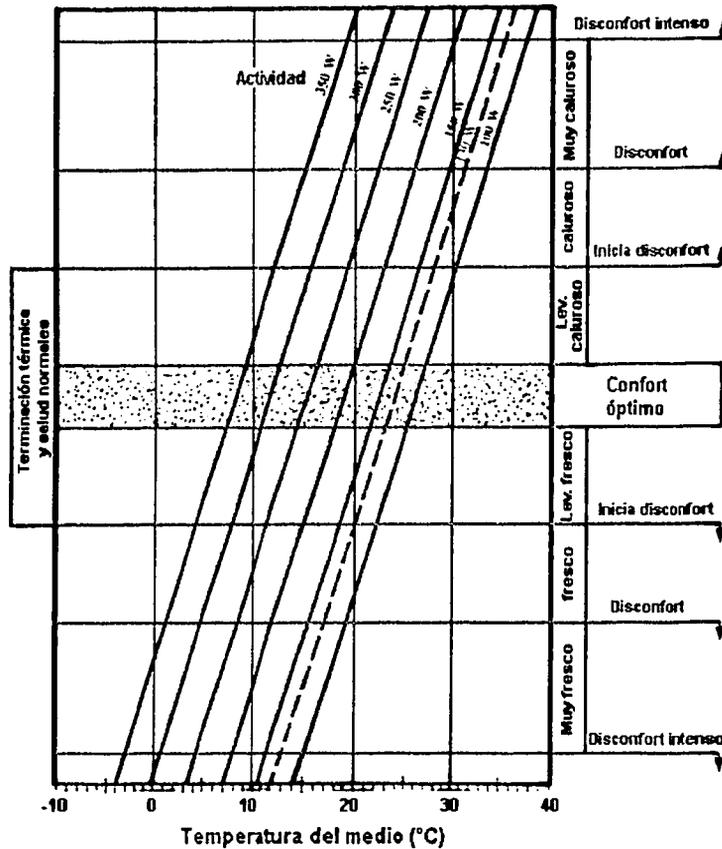


Figura 1.6 El confort humano en función de la temperatura y la actividad física realizada en términos del calor disipado [Rivero R., 1988].

Un ambiente bajo condiciones de disconfort térmico no sólo resulta molesto a las personas, sino que además produce fatiga, agotamiento físico y nerviosismo, disminución del rendimiento, aumento de errores y riesgo en el trabajo. En la figura 1.7 se muestran los resultados de una investigación referente a la frecuencia de los accidentes en una fábrica [Rivero R., 1988]. De ahí podemos fácilmente comprender la influencia que tiene la temperatura ambiente sobre la frecuencia de los accidentes. Es claro que cuando no se mantiene el confort térmico necesario en el centro laboral, esto se traduce en una mayor frecuencia de los accidentes, en virtud de que el trabajador no se encuentra a gusto con el ambiente y por tanto atiende más a esta preocupante sensación de malestar, distrayéndose y desatendiendo a las actividades que realiza.

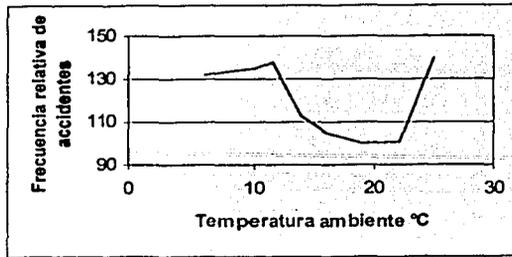


Figura 1.7 Frecuencia de accidentes de trabajo en función de la temperatura del medio [Rivero R., 1988].

La preocupación por el diseño de edificaciones de consumo mínimo energético o, en el caso ideal, de nulo consumo de energía convencional, es retomada a través del concepto cada vez más difundido de Diseño Bioclimático. Consiste en proyectar o construir considerando la interacción de los elementos meteorológicos con la construcción, a fin de que sea esta misma la que regule los intercambios de materia y energía con el medio ambiente y propicie las condiciones que determinan la sensación de bienestar térmico del ser humano en interiores [Morillón D., 1993]. De la sencillez y claridad de la definición anterior, se deduce rápidamente que una edificación cuyo diseño incluya la perspectiva bioclimática será, como consecuencia, una edificación de bajo consumo energético, ya que se abatirá gran parte del consumo energético destinado a proveer confort dentro de las construcciones.

En México, el mayor consumo de energía en las edificaciones es por el concepto de acondicionamiento de aire, durante las épocas de mayor calor, principalmente en las zonas norte y costera del país. La ganancia por radiación solar es la fuente más importante a controlar, por lo cual es importante mejorar el diseño térmico de los edificios, logrando así la comodidad de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía. Desde el punto de vista normativo, en México existe la norma oficial NOM-008-ENER-2001 de eficiencia energética en edificaciones para envolvente de edificios no residenciales [Diario Oficial de la Federación, 2001]. Su objetivo es principalmente proporcionar los elementos e información a través de los cuales se pueda limitar la ganancia de calor de las edificaciones a través de su envolvente, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento. Esta Norma aplica a todos los edificios nuevos y las ampliaciones de edificios existentes, quedando excluidos aquellos edificios cuyo uso primordial sea industrial o habitacional. Si el uso de un edificio dentro del campo de aplicación de esta Norma constituye el 90 por ciento o más del área construida, esta Norma se aplica a la totalidad del edificio.

1.2.2 La radiación térmica

El espectro electromagnético abarca una amplia gama de diferentes clases de radiaciones provenientes de una variedad de fuentes. De acuerdo con la teoría de Maxwell se puede afirmar que, si bien estas difieren en gran manera en cuanto a sus propiedades, sus medios de producción, y las maneras en que las observamos, comparten otras características en común: todas pueden describirse en términos de campos eléctricos y magnéticos, y todas

viajan a través del vacío con la misma velocidad (la velocidad de la luz). De hecho desde el punto de vista fundamental, difieren sólo en la longitud de onda o en la frecuencia. La velocidad c de una onda electromagnética en un medio con índice de refracción n , está dada en los siguientes términos:

$$c = c_0 / n = \lambda \nu \quad (1.1)$$

Donde: c_0 - velocidad de la luz en el vacío
 λ - longitud de onda
 ν - frecuencia de la onda

La figura 1.8 muestra las diferentes bandas de longitud de onda en que se divide el espectro electromagnético.

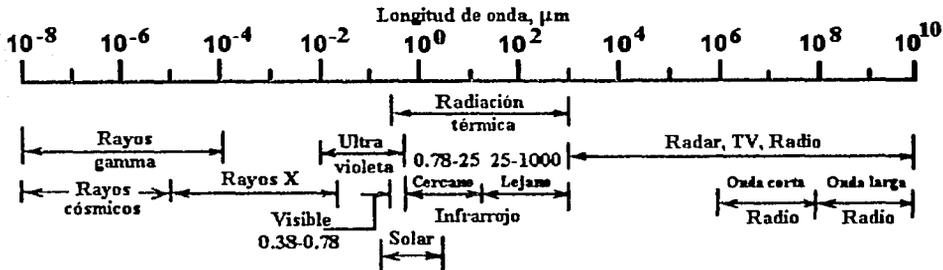


Figura 1.8 El espectro de radiación electromagnética [Duffie J. y Beckman W.,1991].

La radiación infrarroja, que tiene longitudes de onda desde 780 nm hasta 1 mm aproximadamente, se emite comúnmente por átomos ó moléculas cuando cambian su movimiento vibratorio o rotatorio. Este cambio ocurre a menudo como un cambio en la energía interna del objeto emisor y se observa como un cambio en la energía interna del objeto que detecta la radiación. La radiación infrarroja es un medio importante de transferencia de calor, por lo que muchas veces se le llama radiación térmica. Todos los objetos emiten radiación térmica en virtud de su temperatura.

1.2.3 La ventana y el vidrio

La importancia del vidrio como material de construcción se ha incrementado notablemente durante los últimos años, cuando la arquitectura contemporánea lo ha convertido en uno de los materiales preferidos, sobretodo para la construcción de grandes edificaciones. A pesar de su gran uso, consecuencia de la tendencia antes mencionada, los encargados de diseñar y construir las edificaciones (arquitectos e ingenieros civiles) poseen poco conocimiento de sus diferentes propiedades, razón por la cual no han sido considerados en su verdadera dimensión los problemas que ocasiona su utilización en forma arbitraria, basándose sólo en criterios estéticos, sin tomar en cuenta las ventajas o desventajas que traerían sus propiedades físicas. Independientemente de las actuales tendencias arquitectónicas, en las viviendas y edificaciones en general, el vidrio es por mucho el material más utilizado para las ventanas, y de ahí su importancia.

Los vidrios obtenidos en la industria quedan suficientemente caracterizados por la definición de la *American Society for Testing Materials*: “El vidrio es un producto inorgánico fundido que se ha enfriado sin cristalizar”. Su composición química dependerá de la materia prima utilizada y del proceso de fabricación. El vidrio más comúnmente utilizado en México para las edificaciones es el de cal-sosa [Correa G., 2002], cuya composición química es la siguiente: 67.7% SiO₂, 15.6% Na₂O, 5.6% CaO, 0.6% K₂O, 2% BaO, 4% MgO, 2.8% Al₂O₃, 1.5% B₂O₃, 0.1% (FeO+Fe₂O₃).

La conductividad térmica del vidrio cal-sosa es 1.2 W/m°C, un valor relativamente alto con respecto a la mayoría de los materiales de construcción, lo que lo convierte en un material por el cual circula una buena parte del calor que entra o sale de una habitación a través de la conducción. Lo mismo sucede para el caso de la transmisividad del vidrio cal-sosa. La radiación solar que entra a las edificaciones a través del vidrio está compuesta esencialmente de radiación del intervalo entre los 250 y 3000 nm (visible e infrarrojo cercano principalmente), y como lo podemos constatar en la figura 1.9, el vidrio cal-sosa se muestra ampliamente transparente a las longitudes de onda de que se conforma la radiación solar. En virtud de la alta transparencia del vidrio cal-sosa a la radiación cuya longitud de onda corresponde al intervalo del infrarrojo cercano (radiación térmica), el vidrio será el principal material por donde entre o salga de una edificación, el calor a través del mecanismo de la radiación.

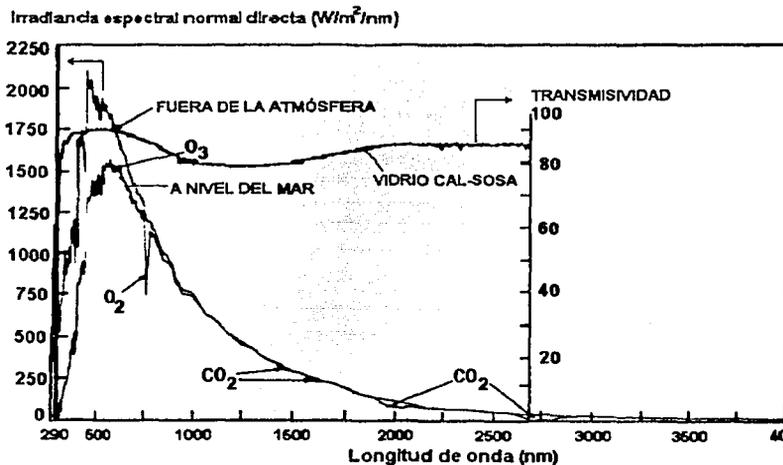


Figura 1.9 Distribución espectral de la irradiación solar normal directa [Correa G., 2002].

Se puede observar también, en la figura 1.9, la influencia de la atmósfera en la radiación que llega a la superficie de la tierra pues ésta es diferente de la que se presenta fuera de la atmósfera, esto es porque dicha radiación es absorbida por algunos de los gases de la atmósfera

Una lámina de vidrio cal-sosa de unos 4 mm de espesor, transmitirá el 80% de la radiación que incide sobre ella y el 20% restante será reflejada y absorbida, tal como lo ilustra la

figura 1.10. Una ventana construida con vidrio de cal-sosa (el más comúnmente utilizado en nuestro país para este fin) presentará desventajas derivadas de las propiedades de dicho material descritas anteriormente. Cuando la radiación solar incide sobre el vidrio de la ventana, la mayor parte de esa energía pasará hacia el interior de la edificación, debido a la alta transmisividad del vidrio cal-sosa al intervalo de longitud de ondas del visible y del infrarrojo cercano de que se compone dicha radiación. Una vez dentro del edificio, la radiación solar será absorbida y reflejada por los cuerpos del espacio interior. Aquella parte de la radiación cuya longitud de onda pertenezca al intervalo del infrarrojo cercano (radiación térmica) calentará directamente el aire; lo cual, aunado al hecho de que la energía de la radiación solar absorbida por los cuerpos del espacio interior se transformará en calor, provocará una elevación en la temperatura del medio. Aquella parte de la energía que no se transmite por el vidrio es absorbida por éste y reirradiada, una parte hacia el exterior y lo restante hacia el interior en forma de radiación de onda larga. La situación se torna complicada, ya que para aquellas temporadas calurosas, la edificación tendrá una ganancia térmica grande a través de las ventanas, por lo que el interior experimentará un aumento considerable de temperatura y, en consecuencia, un calentamiento excesivo. Este problema normalmente se resuelve utilizando equipos de aire acondicionado.

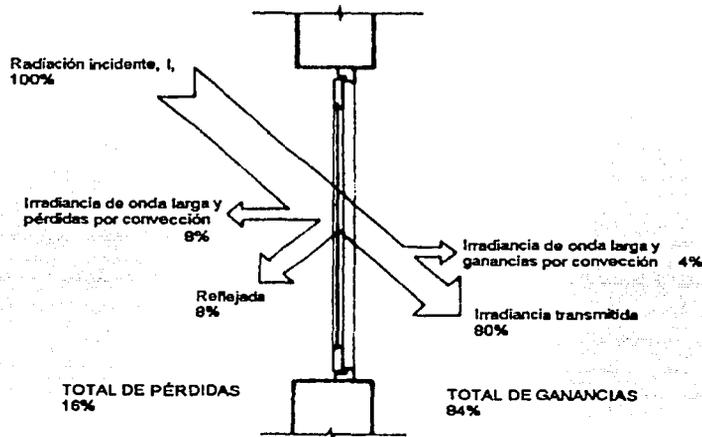


Figura 1.10 Balance de energía para la radiación incidente sobre una ventana de vidrio cal-sosa [Correa G., 2002].

Por otro lado, para los periodos del año de temperaturas bajas el problema se presenta en forma inversa, ya que el exterior se encontrará a una temperatura muy baja, y por lo tanto la ventana será el principal elemento mediante el cual la edificación perderá, hacia el exterior, el calor generado por pérdidas en iluminación, actividad de los habitantes o simplemente el proporcionado por el sistema de calefacción.

El alto uso del vidrio cal-sosa en las ventanas de edificaciones y en general como material de construcción se debe a su bajo precio y alta comercialización, por lo que encontrar un sustituto de éste implica muchos obstáculos, ya que deberá encontrarse un material que por

sus propiedades físicas, evite los problemas antes mencionados, proporcionando además una buena transparencia en el intervalo visible de la radiación y compitiendo en precio también.

1.2.4 Propiedades ópticas

Cuando cierta cantidad de radiación electromagnética incide sobre un cuerpo, una parte de ésta es reflejada, otra parte es absorbida y, si el material es transparente o semitransparente, otra es transmitida, tal como lo sugiere la figura 1.11.

Radiación incidente (=1)

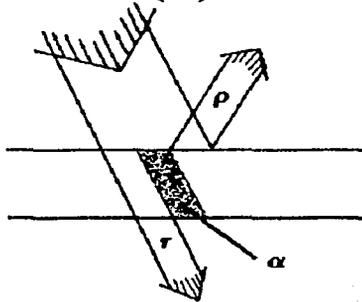


Figura 1.11 Representación esquemática de la transmisividad τ , absorptividad α y reflectividad ρ .

La aseveración anterior no es más que la ley de la conservación de la energía, cuya expresión para este caso es:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (1.2)$$

La fracción de energía que es reflejada, absorbida y transmitida a través del material depende totalmente de las propiedades físico-químicas del mismo.

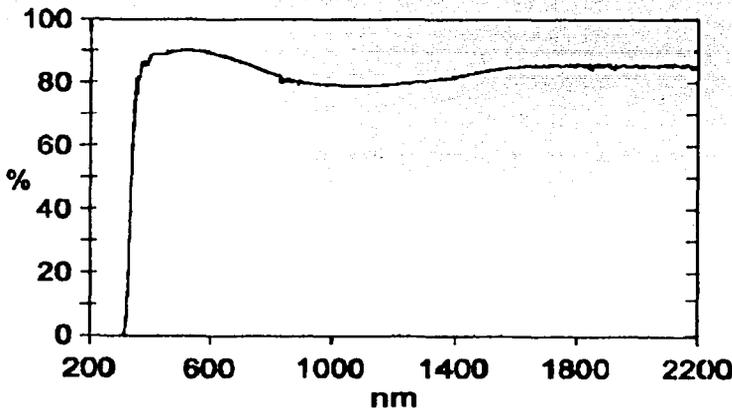


Figura 1.12 Transmisividad medida para el espectro de radiación solar, de un vidrio de cal-sosa flotado de 5 mm de espesor [Correa G., 2002].

Para el caso del vidrio de cal-sosa (material transparente) sobre el que incide radiación solar, gran parte de la energía es transmitida, mientras que la restante será reflejada o absorbida por el vidrio, tal y como fue mostrado anteriormente en la figura 1.10. Por lo tanto, el valor de las propiedades ópticas del vidrio utilizado en las ventanas (transmisividad, reflectividad y absorptividad), determinará en gran parte el aumento en la temperatura en el interior de la edificación y, por ende, el grado de discomfort térmico. Si entendemos y conocemos tales propiedades podemos predecir el comportamiento que mostrará la ventana al interactuar con la radiación solar incidente; y con ayuda de información con respecto a la edificación (ubicación, dimensiones, materiales de construcción, etc) sabremos las condiciones predominantes al interior de ella. La curva de transmisividad medida para el espectro de radiación solar, de un vidrio de cal-sosa flotado de 5 mm de espesor, como el utilizado en el presente trabajo, se muestra en la figura 1.12. Puede observarse la gran transparencia de tal vidrio a lo largo del espectro de radiación solar, ya que dicha curva se mantiene arriba del 85% de transmisividad.

La figura 1.13 representa una onda electromagnética viajando a través del medio Z. Se considera que los campos eléctrico E y magnético H están contenidos sólo en los planos xy y xz respectivamente. Si suponemos que el medio Z es un dieléctrico, la ecuación del campo eléctrico E es [Siegel R. y Howell J.R., 1992]:

$$E = E_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{n}{c_0} x \right) \right] \quad (1.3)$$

Siendo ω - frecuencia angular de la onda.
 n - índice de refracción del medio
 c_0 - velocidad de la onda en el vacío

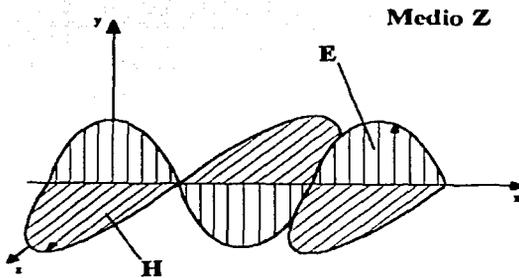


Figura 1.13 Representación de la onda electromagnética propagándose por el medio Z.

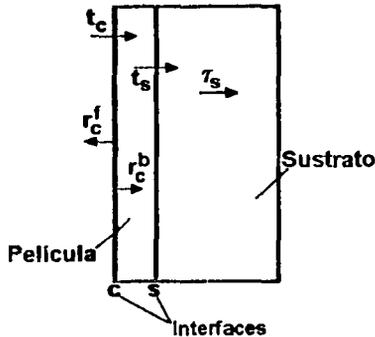
Para el caso más general en que el medio Z corresponda a un dieléctrico imperfecto o un metal, se introduce un elemento de atenuación en la ecuación 1.3, resultando la siguiente expresión [Siegel R. y Howell J.R., 1992]:

$$E = E_0 \exp \left\{ i\omega \left[t - (n - i\kappa) \frac{x}{c_0} \right] \right\} \quad (1.4)$$

donde κ es el coeficiente de extinción en el medio. El término de atenuación indica una absorción de energía de la onda cuando se desplaza a través del medio.

1.2.5 Propiedades ópticas de un sistema vidrio-película delgada

Con el fin de mejorar la apariencia y propiedades de las ventanas, los vidrios son recubiertos con ciertos materiales y de esta manera se consiguen filtros de radiación solar. Para predecir las propiedades ópticas de sistemas compuestos como lo es un sustrato de vidrio con algún recubrimiento sobre una de sus caras (figura 1.14), se tienen las siguientes ecuaciones [Rubin,1998], las cuales nos permiten caracterizar a la ventana:



$$T_c = \frac{(1-r_s) r_c^i \tau_s}{1-r_s r_c^f \tau_s^2} \quad (1.5)$$

$$R_c^f = r_s + \frac{(1-r_s)^2 r_c^f \tau_s^2}{1-r_s r_c^f \tau_s^2} \quad (1.6)$$

$$R_c^b = r_c^b + \frac{r_c^i r_s \tau_s^2}{1-r_s r_c^f \tau_s^2} \quad (1.7)$$

Figura 1.14 Esquema de un sistema vidrio (sustrato)-película delgada.

Donde:

T_c - transmisividad total del recubrimiento

r_c - transmisividad de la interfase del recubrimiento

τ_s - transmisividad interna del sustrato

r_s - reflectividad de la interfase del sustrato

r_c^f, r_c^b - reflectividad de la interfase del sustrato, en la cara frontal y posterior respectivamente

R_c^f, R_c^b - reflectividad total del recubrimiento, en la cara frontal y posterior respectivamente

La influencia del ángulo de incidencia dentro del comportamiento del sistema vidrio-película delgada se considera introduciendo el siguiente término en τ_s :

$$\tau_s = \frac{I_t}{I_i} = e^{-\frac{\kappa L}{\cos \theta}} \quad (1.8)$$

Donde: I_i - irradiancia incidente

I_t - irradiancia transmitida

κ - coeficiente de extinción

L - espesor de la película

θ -ángulo de incidencia

1.2.6 Propiedades promedio.

Las propiedades internas y externas señaladas anteriormente son función de la longitud de onda, ángulo de incidencia y polarización de la radiación que llega al vidrio; mientras que el índice de refracción y el coeficiente de extinción dependen de su longitud de onda. Con el fin de simplificar el manejo de estas cantidades se definen propiedades promedio para intervalos de longitud de onda.

