

01118
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

CONCENTRADOR TIPO CANAL PARABOLICO CON
ESPEJOS DE PRIMERA SUPERFICIE PARA LA
PLANTA TERMOSOLAR DEL INSTITUTO DE
INGENIERIA DE LA UNAM

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA ENERGETICA

P R E S E N T A :

I.Q. IVAN GALILEO MARTINEZ CIENFUEGOS



MEXICO, D.F.

1999

275820

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Marcos Mazari Menzer
Vocal: Dr. Rafael Almanza Salgado
Secretario: M. en I. Genaro A. Correa Miranda
1er Suplente: Dr. Claudio Estrada Gasca
2do Suplente: M. en I. Felipe Muñoz Gutiérrez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Coordinación de Mecánica, Térmica y Fluidos
Instituto de Ingeniería, UNAM.

Planta Termosolar de Canal Parabólico
Instituto de Ingeniería, UNAM.

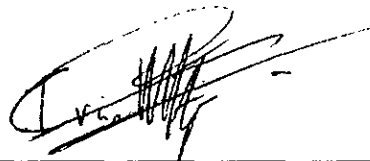
Laboratorio de Implantación de Iones
Instituto de Física, UNAM.

Asesor:



Dr. Rafael Almanza Salgado

Sustentante:



Ing. Iván Galileo Martínez Cienfuegos

DEDICATORIAS

Dedicado a las personas que más admiro y quiero: mis padres América y Galileo. Siempre serán un ejemplo de entrega y dedicación total..

A Camilo y Mónica, que como hermanos representan una parte importante de lo que soy y por tanto, forman parte de mí.

A Rocío, quien siempre estará presente en mi corazón y en mi mente, ya que forma parte de una etapa muy importante de mi vida...

A mis amigos: Alejandro, Erick y Fernando, cuyo apoyo y amistad incondicional siempre agradeceré.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente al Dr. Rafael Almanza por su tutoría, lo que involucró gran atención y paciencia para el desarrollo de este trabajo. De igual manera al Sr. Gabriel Mendoza, cuya ayuda técnica fue de enorme importancia para la terminación del proyecto.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería: Alvaro Lentz, Genaro Correa, Gerardo Silva, y Leticia Ozawa, les agradezco por toda la ayuda y apoyo no sólo en el desarrollo de este trabajo, sino por toda su amistad.

Agradezco a las diferentes dependencias de la UNAM que de alguna manera estuvieron involucradas en la realización de este trabajo de tesis, tales dependencias fueron: Instituto de Ingeniería, Instituto de Física, Instituto de Química, Programa Universitario de Energía, Dirección General de Asuntos del Personal Académico y Dirección General de Estudios de Posgrado.

También doy las gracias a los miembros del jurado que tuvieron a bien revisar este trabajo escrito, cuyas sugerencias y aportaciones fueron muy valiosas para mejorar el contenido y estilo que a continuación se presenta.

ÍNDICE GENERAL

	Página
Resumen	1
Introducción	2
Capítulo I: Panorama Energético Mundial y Energía Solar	5
1.1. Dimensiones de la demanda global de energía	5
1.2. El desafío ambiental de producción energética	8
1.2.1. Posibles efectos debidos al incremento en la concentración de CO ₂	9
1.3. Energías renovables	11
1.4. Introducción al mercado de energías renovables	12
1.5. El recurso solar	14
1.6. Generación de electricidad con energía solar	15
1.6.1. Generalidades	16
1.6.2. Sistema de generación eléctrica con canal parabólico	18
1.6.3. Sistema de generación eléctrica con receptor central	21
1.6.4. Sistema de generación eléctrica con plato parabólico y motor Stirling	23
1.6.5. Sistema de generación eléctrica con chimenea solar	25
1.6.6. Sistema de generación eléctrica con estanque solar	27
1.6.7. Sistema fotovoltaico para la generación de electricidad	29
1.6.8. Comparación entre sistemas	31
1.7. La energía solar en México	33
1.7.1. La energía solar como recurso nacional	34
1.7.2. Experiencias de sistemas termosolares en México	35
1.8. Evaluación de externalidades ambientales	38
Capítulo II: Bases Teóricas	40
2.1. Óptica de concentración	40
2.2. El vidrio	43
2.2.1. Generalidades	43
2.2.2. Vidrios sílico-cálcico-sódicos	44
2.2.3. Ataque químico de la superficie del vidrio	48
2.2.4. Curvatura del vidrio	49
2.3. El proceso de crecimiento de una película delgada	49
2.4. Consecuencias estructurales del proceso de crecimiento para películas delgadas	51
2.5. La erosión iónica para fabricar películas delgadas	52
2.5.1. Corriente directa	53

2.5.2. <i>Regiones del plasma</i>	54
2.5.3. <i>Efecto de la temperatura del sustrato durante el proceso de erosión.</i>	56
2.5.4. <i>Arcos producidos durante el proceso de erosión iónica.</i>	57
2.6. <i>La evaporación térmica para fabricar películas delgadas</i>	58
Capítulo III: Método Experimental	61
3.1. <i>Objetivos del proyecto</i>	61
3.2. <i>Descripción del equipo</i>	62
3.2.1. <i>Sistema de doblado de vidrio</i>	62
3.2.2. <i>Sistema de limpieza</i>	63
3.2.3. <i>Sistema de erosión iónica</i>	63
3.2.4. <i>Sistema de bombeo o generador de vacío</i>	71
3.2.5. <i>Sistema de control de presión</i>	74
3.2.6. <i>Sistema de movimiento del vidrio</i>	75
3.2.7. <i>Preparación del sistema de vacío</i>	77
3.2.8. <i>Operación del sistema de inyección de gases</i>	77
3.3. <i>Método experimental</i>	78
3.3.1. <i>Doblado del vidrio</i>	78
3.3.2. <i>Limpieza del sustrato de vidrio</i>	79
3.3.3. <i>Generación de vacío y limpieza con descarga luminosa</i>	80
3.3.4. <i>Erosión iónica del aluminio</i>	82
3.3.5. <i>Erosión iónica del cuarzo</i>	84
3.3.6. <i>Método alternativo para la evaporación del aluminio</i>	88
3.3.7. <i>Armado del concentrador con forma de mosaico en la planta termosolar</i>	89
3.3.8. <i>Evaluación de las pérdidas de concentración</i>	89
Capítulo IV: Resultados y Análisis	91
4.1. <i>Fabricación de los moldes</i>	91
4.2. <i>Doblado del vidrio</i>	94
4.3. <i>Fabricación de las películas: reflejante de aluminio y protectora de cuarzo</i>	99
4.4. <i>Fabricación del concentrador y montaje en campo</i>	101
4.5. <i>Pruebas concentración</i>	103
4.6. <i>Análisis de resultados</i>	108
4.6.1. <i>Proceso de fabricación de los espejos</i>	108
4.6.2. <i>Funcionamiento en campo</i>	110
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	114
5.1. <i>Conclusiones</i>	114
5.2. <i>Recomendaciones</i>	116

Bibliografía	119
Anexo A: Propiedades de Materiales	125
A.1. La Masa-Roca ^{MR}	125
A.1.1. Modo de empleo general para los materiales Masa-Roca ^{MR}	126
A.1.2. Precauciones generales para trabajar con estos materiales	129
A.2. La Fibra Cerámica	130
Anexo B: Parámetros que Afectan la Formación de las Películas Al-SiO₂	133
B.1. Presión	133
B.2. Temperatura	134
B.3. Presión parcial de oxígeno	134
B.4. Calidad de las películas depositadas	135
Anexo C: Pérdida del Campo Magnético en un Magnetrón	138
Anexo D: Costo de Fabricación de los Espejos	141
Anexo E: Evaluación de Sustentabilidad entre una Planta de Producción de Energía Eléctrica Ciclo Combinado contra un Sistema Solar-Ciclo Combinado	145
E.1. Generalidades	145
E.2. Definiciones	146
E.3. Atributos sistémicos	147
E.4. Definición operativa de un sistema de manejo sustentable	148
E.5. Elementos conceptuales y desarrollo del proyecto	149
E.5.1. <i>Objetivos de la evaluación y definición del sistema de manejo</i>	150
E.5.1.1. <i>Componentes bio-físicas del sistema</i>	151
E.5.1.2. <i>Componentes socioeconómicas y culturales</i>	155
E.5.1.3. <i>Componentes tecnológicas y de manejo</i>	156
E.5.2. <i>Identificación de los puntos críticos del sistema</i>	157
E.5.2.1. <i>Aspectos ambientales</i>	157
E.5.2.2. <i>Aspectos socioeconómicos</i>	158
E.5.3. <i>Selección de los indicadores</i>	158
E.5.3.1. <i>Indicadores económicos</i>	159
E.5.3.2. <i>Indicadores técnicos-ambientales</i>	159
E.5.3.3. <i>Indicadores sociales</i>	160
E.5.4. <i>Medición y monitoreo de los indicadores</i>	161
E.5.4.1. <i>Indicadores económicos</i>	161
E.5.4.2. <i>Indicadores técnicos-ambientales</i>	162
E.5.4.3. <i>Indicadores sociales</i>	163
E.6. Resultados de la evaluación	164

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1: Evolución de la demanda total mundial de energía primaria.	6
Figura 1.2: Demanda incremental primaria de electricidad (1991-2010).	7
Figura 1.3: Evolución de la demanda mundial de electricidad por tipo de combustible.	7
Figura 1.4: Incremento de la capacidad de generación de electricidad (1991-2010).	8
Figura 1.5: Gases que influyen al clima por sectores y fuentes, así como su contribución específica al efecto invernadero global.	9
Figura 1.6: Desarrollo de las emisiones de CO ₂ por región.	10
Figura 1.7: Incremento en las emisiones anuales de CO ₂ .	10
Figura 1.8: Tiempo estimado de uso para las reservas globales de combustibles fósiles.	13
Figura 1.9: Regiones con alta irradiancia solar factibles de instalar una planta termosolar.	15
Figura 1.10: Costos específicos de inversión para diferentes tecnologías termosolares.	16
Figura 1.11: Esquema de un concentrador de canal parabólico.	18
Figura 1.12: Esquema de un sistema de helióstatos con torre central.	21
Figura 1.13: Esquema de un paraboloide con motor Stirling.	23
Figura 1.14: Esquema de una chimenea solar.	26
Figura 1.15: Esquema de un estanque solar y las zonas que lo forman.	28
Figura 1.16: Esquema de una celda fotovoltaica.	29
Figura 1.17: Emisiones relativas de CO ₂ provocadas por diferentes sistemas de generación eléctrica.	39
Figura 2.1: Diagrama de Sankey que representa las pérdidas energéticas de un concentrador de canal parabólico.	41
Figura 2.2: Esquema de los posibles errores de una superficie reflejante.	43
Figura 2.3: Diagrama de devitrificación	45
Figura 2.4: Diagrama de líneas de reblandecimiento.	46
Figura 2.5: Regiones del plasma.	55
Figura 2.6: Plasma sobre el blanco de un magnetrón plano.	56
Figura 2.7: Esquema del montaje de filamento sobre dos electrodos.	60
Figura 3.1: Esquema de la Cámara de Vacío. Vista frontal, lateral y de elevación	64
Figura 3.2: Esquema de un acoplador de impedancias simple.	67
Figura 3.3: Parte superior del Magnetrón con blanco de Cuarzo (SiO ₂).	70
Figura 3.4: Magnetrón completo con blanco de Aluminio.	70
Figura 3.5: Esquema de una bomba de difusión.	73
Figura 3.6: Esquema del sistema de alimentación de gases.	78
Figura 3.7: Esquema del proceso de doblado de un vidrio plano.	79

Figura 3.8: Esquema de colocación del alambre de Al en el filamento de W.	89
Figura 3.9: Esquema de la fotocelda utilizada para la evaluación de los concentradores solares.	90
Figura 4.1: Soporte con perfil parabólico.	92
Figura 4.2: Calentamiento del horno sin carga y tres resistencias.	95
Figura 4.3: Calentamiento del horno a capacidad máxima (9 resistencias) sin carga.	95
Figura 4.4: Calentamiento y control del doblado de un vidrio.	96
Figura 4.5: Calentamiento, control y parte del enfriamiento en el doblado de un vidrio.	96
Figura 4.6: Calentamiento, control y enfriamiento del doblado de un vidrio.	97
Figura 4.7: Calentamiento del doblado de dos vidrios.	97
Figura 4.8: Esquema de la distribución de los espejos en el concentrador de canal parabólico (vista de elevación).	101
Figura 4.9: Fotografía del concentrador solar de canal parabólico con espejos de aluminio en sustratos de vidrio.	102
Figura 4.10: Fotografía de dos concentradores de canal parabólico con espejos de aluminio. Uno con espejos comerciales en sustrato de acrílico marca 3M (izquierda) y otro con espejos desarrollados en el Instituto de Ingeniería en sustratos de vidrio comercial de 3mm de espesor (derecha).	103
Figura 4.11: Esquema del haz de concentración y pérdidas del concentrador de canal parabólico.	104
Figura 4.12: Perfil de pruebas en campo del concentrador con espejos en sustratos de vidrio.	107
Figura 4.13: Perfil de pruebas en campo del concentrador con espejos comerciales 3M.	107
Figura 4.14: Esquema del flujo de calor a través de las paredes del horno.	108
Figura B.1: Fotografía en la que se comparan algunos de los primeros espejos. A la izquierda espejo con un espesor variable de la película de SiO_2 , además presenta SiO . Al centro y a la derecha, espejos degradados por el sobrecalentamiento de la película de aluminio durante su fabricación.	136
Figura B.2: Fotografía en la que se comparan los espejos hechos en una atmósfera con oxígeno al 30% (izquierda) y sólo argón (derecha).	137
Figura C.1: Esquema de la distribución de los imanes en el magnetrón con blanco de aluminio y valores de la densidad del campo magnético después del sobrecalentamiento.	139
Figura E.1: Mapa del Estado de Sonora.	151
Figura E.2: Mapa con los tipos de clima del Estado de Sonora.	152
Figura E.3: Mapa con la distribución de la vegetación en el Estado de Sonora.	153
Figura E.4: Mapa con la distribución del uso de suelo en el Estado de Sonora.	155

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1: Potencial de generación de electricidad con tecnología termosolar en zonas de alta irradiancia solar.	14
Tabla 1.2: Plantas de canal parabólico construidas en el mundo.	20
Tabla 1.3: Plantas de receptor central construidas en el mundo.	22
Tabla 1.4: Sistemas con Motor Stirling a escala mundial.	24
Tabla 1.5: Estanques solares desarrollados a escala mundial.	28
Tabla 1.6: Instalaciones de gran tamaño con celdas fotovoltaicas.	30
Tabla 1.7: Comparación de las principales tecnologías termosolares desarrolladas hasta la fecha.	32
Tabla 1.8: Proyecto "Tonatiuh".	35
Tabla 1.9: Proyecto "Centro Médico Nacional 20 de Noviembre, ISSSTE".	36
Tabla 1.10: Proyecto "Calentamiento de agua en instalaciones del sector hotelero".	36
Tabla 1.11: Proyecto "Instalaciones deportivas del club UNAM, Pumas".	36
Tabla 1.12: Proyecto "Centro Campestre Ecológico Asturiano".	37
Tabla 1.13: Proyecto "Sistema Solar para los Baños de la UAM Iztapalapa".	37
Tabla 1.14: Proyecto "Planta Solar Experimental".	37
Tabla 1.15: Proyecto "Centro Deportivo Luis Donald Colosio".	38
Tabla 1.16: Costos de las externalidades para algunos tipos de fuentes de energía de acuerdo con la cantidad de energía eléctrica generada.	39
Tabla 2.1: Temperaturas de congelación y reblandecimiento para diferentes vidrios.	46
Tabla 3.1: Descripción de las boquillas de la Cámara de Evaporación.	65
Tabla 3.2: Materiales de construcción de los magnetrones.	69
Tabla 3.3: Datos de operación para una corrida típica en la que se forma una capa reflejante de aluminio.	84
Tabla 3.4: Datos de operación para una corrida típica en la que se forma una capa protectora de Cuarzo (SiO ₂).	87
Tabla 4.1: Medidas generales de los concentradores evaluados.	92
Tabla 4.2: Corrida típica con fuente de radio frecuencia.	100
Tabla 4.3: Ejemplos de mediciones de pérdidas de energía alrededor del tubo concentrador.	104
Tabla 4.4: Algunas mediciones hechas en el foco de cada concentrador.	105
Tabla 4.5: Ejemplo de mediciones hechas en el foco de cada fila de espejos de vidrio.	106
Tabla 4.6: Ejemplo de mediciones hechas en el foco de cada fila de espejos comerciales 3M.	106
Tabla 4.7: Lecturas por pérdidas de Irradiancia en los espejos de sustrato de vidrio.	106