Promedios espectrales

El valor promedio P de una propiedad determinada, para un intervalo deseado de longitud de onda, esta dado por la siguiente expresión:

$$P_x = \frac{\int_a^b P(\lambda)\Phi_x(\lambda)\Gamma_x(\lambda)d\lambda}{\int_a^b \Phi_x(\lambda)\Gamma_x(\lambda)d\lambda} \quad (1.9)$$

Donde: P- propiedad estudiada.

Φ - función de ajuste del flujo de la radiación incidente.

Γ - función de ajuste de la respuesta del detector con el que se realizan las mediciones.

a y b son los valores máximo y mínimo del intervalo de λ deseado.

Promedios direccionales

Para el caso en que la radiación llega desde todos los ángulos de un hemisferio, es decir, hay múltiples ángulos de incidencia (θ) y direcciones (φ), se hace una integración de la siguiente forma para obtener el promedio direccional de la propiedad P:

$$P = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} P(\theta)\cos(\theta)\sin\theta d\theta d\varphi \quad (1.10)$$

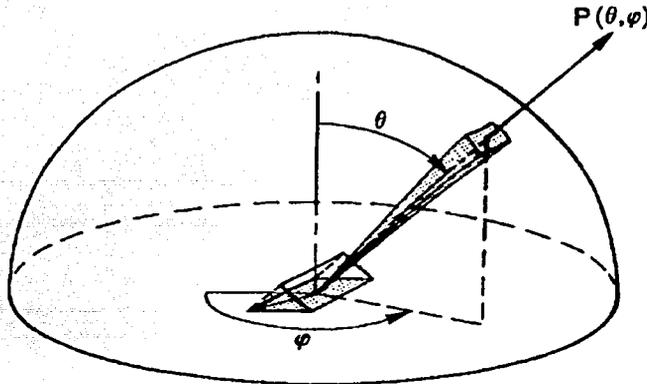


Figura 1.15 Representación de un hemisferio y los ángulos θ y φ .

1.2.7 Uso de filtros solares en las ventanas para el ahorro de energía

Para remediar el problema del disconfort generado en el interior de las edificaciones por las inadecuadas propiedades ópticas y térmicas de las ventanas, se ha probado la instalación de ventanas con doble vidrio en las que el espacio entre ambos vidrios se encuentra al vacío (presiones muy bajas) o relleno de aire o algún gas de baja conductividad térmica. Sin embargo, tal opción es demasiado cara, ya que dentro de los costos de fabricación se debe contemplar un doble costo en el vidrio, el marco especial de aluminio, así como el costo que implica generar la baja presión en la cámara entre ambos vidrios, o en su defecto su relleno con algún gas conveniente.

Una solución acorde al concepto de ahorro de energía y sin sacrificar por ello el confort humano dentro de la edificación, es colocar a los vidrios recubrimientos de materiales selectivos a la radiación, obteniendo lo que se conoce como filtros solares. Para este caso se necesita que los filtros solares impidan el paso de la radiación solar cuyas longitudes de onda están dentro del intervalo del infrarrojo cercano, y lo permitan para el caso de la radiación solar visible. Se han desarrollado a nivel industrial algunos vidrios con ciertos recubrimientos que le confieren al vidrio las coloraciones verdosas, azuladas y grisáceas, que presentan los grandes edificios. Desgraciadamente buena parte de los vidrios con recubrimientos que se encuentran actualmente en el mercado no funcionan de manera óptima, ya que presentan la peculiaridad de que absorben hasta el 80% de la radiación solar, la cual posteriormente es reirradiada por el mismo vidrio hacia el interior y exterior de la edificación, sólo que lo hace en forma de radiación de onda larga (radiación térmica o infrarroja). Para otros, su característica principal es que son recubrimientos altamente reflejantes, disminuyendo efectivamente la transmisividad en el infrarrojo cercano, pero haciendo lo mismo para el caso del intervalo visible del espectro, lo cual ocasiona el problema de la disminución de la visibilidad en el interior del edificio, provocándose ahora un disconfort de iluminación, es decir, una disminución en el nivel de iluminación dentro de la edificación. En las tablas 1.1, 1.2 y 1.3 se presentan algunos ejemplos de los vidrios arquitectónicos que se encuentran actualmente en el mercado nacional para el caso de las compañías Vitro, Pilkington y Saint Gobain respectivamente.

Producto	Apariencia	Espesor (mm)	T (%) Luz-calor	R (%) Luz-calor	U (W/m ² K) Ver-Inv	Coefficiente de sombreado	Ganancia* de calor solar
Reflectasol AP Tintex	Plata	6	8-4	29-17	4.87-4.75	0.24	0.21
Duovent Filtrasol	Claro	25	38-38	7-7	3.22-2.73	0.57	0.49
Duovent Pyroplata Vitrosol	Claro	25	19-23	20-15	3.23-2.73	0.39	0.34

Tabla 1.1 Propiedades de algunos vidrios arquitectónicos fabricados por Vitro [Fuente: Internet].

Los productos Reflectasol de la tabla 1.1 son vidrios con recubrimientos fabricados mediante bombardeo iónico de metales en un ambiente de presión controlada (sputtering); mientras que los vidrios denominados Pyroplata se recubren mediante un proceso pirólítico depositando vapores químicos sobre la superficie del vidrio a altas temperaturas. Por último, las unidades Duovent están formadas por dos laminas de vidrio unidas por un separador de aluminio que componen un espacio de aire hermético. Alguna o ambas de estas láminas de vidrio pueden ser del tipo Reflectasol o Pyroplata con el fin de aumentar la eficiencia del sistema Duovent. En la tabla 1.2 se muestran los vidrios Pilkington, los cuales son recubiertos en una de sus caras mediante la técnica de pirólisis. Algunos

* La ganancia de calor solar es el calor solar transferido hacia el interior del edificio (tanto por radiación como por convección) por unidad de radiación solar total que incide sobre el exterior de la ventana, cuando el haz de radiación solar es perpendicular a la ventana. El coeficiente de sombreado se obtiene dividiendo entre 0.86 el valor de la ganancia de calor solar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ejemplos de vidrios arquitectónicos fabricados por Saint Gobain se exhiben en la tabla 1.3. El vidrio Antelio es fabricado mediante pirólisis aplicando una capa de óxidos metálicos en una de sus caras; el producto Cool-Lite es un vidrio que presenta una cara tratada con capas metálicas aplicadas por pulverización catódica al alto vacío. El producto Climalite es un doble acristalamiento compuesto por 2 o más hojas de vidrio se paradas por un espacio lleno de aire o gas, perfectamente deshidratado.

Producto	Espesor (mm)	Luz visible T-R (%)	Energía solar total T-R (%)	UV T (%)	U (W/m ² K)	Coefficiente de sombreado	Ganancia de calor solar
Artic Blue	6	56-6	35-5	23	5.8	0.60	0.52
Bronze eclipse monolithic	6	23-19	31-13	4	5.7	0.54	0.47
Solar E monolithic	6	60-7	45-7	45	3.6	0.62	0.53

Tabla 1.2 Propiedades de algunos vidrios arquitectónicos fabricados por la compañía Pilkington [Fuente: Internet].

Producto	Espesor (mm)	Luz visible T-R (%)	UV T (%)	Calor T-R-A (%)	U (W/m ² K)	Coefficiente de sombreado
Antelio	6	67-31	34	64-23-13	5.7	0.77
Cool-Lite	6	7-30	1	4-17-79	4.4	0.22
Climalite	6-12-6	6-30	1	3-16-81	2.3	0.13

Tabla 1.2 Propiedades de algunos vidrios fabricados por Saint Gobain [Fuente: Internet].

Por otra parte, en el ámbito de la investigación se han estudiado algunos materiales cuyas propiedades se toman interesantes para su utilización como recubrimientos selectivos a la radiación solar en la ventanas de edificaciones. Ejemplo de ello son las películas delgadas de SnS-Cu₂S, propuestas por Nair M.T.S. y Nair P.K. [1991] para su utilización como recubrimiento para el control solar. De la misma forma Nair M.T.S., et al. [1999] producen películas de Cu₂O, a partir de baños químicos, analizando sus propiedades ópticas, estructurales y eléctricas, y señalando su posible utilización como filtros solares. Richardson, et al. [2001] reportaron el depósito de películas de Cu y Cu₂O sobre pequeños sustratos de vidrio, los cuales tenían un recubrimiento de SnO₂/F destacando las propiedades ópticas selectivas del óxido. Correa G. [2001] fabricó también filtros solares combinando películas delgadas de óxidos y sulfuros de cobre, utilizando ya sustratos de vidrio de dimensiones relativamente grandes (30x60 cm). Se han desarrollado algunos recubrimientos ópticamente activos, es decir, que sus propiedades ópticas pueden variar conforme cambien las condiciones a que se hallan expuestos. Ozer N. y Tepehan F. [1993] señalan el cambio de las propiedades ópticas en películas delgadas de óxidos de cobre

cuando se les aplica una diferencia de potencial, esto es, presentan propiedades electrocrómicas. Estudios acerca del comportamiento termocrómico de películas de VO₂ (que significa el cambio en las propiedades ópticas de las películas en función de su temperatura) han sido reportados ampliamente [Kusano E., et al., 1988; Case F., 1990; Shigesato Y., et al., 2000]. El VO₂ es un material que a 68 °C sufre una modificación en su estructura convirtiéndose de un material semiconductor a un conductor, por consiguiente se modifican sus propiedades ópticas. Reportes de películas delgadas de VO₂ sobre sustratos de vidrio flotado son hechas por Sella, et al. [1998] para sustratos de tamaño pequeño, mientras que Correa G. [2002] lo hizo sobre sustratos grandes por erosión iónica, analizando también su comportamiento al utilizarlas en las ventanas de edificaciones.

1.3 El hierro como material selectivo a la radiación

1.3.1 Propiedades ópticas de los óxidos de hierro

Precisamente, en el mismo concepto de películas delgadas selectivas a la radiación solar (filtros solares) es que surge la propuesta del presente trabajo de tesis. Cuando se analiza la composición química de los vidrios es muy común encontrarnos con que muchas de sus propiedades estarán determinadas por los diferentes compuestos que lo constituyen, así como también por sus respectivas proporciones. La sustancia que comunica color a un vidrio convencional es, en general, el hierro, el cual incluso en proporciones de centésimas por ciento colorea, según sea el estado de oxidación de este metal, en verde azulado, verde amarillento o incluso pardo negruzco cuando está en presencia de azufre. El hierro ferroso (Fe²⁺) colorea con más intensidad que el férrico (Fe³⁺). Los vidrios con 1% de óxido de hierro son todavía azules si el 0.3% está en forma de óxido ferroso (FeO) y el 0.7% como óxido férrico (Fe₂O₃). Los vidrios con 3% de óxido de hierro son verdes si cuentan con 0.7% de FeO y 2.3% de Fe₂O₃. El Fe²⁺ existe siempre como elemento componente del vidrio al mismo tiempo que el Fe³⁺, durante la fabricación del vidrio se establecen equilibrios entre ambos iones que dependen de la concentración, composición del vidrio y atmósfera [Salmang H., 1962].

Respecto a la absorción de radiación solar del vidrio en los intervalos ultravioleta e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, puede afirmarse que la primera se origina por la presencia de Fe₂O₃ y la última por la de FeO, [Pulker H. K., 1984; Salmang H., 1962]. Los vidrios que contienen hierro absorben en toda la región del infrarrojo con un elevado máximo de absorción que difiere un poco en la bibliografía consultada, siendo a una longitud de onda de 1.1 μm para Salmang H. [op. cit.] y de 1.2 μm para Doremus R.H. [1973] presentándose una coloración azul del vidrio, derivada de la presencia del ión Fe²⁺. Al crecer la oxidación disminuye la intensidad de la absorción pero no desaparece.

En la figura 1.16 se muestran las curvas del comportamiento de la transmisividad para un vidrio de 6 mm con diferentes porcentajes de contenido de óxido de hierro. En el presente trabajo se utiliza el vidrio tipo cal-sosa, el cual como se menciona en la sección 1.2.3, contiene 0.1% de óxidos de hierro. En esta gráfica puede apreciarse como disminuye de forma importante la transmisividad del vidrio para el intervalo del infrarrojo cuando aumenta el porcentaje de óxidos de hierro contenido en dicho vidrio, aunque no se especifica en detalle el porcentaje de cada uno de los óxidos de hierro.

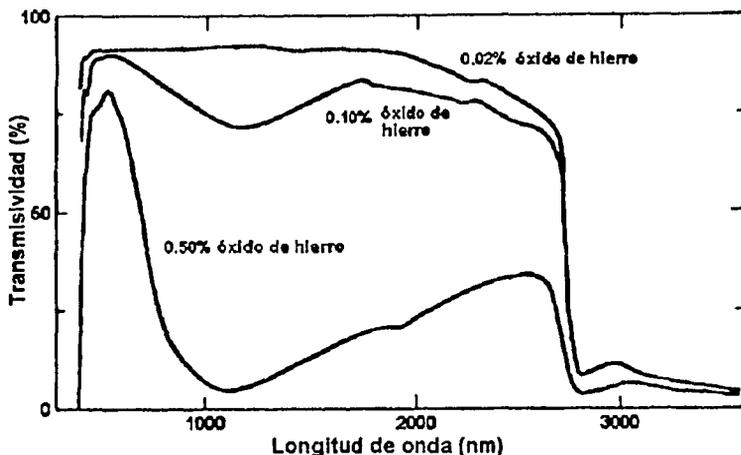


Figura 1.16 Transmisividad espectral para vidrios de 6 mm a diferentes porcentajes de óxido de hierro [Duffie J. y Beckman W., 1991].

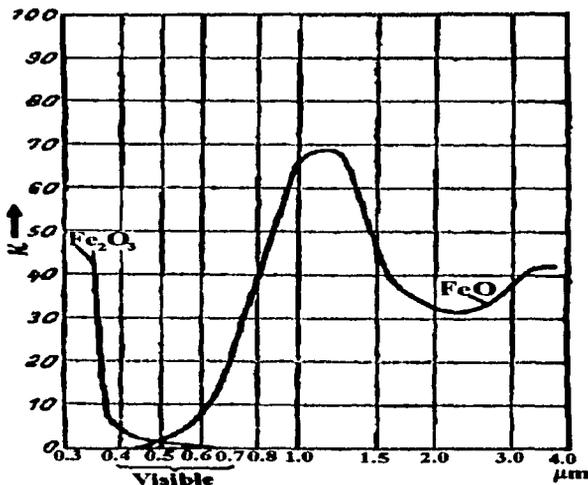


Figura 1.17 Coeficiente de extinción κ de un vidrio con solamente un óxido, FeO o Fe₂O₃. [tomado de Salmang H., 1962].

La figura 1.17 presenta la variación del coeficiente de extinción κ de un vidrio, en función de la longitud de onda (tomada en forma logarítmica) desde el extremo exterior del ultravioleta hasta el infrarrojo, para vidrios con solamente un óxido de hierro, FeO o Fe₂O₃

puros. Podemos ver lo antes mencionado con respecto a la gran absorptividad del óxido ferroso para el intervalo infrarrojo, así como el mismo comportamiento del óxido férrico sólo que para el caso del intervalo ultravioleta, apreciándose la baja absorción de ambos óxidos para la mayor parte del intervalo visible del espectro.

Por las propiedades ópticas selectivas de la radiación que proporciona al vidrio su contenido de FeO, resulta interesante investigar las propiedades que mostraría una película delgada de FeO depositada sobre un sustrato de vidrio cal-sosa, en virtud de la alta probabilidad de que se comporte como un filtro solar selectivo a la radiación solar y con miras a su consecuente utilización en las ventanas de edificaciones para lograr el confort humano deseado al interior de ellas, disminuyendo así el consumo energético destinado para tal fin.

1.3.2 Últimos avances sobre películas delgadas de óxidos de hierro

Se han realizado varios estudios sobre películas delgadas de óxidos de hierro, sin embargo, estas investigaciones tienen dos principales propósitos: desarrollar sensores de gas, así como materiales con alta densidad de grabado magnético. Por ello los principales óxidos de hierro estudiados han sido la hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$), la maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) y la magnetita (Fe_3O_4), cuyas propiedades son acordes a los fines ya mencionados. Con respecto a información sobre la fabricación de películas de óxidos de hierro podemos decir que estas han sido preparadas por medio de muchas técnicas tales como deposición química en fase vapor [Yan B., 1994], técnicas de baño químico [Orel B., et al., 1994] así como por erosión iónica con radiofrecuencia [Siroky K., et al., 1994; Stenberg T., et al., 1998].

Chang W.D., et al. [1995] obtienen películas de Fe_3O_4 por medio del proceso de erosión iónica con corriente directa y magnetrones, se utilizó una atmósfera de $\text{Ar}+\text{O}_2$ y pequeños sustratos de Si; a través de un tratamiento de post-oxidación de las primeras películas se obtienen películas de $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$,

Kim Y.K. y Oliveria M. [1994] fabrican películas de óxidos de hierro por medio de erosión iónica con radiofrecuencia y magnetrones, utilizando un blanco de Fe y sustratos de SiO_2 amorfo. Reportan la dependencia del estado de oxidación (FeO , Fe_2O_3) con respecto al espesor de las películas y al porcentaje del flujo de oxígeno en la mezcla utilizada de $\text{Ar}+\text{O}_2$. Kim K.J., et al. [2000] estudian la formación de películas de FeO a partir de una transición de fase generada por tratamiento de recocimiento de películas de Fe_3O_4 que contenían nanocristales de Fe, las cuales habían sido preparadas por erosión iónica con haz de iones de oxígeno y depositadas sobre sustratos de Si.

No existen muchos estudios que se enfoquen en las propiedades ópticas de películas delgadas de óxidos de hierro, entre ellos podemos mencionar el de Ruzakowski A.P., et al. [1997] quienes prepararon películas de $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ por medio del proceso de pirolisis en sustratos de vidrio cal-sosa flotado, con el fin de utilizarlos como vidrios de ventanas, reportando datos de transmisividad y coeficiente de refracción, así como también analiza otros óxidos de metales de transición, modelando el comportamiento de una mezcla de todos ellos. Sus resultados no son muy buenos para los fines que se citan, ya que obtienen transmisividades muy altas para el $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ (alrededor de 70% para casi todo el visible e infrarrojo cercano), mientras que para la mezcla modelada, el comportamiento para el intervalo visibles es deficiente (transmite alrededor del 45%) y en el infrarrojo es alto, aproximadamente del 65%. Hashimoto T., et al. [1996] presentan el índice de refracción así

como la absorptividad en el visible e infrarrojo cercano, de películas de $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ y $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ (aunque estos óxidos poseen la misma composición, su sistema cristalino es diferente, siendo trigonal-hexagonal escalenoédrico para el primero e isométrico-tetartoidal para el segundo [Berry L.G., et al., 1983]), y del compuesto Fe_3O_4 (que es un compuesto de FeO y Fe_2O_3 , con un 69% de Fe_2O_3 en su composición y el resto de FeO [Mann R. y Romdohr P., 1955]), preparadas por la técnica de sol-gel. Con la misma técnica de sol-gel, Özer N. y Tepehan F. [1999] depositan películas de Fe_2O_3 sobre sustratos de cuarzo y de vidrio, es el trabajo más importante con respecto a la utilización de óxidos de hierro como recubrimientos selectivos a la radiación solar ya que encuentran propiedades termocrómicas en el óxido mencionado, sin embargo, a pesar de que sí se observa una disminución en la transmisividad al aplicar una diferencia de potencial a la película, éstas medidas se limitaron sólo al intervalo visible del espectro presentándose valores constantes nada alentadores de 60 a 70%, además de que se distingue una tendencia a aumentar la transmisividad a valores mayores que los mencionados, para el intervalo del infrarrojo cercano.

La técnica de erosión iónica posee muchas ventajas con respecto a las demás, ya que a pesar de ser una técnica de depósito de películas delgadas que podría parecer cara, ésta tiene varios años de uso dentro de la industria además de que permite controlar muchas variables del proceso tales como la temperatura del sustrato, la presión parcial de oxígeno y la uniformidad del recubrimiento [Correa G., 2002]. Por otro lado, las películas producidas se caracterizan por tener una gran adhesión y poca corrosión, ya que al realizarse los depósitos en condiciones de muy bajas presiones ($\sim 10^{-3}$ mbar) y por tanto en ausencia de contaminación, ello permite una alta pureza de los materiales [Almanza R., et al., 1995; Correa G., 1996]. Por lo anterior, entre otras razones, se decidió emprender la fabricación de los filtros solares con esta técnica.

Capítulo 2

EROSIÓN IÓNICA O "SPUTTERING"

La utilización de recubrimientos por el hombre registró progresos limitados en la antigüedad, basados en enchapados, baños en metales líquidos y barnices; sin embargo, fue recién a partir de la revolución industrial cuando comenzó un desarrollo consistente del tema, marcando un hito importante el uso de la técnica de electrodeposición a partir de 1840. Durante el siglo XIX se produjeron las primeras películas delgadas metálicas por evaporación en vacío (es decir, a muy bajas presiones), hecho atribuido a Nahrwold en 1887. La técnica de evaporación en vacío tuvo inicialmente una amplia aplicación en óptica y uno de sus resultados más notables fue el recubrimiento en 1935 del espejo del telescopio del observatorio de Mount Wilson, de 2.5 m de diámetro. A finales del siglo XIX también se gestaron las ideas básicas y se produjeron las primeras aplicaciones de la técnica de deposición química en fase vapor. A partir de comienzos del siglo XX se registraron avances en varios frentes. En 1925 se desarrolló la electrodeposición de níquel-cromo, con lo que tomó gran auge la producción industrial de recubrimientos decorativos y protectores. A partir de 1910 se estableció comercialmente el método de recubrimiento con metales de proyección, utilizando una llama de oxiacetileno. Se basa en aportar el material a depositar bajo la forma de un polvo metálico a una llama de oxiacetileno. El polvo metálico caliente y en estado plástico es proyectado contra la superficie a ser cubierta, donde se adhiere y enfría formando un recubrimiento [Rodrigo A., 1998].