Tabla 4.8: Lecturas por pérdidas de Irradiancia solar en los espejos comerciales.	107
Tabla 4.9: Datos de una corrida típica para la evaporación con filamento de W.	109
Tabla 4.10: Parámetros típicos para la fabricación de la película de SiO ₂ con magnetrón plano.	110
Tabla 4.11: Mediciones hechas en el concentrador parabólico con espejos en sustratos de vidrio.	111
Tabla 4.12: Mediciones hechas en el concentrador parabólico con espejos comerciales.	111
Tabla 4.13: Reflejancia especular de algunos espejos comerciales después de 2 y 16 años de exposición a la intemperie en la planta Termosolar del Instituto de Ingeniería, UNAM.	112
Tabla 4.14: Emisiones anuales de los principales contaminantes en la Ciudad de México.	113
Tabla A.1: Principales especificaciones técnicas de la Masa-Roca.	126
Tabla A.2: Diferentes materiales Masa-Roca.	126
Tabla A.3: Rendimientos aproximados por metro cuadrado según su espesor.	127
Tabla A.4: Densidades de las presentaciones de colcha de fibra cerámica.	130
Tabla A.5: Propiedades químicas y físicas de los diferentes tipos de colcha de fibra cerámica.	130
Tabla A.6: Propiedades químicas y físicas de los diferentes tipos de tabla de fibra cerámica para baja temperatura.	131
Tabla A.7: Propiedades químicas y físicas de los diferentes tipos de fibra cerámica en bulto.	131
Tabla C.1: Unidades para caracterizar un campo magnético.	138
Tabla D.1: Costo de los materiales utilizados en la fabricación de espejos:	141
Tabla D.2: Costo de los equipos utilizados para la erosión iónica.	141
Tabla D.3: Tarifa eléctrica OM y de agua para la zona centro de México.	142
Tabla D.4: Operación de los equipos utilizados.	142
Tabla D.5: Sustancias para la limpieza de los vidrios.	143
Tabla D.6: Principales Costos de operación (en pesos) para la fabricación de un espejo.	143
Tabla E.1: Comparación de las características de cada sistema.	156
Tabla E.2: Variables económicas de cada modelo.	161
Tabla E.3: Emisiones de cada modelo a la atmósfera.	163
Tabla E.4: Estudio de factibilidad para una planta híbrida Ciclo Combinado – Termosolar de 316 MW..	167
Tabla E.5: Estudio de factibilidad para una planta Ciclo Combinado de 316 MW..	169

RESUMEN

Dada la necesidad mundial de abastecimiento de energía eléctrica con fuentes no convencionales de energía, como una alternativa al uso de hidrocarburos, varios países han desarrollado diferentes tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar en zonas donde existe una irradiancia suficiente para sustentar este tipo de infraestructura.

Este trabajo de tesis presenta el desarrollo de un prototipo de concentrador solar aplicando la tecnología de canal parabólico, específicamente en la construcción de una superficie reflejante en la que se utilizaron diferentes métodos adaptados para la planta termosolar del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El objetivo central de este proyecto consiste en el desarrollo de espejos de aluminio de primera superficie para los concentradores ya existentes en la planta solar del Instituto, bajo las siguientes consideraciones:

- El sustrato para los espejos debió ser vidrio cal-sosa flotado comercial de 3 mm de espesor.
- La curvatura de los vidrios fue dada por reblandecimiento térmico y moldes, fabricados con un material mexicano llamado Masa-roca[®], a partir de las medidas de los soportes ya usados en la planta solar.
- La película reflejante de aluminio se hizo con la tecnología de erosión iónica y con la de evaporación por calentamiento en filamento de Tungsteno (W). Mientras que la película de cuarzo se fabricó solamente con la de erosión iónica en magnetrón plano.
- Las pruebas en campo se hicieron en la planta termosolar del Instituto de Ingeniería, ubicada en la reserva ecológica de Ciudad Universitaria.

Una de las conclusiones principales es que se obtuvo una eficiencia de concentración del 78.1%, lo que establece la viabilidad de fabricación de concentradores solares parabólicos bajo el esquema de espejos de primera superficie en forma de mosaico, usando materiales baratos y de buena calidad.

En este trabajo se dan los detalles sobre cómo se construyó el prototipo de concentrador, cuánto cuesta la fabricación de cada espejo y se lleva a cabo un pequeño ensayo sobre la sustentabilidad de instalación de una planta generadora de electricidad en el norte del país, con una componente solar y otra de gas natural.

INTRODUCCIÓN

Como resultado del uso intensivo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica y de la gran cantidad de descargas a la atmósfera de gases de desecho, en todo el planeta se está dando un cambio climático global muy acelerado. Entre las principales consecuencias de tal cambio están el “efecto invernadero”, la destrucción de la capa protectora de ozono, la lluvia ácida, la contaminación o agotamiento de mantos acuíferos, etc. Es por ello que se plantea la necesidad de buscar esquemas de suministro energético ambientalmente compatibles, tales como las energías primarias renovables.

En la actualidad se ha logrado un gran avance en el desarrollo de las tecnologías que aprovechan la energía solar para calentar un fluido. Posteriormente este calor se transforma en trabajo útil; que puede emplearse para generar electricidad.

Mediante pruebas hechas a lo largo de los últimos 20 años, primero en plantas piloto y después en plantas comerciales generadoras de electricidad, se ha comprobado que una de las tecnologías que más competitividad ofrece en el ámbito técnico y económico, es la tecnología de canal parabólico. Dicha tecnología se ha puesto a prueba en conjunto con sistemas de ciclo combinado, con el fin de minimizar costos de producción y eficientar el servicio de suministro eléctrico al usuario.

Un concentrador de canal parabólico se divide en diferentes partes, una de las principales es el área que refleja la luz solar hacia el foco donde se encuentre el tubo absorbedor de energía. La luz del sol se refleja en un espejo, cuya capa reflejante puede estar hecha de aluminio o plata, en primera o segunda superficie.

Si se pudiera desarrollar un método económico y técnicamente efectivo para la fabricación de espejos, la tecnología de canal parabólico lograría reducir sus costos de fabricación y elevar su eficiencia de concentración, de tal forma que pudiera ser más competitiva en el mercado energético mundial.

En el período 1980-1982, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México construyó una planta experimental de canal parabólico en la reserva ecológica de Ciudad Universitaria. Por diferentes razones, dicha planta funcionó parcialmente, sobre todo en la durabilidad de los materiales. Actualmente se hacen pruebas de generación directa de vapor en los tubos absorbedores para la generación de electricidad con un motor de vapor

acoplado a un generador, para ello se emplean dos tipos de espejo comercial de la marca 3M, uno de aluminio y otro de plata, con sustrato flexible de plástico.

Tales espejos se degradan con el tiempo (alrededor de dos años), ya que se forma un espacio entre la película de acrílico protectora y la película reflejante de aluminio, dándose el llamado "efecto túnel", que deteriora de un 25 a un 30% la superficie total del espejo instalado.

En este trabajo se plantea la posibilidad de construir espejos de aluminio de primera superficie con un perfil parabólico, para los concentradores de la planta termosolar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, sobre sustratos de vidrio comercial cal-sosa flotados. En la fabricación de las películas reflejante de aluminio y protectora de cuarzo se puede utilizar la tecnología de erosión iónica al alto vacío con magnetron plano o evaporación térmica con filamento de tungsteno.

Debido a que la dimensión de los espejos está en función del tamaño de los magnetrones y de la cámara de vacío, tales espejos se pueden fabricar en forma de mosaico, al unir varias secciones con curvaturas bien definidas, dadas por el molde macho original con el que se fabricaron los soportes de fibra de vidrio.

Con ello se espera obtener espejos con una vida útil de al menos 10 años y un valor de reflejancia mínimo de 0.85. Además, el costo de fabricación de cada espejo podrá ser superior al costo establecido de 10 USD por metro cuadrado ya que se trata de un proyecto de investigación.

Este proyecto es la continuación de otro, por lo que se basa en los resultados de la etapa anterior, que consistió en encontrar las condiciones óptimas de fabricación de espejos planos y curvos (con perfil no definido) mediante la tecnología de erosión iónica con magnetron plano.

Para llevar a cabo esta etapa, se debe especificar la curvatura de los concentradores de la planta termosolar y fabricar los moldes necesarios para dar el perfil a los espejos que formarán el mosaico. El tamaño límite de los vidrios que se utilizarán como sustratos es de 0.3x0.6 m con un espesor de 0.3 mm para mayor durabilidad. Una vez hechos los moldes, se colocan en un horno junto con el vidrio plano para que éste adquiera la curvatura del primero. Se fabrica la cantidad suficiente para hacer un segmento de concentrador según los soportes de fibra de vidrio existentes en la planta solar.

Posteriormente se fabrican los espejos en la cámara de vacío del Instituto de Física de la UNAM y su calidad se establece según los parámetros definidos en la etapa anterior de este proyecto (Martínez, 1997), lo que involucra a su reflejancia, pruebas de intemperismo

acelerado, etc. Finalmente, los mejores espejos se colocan sobre uno de los soportes de fibra de vidrio y se monta en campo para evaluar su desempeño a condiciones de la Ciudad de México.

Los resultados que se esperan obtener son espejos de aluminio de primera superficie con una vida útil mínima de diez años y una reflejancia mínima de 0.85, además de información sobre costos reales de fabricación y establecer a la técnica de erosión iónica como un método factible de fabricación industrial de espejos para aplicaciones solares.

La estructura de este trabajo de investigación está conformada por cinco capítulos y cuatro anexos. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los capítulos, así como el fin que se persigue en su desarrollo.

En el capítulo I se hace una descripción general del consumo actual de las fuentes de energía primaria a escala mundial, las consecuencias de su transformación, hacia dónde avanzamos con la actual tasa de crecimiento y consumo energético, y cuáles son las opciones de energías sustitutas que tenemos. Además, se hace una recopilación de los proyectos que se han desarrollado con energía termosolar en México, su alcance y estado actual.

En el capítulo II se establecen los principios teóricos en los que se apoyan los experimentos de esta investigación, de tal forma que se describen los principios básicos sobre óptica de concentración solar, las propiedades fisicoquímicas del vidrio y la explicación física de lo que sucede durante el proceso de la erosión iónica (*sputtering*).

En el capítulo III se describe el método científico llevado a cabo para desarrollar el experimento, además de la descripción de todo el equipo e infraestructura utilizada para su puesta en marcha. Aquí se explica detalladamente el problema a resolver, los objetivos del proyecto y en general cada una de las partes que involucra el método científico.

Los resultados y su análisis se presentan en el capítulo IV, además de la descripción sobre las adaptaciones y problemas que surgen durante este proyecto. Finalmente, en el capítulo V, se establecen las conclusiones y sugerencias sobre este proyecto.

Los anexos, son información complementaria que sirve de guía para entender el por qué de algunas decisiones y qué factores son los principales que pueden afectar trabajos futuros relacionados con este tema. Éstos incluyen las propiedades de los materiales utilizados para la fabricación de moldes y aislantes térmicos; los parámetros que afectan la formación de las películas delgadas; la importancia del campo magnético en un magnetrón; y finalmente, se desarrolla un estudio de evaluación de sustentabilidad entre una planta de producción de energía eléctrica ciclo combinado contra un sistema híbrido solar-ciclo combinado. Este último es una parte ajena al experimento, pero que ejemplifica una aplicación directa de este trabajo.

CAPÍTULO I

PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL Y ENERGÍA SOLAR

Uno de los debates públicos que más controversia y alarma ha causado durante la última década, se refiere a los efectos de las emisiones en el ambiente relacionadas con la producción de energía térmica y eléctrica. La atención que ha logrado este tema es muy extensa y considerada como grave por las consecuencias que tiene en la calidad del aire; tales consecuencias se manifiestan con el efecto invernadero y la destrucción de la capa protectora de ozono por el CO₂, fluorocarbonos y otros gases. La calidad del aire también se ve directamente afectada por las emisiones de SO_x y NO_x, gases que provocan la lluvia ácida y el "smog". Un punto clave del debate, se enfoca en las estrategias futuras de suministro energético, lo que incluye el uso de tecnologías ambientalmente adecuadas de conversión de energía a gran escala para garantizar un crecimiento energético sustentable.

1.1. Dimensiones de la demanda global de energía

A escala país, para poder aumentar el nivel de vida de una población, se requiere proporcionar mayor cantidad de energía y hacer que sus actividades se desarrollen a tal punto que cada una de sus acciones sean más productiva. Por lo que al aumentar la demanda de energía eléctrica, con las medidas respectivas de uso eficiente, se puede desarrollar a todo un país. Nos preguntamos ¿cómo será satisfecha esta demanda y a qué costo ambiental?

Un objetivo clave de las políticas energéticas globales relacionado con las emisiones por conversión de energía, es la reducción de las emisiones de CO₂ como gas invernadero. Para ello, durante la Conferencia en Energía y Desarrollo de las Naciones Unidas (*UNDED*), que se llevó a cabo en Río de Janeiro en 1992, se creó el convenio "Facilidad Ambiental Global" con la meta de dar soporte a la aplicación de medidas de eficiencia energética así como a las tecnologías de energías renovables. Adicionalmente, el Banco Mundial propuso una "iniciativa solar" para apoyar la entrada al mercado mundial de estas tecnologías.

Actualmente, las tendencias globales en la conversión energética son contrarias a la meta de reducción de emisiones contaminantes; los datos muestran un incremento en nivel de CO₂ a escala mundial, cosa que está totalmente ligada al fuerte crecimiento en la demanda global de energía primaria.

La perspectiva energética mundial (*World Energy Outlook*) de la Agencia Internacional de Energía (IEA), que se muestra en la figura 1.1, nos da un panorama de las expectativas de crecimiento energético durante los próximos 12 años. La dimensión energética debe hacer énfasis en frenar el efecto invernadero, sobre todo se deben dirigir esfuerzos hacia los países en vías de desarrollo, ya que en ellos se tiene un crecimiento industrial muy acelerado.

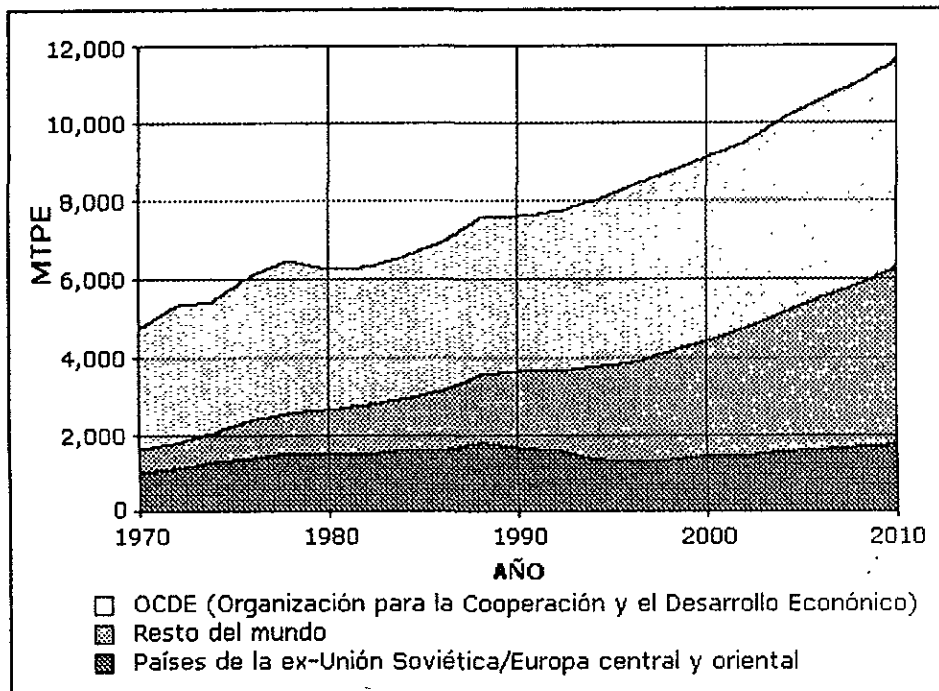


Figura 1.1: Evolución de la demanda total mundial de energía primaria.¹

Para el año 2010 el mundo consumirá 48% más energía que en 1991 (figura 1.1). El pronóstico del incremento en el uso energético, nos dice que será más pronunciado en los países en vías de desarrollo que en los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Particularmente en China y en los países con economías dinámicas del este asiático, el promedio anual de crecimiento en el uso de la energía, para los años de 1995 a 2010, puede ser mayor al 4% anual (figura 1.2).

¹ OCDE: *World Energy Outlook*, 1994.