No obstante, fue recién después de la Segunda Guerra Mundial (~1945) cuando comenzó el uso de recubrimientos en escala industrial, utilizando principalmente el método de evaporación en vacío. En 1966, Mattox introdujo el proceso de "plateado iónico", basado en el uso de un plasma en un método clásico de evaporación, lo que dio lugar a una rápida incorporación de plasmas a las técnicas de deposición física y química en fase vapor (denominadas comúnmente como PVD y CVD respectivamente).

2.1 Clasificación de las tecnologías de depósito de películas delgadas

En la actualidad existe un gran número de tecnologías de depósito para la formación de materiales; sin embargo, el número de tecnologías a ser consideradas se limita cuando se trata del crecimiento de películas delgadas para la formación de capas, cuyos espesores van desde unos cuantos nanómetros hasta alrededor de diez micrómetros. Un esquema de clasificación es presentado en la Tabla 2.1, donde se han agrupado las diferentes técnicas de depósito de películas delgadas en: evaporativos, por plasma, procesos químicos en fase vapor y procesos químicos en fase líquida.

<p>Métodos evaporativos</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Evaporación convencional en vacío -Evaporación reactiva -Evaporación asistida por haz de electrones -Molecular-beam epitaxy 	
<p>Técnicas por plasma</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Erosión iónica "Sputtering" - Erosión iónica "Sputtering" reactivo 	<ul style="list-style-type: none"> -Tipo diodo -Bias sputtering -Getter sputtering -Asistido tipo triodo -Asistido por RF -Asistido por un haz de iones -Con magnetrones
	<ul style="list-style-type: none"> -Depósito por haz de iones -Plateado iónico -Plateado iónico reactivo -Depósito por cluster beam 	
	<ul style="list-style-type: none"> -Deposición química en fase vapor (CVD) asistida por plasma 	<ul style="list-style-type: none"> -Electrón Cyclotron Resonance (ECR) plasma CVD -Microwave plasma CVD -Proceso Microwave plasma CVD remoto
<p>Procesos químicos en fase vapor</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Deposición química en fase vapor (CVD) a presión atmosférica -CVD epitaxy -CVD a baja presión -CVD metalorgánica -CVD foto asistida -CVD inducida por láser -CVD asistida por electrones 	
<p>Procesos químicos en fase líquida</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Electro procesos 	<ul style="list-style-type: none"> -Electro plateado -Electroless plating -Deposición Electrophoretic
	<ul style="list-style-type: none"> -Técnicas mecánicas 	<ul style="list-style-type: none"> -Spray pyrolysis -Técnicas spray-on -Técnicas spin-on

Tabla 2.1 Clasificación de las técnicas de depósito de películas delgadas [Schuegraf K.K., 1988].

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

La evaporación y la erosión iónica son dos métodos muy usados a nivel industrial y que se llevan a cabo dentro de cámaras especiales de vacío, para evitar que las sustancias que se vayan a depositar estén contaminadas. Es por ello que se recomiendan para la fabricación de películas delgadas de alta pureza. Se ha probado sin embargo, que la evaporación térmica produce depósitos con menos adhesión, por eso se sugiere el trabajo con magnetrones para fabricar depósitos en áreas extensas y en grandes cantidades.

2.2 El proceso físico de erosión iónica o "sputtering"

Si un sólido es bombardeado con átomos, iones o moléculas cuyas energías cinéticas superen la energía de enlace de los átomos del sólido, dichos átomos son empujados a ocupar nuevas posiciones, dando lugar a su emigración hacia la superficie así como un daño en la superficie del sólido. Cuando la energía cinética de las partículas incidentes es mayor que $4H$ (siendo H el calor de sublimación del sólido), el desalojo de átomos y su eyección en fase gas, llega a jugar un rol decisivo. Para el bombardeo son utilizados iones en lugar de átomos neutros, en virtud de que son igualmente masivos que los anteriores y además pueden ser acelerados a través de campos eléctricos con el fin de proporcionarles la energía cinética que se desee. A este proceso se le denomina erosión iónica o "sputtering".

Durante la primera colisión entre las partículas incidentes y los átomos del sólido, los últimos son empujados de la superficie al interior, donde rebotan con los primeros átomos que conforman la red cristalina del sólido, suponiendo un arreglo aleatorio de los mismos. La distribución de la energía del choque llega a extenderse de 50 a 100 Å por debajo de la superficie, sin embargo, la mayor parte del intercambio de momento ocurre sólo hasta 10 Å desplazando hacia fuera a su vez a los que se encontraban en la superficie en ese momento. El átomo desalojado viaja a través del medio donde se encuentran los iones hacia la superficie en la que se desca depositar el material, el cual es llamado comúnmente sustrato, donde se condensa.

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

$$\varepsilon = \frac{4M_i M_T}{(M_i + M_T)^2} \quad (2.1)$$

Donde: M_i - masa del ión incidente (kg)

M_T - masa del blanco (kg)

2.2.1 El plasma

Para iniciar la exposición del proceso de bombardeo iónico es necesario, primero que nada, definir lo que se conoce como plasma, en virtud de la importancia que tiene este concepto para lograr entender el proceso físico antes mencionado.

"Un plasma es un gas cuasineutro de partículas cargadas y neutras que presenta un comportamiento colectivo y en el cual la energía potencial de una partícula típica debida a la interacción con su vecino próximo es mucho menor que su energía cinética".

En esta definición el término comportamiento colectivo significa que las interacciones electromagnéticas (de largo alcance) determinan las propiedades estadísticas del sistema; lo

cual representa una diferencia importante respecto de los gases ideales donde las partículas interactúan sólo a través de choques elásticos. El término cuasineutro significa que desde el punto de vista macroscópico el número de cargas de uno u otro signo es aproximadamente igual.

2.2.2 Descarga luminosa

Si se aplica un voltaje entre dos electrodos espaciados una cierta distancia en un ambiente a baja presión, figura 2.1, el flujo de corriente será muy pequeño, debido a que es grande la resistencia del gas neutro presente. Sin embargo, si se hace que el cátodo emita algunos electrones, el campo eléctrico los acelerará hacia el ánodo. Como un resultado de la aceleración producida por el campo eléctrico, los electrones ganarán energía y en su camino chocarán con las moléculas del gas ionizándolo. Con cada colisión se producen nuevos electrones de tal forma que el número de electrones que llega al ánodo es mayor que el producido originalmente en el cátodo. El campo eléctrico también acelerará a los iones y, si el voltaje aplicado es lo suficientemente grande, algunos de estos producirán más electrones al chocar contra el cátodo, fenómeno que se conoce como emisión secundaria de electrones. Estos nuevos electrones siguen el mismo mecanismo antes descrito y generan nuevos iones y nuevos electrones.

En la anterior secuencia de sucesiva generación de electrones secundarios que dan origen a más iones, los cuales generan más electrones secundarios, etc., la corriente producida se puede deducir por la siguiente expresión [Maissel L.I. y Glang R., 1970; Stephen M.R., et al., 1990]:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d})} \quad (2.2)$$

Siendo: I- corriente total que llega al ánodo (A)

I_0 - corriente generada en el cátodo por la fuente externa (A)

α - probabilidad de ionización del gas

d- distancia entre electrodos (m)

γ - probabilidad de emisión de electrones secundarios, emitidos por la ionización del gas

Cuando el voltaje entre los electrodos se va incrementando, lo mismo ocurre con los valores de α y γ , por lo que el denominador de la ecuación se aproximará a cero. Cuando ello sucede la corriente I aumenta con rapidez, manteniéndose el voltaje constante. A esta situación se le conoce como el *gas breakdown* o abatimiento del gas.

El voltaje mínimo al cual se consigue librar la resistencia del gas al flujo de corriente, llamado también voltaje mínimo de Paschen, está dado por [Stephen M.R., et al., 1990]:

$$V = \frac{A \times P \times d}{[C + \ln(P \times d)]} \quad (2.3)$$

Siendo: V- voltaje de abatimiento del gas (V)

P- presión del sistema (Pa)

d- distancia entre los electrodos (m)

A- inverso de la polarización eléctrica, depende del gas ($[C/m^2]^{-1}$)

C- constante adimensional, depende del gas

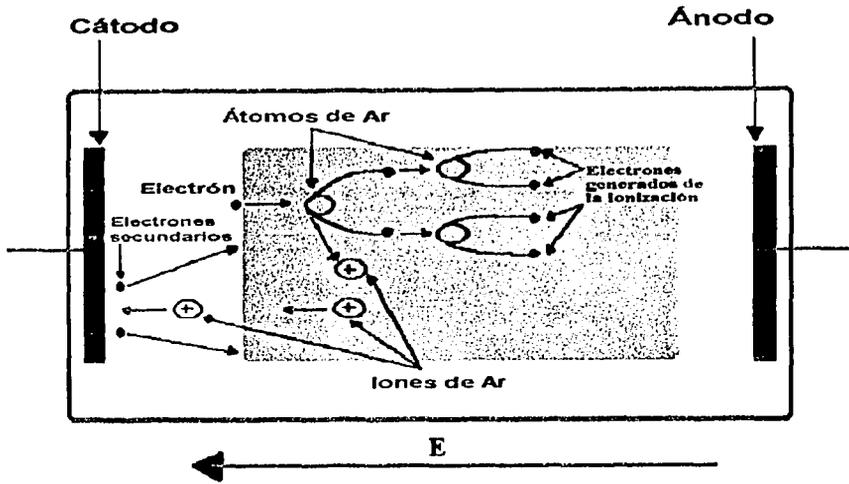


Figura 2.1 Esquema del proceso de descarga luminosa

Una vez que se presenta el *gas breakdown* ocurre la descarga luminosa, la cual se manifiesta visualmente a causa de la ionización y excitación de los átomos del gas presente. La principal característica de la descarga luminosa es que los electrones son creados por ionización y por generación secundaria de electrones. Si la potencia es incrementada en gran medida, el cátodo se calentará y, eventualmente, ocurrirá una emisión termoiónica llegando a ser el proceso dominante de creación de electrones. En este punto el voltaje decrecerá y la descarga luminosa evolucionará en un arco.

Para que el proceso sea autosostenible el número de electrones generados debe ser suficiente para producir tantos iones que puedan a su vez ser fuente de igual número de electrones. Una vez que se ha iniciado la ionización del gas, el número de electrones secundarios producidos en el cátodo es suficiente para mantener la descarga luminosa. El autosostén del plasma constituye la base para realizar la erosión iónica.

Aunque la descarga luminosa es una entidad casi continua a simple vista, ésta es dividida en diferentes regiones ubicadas entre los electrodos, en virtud de las diferencias en la distribución de potencial que se presentan [Stephen M.R., 1990; Kiyotaka W. y Hayakawa S., 1992; Pulker H.K., 1984]. La Figura 2.2 muestra las regiones mencionadas; estas son la *región del cátodo*, la *región negativa luminosa (plasma)*, el *espacio oscuro de Faraday*, la *columna positiva* y el *halo anódico*.

Región del cátodo. En esta región, se observa una banda luminosa angosta adyacente al cátodo, el *halo anódico*. La luz emitida desde aquí se debe a la excitación del gas neutro y al bombardeo de la superficie por los iones. Junto a esta zona se encuentra el *espacio oscuro de Crookes* o *cathode dark space*, en la que se presenta casi la totalidad de la caída de potencial. En esta zona los iones son acelerados hacia el cátodo, donde originarán la

emisión secundaria de electrones con una probabilidad de 0.1 a 0.05. Debido a que el mayor campo eléctrico se encuentra en tal zona, y la velocidad de los electrones es mayor que la de los iones del gas, la densidad electrónica es pequeña comparada con la de los iones.

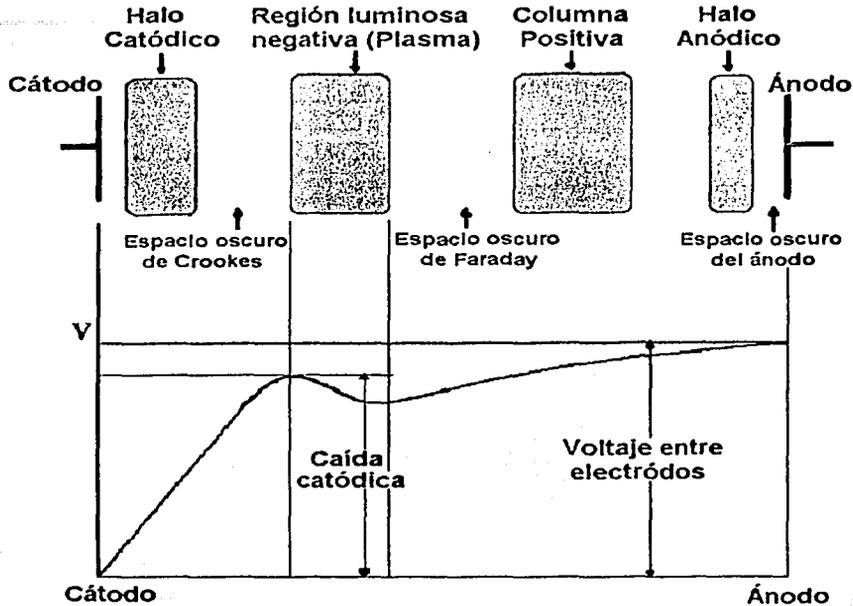


Figura 2.2 Regiones que conforman la descarga luminosa

Región luminosa negativa (plasma). Es una región de plasma con densidades iguales de iones y electrones, siendo valores típicos de 10^7 a 10^{11} por cm^3 . En virtud de que esta región es un plasma, el campo eléctrico aquí es pequeño. Esta zona es en la cual se concentran la mayor cantidad de partículas y es la región más luminosa.

Espacio oscuro de Faraday. Cuando los electrones llegan a la región del plasma poseen prácticamente la máxima energía disponible en el sistema; al presentarse las colisiones con el gas, que originarán la ionización, gran parte de esta energía se pierde hasta el punto en que ya no es posible producir iones adicionales (15.3 eV para el argón), por lo que al final de la zona del plasma los electrones, ya sin capacidad de ionizar o excitar átomo alguno, empiezan a acumularse creando una región oscura con una ligera carga negativa.

Columna positiva. En esta región los electrones son acelerados hacia el ánodo por el pequeño campo eléctrico local, el cual representa la principal fuente de energía. Su comportamiento es descrito por la ecuación (2.2), sólo que γ vale cero.

2.2.3 Erosión iónica tipo diodo

Con base en lo mencionado al inicio de esta sección sobre el fenómeno de la erosión iónica o sputtering, si los iones generados durante la descarga luminosa y que inciden sobre la superficie del cátodo poseen suficiente energía, éstos no solamente generarán electrones secundarios si no que también desalojarán átomos neutros del cátodo. La figura 2.3 muestra en detalle el fenómeno de erosión iónica entre los electrodos.

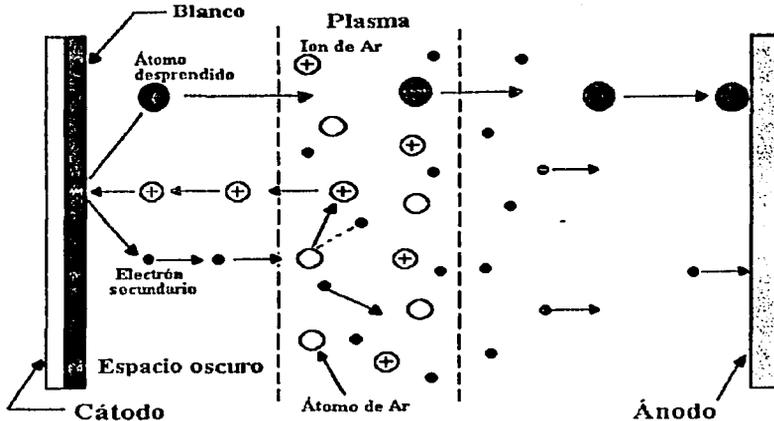


Figura 2.3 Representación del proceso de erosión iónica

En la figura 2.4 aparece la configuración por corriente directa. Para ello se requieren dos electrodos: un cátodo y un ánodo conectado a tierra física. En la superficie frontal del cátodo se coloca el material a erosionar habitualmente llamado blanco, mientras que en la superficie posterior un sistema para refrigerarlo. La mayoría de los blancos para erosión iónica se adhieren a una placa metálica refrigerada con agua. El adhesivo es generalmente soldadura de indio, de indio-estaño o algún epóxico tanto conductor térmico como eléctrico. En el ánodo se instala el sustrato. A la cámara donde se encuentran ambos electrodos se introduce un gas de trabajo, generalmente argón por sus cualidades de gas inerte. La descarga luminosa se inicia y se mantiene aplicando voltajes que van de cientos a miles de volts, dependiendo de la presión a la que se trabaja.

Se supone un arreglo aleatorio de los átomos del sólido a erosionar (aproximación para una estructura policristalina) y que las colisiones son elásticas; la cantidad de material desprendido del cátodo (S) para una superficie plana se calcula con [Sequeda, F.O., 1986]:

$$S = k_1 \alpha \left(\frac{M_T}{M_i} \right) \epsilon \frac{E}{U} \quad (2.4)$$

Siendo: S- cantidad de material erosionado [átomos / ión)

E- energía cinética del ión incidente (J)

U- entalpía de sublimación del blanco (J)

k_1 - constante (incluye energía de enlace del blanco y las masas de las partículas)

- α - función que depende de M_T/M_i (involucra ángulo de incidencia y camino libre medio del ión)
- M_i - masa del ión (kg)
- M_T - masa del átomo del blanco (kg)
- ϵ - fracción de energía cinética transferida por el ión (ecuación 2.1)

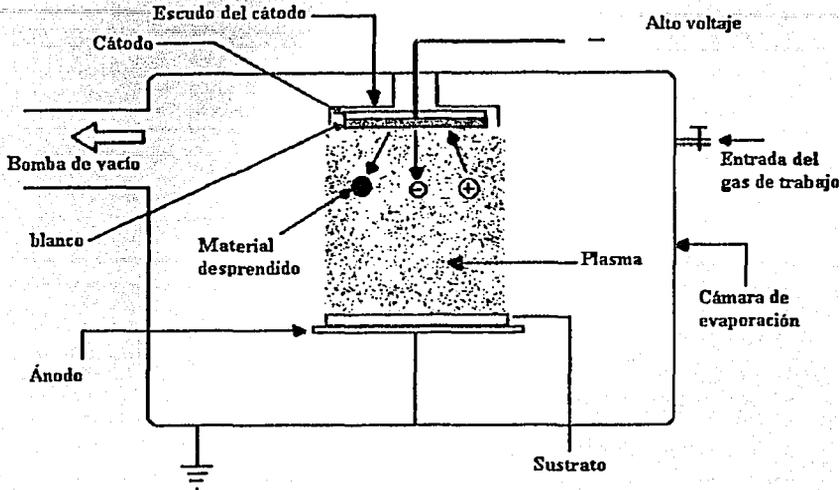


Figura 2.4 Configuración de un sistema de erosión iónica tipo diodo

Suponiendo que las partículas se comportan como esferas sólidas, S se puede obtener con [Sequeda, F.O., 1986]:

$$S = \frac{3}{4} \pi^2 \alpha \frac{\epsilon E}{U} \quad (2.5)$$

A su vez, el depósito total en el sustrato por unidad de área se obtiene con: [Kiyotaka W. y Hayakawa S., 1992]

$$R = \frac{k_2}{t} \left(\frac{S_0}{P * d} \right) \quad (2.6)$$

Siendo: k_2 - constante

d - distancia entre electrodos (m)

S_0 - total de partículas desprendidas por unidad de área (n/m^2)

t - tiempo

n - número de partículas

P - presión del sistema (Pa)

R - tasa de depósito (n/m^3s)

2.2.4 Erosión iónica asistida con radiofrecuencia

Es posible incrementar la eficiencia de ionización de los electrones presentes en la descarga mediante la aplicación de un campo de corriente alterna en la zona del cátodo, ya sea en forma capacitiva o inductiva, por dentro o por fuera de la cámara. Este método es especialmente útil para la erosión de materiales dieléctricos debido a que en la erosión por corriente directa existe acumulación inmediata de cargas positivas en la superficie del material a depositar, lo que provoca que la descarga luminosa no se mantenga por mucho tiempo. Los iones se acumulan pues el material no es conductor, entonces, en la superficie la carga neta se hace positiva, lo que repele a los nuevos iones que van llegando.

Al aplicar el potencial de corriente alterna, la polaridad de los electrodos se cambia varios miles o millones de veces por segundo, lo que evita que transcurra el tiempo suficiente para que las cargas se acumulen. Típicamente se utiliza un campo de radiofrecuencia de 13.56 MHz con una potencia de 1-3 kW y aproximadamente 2 kV de tensión pico a pico. Se trabaja a dicha frecuencia del campo ya que en este valor los iones masivos tienen suficiente inercia como para responder al campo eléctrico instantáneo en las regiones de la descarga luminosa. Un arreglo característico del sistema se presenta en la figura 2.5.

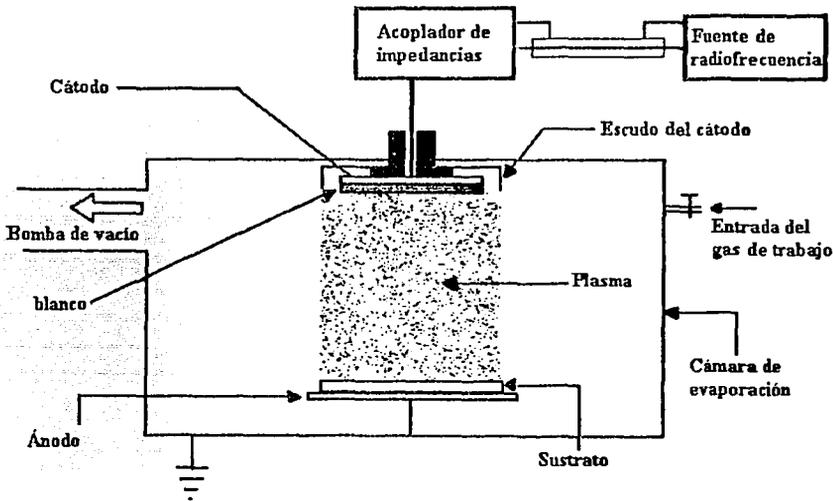


Figura 2.5 Esquema de un sistema de erosión iónica asistida por radiofrecuencia

Es muy importante la refrigeración cuando se manejan dieléctricos pues el calor se acumula más rápidamente que en los metales, en virtud de las características no conductoras de los materiales, pudiendo inclusive cuando se trabaja a altas potencias, que se alcance la temperatura de sublimación y el material sea tanto erosionado como evaporado. Por estas razones los blancos llegan a ser más delgados, con espesores inferiores a un centímetro.