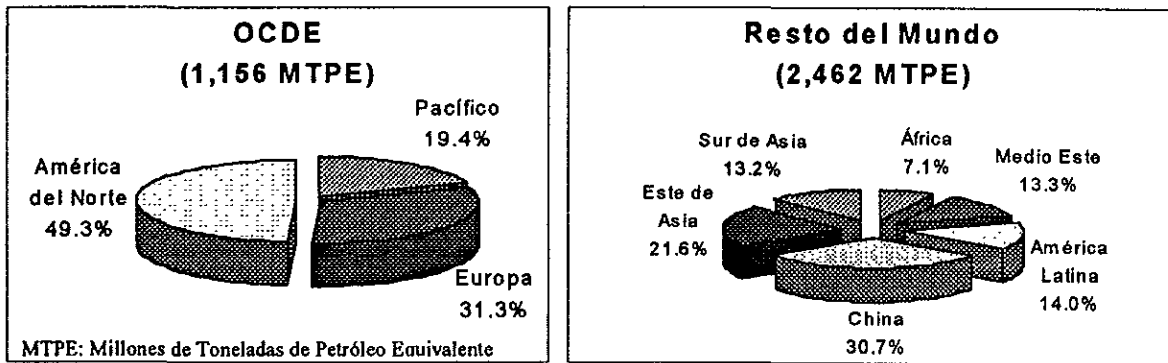


Figura 1.2: Demanda incremental primaria de electricidad (1991-2010).²

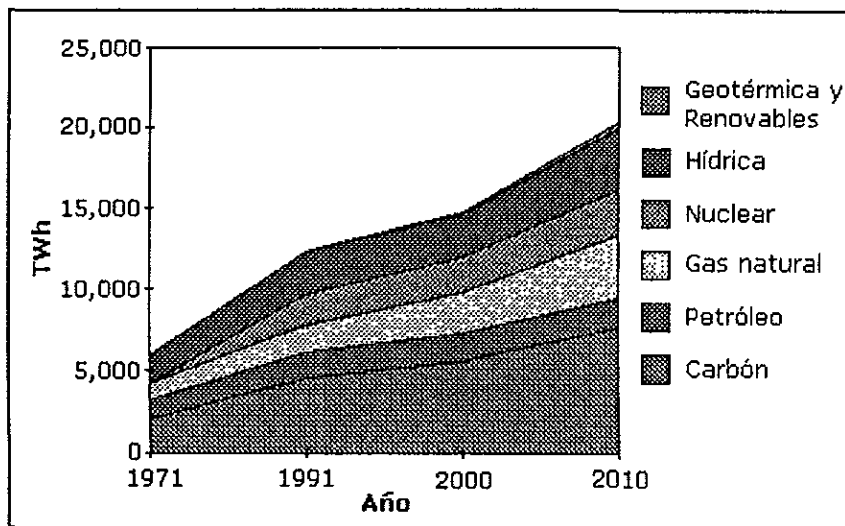


Figura 1.3: Evolución de la demanda mundial de electricidad por tipo de combustible.³

La electricidad es la forma de energía de uso final con mayor rapidez de crecimiento, tal crecimiento será alrededor del 70% al final de este horizonte de tiempo (figura 1.3). La capacidad de generación basada en combustibles fósiles para los países de la OCDE, crecerá más rápido que la generación con energía nuclear o hídrica; debido a las posibilidades tan limitadas de expansión de la energía nuclear y a la saturación en el desarrollo de plantas hidroeléctricas. En el resto del mundo, el incremento de la demanda eléctrica será satisfecho con combustibles fósiles.

El crecimiento en la demanda es particularmente significativo en el resto del mundo, donde el consumo per cápita será el doble para el año 2010. Consecuentemente, para ese año la capacidad de generación eléctrica global se incrementará 620 GW en los países industrializados y 835 GW en el resto del mundo (figura 1.4).

² Fuente: Agencia Internacional de Energía, "World Energy Outlook", 1994.

³ Fuente: Agencia Internacional de Energía, "World Energy Outlook", 1994.

El crecimiento de la generación de electricidad con energías renovables, se dará a un promedio de 9% anual en los países de la OCDE, de tal forma que abarcará el 70% del total mundial renovable para el año 2010. En América Latina, África y Asia, se tienen excelentes condiciones para el aprovechamiento de este tipo de energía, sin embargo su contribución ascenderá más lentamente que las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía.

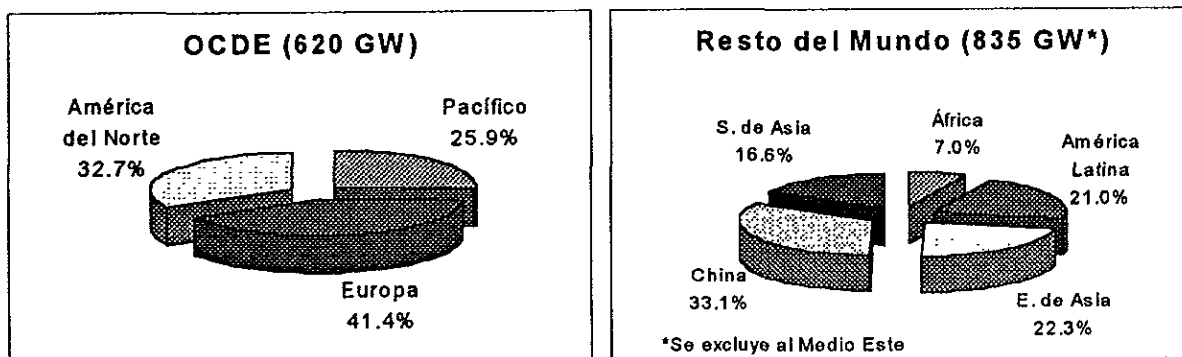


Figura 1.4: Incremento de la capacidad de generación de electricidad (1991-2010).⁴

Las tecnologías de energías renovables comerciales se concentran básicamente en geotermia, plantas de biomasa, eólica y alguna solar. Para el año 2010 se espera que aumenten su producción al cuádruple, de 40 TWh a casi 190 TWh; así se incrementará su contribución a la producción total en 1%. A pesar de esta contribución marginal, tal capacidad representa un aumento de aproximadamente 25 000 MW durante los próximos 11 años.

La capacidad eléctrica instalada en México es de 31 600 MW, la cual se pretende aumentar en 23 500 MW durante los próximos 10 años; por otro lado, México recibe energía solar de alta calidad (1000 W/m² en días claros) en más de la mitad de su territorio, ésta se puede aprovechar con tecnologías existentes: fototérmicas y fotovoltaicas (Estrada, 1996).

1.2. El desafío ambiental de producción energética.

Alrededor del 90% de las necesidades humanas se satisfacen quemando combustibles fósiles comerciales (carbón, petróleo y gas), así como también con la quema de fuentes tradicionales de energía renovable, como son la madera, biogas y otros tipos de biomasa. Desde el comienzo de la revolución industrial hasta hoy, la concentración de CO₂ en la atmósfera terrestre, ha aumentado de 280 ppm hasta casi 360 ppm, dando una tasa de incremento anual de 3 a 5 ppm.

⁴ Fuente: Agencia Internacional de Energía, "World Energy Outlook", 1994.

1.2.1 Posibles efectos debidos al incremento en la concentración de CO₂.

La comunidad científica internacional concluye a partir de modelos teóricos, sobre los procesos fisico-químicos atmosféricos, que bajo condiciones “naturales” de emisión de CO₂ se puede esperar un aumento de 0.1 °C en la temperatura media durante los próximos 10 años. Sin embargo, debido a los mecanismos de reacción provocados por el aumento de concentración de CO₂ en la atmósfera, tal incremento puede darse en un tiempo más corto.

En 1988, el grupo de asesores del Gobierno de la República Federal Alemana escribió: “La posibilidad no puede ser ignorada que, en las décadas de la segunda mitad del próximo siglo, el contenido de CO₂ en la atmósfera puede llegar a alcanzar tal nivel que intensifique el ‘efecto invernadero’; el cual puede causar un incremento de varios grados centígrados en la temperatura media global. Lo que puede llevar a cambios climatológicos dramáticos e irreversibles, así como el desplazamiento de zonas climáticas cuyos efectos sobre grandes partes de nuestro planeta son ahora inciertos, pero que seguramente serán negativos...” (Grupo asesor del Gobierno Alemán, 1988).

En la figura 1.5 se muestra la contribución relativa, de los diferentes tipos de usos energéticos con sus fuentes, al efecto invernadero mundial. Las emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de energía: generación de electricidad, calor de proceso y transporte, contribuyen con un 40%, mientras que el gas metano proveniente de fugas en la producción y transporte de gas natural contribuye con 10%.

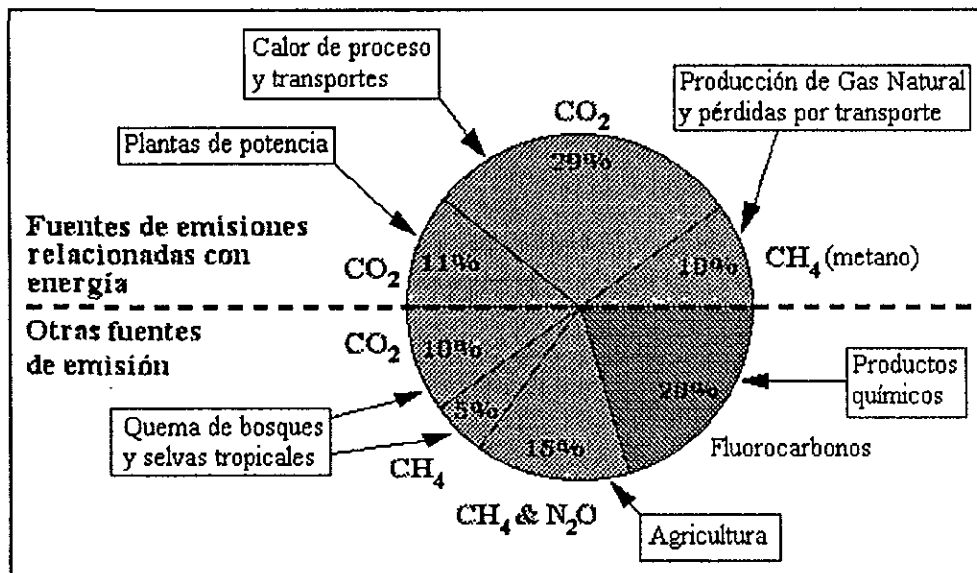


Figura 1.5: Gases que influyen al clima por sectores y fuentes, así como su contribución específica al efecto invernadero global.⁵

⁵ Fuente: Reporte final de la Comisión Parlamentaria del Gobierno Federal Alemán: “Protección de la atmósfera terrestre”, Bonn, Alemania, 1995.

Por otro lado está la condición de que el crecimiento del sector energético es un requisito para el desarrollo económico y bienestar social en cualquier nación. Aunque se requieren reducciones en las emisiones de CO₂ urgentemente, las extrapolaciones hechas sobre la tendencia global de tales emisiones por el incremento en el uso de energía, nos muestran que de 22,000 millones de toneladas de CO₂ emitidas en 1991 se llegará a emitir 32,000 millones de toneladas para el año 2010, lo cual representa un aumento del 47% en sólo 20 años (figura 1.6).

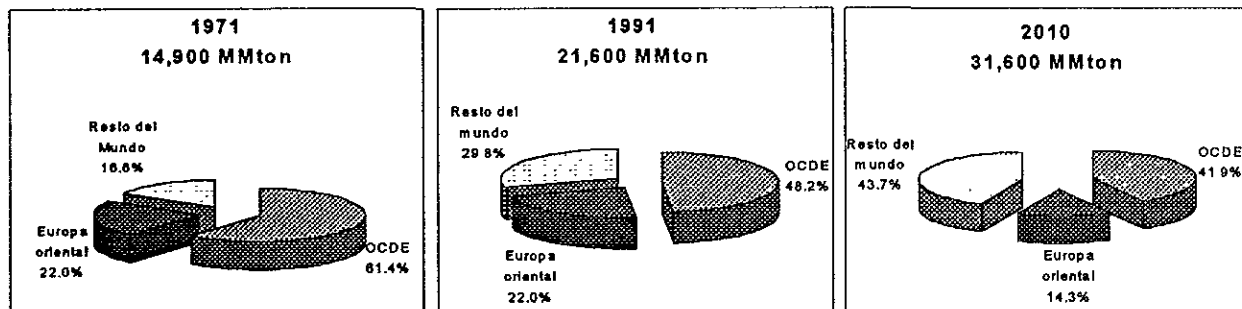


Figura 1.6: Desarrollo de las emisiones de CO₂ por región.⁶

Es particularmente desconcertante que las emisiones de este gas crecerán 28% en los países de la OCDE, a pesar de que se pueden dar el lujo de mejorar los panoramas de eficiencia energética mediante la introducción de tecnologías de transformación energética costosas pero limpias. Mientras que en los países en vías de desarrollo la situación es preocupante por la falta de recursos para inversión en tecnologías limpias (figura 1.7).

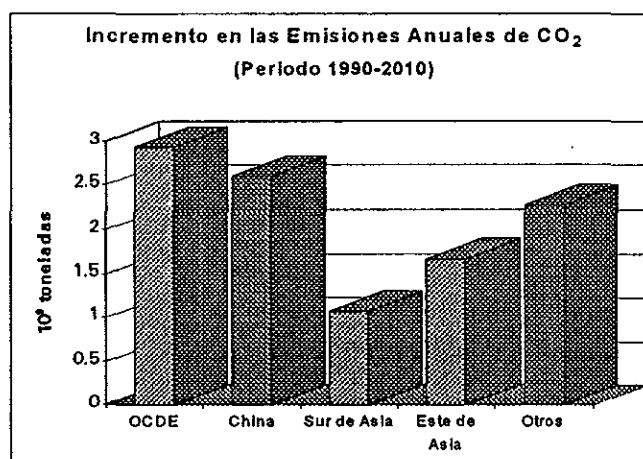


Figura 1.7: Incremento en las emisiones anuales de CO₂.⁷

⁶ Fuente: OCDE, "World Energy Outlook", 1994.

⁷ Fuente: OCDE, "World Energy Outlook", 1994.

Está claro que producción de energía y economía son los más grandes desafíos durante los próximos años para mejorar al clima y al ambiente. La aplicación de tecnologías energéticas limpias y el desarrollo de fuentes renovables de energía es esencial para disminuir la distancia que hay entre las necesidades de competencia por energía adicional y la reducción de las emisiones de CO₂.

1.3. Energías Renovables

Aquellas fuentes de energía primaria que se renuevan al finalizar el proceso o ciclo del que formaron parte, o su disponibilidad en el tiempo a escala humana es tan grande que prácticamente no se agotan al hacer uso de ellas, se les llama "energías renovables". De acuerdo a esta definición, su potencial de uso en el ámbito mundial para satisfacer parte de las necesidades energéticas es enorme; por un lado se tiene que los combustibles fósiles y nucleares son finitos, además de que están concentrados en regiones específicas del planeta; por otro lado, se tiene que el uso indiscriminado de los combustibles fósiles ha causado daño en todos los ecosistemas existentes en la Tierra, por lo que es primordial tratar de minimizar su uso.

Es importante hacer una diferencia entre los distintos tipos de energías renovables, lo que está en función de las tecnologías que las aprovechan, de tal forma que según la intensidad de su uso así será el lugar donde se localizan los dispositivos de conversión energética (Estrada, 1998).

Por un lado están las tecnologías cuyo producto en energía secundaria se usa en el mismo lugar donde están instalados los sistemas, se les llama Energías Renovables de uso local, entre ellas tenemos:

- Energía solar pasiva en edificaciones.
- Producción de calor por captadores de irradiancia solar.
- Arreglos fotovoltaicos para la generación de electricidad.
- Uso del calor ambiente en bombas de calor.
- Conversión del viento en energía eléctrica.
- Conversión de potencia hidráulica en energía eléctrica.
- Conversión de biomasa en energía eléctrica.

Por otro lado, tenemos las tecnologías donde el uso de la energía secundaria está alejado del lugar donde se produce, se les llama Energías Renovables de uso remoto, entre las que se encuentran:

- Plantas de potencia termosolares y fotovoltaicas.
- Plantas de potencia hidroeléctricas.
- Plantas de potencia eolieléctricas.
- Sistemas de conversión de energía térmica oceánica (OTEC).
- Plantas de potencia geotérmicas.

El primer grupo de energías renovables tiene en común la capacidad de producir energía secundaria derivada de la energía solar en casi todos los climas de la tierra, por lo que su calidad depende del lugar. El segundo tipo corresponde al aprovechamiento de la energía solar en su forma directa como energía radiante, o en su forma indirecta como viento, agua de lluvia almacenada en represas y gradientes térmicos en los océanos. Todas estas energías por provenir del Sol, se consideran renovables y existe una más que es la geotérmica, que por la dinámica del subsuelo su potencial rebasa el tiempo de vida humano. Para la segunda clasificación se usan sistemas grandes que pueden ser útiles en el ámbito nacional, por lo que nuestra atención se dedicará a este tipo de sistemas, especialmente a las plantas de potencia termosolares.

Es importante recalcar el uso racional y eficiente de la energía, independientemente de que su fuente primaria sea renovable o no, para ello se requiere de un esfuerzo adicional tanto tecnológico como financiero, ya que las tecnologías de punta siempre serán las de más alto costo. Los resultados de este esfuerzo no sólo serán para el país que los lleve a cabo, sino para todo el mundo cuando disminuya el cambio climático global y otros efectos negativos producto de satisfacer las necesidades energéticas de la población mundial cuyo crecimiento es cada vez mayor.

1.4. Introducción al mercado de energías renovables

En la década de los 70's el mundo tomó conciencia de la disponibilidad finita de los combustibles fósiles. Por lo que en esos años comenzó el desarrollo de las tecnologías para el uso de energías renovables, especialmente para la aplicación de energía solar. Debido a que la economía energética global continuará dependiendo de combustibles fósiles hasta las primeras décadas del próximo siglo y con las tasas actuales de incremento en la demanda, producción y precio, las reservas de crudo y gas natural se agotarán en aproximadamente 4 y 6.5 décadas respectivamente (Trieb, et. al, 1997).

Las reservas de hidrocarburos pueden ampliarse si se incluyen los llamados recursos energéticos primarios no convencionales, entre los que se encuentran el aceite de pizarra, el

alquitrán de carbón y los esquistos bituminosos. Sin embargo, para poder disponer de estas reservas adicionales, el precio de petróleo crudo equivalente deberá llegar a 30 o 40 dólares estadounidenses.