Ya que la impedancia del plasma es del orden de 1 a 10 kΩ, y la de la fuente de radiofrecuencia se diseña para que sea de 50Ω, el sistema de erosión iónica con radiofrecuencia requiere de un acoplador de impedancias entre la cámara, donde se encuentra el plasma, y la fuente de radiofrecuencia. Su función es transformar las características resistivas y capacitivas del plasma a valores de 50Ω, para procurar que la fuente pueda operar correctamente y transfiera el máximo de potencia al gas, disminuyendo las pérdidas por potencia reflejada; de lo contrario existiría una reflexión de la potencia suministrada por la fuente y la consecuente ineficiencia del sistema.

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

$$I_s = c \frac{dv}{dt} \quad (2.7)$$

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

Una de las principales ventajas de la erosión asistida por radiofrecuencia es que no se necesita que el blanco sea conductor, entonces se puede erosionar cualquier material. Debido a el continuo cambio de polaridad en los electrodos, los electrones oscilan en la área del plasma y ganan suficiente energía para realizar varias colisiones ionizantes, lo que permite que la descarga luminosa sea menos dependiente de la emisión de electrones secundarios, permitiendo así reducir el voltaje necesario para vencer la resistencia inicial del gas. Los sistemas de radiofrecuencia presentan cátodos con un área menor a la del ánodo. Esta configuración asimétrica induce una polarización negativa en el cátodo, facilitando el movimiento de los iones positivos [Kiyotaka W. y Hayakawa S., 1992]. Además, el ya mencionado cambio de polaridad de los electrodos incrementa también la probabilidad de colisión entre los electrones secundarios y las moléculas del gas, lo cual permite que la presión de trabajo disminuya hasta valores cercanos a 133 mPa. Esta disminución en la presión del sistema reduce también el número de colisiones del material erosionado en tránsito hacia el sustrato, por tanto ello se traduce en una mayor eficiencia de transporte.

2.2.5 Erosión iónica asistida con magnetrones

Movimiento de una partícula cargada en presencia de campos eléctricos y magnéticos

Si tanto un campo eléctrico E como un campo magnético B actúan sobre una partícula de masa m y carga eléctrica q que se mueve a una velocidad inicial v , la fuerza total que experimentará, llamada fuerza de Lorentz, puede expresarse como:

$$F = qE + qv \times B \quad (2.8)$$

Para el caso de que $B=0$ y $E=cte$, la partícula sufre una aceleración constante en la dirección de F dada por:

$$a = qE/m \quad (2.9)$$

Cuando $E=0$ y $B=cte$, de la ecuación (2.8), la fuerza será perpendicular a la dirección de movimiento y por tanto el campo magnético no efectuará trabajo sobre la carga, conservándose la energía cinética de la partícula. La componente de v paralela al campo magnético B se mantendrá constante, y argumentando la conservación de la energía cinética se deduce que la componente en dirección perpendicular también debe ser constante. El movimiento consiste entonces en una traslación, con velocidad constante, en dirección paralela al campo y una rotación, con velocidad tangencial constante, en el plano perpendicular al campo magnético.

Si la velocidad de la partícula únicamente tiene componente perpendicular a la dirección de B , el movimiento será una trayectoria circular de radio r , determinado por la ecuación escalar:

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (2.10)$$

o en términos de la energía cinética K de la partícula:

$$r = \frac{(2mK)^{1/2}}{qB} \quad (2.11)$$

La figura 2.6 muestra la trayectoria que describiría un electrón bajo las condiciones antes señaladas.

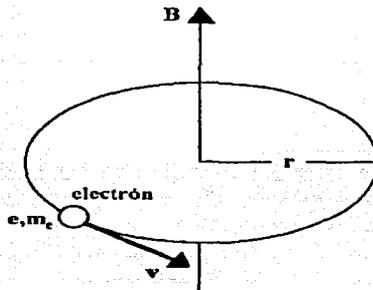


Figura 2.6 Órbita de un electrón de carga e con una velocidad inicial v , que se mueve bajo la influencia de un campo magnético B .

Si ambos campos son finitos, podemos separar el campo eléctrico en una componente paralela y una componente perpendicular al campo magnético. El efecto de la componente paralela será el mismo que en ausencia de campo magnético; es decir, producirá un movimiento uniformemente acelerado descrito por la ecuación (2.9). La componente perpendicular produce un movimiento de deriva del centro de giro con velocidad v_E dada por:

$$v_E = \frac{1}{B^2}(E \times B) \quad (2.12)$$

Si el campo eléctrico E es perpendicular a B , la partícula cargada solamente mostrará un movimiento cicloidal con el desplazamiento perpendicular a E y B del centro de su órbita señalado anteriormente. Dicho movimiento se presenta en la figura 2.7 para el caso de que la partícula cargada sea un electrón, considerando el instante inicial de tiempo $t=0$ y el instante $t=T$. Si el electrón posee una velocidad inicial paralela al campo magnético B , entonces su movimiento será helicoidal con el mismo desplazamiento del centro de la órbita.

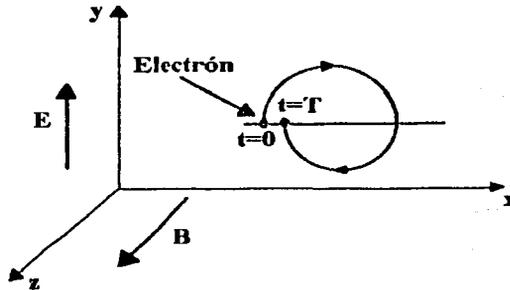


Figura 2.7 Órbita descrita por un electrón bajo un campo eléctrico E perpendicular a un campo magnético B

El empleo de campos magnéticos para la erosión iónica

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

Existen dos tipos de magnetrones, el cilíndrico y el plano; en ambos se incluyen imanes permanentes por atrás del material a erosionar, con un campo magnético emergente paralelo a su superficie y con una intensidad de cientos de gauss. La configuración de los campos eléctrico y magnético induce a los electrones en el plasma a seguir trayectorias helicoidales (Figura 2.8) donde el centro de su órbita se desplaza en la dirección $E \times B$. El campo magnético está orientado de tal manera que los electrones al moverse en dicha dirección $E \times B$ quedan confinados en un toroide sobre la superficie del blanco. Este confinamiento crea un plasma más denso que en aquellos sistemas donde el campo magnético está ausente.

El resultado final es una mayor corriente y menor voltaje para mantener el plasma. Valores típicos son de 500 V y 5 A, que contrastan con los 2500 V y 0.5 A que se requieren cuando no existe campo magnético [Kiyotaka W. y Hayakawa S., 1992]. Asimismo, el movimiento helicoidal de los electrones incrementa la probabilidad de colisiones con las moléculas del gas y con ello la eficiencia de ionización, lo que se traduce en un descenso de la presión de trabajo hasta 1.33×10^{-2} Pa. Valores usuales se sitúan entre 0.133 y 1.33 Pa [Stephen M.R., et al., 1990]. Con una menor presión se incrementa la velocidad de depósito del material erosionado, dado que aumenta su camino medio libre.

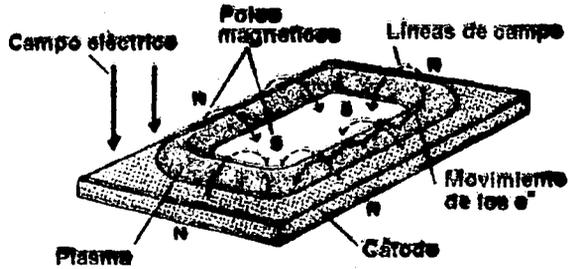


Figura 2.8 Confinamiento del plasma en un magnetrón plano.

Para el depósito total sobre el sustrato, utilizando la erosión iónica con magnetrones, una buena aproximación es:

$$R \approx \frac{kS_0}{t} \quad (2.)$$

Siendo: k- relación de radios entre cátodo y ánodo para magnetrones cilíndricos (k=1 para magnetrones planos)

S_0 - total de partículas desprendidas por unidad de área (n/m^2)

t- tiempo

Es pertinente mencionar que a pesar de que la erosión iónica con magnetrones fue propuesta por Denning desde 1936, fue hasta comienzos de los años setentas cuando se le reconsideró como una técnica útil en el depósito de películas delgadas. Actualmente sus principales aplicaciones a gran escala se encuentran en la microelectrónica, industria automotriz y en vidrios destinados a la industria de la construcción.

Capítulo 3

DESARROLLO DE LOS FILTROS SOLARES

Para la fabricación de los filtros solares, consistentes en sustratos de vidrio cal-sosa recubiertos con una película delgada de óxido ferroso (FeO), mediante la técnica de erosión iónica con magnetrones y asistida por radiofrecuencia, es necesario contar con diferentes equipos a través de los cuales se consiguen las condiciones pertinentes tales como la presión de trabajo (dentro del tanque), flujo del gas de trabajo, diferencia de potencial eléctrico necesario para formar el plasma, campo magnético para eficientar el proceso de erosión iónica, entre otros. A continuación se describen los equipos utilizados para satisfacer tales necesidades.

3.1 Descripción del equipo

Los equipos principales fueron los siguientes: cámara de evaporación, sistema de bombeo, magnetrón plano, fuente de radiofrecuencia de 1.25 kW y soporte móvil para el sustrato de vidrio.

Cámara de evaporación

La cámara de evaporación se muestra en la figura 3.1, consiste en un tanque fabricado de acero al carbón sin recubrimiento interno y con un volumen de 2.25m^3 . Su diámetro interno mide 1.35 m y su longitud 1.55 m.

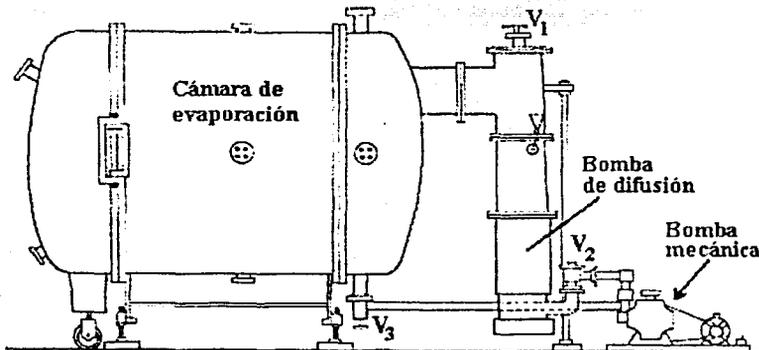


Figura 3.1 Diagrama de la cámara de evaporación (vista lateral). En la parte derecha se encuentran las bombas de difusión y mecánica, las cuales forman parte del sistema de bombeo.

Cuenta con varias boquillas a través de las cuales se colocan los dispositivos y medidores de presión, líneas de suministro del gas de trabajo, sistema de enfriamiento de los

magnetrones, etc.; así como también algunas de ellas se habilitaron como ventanillas con el fin de observar el desarrollo de las pruebas. Una de las tapas del tanque hace la función de puerta de acceso al interior.

Sistema de bombeo

Las condiciones de vacío (muy baja presión) al interior de la cámara de evaporación se consiguen utilizando dos bombas de diferentes tipos. Primero, mediante una bomba mecánica se realiza la etapa preliminar, evacuando el gas que se encuentra inicialmente en el interior de la cámara a presión atmosférica hasta llegar a una presión de 10^{-3} mbar. Posteriormente, entra en operación una bomba de difusión con la que se alcanza una presión de hasta 10^{-5} mbar.

La bomba mecánica es de desplazamiento positivo, tipo rotatoria, de paletas en aceite y que descarga los gases directamente hacia la atmósfera, marca Sargent Welch, modelo 1397, con capacidad de $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ (figura 3.2). En cada ciclo, el gas del sistema cerrado se expande y un volumen queda en una de las cámaras de la bomba, al girar las paletas dicho volumen es atrapado y desplazado posteriormente, y por la misma rotación de las paletas es expelido a través de una salida equipada con una válvula de descarga. Durante la etapa preliminar sólo la válvula V_3 se mantiene abierta, ya que comunica directamente la bomba mecánica con la cámara de evaporación (ver figura 3.1).

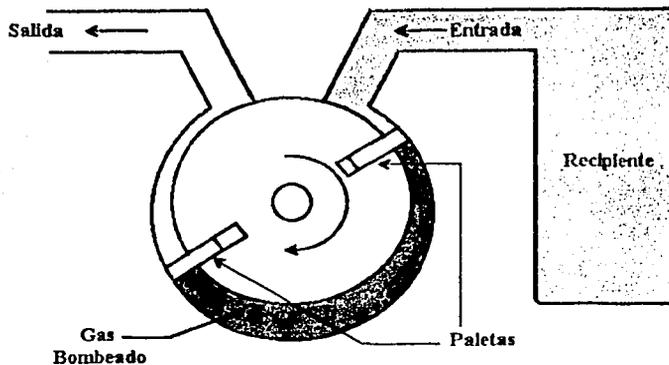


Figura 3.2 Esquema del funcionamiento de la bomba mecánica.

Una vez alcanzada la presión preliminar con la bomba mecánica, inicia su operación la bomba difusora cuya representación es mostrada en la figura 3.3. En la parte inferior posee un calentador eléctrico por medio del cual se evapora el aceite de trabajo; el cual al expandirse se desplaza hacia arriba por las chimeneas de vapor concéntricas hasta llegar a las toberas donde es expulsado. En su camino, las masivas moléculas del vapor que poseen una dirección bien determinada y un momentum grande, colisionan con las moléculas del gas (por lo regular menos pesadas) que se mueven de forma alcatatoria, transfiriéndoles parte de su momentum en la dirección de su movimiento. El vapor del aceite alcanza las paredes de la bomba, las cuales son enfriadas con agua, y se condensa al entrar en contacto con ellas escurriéndose por gravedad hacia el fondo de la bomba. Ya que el comportamiento del

vapor de aceite es el mismo para las tres toberas, se forma una diferencia de presiones entre el fondo y la parte superior de la bomba, presentándose una presión en el fondo mayor que en la parte superior. Los gases comprimidos debajo de las toberas son extraídos hacia el codo de salida de la bomba por medio de una corriente horizontal de vapor, donde son removidos por la bomba mecánica utilizada en la etapa preliminar y descargados hacia la atmósfera. Con la finalidad de evitar que el vapor de aceite sea enviado por la bomba mecánica hacia el exterior, ya que este tipo de aceite es demasiado caro por sus características particulares, la sección de salida es enfriada externamente por medio de conductos por los que circula agua de refrigeración, con lo cual se logra que el vapor se condense y retorne a la bomba de difusión.

La bomba de difusión empleada es una bomba marca Leybold modelo DO 4001/57247, con capacidad de 4 m³/min y que utiliza aceite de baja tensión superficial tipo D.G. 704. Las moléculas del aceite utilizado deben ser muy estables y pesadas para lograr transmitir una velocidad máxima a las moléculas de gas. Durante el funcionamiento de la bomba difusora, se mantiene abierta la válvula V₁, que comunica la cámara de evaporación con la bomba difusora, así como también la válvula V₂ a través de la cual se conectan ambas bombas (de difusión y mecánica) con el fin de que la bomba mecánica evacue hacia la atmósfera las moléculas de gas atrapadas por el vapor de aceite de la difusora. La válvula V₃ se mantiene cerrada.

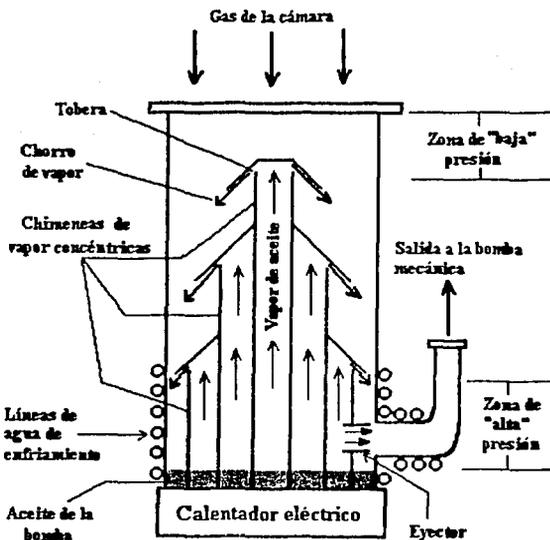


Figura 3.3 Representación de la bomba de difusión de vapor de aceite.

Para disminuir el paso de las partículas que se encuentran en la bomba de difusión hacia la cámara, se utiliza una trampa criogénica ubicada entre la válvula V₁ y la bomba de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

difusión. Consiste en un arreglo de pantallas y paredes, enfriadas con nitrógeno líquido en las cuales se condensarán las moléculas de los gases y vapores del aceite. Con la misma finalidad, entre la trampa criogénica y la entrada de la bomba de difusión se encuentra instalado un serpentín de cobre por el cual circula agua que mantiene fría su superficie en contacto con los vapores del aceite. Con este equipo se puede alcanzar dentro de la cámara de evaporación una presión de 4×10^{-5} mbar.

Cátodo para descarga luminosa

Para realizar la última etapa en la limpieza de los vidrios se emplea un cátodo en forma de aro cuyo diámetro es de 90 cm, fabricado a partir de una barra hueca de aluminio; el cual está suspendido en el interior de la cámara de evaporación, cercano al sustrato de vidrio y aislado de las paredes del tanque. Se conecta a una fuente de alto voltaje de corriente directa capaz de alcanzar 5000 volts y 1 A. Su función es ionizar las moléculas de argón que son introducidas al interior de la cámara y formando un plasma; dichos iones bombardean la superficie de los vidrios desorbiendo aquellos gases que aún después de una limpieza química previa están todavía presentes.

Magnetrones

Se utilizó un magnetrón plano fabricado por la empresa Sierra Applied Science Inc. En la figura 3.4 se ilustran sus partes principales.

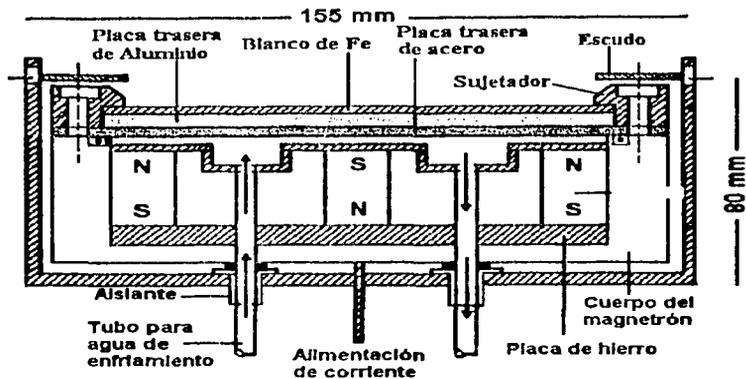


Figura 3.4. Diagrama del interior de los magnetrones y de la disposición del blanco de Fe.

El núcleo del magnetrón (cátodo) es una especie de embalaje hecho de bronce por cuya superficie circula agua de enfriamiento y dentro del cual se encuentran confinados los imanes cubiertos por una resina epóxica de larga duración. Los imanes están confinados a base de una aleación de Nd-Fe-B (Neodimio-hierro-boro). Es fundamental que los imanes se mantengan sellados así como evitar que alcancen altas temperaturas; ya que se puede ocasionar degradación en la intensidad de su campo magnético. Si la resina epóxica se daña por la alta temperatura puede haber entrada de agua que oxide los imanes. Los imanes originan un campo magnético de aproximadamente 0.03 Tesla (300 Gauss), y por su

disposición dan lugar a un confinamiento del flujo de electrones en una trayectoria toroidal tal como se aprecia en la figura 2.8. El campo magnético debe ser el mismo a lo largo de toda el área de erosión del blanco con la finalidad de que el depósito sea uniforme, por lo cual debe de haber una diferencia máxima entre dos puntos cualquiera de $\pm 5\%$. Una placa de acero estándar AISI (placa trasera) va unida al núcleo, y por la misma forma de la superficie del núcleo, se forma un conducto entre ambos por el cual circulará el agua de enfriamiento. Dicha placa actúa como medio de contacto entre el agua de enfriamiento y el blanco.

El material a erosionar es hierro y éste es un material ferromagnético; entonces al colocar un blanco de hierro en el magnetrón, sobre la placa trasera de acero, éste debilitaría o distorsionaría el campo magnético de los imanes del magnetrón disminuyendo así la intensidad de dicho campo; por lo que el efecto de confinamiento del plasma se vería drásticamente reducido y, por ende, la eficiencia del proceso de sputtering. Para evitar esto, se optó por utilizar un blanco de hierro de espesor muy pequeño, de tal forma que sus propiedades ferromagnéticas no afecten el campo magnético. El espesor usado fue el recomendado por el fabricante del magnetrón, el cual es de 2.5 mm. Podemos señalar aquí que se utilizó un blanco de Fe de alta pureza (99.99%), producido por la empresa Plasmaterials, con el fin de evitar la presencia de elementos contaminantes en las películas depositadas, lo cual puede ocasionar que no se tenga un adecuado control del experimento así como de la composición de las películas depositadas. Además cualquier contaminante puede ser el origen de corrosión cuando estos dispositivos se expongan al medio ambiente. Las dimensiones del blanco son de 254 x 127 x 2.5 mm.

Ya que el espesor del blanco es menor al valor para el que el magnetrón fue diseñado, el espacio que quedó entre la placa trasera de acero y el blanco de hierro fue relleno con una placa de aluminio de 10.2 mm de espesor; sujetos todos al magnetrón a través de sujetadores de acero inoxidable AISI 304 (ver figura 3.4). En la parte frontal del magnetrón y sobre los sujetadores es colocado un marco también de acero inoxidable AISI 304 conectado a tierra física, el cual actúa como escudo (protección) de los sujetadores, evitando que las partículas de plasma ataquen a los sujetadores.

El agua de enfriamiento entra al magnetrón a través de dos mangueras de polipropileno de 9.5 mm (3/8") de diámetro. Debe tener una resistividad superior a 50 k Ω con respecto a tierra para que pueda tomarse como aislante y evitar que alguna corriente eléctrica se pueda transmitir a través de ella. Se recomienda agua destilada o desmineralizada. El flujo de agua debe ser de 1 galón/min por cada 5 kW de potencia suministrada y la presión del agua debe ser como máximo de 0.24 MPa (2.44 kg/cm²). El cuerpo o carcasa del magnetrón está fabricado de cobre OFHC.