Otra gran reserva de combustible fósil es el carbón, el cual se estima que puede durar 200 años más; no obstante, su uso contribuye más que otros combustibles a aumentar el efecto invernadero. Las emisiones de CO₂ por la quema de carbón son 30% mayores que las del petróleo y 80% más que las del gas natural. Una alternativa para reducir el nivel de estas emisiones, es la gasificación del carbón en plantas eficientes de ciclo combinado. Sin embargo, la gasificación de este combustible no alivia las emisiones específicas de CO₂, además de que su uso en sistemas de ciclo combinado es aproximadamente 10% menos eficiente que el uso de gas natural. Por tanto, se espera que el carbón juegue un papel menos dominante para el suministro energético ambientalmente compatible.

El carbón licuado puede llegar a ser otra opción de importancia como suministro de energía primaria, pero para que sea comercialmente competitivo el precio del barril de petróleo equivalente deberá fijarse en 60 dólares estadounidenses.

Con tales niveles de precios para los combustibles fósiles, las tecnologías para el uso de energía renovables llegarán a incrementar su competitividad. Hoy en día, la generación de electricidad con energía termosolar puede competir reemplazando a los combustibles fósiles con precios equivalentes a US\$30 ~ US\$35 por barril, dependiendo de la intensidad de la fuente, infraestructura usada y modo de operación.

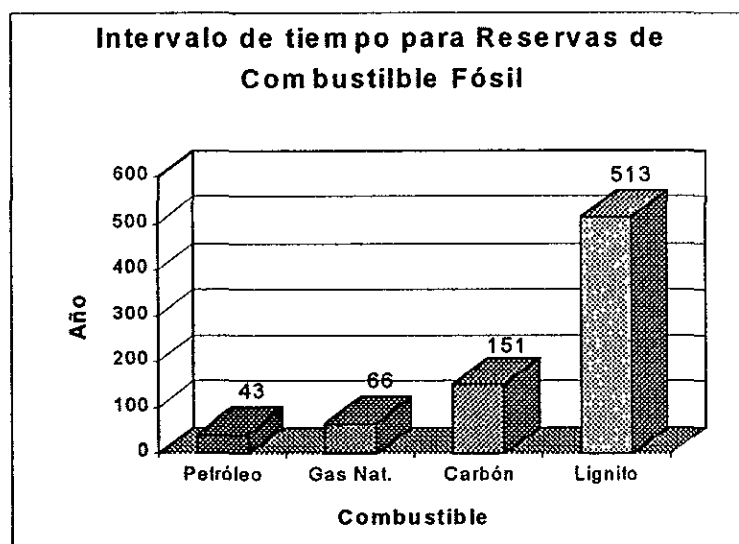


Figura 1.8: Tiempo estimado de uso para las reservas globales de combustibles fósiles.⁸

⁸ Fuente: Anuario Minero Alemán y RWE, 1994.

1.5. El recurso solar

La intensidad de la irradiancia solar directa fuera de la atmósfera es de aproximadamente 1.3 kW/m^2 . Del total de rayos solares que pasan hacia el suelo, una porción se dispersa por las nubes y partículas suspendidas, de tal forma que solamente una fracción de ellos llega hasta la superficie de la tierra como radiación directa. Si utilizáramos el 1% de la superficie de los desiertos existentes para la construcción de concentradores solares y se aplica un factor de eficiencia de conversión del 15% para producir energía eléctrica a partir de la solar, se generaría más energía que la producida actualmente por combustibles fósiles. Este pequeño cálculo solamente nos da idea de la magnitud de este recurso (tabla 1.1).

Hablando técnicamente, la radiación global que incluye toda la energía radiante incidente sobre la superficie terrestre, consta de una componente difusa (Irradiancia Difusa Global) y una componente directa (Irradiancia Directa Normal).

Debido a que el sol es una fuente energética intermitente, su energía no está disponible durante todo el día, además de que es estacional para una intensidad uniforme. Es decir, que el ángulo de los rayos solares con respecto a la superficie de la tierra cambia durante el día y en cada estación del año. El flujo energético es pequeño en invierno y grande en verano. Los niveles de radiación también se afectan por las condiciones climáticas y por la distancia que recorren los rayos solares a través de la atmósfera. En la figura 1.9 se esquematiza las zonas con mayor incidencia de irradiancia solar a escala mundial, tales lugares son excelentes para la instalación de plantas termosolares con nivel competitivo.

Tabla 1.1: Potencial de generación de electricidad con tecnología termosolar en zonas de alta irradiancia solar*.

1. Irradiación solar global incidente sobre el área de tierra firme en el mundo.	240×10^6	TWh/año
2. El área de los desiertos es el 7% de tierra firme. (Se asume igual distribución de la irradiancia solar)	16×10^6	TWh/año
3. Fracción útil de la irradiación normal directa (alrededor de un 70%).	11.2×10^6	TWh/año
4. Promedio anual en la eficiencia de conversión de energía solar a energía eléctrica (15%)	1.68×10^6	TWh/año
Fracción de sitios áridos o semiáridos factibles para plantas solares con acceso a infraestructura (1% del área de desiertos)	16.8×10^3	TWh/año
Energía eléctrica total mundial producida para el año 2000	15×10^3	TWh/año

*Fuente: Status Report on Solar Trough Power Plants, 1996.

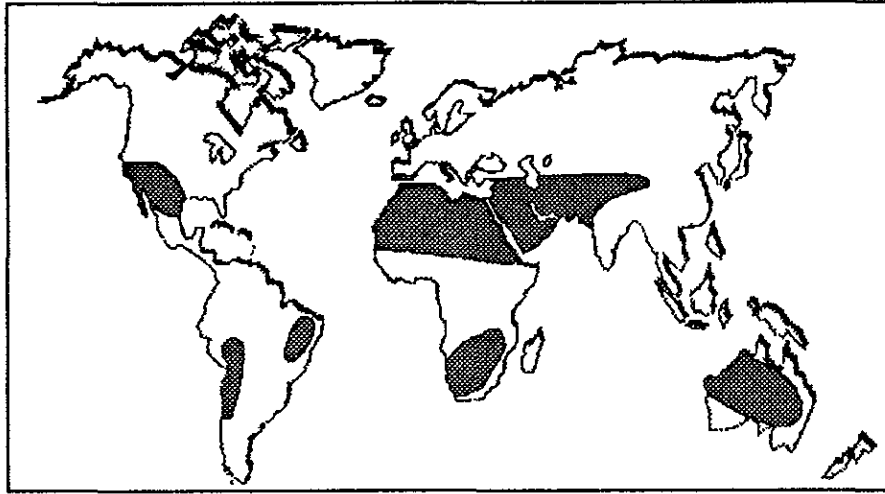


Figura 1.9: Regiones con alta irradiación solar factibles de instalar una planta termosolar.

1.6. Generación de Electricidad con Energía Solar

La transformación de la energía solar en otros tipos de energía aplicables directamente a las actividades cotidianas de la sociedad, se puede llevar a cabo por medio de diferentes dispositivos. Para este proyecto tienen gran importancia los dispositivos térmicos solares o termosolares, los cuales se clasifican en:

- a) **Colectores de baja temperatura.** Proveen calor útil a temperaturas menores de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ mediante absorbedores metálicos o no metálicos, cuya aplicación se da en el calentamiento de albercas, calentamiento doméstico de agua para baño y, en general, para todas aquellas actividades industriales en las que el calor de proceso no es mayor a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, por ejemplo la pasteurización, el lavado textil, etc.
- b) **Colectores de temperatura media.** Son los dispositivos que concentran la irradiación solar de tal forma que el calor útil entregado aumenta la temperatura del fluido de trabajo, usualmente entre los 200 y $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. En esta categoría se tienen a los concentradores de canal parabólico, con los que se puede generar vapor de proceso cuyo uso es bastante amplio. Tienen el inconveniente de trabajar solamente con la componente directa de la irradiación solar por lo que su uso queda restringido a zonas de alta insolación.
- c) **Colectores de alta temperatura.** Entre ellos están los colectores de plato parabólico, la nueva generación de canal parabólico y los sistemas de torre central. Operan a temperaturas mayores a los $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se usan exclusivamente para generar electricidad.

1.6.1 Generalidades.

La construcción y puesta en marcha de plantas solares generadoras de electricidad en regiones con una alta insolación es una opción ambientalmente compatible como estrategia de suministro. Hoy en día, está disponible una gran variedad de tecnologías solares para la generación de electricidad; como ejemplo de ellas se encuentra la capacidad instalada de California, EUA, con 354 MW de sistemas solares de canal parabólico, los cuales han generado más de 5000 GWh de electricidad en más de 10 años de operación; al ser sistemas híbridos, el 80% de la electricidad generada fue con energía solar. El sistema de plato parabólico con motor Stirling (*Dish-Stirling*) y plantas de receptor central han conseguido eficiencias de conversión desde 15% hasta más del 25%. La capacidad mundial de producción anual de celdas fotovoltaicas ha ascendido a más de 80 MW/año. Las plantas experimentales basadas en estanques solares y chimeneas solares han mostrado tener una operación confiable, además de características de construcción simples que las hacen apropiadas para países en vías de desarrollo, sin embargo en la generación de electricidad, su eficiencia es demasiado baja.