La presión máxima de trabajo es de 133 Pa (1.33 mbar), sin embargo, las mejores eficiencias de operación se dan entre 0.8 y 0.13 Pa (0.008-0.001 mbar). La presión mínima a la cual la fuente de radiofrecuencia puede formar el plasma es de 0.067 Pa (6.7x10⁻⁴ mbar).

Fuente de radiofrecuencia

Se utiliza una fuente de radiofrecuencia Advanced Energy modelo RFXII-1250. Esta puede proporcionar un máximo de 1250 W en condiciones óptimas, a 13.56 MHz de frecuencia. Trabaja a 178/242V y 18A de corriente alterna, 50/60 Hz \pm 10%. Cuenta con sistemas de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

protección para descargas súbitas y sobrecalentamiento. El operador puede predeterminar el valor de tolerancia para la potencia reflejada o, en su defecto, cuenta con una tolerancia automática cuando la potencia reflejada alcanza los 250W. Especificaciones físicas: 17.68cm (alto) x 21.59 cm (ancho) x 48.26 cm (largo), con un peso de 16.3 kg. Adicionalmente con la fuente, fue empleado un acoplador de impedancias, con capacitor de placas móviles, de la marca Advanced Energy.

Sistema de movimiento del vidrio

Con el fin de cubrir más área y con esto obtener los filtros solares de áreas relativamente grandes (300x600 mm), fue utilizado un mecanismo para mover el sustrato horizontalmente frente al magnetrón, haciéndolo a distancia y sin perturbar las condiciones de presión en el interior de la cámara. A través de un motor eléctrico de 1/15 hp y 50 W marca Dayton (maniobrado a control remoto), se gira una flecha de acero que entra a la cámara y que se encuentra acoplada en el interior con una cremallera soldada sobre el carro que transporta al sustrato. El sustrato es sujetado a través de dos barras de hierro colocadas en los extremos del carro. A pesar de lo anterior, el tamaño de los filtros lo determinaron las limitaciones de espacio que impone la cámara de evaporación.

Es prudente mencionar que este sistema no lleva ningún tipo de lubricación dentro de la cámara debido a que los vapores del lubricante afectarían las condiciones de presión y pureza del medio necesarios. Sólo cuando se presentaba demasiada fricción en virtud del uso cotidiano, ocasionando el frenado del carro, se recurrió a una grasa de silicón especial para muy bajas presiones, la cual se aplicó en muy poca cantidad. Por último, la disposición de los elementos que se encuentran dentro de la cámara de evaporación se presenta en la figura 3.5.

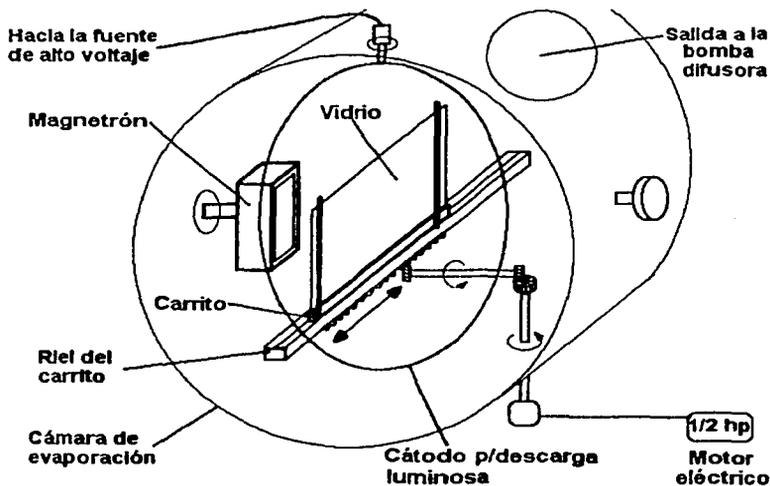


Figura 3.5 Diagrama del interior de la cámara de evaporación (vista frontal).

3.2 Fabricación de los filtros solares con base en hierro

3.2.1 Proceso de limpieza del sustrato de vidrio

Se utilizó vidrio cal-sosa flotado para fabricar los filtros solares, ya que en su proceso de elaboración, después de pasar por varias etapas de refinamiento, el vidrio fundido es vaciado a una línea continua de estaño fundido; donde por diferencia de densidades queda sobre la superficie del estaño, resultando con ambas caras esencialmente planas. La cara que está en contacto con el estaño queda impregnada con algo de este material. Por lo anterior, éste vidrio tiene su superficie más plana que el vidrio convencional, favoreciendo así, el crecimiento de una película delgada más uniforme. Además, durante su proceso de solidificación el vidrio es estirado y después pasa por otro proceso de recocimiento, el cual sirve para aliviar la tensión en su estructura, producto del estiramiento, y así eliminarle esfuerzos; resultando en un tipo de vidrio que carece de esfuerzos mecánicos en su estructura interna y, por lo tanto, soporta cambios bruscos de temperatura.

Con el fin de lograr una buena adherencia entre la película y el sustrato, es importante la limpieza de este último, ya que la presencia de algún contaminante en la superficie del vidrio es causa de corrosión en la película depositada, provocando una reducción de la vida media del filtro solar al ser utilizado como ventana. Dicho proceso de limpieza puede ser inducido por medio de una reacción química, a través de la cual sean rotos los enlaces entre las moléculas contaminantes, así como entre el contaminante y el sustrato; o también administrando la suficiente energía para remover la impureza, ya sea con calor o mediante un bombardeo con partículas [Almanza R., et al., 1992].

Para la limpieza de los vidrios cuando se encuentran fuera de la cámara, el procedimiento fue relativamente sencillo. Consistió en lavar una lámina de vidrio de 600x300x3mm con detergente comercial y esponja suave; posteriormente se enjuaga con agua corriente hasta eliminar por completo de la superficie la sensación jabonosa. El vidrio es sumergido en una solución de mezcla crómica durante 30 minutos, por medio de la cual los óxidos y grasas presentes en la superficie del vidrio son convertidos en compuestos solubles. La composición de la mezcla crómica es: 24 g de $K_2Cr_2O_7$, 408 mL de H_2SO_4 y 144 mL de H_2O . Concluido lo anterior, el sustrato se enjuaga con agua destilada; y los vidrios son colocados dentro de un recipiente con alcohol isopropílico. Por último, se secan con aire caliente a una temperatura de 90-110°C durante 10 minutos.

Posteriormente, ya estando el vidrio instalado dentro de la cámara y bajo condiciones de muy baja presión ($\sim 10^{-5}$ mbar), se recurre al bombardeo con iones como etapa final de limpieza del sustrato. Se introduce argón al interior del tanque hasta una presión de 7×10^{-4} mbar y empleando el cátodo descrito en la sección anterior, al cual se le aplica un voltaje de 3 kV a través de una fuente de corriente directa, se genera una "descarga luminosa" que provocará un bombardeo iónico de la superficie del vidrio, para lo cual se mantiene el vidrio en reposo. La eliminación de impurezas se debe principalmente a los siguientes mecanismos [Brawn R., 1970]:

1. Calentamiento directo debido al choque de partículas cargadas.
2. Desorción de impurezas por el bombardeo continuo de electrones.
3. Desorción de impurezas como resultado del bombardeo de iones de baja energía o partículas neutras.

4. Modificación de la superficie del vidrio por el bombardeo continuo de las partículas que conforman el plasma.

3.2.2 Erosión iónica del hierro

Una vez instalado el vidrio frente al magnetrón en el cual se encuentra el blanco de hierro, y habiéndosele hecho la limpieza a través de la descarga luminosa, se procede a depositar la película de óxido ferroso (FeO). Inicialmente se intentó erosionar el blanco de hierro utilizando corriente directa, sin embargo no se logró ya que para encender y mantener el plasma, se necesitaba una presión muy grande de 2×10^{-2} mbar, lo que provocaba muchos arcos dentro de la cámara (sobre todo entre el cuerpo del magnetrón y las barras sujetadoras del blanco) en virtud de la densidad de gas que existía. Después de hacer algunas pruebas bajo estas condiciones durante periodos aproximados de una hora, se observó que a pesar de que se conseguía encender el plasma, no se alcanzaba lograr la erosión iónica del hierro (lo cual se reflejaba en la nula deposición de material sobre el sustrato de vidrio).

Ya que se necesitaba tener un proceso de erosión iónica eficiente se optó por utilizar la misma técnica de erosión iónica con magnetrones, sólo que esta vez asistida con radiofrecuencia. El proceso se describe a continuación:

Partiendo de una presión base de 5×10^{-5} mbar, se introduce argón al interior del tanque hasta una presión de 1×10^{-3} mbar. Con la fuente de radiofrecuencia se le aplica al sistema una potencia de 100 W, condiciones a las que se observó que encendía el plasma, es decir, se genera la descarga luminosa autosostenible y por tanto el plasma necesario para la erosión iónica. En esta etapa el vidrio no se coloca todavía frente al magnetrón.

Es importante señalar que al evaporar el hierro se presentan altos valores en la polarización lo cual ocasiona sobrecalentamiento del acoplador de impedancias, así como la presencia de cortos en el capacitor de placas móviles que se encuentra en tal acoplador. Se observó que -145V de polarización es el valor límite para el cual la probabilidad de que se presenten cortos en el capacitor es todavía nula, ya que si se trabaja arriba de dicho valor, se corre el riesgo de averiar seriamente el capacitor.

En virtud de la rápida oxidación característica del hierro, primero se hace una erosión del blanco de hierro durante un lapso de 30 minutos para poder "limpiarlo" de aquellos óxidos que se forman en su superficie por la exposición del blanco al aire atmosférico, durante el proceso de instalación del sustrato de vidrio sobre su base móvil (carro). Durante este periodo la potencia es aumentada sólo a 700 W debido a que el vidrio aún no se posiciona frente al magnetrón, lo cual ocasiona todavía un mayor valor de la polarización y, por lo tanto, una alta probabilidad de presencia de arcos en el capacitor del acoplador de impedancias. Para mantener el valor de la polarización debajo de -145V, la presión del sistema es aumentada a 5×10^{-3} mbar.

Posteriormente el vidrio es movido frente al magnetrón y la potencia aplicada al sistema se incrementa hasta 1050 W, mientras que la presión del sistema se aumenta hasta 7×10^{-3} mbar. Para esta potencia de depósito se registran valores de polarización entre los electrodos (DC BIAS) de -140 a -145 V. El tiempo total de depósito del hierro fue de 2 horas. Para poder alcanzar dicho valor de potencia suministrada a una presión de trabajo baja (eficiando así el camino del material erosionado hacia el sustrato) y sin sobrepasar el valor límite de la polarización mencionado anteriormente; se tuvo que disminuir la distancia entre el vidrio y el blanco de 130 a 85 mm, ya que de otra forma se habría tenido

que trabajar a una potencia de alrededor de 700 W (para no dañar el equipo por la alta polarización) y una presión de 7×10^{-3} mbar, durante un periodo aproximado de 4 horas. Al momento de realizar la erosión iónica, el sustrato de vidrio se mantiene en continuo movimiento frente al magnetrón con ayuda del sistema de movimiento descrito. Con la finalidad de evitar que las partículas de plasma ataquen a las barras de sujeción del blanco, el escudo del magnetrón fue colocado a 3.5 mm de dichas barras.

La tabla 3.1 presenta los valores típicos de las condiciones de operación durante la erosión iónica del blanco de hierro puro, asistida con magnetrones y radiofrecuencia.

P_{base} : 5.3×10^{-5} mbar.

Presión (mbar)	Potencia (Watts)			Polarización de electrodos (V)	Tiempo (min)
	Seleccionada	Alimentada	Reflejada		
1×10^{-3}	100	101	0	-62	2
1×10^{-3}	200	201	0	-85	4
1×10^{-3}	300	302	0	-100	6
1×10^{-3}	400	402	0	-112	8
1×10^{-3}	500	502	0	-123	10
1×10^{-3}	600	602	0	-131	12
1×10^{-3}	700	703	1	-139	14
5×10^{-3}	700	703	1	-132	16
5×10^{-3}	800	803	1	-138	46
5×10^{-3}	900	904	2	-142	48
7×10^{-3}	900	903	1	-136	50 (*)
7.2×10^{-3}	1050	1055	3	-140	52
6.9×10^{-3}	1050	1058	5	-141	90
7×10^{-3}	1050	1054	3	-143	130
7.1×10^{-3}	1050	1057	4	-144	170

(*) El sustrato de vidrio es colocado frente al magnetrón.

Tabla 3.1 Corrida típica de las variables que intervienen durante la erosión iónica con magnetrones asistida por radiofrecuencia del blanco de hierro puro.

El gas de trabajo para obtener las películas fue argón (pureza mínima de 99.998%). En un principio se utilizaron diferentes mezclas de argón con oxígeno; no obstante, se observó que independientemente del porcentaje de oxígeno empleado (desde 0 hasta 100%), la película obtenida siempre era una composición de óxidos de hierro. Ello se manifestaba inmediatamente en su color que iba desde anaranjado hasta café (en orden ascendente del porcentaje de oxígeno) característico del óxido férrico Fe_2O_3 [Samsonov G.V., 1982; Hashimoto T., et al., 1996]. Ya que se buscaba el óxido de menor grado de oxidación del

hierro, entonces se optó por utilizar argón puro, para con ello poder minimizar la oxidación de las películas depositadas.

El resultado son películas que presentan una coloración verde muy tenue en los extremos, mientras que en la parte central (por la misma geometría del magnetrón corresponde a la zona en que la película tiene un mayor espesor) tiene un color anaranjado con una tendencia al café cuando los tiempos de depósito eran mayores, es decir, cuando el espesor de la película era mayor. Como se menciono antes, en virtud de los altos valores de polarización que se presentaron dentro el sistema, se tuvo que acercar el sustrato de vidrio hacia magnetrón. Ya que las partículas erosionadas recorren una menor distancia para depositarse en el vidrio, aquellas partículas erosionadas en los extremos del blanco y cuyas trayectorias no son normales a la superficie de este, se desvían menos de la zona del vidrio que está justo enfrente, por lo que en dicha zona (parte central del vidrio) el espesor de la película será mayor y uniforme. Algunas de las partículas erosionadas en los extremos del blanco, cuyas trayectorias divergen notablemente de una trayectoria normal a la superficie de este, alcanzan a depositarse en las orillas del vidrio, lo cual origina, junto con la baja eficiencia del magnetrón en el proceso de erosión iónica del hierro, que el espesor de la película formada en esta zona sea menor que al de la zona central del vidrio.

Se observo que la zona de las orillas abarca una franja de aproximadamente 3 cm de ancho a lo largo de los extremos del vidrio, mientras que la zona central es toda la parte restante del vidrio, la cual representa el 72 % del área total del sustrato.

Es importante mencionar que se eligió un tiempo de depósito de 2 horas, ya que en el proceso de calentamiento en atmósfera reductora al que fueron sometidos los filtros solares, y que es descrito en la siguiente sección, la reducción de las películas con tiempos de depósito mayores a 2 horas sólo se lograba a temperaturas mayores que la temperatura de reblandecimiento reportada para el vidrio cal-sosa flotado (Martínez I., et al., 2000), es decir mayores a 600°C; además de las dificultades técnicas que implica, para nuestro caso, mantener por grandes periodos (mas de 2 horas) ciertas condiciones del proceso fabricación de los filtros solares. Algunos ejemplos de tales dificultades son mantener el movimiento constante del carrito sobre el que va montado el sustrato de vidrio, el suministro eficiente del agua de enfriamiento del magnetrón, la bomba de difusión y la fuente de radiofrecuencia, mantener constante el valor de la presión al interior del tanque (se utiliza un controlador manual), además del sobrecalentamiento que muestra el acoplador de impedancias y el riesgo de presentarse cortos en las placas de su capacitor. Por otro lado, las películas con tiempos de depósito menores a 2 horas mostraron pocos cambios en sus propiedades ópticas, después de ser sometidas al proceso de calentamiento en atmósfera reductora bajo diferentes valores de temperatura, composición de la atmósfera y tiempo de calentamiento.

3.2.3 Reducción en atmósfera de H_2+N_2 de las películas obtenidas.

A pesar de que el gas de trabajo utilizado consistió en argón puro, por lo cual se esperaba el depósito de una película de hierro metálico sobre el sustrato de vidrio; como se verá en el siguiente capítulo, al analizarse los espectros de transmisividad de las películas y basándonos en la bibliografía existente sobre el tema, se deducía la presencia de una película compuesta esencialmente de Fe_2O_3 y en mucho menor cantidad de FeO . Dicha situación obligaba a la búsqueda de una segunda etapa dentro del proceso de fabricación de

los filtros solares, en la cual el contenido de óxido férrico de la película obtenida por sputtering fuera reducido al menor grado de oxidación del hierro, es decir, una película de óxido ferroso (FeO), que es precisamente aquel óxido que se pretende obtener en el presente trabajo.

El hidrógeno actúa como un agente reductor en reacciones químicas en las que se presenta cierto calentamiento [Nekrasov B., 1969]. Para el caso del hierro, algunos autores reportan la reducción de películas de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ fabricadas mediante la técnica de sputtering, a películas de Fe_3O_4 (el cual es un compuesto de FeO y Fe_2O_3), lo cual fue realizado en una atmósfera de hidrógeno húmedo a 300-330°C, por un periodo de 2-4 horas [Yoshii S., et al., 1982]. Roth W.L. [1960] redujo pequeñas muestras de polvo de Fe_2O_3 a FeO al mantenerlas en una atmósfera controlada de $\text{H}_2\text{O-H}_2$ a una temperatura de 1000°C durante un lapso de 24-72 horas.

Considerando lo anterior, fueron tomadas pequeñas muestras (45 x 22 mm) de los filtros fabricados, las cuales se calentaron a 400°C durante 10 minutos, en una atmósfera de H_2+N_2 , cuya composición fue de 50% H_2 y 50% N_2 , con el fin de reducir el contenido de óxido férrico Fe_2O_3 de las películas obtenidas, a óxido ferroso FeO . Para ello se utilizó un horno (o mufla) con atmósfera controlada marca Thermolyne modelo F79300, el cual proporciona el calentamiento en su interior a través de una resistencia eléctrica, llegando a alcanzar una temperatura máxima de 1100°C. El flujo de hidrógeno y nitrógeno es controlado por medio de un sistema electrónico intermedio entre los tanques contenedores de los gases y la cámara de calentamiento del horno. La elección en la composición de la atmósfera reductora (50% H_2 y 50% N_2) se debe a que cuando se probaba con composiciones en las cuales alguno de los gases tenía mayor porcentaje, era más difícil de controlar la reducción de las películas, ya que se obtenían resultados diferentes en la película bajo condiciones de trabajo semejantes; obteniéndose mejores resultados en este sentido con la composición reportada.

La temperatura a la cual se desea someter las muestras de los filtros solares fabricados, denominada como *temperatura de trabajo*, se especifica en un controlador de temperatura el cual incrementará paulatinamente la temperatura del interior del horno hasta llegar al valor de temperatura de trabajo indicado. A el tiempo que le toma al controlador realizar lo anterior se le llama "rampa de temperatura", por lo cual, cada valor de la temperatura de trabajo tiene una rampa de temperatura diferente. Por otro lado, el horno utilizado en estas pruebas es un horno al que le fueron modificadas algunas características de su diseño inicial con la finalidad de poder realizar pruebas con atmósfera controlada. La cámara de calentamiento fue adaptada y consiste en un tubo de cuarzo en el interior de la cámara de calentamiento original, a través del cual circula el gas de trabajo proveniente de los tanques contenedores; por lo que el transductor del controlador de temperatura se encuentra en la parte exterior de la cámara de calentamiento actual; de esta manera, la temperatura que mide tal transductor no es exactamente la que hay en el interior de la cámara de calentamiento actual. En virtud de lo anterior, el equipo de personas a cargo del horno tomaron medidas de la temperatura del interior de la cámara de calentamiento actual a diferentes temperaturas de trabajo, utilizando para ello un termopar de nicromel-alumel que fue introducido adentro del tubo de cuarzo (la cámara de calentamiento actual). Con ello lograron obtener las rampas de temperatura de algunos valores de temperatura de trabajo para la actual cámara de calentamiento del horno.

En la figura 3.6 se presentan las rampas de temperatura del controlador y del interior de la cámara de calentamiento actual (obtenida por medio del termopar) para ciertos valores de temperatura de trabajo. En estas mediciones son consideradas condiciones iguales a las utilizadas en el proceso de reducción del contenido de óxido férrico Fe_2O_3 de la película obtenida, a una película de óxido ferroso FeO , es decir: atmósfera reductora que consiste en una mezcla de $50\%H_2+50\%N_2$, con un flujo de 50 sccm (centímetros cúbicos estándar) para cada uno de los gases. La diferencia numérica entre ambas rampas de temperatura (del controlador y del interior de la cámara actual) es graficada en una tercera curva. Se observa que cuanto mayor es la temperatura de trabajo, disminuye la diferencia entre las rampas del controlador y de la cámara actual.

Como se había mencionado antes, las películas obtenidas por sputtering con alto contenido de óxido férrico Fe_2O_3 , se mantuvieron durante un lapso de 10 minutos dentro del horno a $400^\circ C$; sin embargo, es prudente mencionar que en esta cifra no se considera el tiempo de exposición de las películas a la atmósfera dentro del horno mientras la temperatura al interior no alcanzaba el valor de temperatura de trabajo (rampa de temperatura), el cual fue de aproximadamente 1 hora, tal como se puede deducir de la figura 3.6.

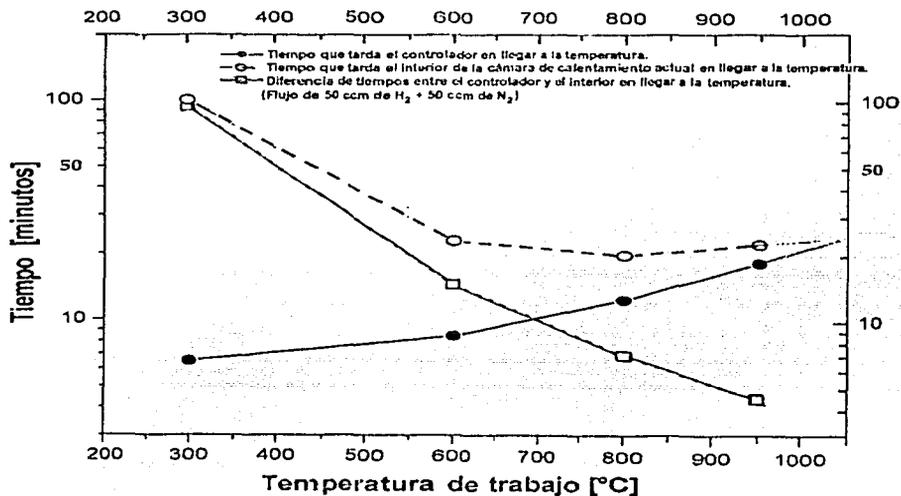


Figura 3.6 Rampas de temperatura para el horno utilizado en el proceso de reducción del contenido de Fe_2O_3 de la película obtenida por sputtering, considerando una atmósfera de H_2 y N_2 .

Del proceso de reducción anterior, se obtuvieron películas que presentan una coloración verde oscuro-café, cuya caracterización se presenta en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

PROPIEDADES DE LOS FILTROS SOLARES CON BASE EN Fe

4.1 Propiedades ópticas de los filtros solares con base en hierro

Como se mencionó en el capítulo anterior, durante la fabricación de los filtros solares el porcentaje de oxígeno en el gas de trabajo utilizado tiene una influencia casi nula en la apariencia de los filtros así como en sus propiedades ópticas. El color de los filtros va desde anaranjado hasta café (en orden ascendente del porcentaje de oxígeno) característico del óxido férrico Fe_2O_3 tal como es señalado en la bibliografía [Samsonov G.V., 1982; Hashimoto T., et al., 1996]. Por otra parte, en la figura 4.1 se presenta la transmisividad de algunas muestras de los filtros solares obtenidos por sputtering para diferentes composiciones de la mezcla de $O_2 + Ar$ utilizada como gas de trabajo, la cual varía desde un 100% de Ar hasta 100% de O_2 . Los filtros solares fueron fabricados bajo las mismas condiciones descritas en la sección 3.2.2, es decir, potencia suministrada de 1050 W a una presión de 7×10^{-3} mbar durante 2 horas de depósito.

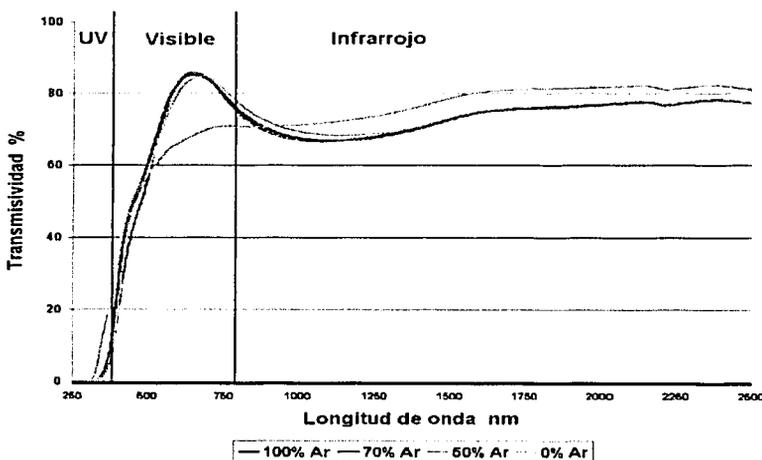


Figura 4.1 Transmisividad de algunas muestras de los filtros solares obtenidos por sputtering, para diferentes composiciones de la mezcla $O_2 + Ar$ utilizada como gas de trabajo.

Como se observa, la curva de transmisividad es prácticamente la misma para las diferentes mezclas de gas, mostrándose una diferencia únicamente para el caso en que se usó solamente oxígeno como gas de trabajo para el sputtering. Las curvas de transmisividad

coinciden con aquellas observadas en la bibliografía para el óxido férrico Fe_2O_3 [Ruzakowski P., et al., 1997; Özer N. y Tepehan F., 1999]. Las muestras con menor porcentaje de oxígeno tienen mayormente acentuada, en sus curvas de transmisividad, la tendencia a tener un pequeño pico en el intervalo visible de la radiación y disminuir en el infrarrojo cercano, lo que supone la presencia de cierta cantidad de FeO en esas películas. Esto es, algunas partículas del hierro erosionado recorren su trayectoria del blanco hacia el sustrato de vidrio sin oxidarse, y alcanzan a depositarse sobre éste todavía en la fase de menor grado de oxidación, es decir, óxido ferroso FeO. Lo anterior se aplica también al caso en que sólo se empleó argón como gas de trabajo, ya que para el sputtering de un blanco de Fe puro en atmósfera de argón, asistido con magnetrones y radiofrecuencia; un pequeño flujo de oxígeno en la atmósfera de evaporación (a partir de 0.6% del flujo total, con una presión base de 10^{-7} mbar) es suficiente para que se presenten fases de oxidación del hierro en la película depositada [Kim Y.K. y Oliveria M., 1994], lo cual es muy factible que suceda en una cámara de evaporación tan grande (2.25 m^3) como la utilizada en este experimento. En virtud de que la curva de transmisividad de la película depositada en atmósfera constituida sólo por Ar exhibía la tendencia ya mencionada, y que consiste en un pequeño pico en el intervalo visible de la radiación y una disminución en el infrarrojo cercano, entonces se conjeturaba que el problema se reducía a obtener películas bajo las mismas condiciones de dicha muestra, sólo que de mayor espesor. Con ello se esperaba conseguir un filtro solar cuya curva de transmisividad sería semejante a la de la muestra de 100% Ar en la figura 4.1, sólo que estaría desplazada hacia abajo, logrando de esta forma fabricar los filtros solares con las propiedades ópticas que se buscan en este trabajo.

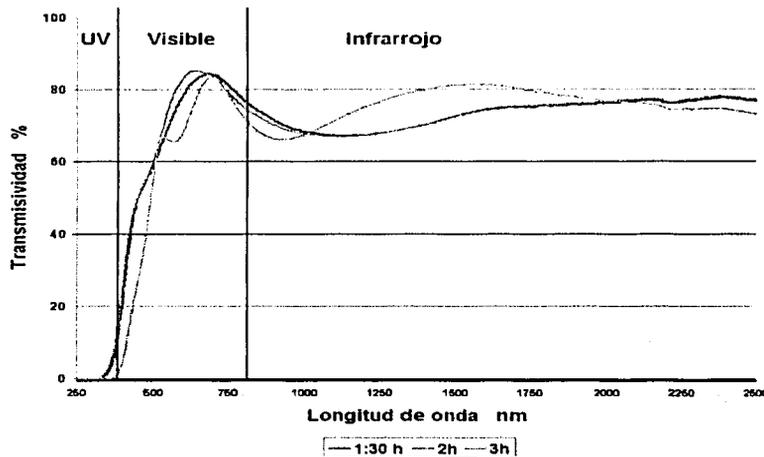


Figura 4.2 Transmisividad de algunas muestras de los filtros solares obtenidos por sputtering, para diferentes tiempos de depósito.

No obstante lo anterior, el resultado fue que la transmisividad de los filtros varía muy poco para diferentes tiempos de depósito, es decir, para diferentes espesores de las películas depositadas. La figura 4.2 muestra la transmisividad de algunos de los filtros solares fabricados, para diferentes tiempos de deposición. Se observa que la transmisividad disminuye escasamente cuando se comparan las curvas para tiempos de depósito de 1:30 h y 2 h. Para el caso de tiempos de depósito más grandes, el comportamiento de las curvas de

transmisividad se vuelve bastante variable. A simple vista puede apreciarse el mayor espesor de las películas con tiempos de depósito más grandes, ya que se observan películas del mismo color sólo que en tonos más oscuros según fuese más grande el tiempo de depósito; sin embargo, la diferencia entre las curvas de transmisividad de las muestras resulta ser casi nula.

Debido a las propiedades ópticas de los filtros solares obtenidos por sputtering, estos no funcionarían como un elemento ahorrador de energía al ser utilizados como ventanas en una edificación; por lo cual fue necesario someterlos a un proceso de reducción química por medio del cual la película depositada sobre el sustrato de vidrio, constituida básicamente por óxido férrico Fe_2O_3 y en menor proporción por FeO , sería reducida a una película de óxido ferroso FeO . El proceso consistió básicamente en calentar las muestras de los filtros solares fabricados, a una temperatura de $400^\circ C$ en una atmósfera de 50% H_2 y 50% N_2 por un periodo de 10 minutos.

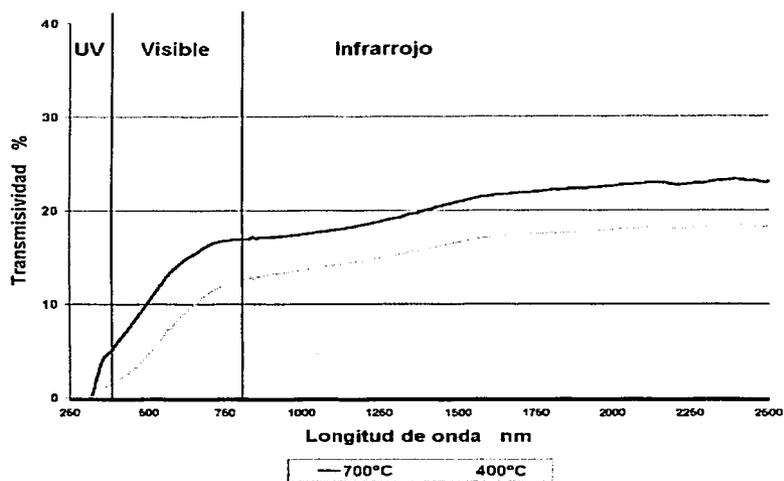


Figura 4.3 Transmisividad de dos muestras después del calentamiento en atmósfera de hidrógeno a 700 y $400^\circ C$, durante un tiempo de 10 minutos.

Inicialmente se utilizó una atmósfera de H_2 y los resultados se exponen en la figura 4.3, donde se presentan las curvas de transmisividad de dos muestras después de calentarlas a 700 y $400^\circ C$, respectivamente, en atmósfera de H_2 durante un lapso de 10 minutos. La forma de las curvas, horizontalmente planas, así como sus bajos valores de transmisividad a lo largo de casi todo el intervalo de longitudes de onda medido, es el espectro de transmisividad típico de un metal. Por lo anterior se deduce que en ambos casos el hidrógeno redujo rápidamente el óxido férrico hasta la fase de hierro metálico.

Ya que el tiempo de calentamiento fue tan sólo de 10 minutos, se optó por utilizar una mezcla de $H_2 + N_2$. Con la presencia del N_2 en la atmósfera de reducción, el cual es un gas inerte, se controlaría de mejor forma la velocidad de reducción de las películas de óxido férrico Fe_2O_3 , logrando así obtener películas de óxido ferroso FeO . Empleando una atmósfera de 50% H_2 y 50% N_2 para el calentamiento de las muestras durante un tiempo de 10 minutos, se llevo a cabo la etapa de reducción de las películas de Fe_2O_3 , con una

temperatura al interior del horno (temperatura de trabajo) de 400°C. Los resultados son expuestos en la figura 4.4, donde se muestra la transmisividad, reflectividad y absorptividad de una muestra después del proceso de reducción química basada en el calentamiento en atmósfera reductora a 400°C. La curva de transmisividad en el intervalo visible del espectro muestra un pico bastante interesante y conveniente para nuestros fines, llegando hasta un valor de 50%, mientras que para el infrarrojo cercano disminuye manteniéndose en un valor muy cercano al 40% a lo largo de casi todo este intervalo. El valor de la reflectividad contiene un valle en el intervalo visible, aumentando paulatinamente en el intervalo del infrarrojo cercano del espectro. Por último, la absorptividad es bastante alta para aquellas longitudes de onda pertenecientes al intervalo ultravioleta disminuyendo notablemente en la parte visible, y aún más en el infrarrojo cercano. Este comportamiento de las curvas señala un buen funcionamiento de los filtros solares para ser utilizados como ventanas en edificaciones.

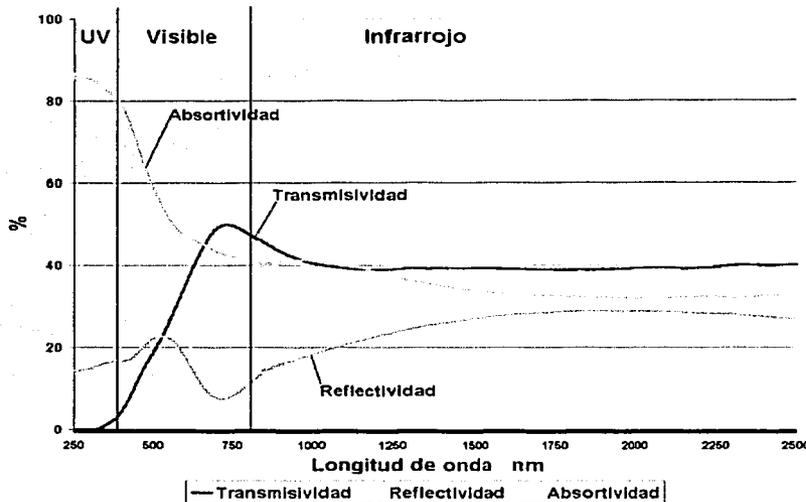


Figura 4.4 Transmisividad, reflectividad y absorptividad para una muestra después del calentamiento por 10 minutos a 400 °C en atmósfera reductora 50% H₂ + 50% N₂.

En la figura 4.5 se presenta una comparación entre la transmisividad y reflectividad de una muestra de los filtros solares fabricados por sputtering bajo las condiciones ya descritas en este trabajo, y sus respectivas propiedades de la muestra después del proceso de reducción química basada en un calentamiento en atmósfera reductora a 400°C. Es visible la diferencia entre las curvas de transmisividad y reflectividad antes y después del tratamiento térmico de reducción, ya que al realizarse el proceso de reducción a la muestra, la transmisividad disminuye y la reflectividad aumenta su valor a lo largo del intervalo del infrarrojo cercano, mientras que para el caso de las longitudes de onda correspondientes al intervalo visible del espectro, la reflectividad se mantuvo casi igual a los valores iniciales y el valor de la transmisividad disminuyó, pero manteniéndose el pico en dicho intervalo. Lo anterior señala la presencia de FeO en la película después del tratamiento en atmósfera reductora, ya que se asemeja a las propiedades del óxido ferroso ya mencionadas anteriormente en este trabajo. Para la obtención de los espectros que aparecen en las figuras

4.1 a 4.5, fue utilizado un espectrofotómetro Shimadzu UV-VIS-NIR modelo 3101, ubicado en el Centro de Investigaciones en Energía (CIE) de la UNAM.

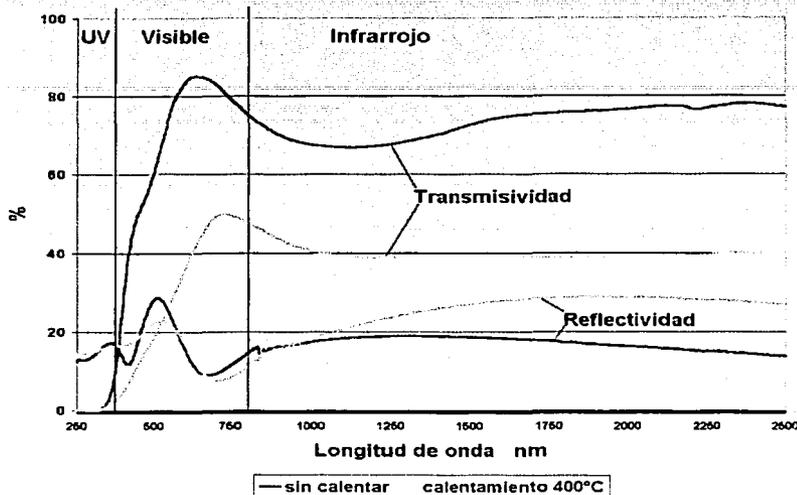


Figura 4.5 Transmisividad y reflectividad de una muestra antes y después del proceso de reducción por calentamiento.

Utilizando el programa TRABSOL desarrollado en el Centro de Investigaciones en Energía (CIE) de la UNAM, se obtuvieron los valores promedio espectrales de transmisividad y reflectividad de los filtros solares obtenidos a partir de la metodología descrita en el Capítulo 1, para la región ultravioleta, visible e infrarrojo cercano del espectro.

	R_{UV}	R_{VIS}	R_{IR}	T_{UV}	T_{VIS}	T_{IR}	T_{TOTAL}	R_{TOTAL}	A
Antes	15.8	18.5	16.1	6.83	68.0	72.3	65.3	17.0	17.5
Después	16.0	17.5	19.0	1.65	30.2	39.9	33.2	18.2	48.5

Tabla 4.1 Valores promedio en % (integrados por zonas del espectro solar) de reflectividad y transmisividad, para los filtros solares antes y después del tratamiento térmico de reducción.

Los promedios se obtienen primero dividiendo cada región del espectro en intervalos de igual valor de energía y se integran todas las áreas bajo la curva que se definieron por los intervalos. En la Tabla 4.1 están contenidos los valores obtenidos para reflectividad (R) y transmisividad (T) en los intervalos ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarrojo cercano (IR) del espectro de radiación solar, así como los valores totales de T y R. Dichos valores son utilizados en el siguiente capítulo durante la simulación, con el software ENERGY-10, del desempeño de una edificación que utiliza en las ventanas los vidrios cal-sosa recubiertos con las películas con base en FeO, es decir, los filtros solares en lugar del vidrio cal-sosa común.

4.2 Análisis por RBS de los filtros solares con base en hierro

La técnica de análisis por RBS (Rutherford Back Scattering) se basa en colisiones entre núcleos atómicos. Consiste en dirigir un haz de iones hacia la superficie de la muestra, por lo que cierto número de ellos será retrodispersado después de “colisionar” con átomos de la muestra. Esta “colisión” no involucra un contacto directo entre los iones y los átomos de la muestra, sino que el intercambio de energía ocurre debido a las fuerzas coulombianas entre los núcleos atómicos. La interacción puede ser descrita en forma precisa como una colisión utilizando la física clásica. La medición del número y energía de los iones retrodispersados, como una función del ángulo de emisión, provee información referente a los diferentes elementos químicos constituyentes de la muestra en cuanto a su concentración, en función de la profundidad entre los primeros 0.5 a 2.0 micrómetros [Tesmer J.R. y Nastasi M., 1995]. La energía medida para las partículas retro dispersadas a un ángulo dado depende de dos procesos: la energía que la partícula pierde mientras transita a través de la muestra, antes y después de la colisión, así como también la energía perdida durante la colisión misma. Por otro lado, el número de eventos retrodispersados para un elemento dado de la muestra, depende de dos factores: la concentración del elemento en la muestra, así como también el tamaño efectivo de su núcleo.

Con el fin de asegurar la presencia de Fe en la película de los filtros solares fabricados, se le realizó un análisis por RBS, para ello se utilizaron iones de He con una energía de 700 keV, mediante los cuales se bombardeó la muestra en la superficie sobre la que se encuentra el recubrimiento. En la figura 4.6 se exponen los espectros obtenidos para dos muestras de los filtros solares fabricados. Una corresponde a una muestra antes de que se sometiera al proceso de calentamiento en atmósfera reductora, y la otra es después de dicho proceso de calentamiento (sin calentar y calentada respectivamente). Los análisis fueron realizados en el acelerador Van de Graff de 0.7 MeV del Instituto de Física de la UNAM.

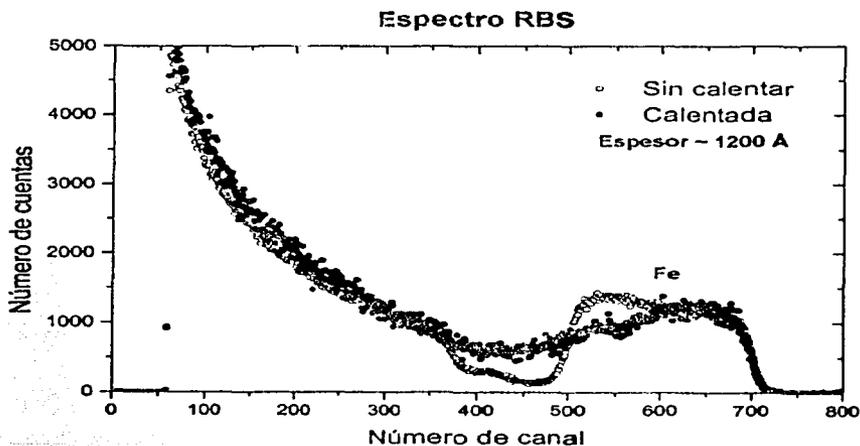


Figura 4.6 Espectro RBS del filtro solar obtenido por erosión iónica con base en FeO, antes y después del proceso de calentamiento en atmósfera reductora.

En la figura puede observarse, "leyendo" la gráfica de derecha a izquierda, un pico ancho para la muestra sin calentar, el cual se presenta en forma de un diente relativamente bien definido, y que corresponde al hierro contenido en la película depositada. Inmediatamente después es evidente un valle y por último un ascenso rápido de la curva, que corresponde a los iones retrodispersados por el vidrio, con lo cual tenemos que la película de óxido de hierro se encuentra en la superficie del vidrio. Para el caso de la muestra calentada se observa el inicio del pico en el mismo punto que la para la muestra sin calentar, sólo que ahora no continúa en forma de escalón si no que va disminuyendo paulatinamente. En la región donde se presenta el valle para la muestra sin calentar, el número de cuentas de la muestra calentada no expone una disminución tan clara, por lo que no se observa dicho valle en este caso. Dichas curvas vuelven a coincidir en la región donde ambas ascienden rápidamente. Este comportamiento del espectro para la muestra calentada, refleja un proceso de difusión del hierro dentro de la estructura del sustrato de vidrio, durante el proceso de calentamiento en atmósfera reductora al que fue sometido. La cantidad de hierro contenida en la muestra es la misma antes y después del proceso de calentamiento; ello se deduce de las diferencias observadas en los espectros RBS para la muestra calentada con respecto a la muestra sin calentar, ya que se aprecia que la disminución del pico del hierro se compensa con la desaparición del valle, es decir, la disminución en las cuentas correspondientes al pico del hierro de la película delgada, corresponden al aumento de las cuentas del hierro que se difundió en el vidrio y por el cual desaparece el valle observado para el caso de la muestra sin calentar. El espesor medido para la película de FeO de la muestra analizada antes de calentar fue de 1200 Å.

4.3 Análisis por XRD de los filtros solares con base en hierro

Los rayos X son radiación electromagnética con longitudes de onda del orden de 0.1 nm. Puesto que la estructura atómica de los cristales posee una disposición regular de átomos, así como también sus distancias interatómicas son comparables a longitud de onda de los rayos X, entonces es posible emplearse un sólido cristalino como una "rejilla de difracción" tridimensional natural para los rayos X.

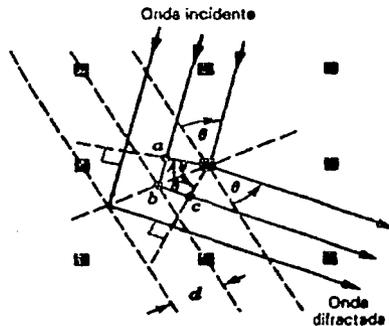


Figura 4.7 Haz de rayos X incidente sobre un conjunto de planos atómicos de un cristal.

La figura 4.7 muestra un haz incidente de rayos X que choca con una serie de planos atómicos, formando los rayos incidentes un ángulo θ con tales planos. En un solo plano,

tiene lugar una "reflexión" especular para cualquier valor de θ . Para lograr interferencia constructiva del haz difractado de la serie de planos en la dirección θ , los rayos que parten de planos separados deben reforzarse entre sí. Esto significa que la diferencia del camino de los rayos que proceden de planos adyacentes (abc en la figura 4.7) debe ser un número entero de longitudes de onda, es decir:

$$2d \cdot \sin\theta = n\lambda \quad \text{para } n=1,2,3\dots \quad (4.1)$$

Esta relación se conoce como Ley de Bragg [Halliday R., et al., 1996], donde la cantidad d (el espaciamiento interplanar) es la distancia perpendicular entre los planos. De lo anterior, la técnica de análisis por difracción de rayos X (XRD por las siglas en inglés de X Ray Diffraction) consiste en hacer incidir un haz monocromático de rayos X sobre una muestra, y con base en los valores de θ para los cuales se registra una interferencia constructiva (picos en la curva de θ vs intensidad), es posible estudiar el espaciamiento de los diversos planos cristalinos de la muestra así como la estructura de la célula unitaria.

Para este caso, se realizaron los análisis de los filtros solares fabricados con base en FeO, con la finalidad de determinar si la película delgada depositada sobre el sustrato de vidrio antes y después del proceso de calentamiento en atmósfera reductora presentaba una estructura cristalina y, en caso afirmativo, qué tipo de estructura cristalina era. Los análisis por XRD fueron realizados en el Laboratorio de Cristalografía y Rayos X del Instituto de Física de la UNAM, usando para ello un difractómetro Siemens Kristalloflex D5000, operado a 30 kV y 20 mA, con un haz de radiación de Cu $K\alpha$.

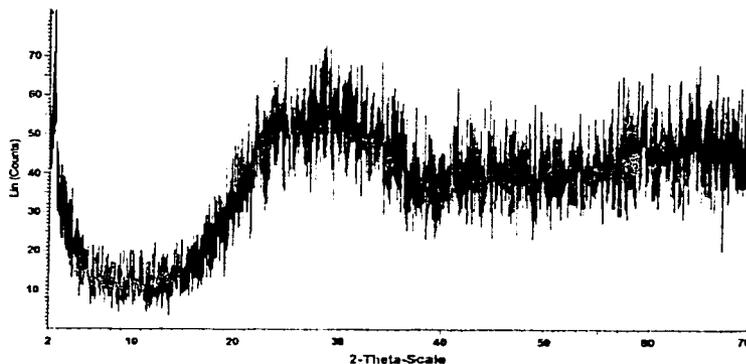


Figura 4.8
Espectro de XRD para la muestra del filtros solar sin calentamiento.

La figura 4.8 presenta el espectro de XRD para la muestra del filtros solar sin calentamiento en atmósfera reductora. En dicho espectro no se observan picos a lo largo de toda la curva, por lo que se deduce que se trata de una estructura amorfa y no de una estructura cristalina.

El espectro de XRD de la figura 4.9 corresponde a la muestra del filtro solar después del proceso de calentamiento en atmósfera reductora. Al igual que para la muestra del filtro solar antes del calentamiento en atmósfera reductora, no se observan picos a lo largo de toda la curva, por lo que se deduce que su estructura no es cristalina, sino más bien amorfa.

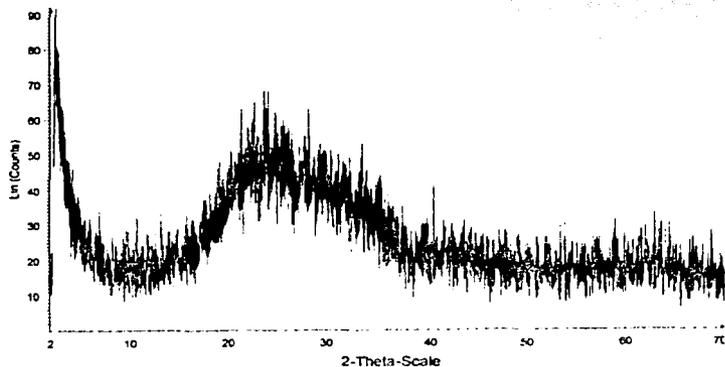


Figura 4.9
Espectro de
XRD para la
muestra del
filtro solar
después del
calentamiento.

Por último, dentro del proceso de simulación reportado en el siguiente capítulo, es necesario suministrar el coeficiente de transferencia de calor (U) del filtro desarrollado, el cual fue estimado con un medidor marca OMEGA, modelo OS-652, y que consiste de un sensor de rayos infrarrojos cuya respuesta espectral abarca el intervalo de 8,000-14,000 nm. Las lecturas tomadas del medidor e interpretadas con ayuda de un nomograma permiten obtener el valor de U . Debido a que dicho medidor está diseñado para medir la U de paredes de edificaciones (para nuestro caso serían muestras grandes), entonces solamente se pudo evaluar el coeficiente de los filtros solares antes del proceso de calentamiento (300x600 mm) ya que las muestras calentadas eran demasiado pequeñas (45x22 mm). Se obtuvo un valor de U de $3.0 \text{ W/m}^2\text{K}$, el cual fue tomado para las simulaciones debido a que es muy semejante al valor recomendado por ASHRAE de $2.78 \text{ W/m}^2\text{K}$ para vidrios con recubrimiento depositado por sputtering (en este caso se contempla doble vidrio); además está dentro del intervalo de valores reportados por Correa G. [2002] para vidrios cal-sosa flotados recubiertos con óxidos de metales transición (al igual que el FeO) tales como el Cu_2O y VO_2 , donde se señalan coeficientes U entre 2.18 y $4.30 \text{ W/m}^2\text{K}$. Junto con las consideraciones anteriores, fueron realizadas las simulaciones utilizando valores para el coeficiente de transferencia de calor U de los filtros solares desarrollados, entre 2.0 y $4.0 \text{ W/m}^2\text{K}$, y los resultados de consumo y ahorro energético no reflejaban ninguna diferencia, por que se puede decir que influye muy poco en los resultados de la simulación, el valor de U para los filtros solares con base en FeO utilizados en las ventanas de la edificación.

Capítulo 5

EVALUACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO POR EL USO DE LOS FILTROS SOLARES

Se presenta la simulación por computadora del desempeño, a lo largo de un año, de los filtros solares fabricados cuando estos son utilizados en las ventanas de una casa-habitación, con lo cual podremos cuantificar los ahorros de energía. A partir de lo anterior, quedará expuesta la viabilidad del hecho de utilizar los vidrios con recubrimientos a base de FeO con fines de ahorro de energía en una edificación.

Con ayuda del software ENERGY-10 versión 1.5, se realizó la simulación del comportamiento térmico de la casa-habitación. Para realizar tal simulación de una edificación ubicada en alguna ciudad de nuestro país, es necesario suministrar los valores de las principales variables climatológicas y de irradiación solar de la localidad en cuestión, a través de un archivo que contenga tales datos hora por hora y a lo largo de todo el año, ya que a través de esto es posible que la simulación considere las particularidades del clima de la localidad, para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y los niveles de radiación incidente en los diferentes elementos de la edificación, entre muchos otros. Sin embargo, debido a que dicho software fue elaborado por instituciones de los Estados Unidos de Norteamérica, entonces sus librerías sólo contienen los archivos de las variables climatológicas para unas cuantas localidades de México. Por ello, fue ineludible utilizar el software TRNSYS versión 15, a través del cual se obtuvo el archivo con los datos de las variables climatológicas y de irradiación solar para la ciudad de Mexicali, B.C. Dicho archivo fue obtenido de la siguiente manera:

- Por medio de la interface IisSiBat del software TRNSYS 15 fueron generados los datos horarios a lo largo de todo el año (8760 datos en total) de radiación global horizontal, radiación normal directa, radiación horizontal difusa, temperaturas de bulbo seco y húmedo, velocidad y dirección del viento, utilizando para ello el componente TYPE 54a (Weather generator). Como datos de entrada, es necesario suministrar al TYPE 54a los promedios mensuales de las variables antes mencionadas, por lo que se usaron datos reales los cuales fueron tomados del Atlas del Agua de la República Mexicana, [Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1976].
- Los datos generados se guardan en un archivo de texto y, posteriormente, dicho archivo es convertido a un archivo del tipo etl, mediante la utilidad Weather Maker versión 1.01, el cual es el tipo de archivos de clima que puede leer directamente el software ENERGY-10 para la realización de las respectivas simulaciones.

Esperando presentar un contraste entre el desempeño que pueden tener los filtros solares cuando son utilizados como ventanas bajo diferentes condiciones climatológicas, fueron realizadas simulaciones para varias localidades del país y cuyos climas son variados. Con lo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

anterior no se pretende proponer un estricto sumario sobre las cantidades de energía que se ahorran cuando los filtros solares con base en FeO son utilizados en diferentes lugares del país; si no que más bien se procura ilustrar únicamente la diferencia en el comportamiento energético de estos, cuando son empleados bajo diferentes condiciones climáticas.

En el proceso de simulación se considera una edificación tipo los departamentos de interés social de una unidad del FOVISSSTE. Es un departamento con un área de 70 m², con techo de concreto, suelo de mosaico y paredes construidas de ladrillo. La orientación es de Norte a Sur, con cuatro ventanas en su cara Norte y cuatro en su cara Sur, las cuales utilizan una lámina de vidrio tipo cal-sosa de 3 mm de espesor. En el proceso de simulación se compara el caso base (la edificación tal como se describió anteriormente) contra el caso de bajo consumo energético, y que contempla el reemplazo de los vidrios cal-sosa en las ventanas de la edificación, por vidrios cal-sosa de 3 mm con recubrimiento con base en FeO. El departamento en ambos casos se considera habitado por 5 personas. Se contempla el uso de calefacción por resistencia eléctrica, así como también un equipo de aire acondicionado a base de un ciclo de expansión directa. A partir de lo anterior, puede evaluarse la disminución en el consumo de electricidad para calefacción y para aire acondicionado, propiciado por el uso de los filtros solares con base en FeO en las ventanas del departamento.

5.1 Caso Cd. de México

La figura 5.1 muestra los resultados de la simulación energética, donde se presentan los consumos de energía anuales (kWh/m²), por usos finales, para la Ciudad de México, cuyo clima es predominantemente templado.

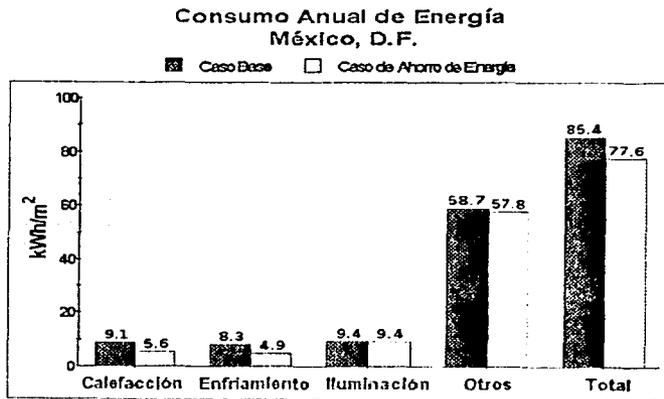


Figura 5.1
Consumo anual de energía para un departamento en la Ciudad de México, obtenido por medio del software ENERGY-10.

Los consumos para el caso base, por concepto de calefacción y enfriamiento (o aire acondicionado) son de 17.4 kWh/m², y representan aproximadamente el 20% del consumo total anual de energía; mientras que el consumo por concepto de iluminación es de 9.4 kWh/m², es decir, poco más del 11% del total. Por último, el consumo más importante es aquel que se designa en la gráfica como *Otros* (58.7 kWh/m²), y que incluye consumo por

calentamiento de agua, electricidad para usos distintos a la iluminación, etc., ascendiendo al 68.7% del consumo total.

Si comparamos las cifras de consumo para el caso base con las del caso de ahorro de energía, el cual consiste únicamente en sustituir en las ventanas del departamento el vidrio común de cal-sosa por los filtros solares fabricados con base en FeO, vemos que la disminución en el consumo energético se presenta en los conceptos de calefacción y enfriamiento (o aire acondicionado) siendo esta de 6.9 kWh/m². En el consumo total del caso de ahorro de energía, se presenta un ahorro del 9.8% comparado con el caso base, es decir 7.8 kWh/m². Lo anterior refleja el buen funcionamiento en las ventanas, para tal localidad, de los filtros solares fabricados con base en FeO por sputtering.

5.2 Caso Mexicali, B.C.

Para el caso de la ciudad de Mexicali, B.C., la figura 5.2 presenta los resultados. El consumo energético total anual aquí es mucho mayor que para la Ciudad de México, debido a las variables climatológicas que determinan un clima extremoso para Mexicali, y que prevalece a lo largo del año. Es de resaltar que en esta ocasión el consumo principal de energía es por los conceptos de calefacción y enfriamiento (o aire acondicionado), alcanzando alrededor del 66% del total, quedando en segundo término el concepto de otros, y en tercer término el consumo por iluminación. El ahorro de energía en el consumo total del caso de ahorro de energía es del 16.4% (40.9 kWh/m²) con respecto al caso base.

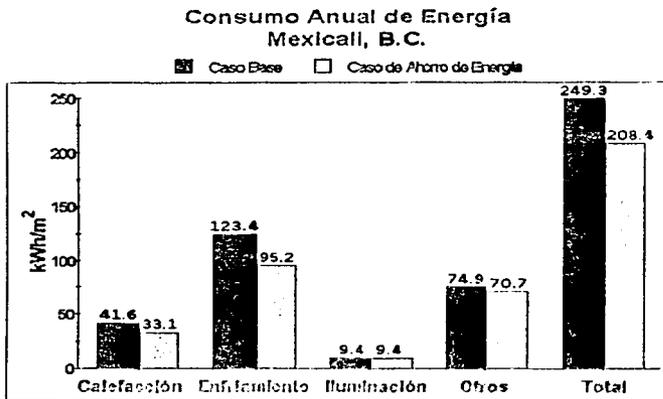


Figura 5.2
Consumo anual
de energía para
un departamento
en la ciudad de
Mexicali, B.C.,
obtenido por
medio del
software
ENERGY-10.

En la ciudad de Mexicali, B.C. se obtiene un mayor ahorro de energía que para el caso de la Ciudad de México, ya que el clima en esta ciudad es cálido extremoso, lo cual provoca que los consumos energéticos por concepto de calefacción (para las horas de frío) y de enfriamiento o aire acondicionado (para las horas de calor) sean mayores, convirtiéndose de esta forma, en los conceptos en los cuales se encuentran los mayores potenciales de ahorro de energía para la edificación.

5.3 Caso Chihuahua, Chi.

Los resultados para la ciudad de Chihuahua, Chi. se muestran bastante parecidos a los de Mexicali, sólo que en este caso el consumo es menor ya que el clima a pesar de que es parecido no es tan extremo. Los resultados están ilustrados en la figura 5.3.

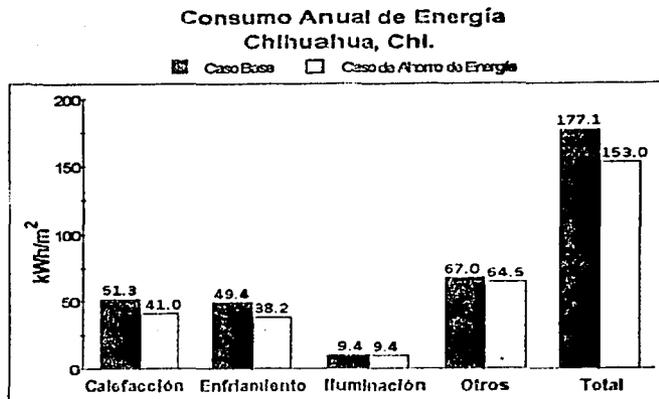


Figura 5.3
Consumo anual de energía para un departamento en la ciudad de Chihuahua, Chi., obtenido por medio del software ENERGY-10.

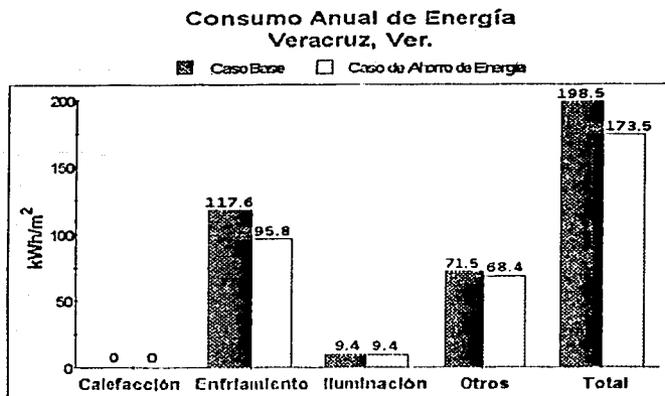
El consumo energético total anual aquí continúa siendo mayor que para la Ciudad de México (poco más del doble), debido también a las características del clima a lo largo del año. El consumo principal de energía es por los conceptos de calefacción y enfriamiento (o aire acondicionado), alcanzando alrededor del 56.8% del consumo anual total, quedando en segundo término el concepto de otros, y en tercer término el consumo por iluminación. El ahorro de energía en el consumo anual total del caso de ahorro de energía es del 13.6% (24.1 kWh/m²) con respecto al caso base.

5.4 Caso Veracruz, Ver.

Otro resultado interesante es el de la ciudad de Veracruz, Ver., el cual se muestra en la gráfica de la figura 5.4. Es importante resaltar que el clima en dicha ciudad es predominantemente cálido húmedo, donde la calefacción es prácticamente innecesaria debido a los altos valores de humedad relativa que se registran.

Tal situación está reflejada en los resultados de la simulación de la figura 5.4, ya que el consumo de energía por concepto de calefacción es de cero. Sin embargo, para enfriamiento o aire acondicionado, el consumo por este concepto resulta ser el más importante, alcanzando el 59% del consumo total anual de la edificación. Para esta localidad se obtiene un ahorro de energía por el uso de los filtros solares con base en FeO en las ventanas, del 12.6% con respecto al caso base, lo cual en unidades de energía representa 25 kWh/m².

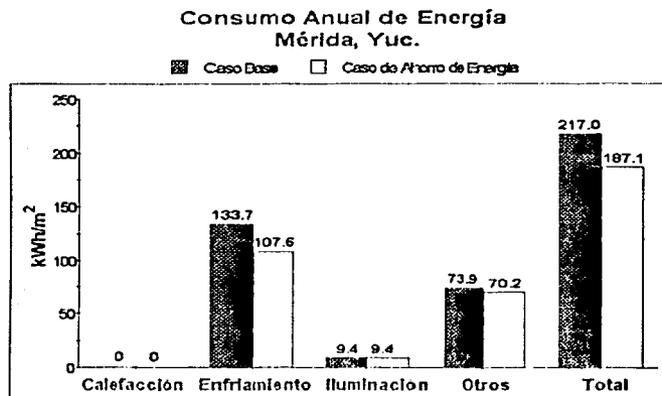
Considerando los resultados de la simulación para la ciudad de Veracruz, el mayor potencial de ahorro de energía en la edificación se encontraba en el consumo por enfriamiento, por lo que al utilizar en las ventanas los filtros solares fabricados, estos funcionan de manera conveniente para nuestros fines de ahorro de energía.



*Figura 5.4
Consumo anual de energía para un departamento en la ciudad de Veracruz, Ver., obtenido por medio del software ENERGY-10.*

5.5 Caso Mérida, Yuc.

Este mismo escenario prevalece en el caso de la ciudad de Mérida, Yuc. donde los resultados, mostrados en la figura 5.5, son bastante similares que para el caso de Veracruz.



*Figura 5.5
Consumo anual de energía para un departamento en la ciudad de Mérida, Yuc., obtenido por medio del software ENERGY-10.*

El consumo de energía por concepto de calefacción es de cero, mientras que para enfriamiento o aire acondicionado, el consumo por este concepto resulta ser el más importante, alcanzando el 61.6% del consumo total anual de la edificación. Para esta localidad se obtiene un ahorro de energía por el uso de los filtros solares con base en FeO en las ventanas, del 13.8% con respecto al caso base, lo cual en unidades de energía representa 29.9 kWh/m². Por lo anterior, el mayor potencial de ahorro de energía en la edificación del caso de la ciudad de Veracruz se encuentra en el consumo por enfriamiento.

5.6 Caso Mexicali B.C. usando vidrios Reflectasol-Vitro

Por último, la figura 5.6 exhibe los resultados de consumo energético bajo las mismas condiciones señaladas a lo largo de este capítulo, sólo que esta vez la simulación es realizada considerando que para el caso de ahorro de energía se utilizan, en las ventanas del departamento, los vidrios arquitectónicos llamados Reflectasol® AP Tintex, los cuales son comercializados por la compañía Vitro y se encuentran actualmente en el mercado. Para tal simulación se emplearon las propiedades de los vidrios Reflectasol® AP Tintex presentadas en la tabla 1.1. El consumo energético del caso base es de 249.3 kWh/m² (igual que en la sección 5.2); sin embargo para el caso en que son utilizados vidrios Reflectasol® AP Tintex en las ventanas (caso de ahorro de energía), el consumo es de 221.4 kWh/m². Ello representa un ahorro energético del 11.2%. Se observa así que los filtros solares con base en FeO desarrollados, tienen un mejor desempeño energético que los vidrios Reflectasol® AP Tintex. Se eligió este tipo de vidrios en virtud de que son de los más parecidos a los filtros solares con base en FeO desarrollados aquí, ya que también son fabricados mediante bombardeo iónico y consisten en una sola lámina de vidrio con el recubrimiento en una de sus caras. Por otro lado, la medida de su espesor es de 6 mm, es decir, el doble que para el caso de los filtros solares con base en FeO.

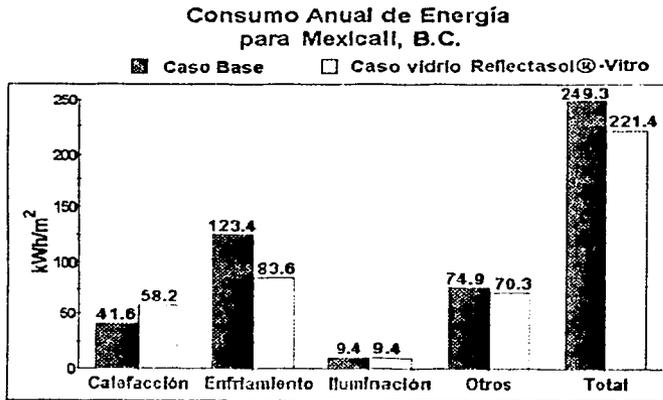


Figura 5.6
Consumo anual de energía para un departamento en la ciudad de Mexicali, B.C., cuando usa vidrios arquitectónicos Reflectasol® fabricados por Vitro.

Los datos anteriores nos dan una buena idea de los potenciales de ahorro de energía que podrían ser aprovechados a través del simple uso en las ventanas de los filtros solares desarrollados con base en FeO, sin embargo, resultaría interesante realizar la simulación del comportamiento térmico de un edificio moderno con estructura de acero y envolvente de vidrio, cuando se utilizan los filtros solares con base en FeO en la totalidad de la envolvente. Seguramente los ahorros de energía serían más significativos, lo cual haría mucho más interesante la posible comercialización de los filtros solares con base en FeO. Para esta simulación tendrían que cambiar muchas condiciones consideradas para nuestro caso, tales como el uso mismo de la edificación ya que este clase de edificios son utilizados habitualmente para oficinas de corporativos. Por otro lado, se tendría que utilizar otro software ya que el Energy-10 no nos permite realizar las simulaciones del comportamiento

térmico de este tipo de edificios, en virtud de que su uso se limita a edificaciones de no más de 929 m² de superficie (10,000 pies cuadrados).

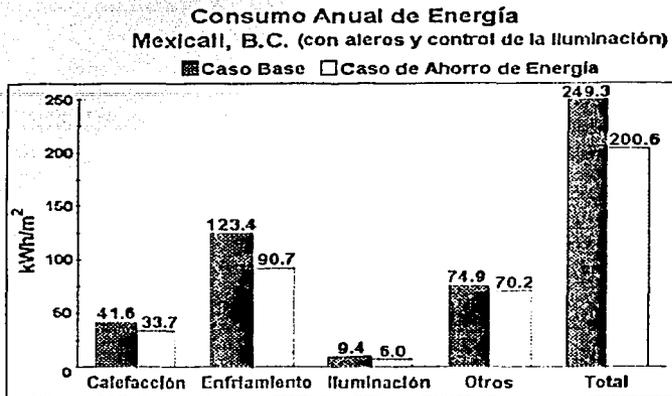


Figura 5.7
 Consumo anual de energía para un departamento en la ciudad de Mexicali, B.C., considerando para el caso de ahorro de energía, además de los filtros con base en FeO, el uso de aleros y control de la iluminación.

Por último, es prudente señalar que los ahorros de energía obtenidos para los ejemplos anteriores, pueden ser incrementados si dentro de la simulación son consideradas, junto con el uso de los filtros solares con base en FeO en las ventanas, algunas estrategias para la edificación. En la figura 5.7 se muestra un ejemplo de lo anterior, ya que en este caso se considera para el caso de ahorro de energía, además de los filtros con base en FeO, el uso de aleros así como también el control de la iluminación (tomando como referencia el flujo de la luz natural al interior de la edificación, por medio de un sensor se controla el flujo de la luz artificial). Situando la edificación en la ciudad de Mexicali B.C., resulta en un ahorro total de energía de 48.7 kWh/m², es decir, un ahorro energético de cerca del 20%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos de los experimentos desarrollados a lo largo del presente trabajo, se pueden presentar las siguientes conclusiones:

- Las películas delgadas con base en FeO depositadas sobre los sustratos de vidrio cal-sosa, poseen propiedades selectivas a la radiación, lo cual permite afirmar que actúan como filtros solares; los cuales tienen una transmisividad en el infrarrojo cercano de 39.9% y en el intervalo visible de la radiación de 30.2%, su reflectividad es de 19% y 17.5% en los intervalos infrarrojo cercano y visible respectivamente, mientras que absorberán 48.5% de la radiación solar.
- Cuando los filtros solares con base en FeO son utilizados en las ventanas de casas habitación, según la simulación realizada con el software Energy-10, éstos permiten ahorros de energía principalmente por concepto de acondicionamiento de aire (calefacción y enfriamiento). Si dichos filtros solares se usan en localidades con climas cálidos extremos (como el de Mexicali B.C. y Chihuahua, Chi.) se presentan considerables ahorros de energía, siendo estos de hasta 16.4% del consumo total. Para climas templados como el que prevalece en la Cd. de México, se obtienen ahorros energéticos de alrededor del 9.1%; mientras que para climas cálido-húmedos (Veracruz, Ver. y Mérida, Yuc.) los ahorros de energía alcanzan valores entre 12.6 y 13.8% del consumo total. Además, los filtros solares con base en FeO resultaron tener un mejor desempeño que los vidrios Reflectasol ©AP Tintex de Vitro, cuando son utilizados en las ventanas para el caso de la Cd. de Mexicali. Si se consideran, junto con los filtros solares con base en FeO, estrategias tales como el uso de aleros y control de la iluminación, los ahorros de energía se incrementarán, como se mostró para el caso de Mexicali.
- Otro aspecto interesante desde el punto de vista de la posible comercialización de los filtros solares con base en FeO para ser utilizados en las ventanas de edificaciones, radica en su relativa sencillez, ya que solamente consisten en una película selectiva depositada sobre el sustrato de vidrio cal-sosa, que sustituirá al vidrio común de cal-sosa utilizado en las ventanas. No requiere de la instalación de dobles vidrios con marcos especiales, ni de materiales complejos y caros.
- El amplio conocimiento de la técnica de erosión iónica (sputtering) con magnetrones así como su uso y difusión actual en la industria nacional para el depósito de películas delgadas, hacen mucho más viable la producción en nuestro país a nivel industrial, en gran escala y a bajo costo, de los filtros solares con base en FeO.
- Considerando los puntos anteriores, sería posible que una parte importante de la sociedad tenga acceso a los filtros solares con base en FeO, logrando así un uso masivo que repercute en una disminución en la demanda energética nacional y la consecuente disminución en la quema de combustibles fósiles y en la emisión de gases contaminantes. Además, se logra también mejorar la calidad de vida de aquellos sectores de la sociedad que viven en zonas con climas extremos y que no tienen acceso a equipos de acondicionamiento de aire, ya que con el uso de los filtros solares con

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

base en FeO en las ventanas, pueden alcanzarse condiciones al interior de las casas-habitación mucho más cercanas a las condiciones de confort térmico humano.

- La obtención de filtros solares con base en FeO de grandes áreas no fue posible debido a las limitaciones de espacio que se tuvieron en el proceso de fabricación de los filtros solares, durante la etapa de calentamiento en atmósfera reductora. Se propone realizar el proceso de sputtering del hierro partiendo de una presión base del sistema mas baja ($\sim 10^{-7}$ mbar) con el fin de controlar la oxidación de éste, ya que con el equipo utilizado no es posible alcanzar esta presión.
- Se propone la posibilidad de disminuir el tiempo de depósito de las películas. Para ello es necesario utilizar un magnetrón que posea un campo magnético más intenso, disminuyendo así la influencia del ferromagnetismo del blanco de hierro que debilita y distorsiona el campo magnético de los imanes del magnetrón. El efecto de confinamiento del plasma no se vería considerablemente reducido, por lo que la eficiencia del proceso de sputtering del blanco de hierro aumentaría.
- Con el fin de mejorar la uniformidad en el espesor de las películas depositadas por medio de la erosión iónica o sputtering, se recomienda el uso de magnetrones con una longitud de su altura igual a la altura de los sustratos de vidrio, de esta forma todas las zonas del vidrio estarían, en algún momento, directamente frente al magnetrón durante el proceso de depósito.
- Es muy probable que los ahorros de energía que permitiría el uso de los filtros solares, con base en FeO, en un edificio moderno con estructura de acero y envolvente de vidrio, cuando éstos son utilizados en la totalidad de la envolvente del edificio, serían más significativos que para el caso de la casa habitación analizado aquí, lo cual haría mucho más interesante la posible comercialización de los filtros solares con base en FeO. Desgraciadamente, el software Energy-10 no nos permite realizar la simulación del comportamiento térmico de este tipo de edificios, ya que los resultados obtenidos tienen un grado de confiabilidad bajo en virtud de que el uso de este software se limita a edificaciones de no más de 929 m^2 de superficie.
- Es importante estudiar la estabilidad química de los filtros solares con base en FeO desarrollados, bajo las diferentes condiciones climáticas que predominan en el país, con la finalidad de determinar sus limitaciones o posibles ventajas al ser utilizados en las ventanas de edificaciones, para las diferentes localidades del país.
- Como un posible trabajo directamente relacionado con el presente, se recomienda el estudio y cálculo del posible potencial de ahorro de energía por el uso de los filtros solares con base en FeO en México para los próximos 10 y 25 años, tomando como base los diferentes programas de construcción de viviendas.
- Es importante el desarrollo de los filtros solares con base en FeO como un nuevo material de construcción para el ahorro de energía; sin embargo, sería conveniente realizar un estudio sobre cuales serían los materiales de construcción ideales para contribuir al ahorro energético en las edificaciones, para los diferentes tipos de climas en nuestro país.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

BIBLIOGRAFÍA

- Almanza R., Muñoz F. y Mazari M., (1992). Development of aluminum first surface mirrors for solar energy applications, *Solar Energy*, Vol. 48, No. 5, pp. 339-343.
- Almanza R., Chen J.F. Correa G. y Mazari M., (1995). Further option for solar concentrators: aluminum first surface mirrors, *Solar Energy*, Vol. 54, No. 5, pp. 339.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, (1989). *Fundamentals Handbook*, E.U.A.
- Berry L.G., Mason B. y Dietrich R.V., (1983). *Mineralogy, Concepts, description and determination*, Segunda ed., W.H. Freeman and Company, New York.
- Brawn R., (1970). Thin film substrates, en: *Handbook of Thin Film Technology*, Mc Graw Hill, E.U.A.
- Brühl S., (1998). Recubrimientos por plasma PVD, en: *Procesamiento de Materiales por Plasma, Primer curso latinoamericano*, patrocinado por la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón., 3-28 Agosto 1998, Buenos Aires, Argentina.
- Bunshah R.F., (2001). Vapor Deposition Technologies, en: Bunshah R.F. (editor), *Handbook of Hard Coatings, Deposition, technologies, properties and applications*, Cap. 3, Noyes Publications, New Jersey, E.U.A.
- Case F., (1990). Low temperature deposition of VO₂ thin films, *Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol. A8, No. 3, pp. 1395-1398.
- Chang W.D., Chin T.S., Wu H.S., Chou S.W. y Jou J.H., (1995). Stress effect on coercivity of γ Fe₂O₃ thin films, *Journal of Applied Physics*, Vol. 77, No. 3, pp. 1184-1188.
- Correa G., (1996). Espejos solares para plantas fototérmicas, *Tesis de Maestría*, Fac. de Ingeniería, UNAM.
- Correa G. y Almanza R., (2001). Copper based thin films to improve glazings for energy-savings in buildings, *ISES 2001 Solar World Congress*, Adelaide, Australia.
- Correa G., (2002). Fabricación de filtros solares para ahorro de energía con recubrimientos de Cu₂O-CuS y VO₂, *Tesis de Doctorado*, Fac. de Ingeniería. UNAM.
- Diario Oficial de la Federación, (2001). *Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales*, 25 de abril, Segunda Sección.
- Doremus R.H., (1973). *Glass Science*, John Wiley & Sons, Inc, New York, pp 319-332.
- Duffie J. y Beckman W., (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, Segunda Edición, John Wiley & Sons, E.U.A.
- Farengo R., (1998). Introducción a la física del plasma, en: *Procesamiento de Materiales por Plasma, Primer curso latinoamericano*, patrocinado por la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 3-28 Agosto 1998, Buenos Aires, Argentina.

- Fujii T., Takano M., Katano R., Bando Y. e Isozumi Y., (1989). Preparation and characterization of (111)-oriented Fe_3O_4 films deposited on sapphire, *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, No. 7, pp. 3168-3172.
- Hall W.T., (1956). *Analytical Chemistry*, Vol. 1, décimo primera ed., John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Halliday D., Resnick R. y Krane K.S., (1996). *Física Vol. 2*, Versión ampliada, Cuarta ed., C.E.C.S.A., México.
- Hashimoto T., Yamada T. y Yoko T., (1996). Third-order nonlinear optical properties of sol-gel derived $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, and Fe_3O_4 thin films, *Journal of Applied Physics*, Vol. 80, No. 6, pp. 3184-3190.
- Hollands K.G., Raithby G.D. y Konicek L., (1975). Correlation equations for free convection heat transfer in horizontal layers of air and water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 879.
- Ishii O., (1988). Diffusion of Cu into rf-sputtered iron oxide films, *Journal of Applied Physics*, Vol. 63, No. 9, pp. 4753-4755.
- Kim Y.K. y Oliveria M. (1994). Magnetic properties of reactively sputtered Fe_{1-x}O and Fe_3O_4 thin films, *Journal of Applied Physics*, Vol. 75, No. 1, pp. 431-437.
- Kim K.J., Moon D.W., Lee S.K. y Jung K.-H., (2000). Formation of a highly oriented FeO thin film by phase transition of Fe_3O_4 and Fe nanocrystallines, *Thin Solid Films*, Vol. 360, pp. 118-121.
- Kiyotaka W. y Hayakawa S. (editores), (1992). *Handbook of Sputter Deposition Technology: principles, technology and applications*, Noyes Publications, New Jersey, E.U.A.
- Kusano E., Theil J.A. y Thornton J.A., (1988). Deposition of vanadium oxide films by direct-current magnetron reactive sputtering, *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, Vol. 6, No. 3, Parte II, pp. 1663-1667.
- Lind D.M., Berry S.D., Chern G., Mathias H. y Testardi L.R., (1992). Growth and structural characterization of Fe_3O_4 and NiO thin films and superlattices grown by oxygen-plasma-assisted molecular-beam epitaxy, *Physical Review B*, Vol. 45, No. 4, pp.1838-1850.
- Livage J. y Ganguli D., (2001). Sol-gel electrochromic coatings and devices: A review, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 68, pp. 365-381.
- Mann R. y Romdohr P., (1955). *Tratado de Mineralogía*, Segunda ed., Ed. Gustavo Gili S.A., Barcelona.
- Maissel L.I. y Glang R. (editores), (1970). *Handbook of Thin Film Technology*, Mc Graw-Hill, New York, E.U.A.
- Martínez I., Almanza R., Mazari M. y Correa G., (2000). Parabolic trough reflector manufactured with aluminum first surface mirrors thermally sagged, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 64, pp. 85-96.
- Morillón D., (1993). *Bioclimática; Sistemas pasivos de climatización*, Ed. Universidad de Guadalajara.

- Nair M.T.S. y Nair P.K., (1991). SnS-Cu_xS thin film combination: a desirable solar control coating for architectural and automobile glazings, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 24, pp. 450-453.
- Nair M.T.S., Guerrero L., Arenas O.L. y Nair P.K., (1999). Chemically deposited copper oxide thin films: structural, optical and electrical characteristics, *Applied Surface Sciences*, Vol. 150, pp. 143.
- Nekrasov B., (1969). *Textbook of General Chemistry*, Cap. 4 y 14, MIR Publishers, Moscow.
- Ohta S. y Terada A., (1986). Direct preparation of $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ thin film recording media by reactive r.f. sputtering technique, *Thin Solid Films*, Vol. 143, pp. 73-82.
- Olgay V., (1963). *Design with Climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*, Princeton University Press, New Jersey, E.U.A.
- Orel B., Macek M., Svegl F. y Kalcher K., (1994). Electrochromism of iron oxide films prepared via the sol-gel route by the dip-coating technique, *Thin Solid Films*, Vol. 246, pp. 131-142.
- Ortiz C., Lim G., Chen M.M. y Castillo G., (1988). Physical properties of spinel iron oxide films, *Journal of Materials Research*, Vol. 3, No. 2, pp. 344-350.
- Özer N. y Tepchan F., (1993). Structure and optical properties of electrochromic Koper oxide films prepared by reactive and conventional evaporation techniques, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 30, pp. 13-26.
- Özer N. y Tepchan F., (1999). Optical and electrochemical characteristics of sol-gel deposited iron oxide films, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 56, pp. 141-152.
- Pulker H.K., (1984). Coatings on Glass, *Thin Films Science and Technology*, Vol. 6, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Raythby G.D. y Hollands K.G., (1975). A general method of obtaining approximate solutions to laminar and turbulent free convection problems, *Advances in Heat Transfer*, 11, pp. 265, N.Y. Academic Press, E.U.A.
- Richardson T.J., Slack J.L. y Rubin M.D., (2001). Electrochromism in copper oxide thin films, *Electrochimica Acta*, Vol. 46, pp. 2281-2284.
- Rivero R., (1988). *Arquitectura y Clima*, Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Roberts W.L., Campbell T.J. y Rapp G.R., (1990). *Encyclopedia of minerals*, Van Nostrand Reinhold, New York, E.U.A.
- Roth W.L., (1960). Defects in the crystal and magnetic structures of ferrous oxide, *Acta Crystallographyca*, Vol. 13, pp. 140-149.
- Rubin M., Rottkay V. y Powles R., (1998). Window optics, *Solar Energy*, Vol. 62, No. 3, pp. 149-161.
- Ruzakowski A.P., Tabet M.F. y UrbanIII F.K., (1997). Determining the optical properties of a mixed-metal oxide film, $\text{Co}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, with spectroscopic ellipsometry and atomic force microscopy, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, Vol. 15, No.3, pp. 998-1006.
- Salmang H., (1962). *Fundamentos Físico-Químicos de la Fabricación del Vidrio*, Editorial Aguilar, Madrid.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Samsonov G.V. (editor), (1982). *The Oxide Handbook*, Segunda ed., IFI/Plenum Data Company, New York, E.U.A.
- Satas D. y Tracton A.A. (editores), (2001). *Coatings Technology Handbook*, Marcel Dekker Inc., New York, E.U.A.
- Schedel-Niedrig Th., Weiss W. y Schlögl R., (1995). Electronic structure of ultrathin ordered iron oxide films grown onto Pt(111), *Physical Review B*, Vol. 52, No. 24, pp.17449-17460.
- Schuegraf K.K. (editor), (1988). *Handbook of Thin Film Deposition, Processes and Techniques*, Capítulo 1, Noyes Publications, New Jersey, E.U.A.
- Secretaría de Energía, (1999). *Agenda Estadística del Sector Energético 1993-1998*, Gobierno de la República, México.
- Secretaría de Energía, (2001). *Balance Nacional de Energía 2000*, Gobierno de la República, México.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, (1976). *Atlas del Agua de la República Mexicana*, Gobierno de la República, México.
- Sella C., Maaza M., Nemraoui O., Lafait J., Renard N. y Sampeur Y., (1998). Preparation, characterization and properties of sputtered electrochromic and thermochromic devices, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 98, pp. 1477-1482.
- Sequeda, F.O., (1986). *Sputter Deposition and Ion Beam Processes*, IBM Research Lab., San José, Ca, E.U.A., Apuntes del curso patrocinado por la Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y Vacío y el CINVESTAV, Marzo 19-20, Cd. de México.
- Shigesato Y., Enomoto M. y Odaka H., (2000). Thermochromic VO₂ films deposited by r.f. magnetron sputtering using V₂O₃ or V₂O₅ targets, *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1*, Vol. 39, No. 10, pp. 6016-6024.
- Siegel R. y Howell J.R., (1992). *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere publishing Co., tercera ed., E.U.A.
- Siroky K., Jiresova J. y Hudec L., (1994). Iron oxide thin film gas sensor, *Thin Solid Films*, Vol. 245, pp. 211-214.
- Stenberg T., Vuoristo P., Keränen J., Mäntylä T., Büchler M., Virtanen S., Schmuki P. y Böhni H., (1998). Characterization of r.f.-sputtered iron oxide thin films for modeling passive films, *Thin Solid Films*, Vol. 312, pp. 46-60.
- Stephen M.R., Cuomo J.J. y Westwood W.D. (editores), (1990). *Handbook of Plasma Processing Technology. Fundamentals, etching, deposition and surface interactions*, Noyes Publications, New Jersey, E.U.A.
- Tesmer J.R. y Nastasi M. (editores), (1995). *Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis*, MRS, Pittsburg, E.U.A.
- Yan B., Peng J. y Chai C., (1994). Gas-sensing properties of $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ thin films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition, *Thin Solid Films*, Vol. 245, pp. 225-227.

Yoshii S., Ishii O., Hattori S., Ishida G. y Nakagawa T., (1982). High density recording characteristics of sputtered $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ thin-film disks, *Journal of Applied Physics*, Vol. 53, No. 3, pp. 2556-2560.

Direcciones de internet:

www.vitro.com/vidrio_plano_arquitctónico/español/Productos.htm

www.pilkington.com/the+americas/usa/english/building+products/default/htm

www.saint-gobain-glass.com.mx/productos/comfort.aspx?id_familia=1