El obstáculo más grande para el uso, en el ámbito comercial, de sistemas de generación eléctrica a partir de energía solar es el alto costo de inversión por kW instalado para los sistemas de colectores solares (figura 1.10). La disponibilidad de la energía solar está restringida por las fluctuaciones naturales de la fuente energética; a primera vista, esto parece limitar severamente la posibilidad de generación con altos réditos durante la carga pico, así como bajos costos de carga base.

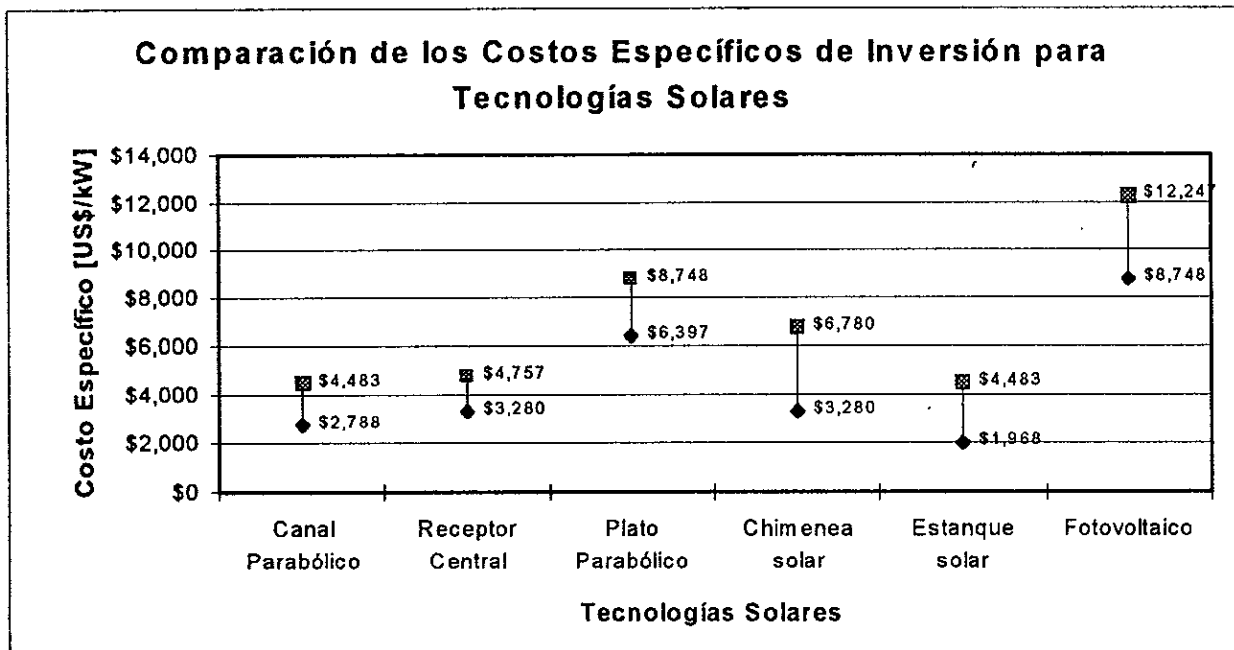


Figura 1.10: Costos específicos de inversión para diferentes tecnologías termosolares (Trieb, et.al, 1997).

Sin embargo, los inconvenientes antes mencionados pueden minimizarse mediante dos soluciones técnicas:

- 1) La primera solución se refiere a la adaptación de esquemas híbridos en las plantas solares mediante sistemas de respaldo basados en combustibles fósiles, los cuales se usan como una fuente adicional de energía para lograr la producción deseada de electricidad. Un sistema de este tipo permite compensar las fluctuaciones de la irradiancia solar incidente y permite la operación nocturna, aumentando las horas anuales de operación (factor de planta) a carga total, así como la disponibilidad de potencia a más de 8000 h/año. Los sistemas de Canal parabólico, Receptor Central y Plato parabólico, permiten la integración, dentro de la planta solar, de un sistema de respaldo basados en combustible fósil. Los sistemas de Chimenea Solar, Estanque Solar y Celdas Fotovoltaicas requieren una unidad completa y externa de respaldo basado en combustible fósil. Con el fin de lograr una respuesta rápida a las fluctuaciones, el combustible utilizado generalmente está restringido a combustóleo o gas natural.
- 2) La segunda solución consiste en la integración de sistemas de almacenamiento de energía dentro de la planta solar. En combinación con un campo de colectores solares aumentado, la reserva permite un incremento en horas anuales de operación solar y compensa las fluctuaciones del flujo energético solar en corto tiempo.

Posiblemente, a mediano plazo los altos costos de inversión de las instalaciones solares llegarán a ser un problema menor, siempre y cuando la capacidad de producción de los componentes solares se incremente, así como los precios de los combustibles fósiles se encarezcan; en cuanto a su integración inmediata dentro de los actuales esquemas de industrias públicas, los altos costos representan un severo impedimento o un criterio llano de exclusión. Sin embargo, los cambios climáticos actuales tan acelerados requieren una rápida y continua comercialización de tecnologías ambientalmente compatibles. Así mismo, hay dos caminos que se siguen para atacar este problema:

- a) El desarrollo de componentes a bajo costo condujo a reducciones considerables en las inversiones de plantas solares durante los últimos 10 años, tal potencial de reducción aún no se agota. Pero el desarrollo de los costos generalmente es contrario a la eficiencia de planta, lo que lleva a un compromiso entre eficiencia e Inversión. Reducciones más dramáticas de costos no se esperan hasta que la producción masiva de componentes solares tenga lugar, lo cual requiere un gran uso a escala mundial.

b) Nuevos conceptos se desarrollan considerando a la Energía solar únicamente para el ahorro de combustible y no como capacidad de operación en carga total, con el fin de reducir el diseño de la parte solar. Lo anterior conduce a reducir el tamaño del colector y por tanto se reduce la Inversión en el campo solar, pero también el ahorro de combustible. Tales conceptos consideran la paridad de los colectores termosolares de alta temperatura con modernas plantas de ciclo combinado de alta eficiencia, para la generación de vapor, para el precalentamiento de aire de combustión o para el mejoramiento químico del combustible. De este modo, las eficiencias de conversión de Energía solar a electricidad y de combustible a electricidad se pueden mejorar en comparación con las plantas termosolares tradicionales con ciclo de vapor.

El desempeño de las plantas solares depende no únicamente de la demanda energética, sino también de las condiciones meteorológicas, y por supuesto, de su diseño. Estas son características especiales de cada tecnología que no son fácilmente comparables con las de otras tecnologías solares, y mucho menos con sistemas energéticos convencionales

1.6.2 Sistema de Generación Eléctrica con Canal Parabólico.

Generalmente, este tipo de sistemas se diseña para un intervalo de potencia de 30 a 150 MW. Consiste en un receptor de irradiancia solar formado por un largo arreglo de canal parabólico que refleja la irradiancia directa a un tubo absorbedor, el cual descansa sobre la línea focal de dicho canal, por lo que este sistema no puede operar bajo condiciones de luz difusa (figura 1.11). Un sistema de movimiento automático en un solo eje (puede ser norte-sur o este-oeste), mantiene al tubo en la línea focal durante el día, dentro de él circula un Fluido de Transferencia Térmica (FTT), que generalmente es aceite sintético o mineral cuya temperatura máxima de trabajo es arriba de 400 °C. El fluido caliente se bombea a un intercambiador de calor- evaporador que forma parte de un ciclo Rankine, donde se produce vapor para la generación de electricidad.

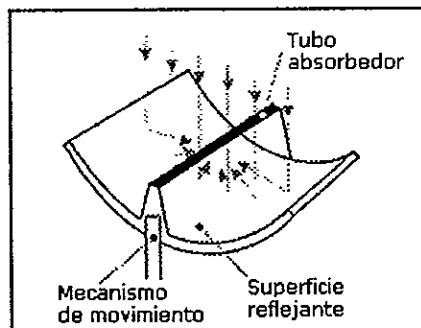


Figura 1.11: Esquema de un concentrador de canal parabólico.

Las fluctuaciones en la incidencia de los rayos solares pueden compensarse con un sistema energético de reserva basado en combustible fósil, que consiste en un calentador de FTT o de una caldera integrada al ciclo del vapor. Este sistema energético de reserva es particularmente importante cuando se requieren factores de alta capacidad y alta disponibilidad de potencia, como es el caso de las plantas que producen varios MW; además, permite mejores rentas en las ventas de electricidad, debido a que puede suministrar los requerimientos de los picos de demanda.

Con el objeto de lograr una respuesta rápida en los cambios de potencia, solamente pueden ser usados como reserva de combustible el gas natural o el combustóleo. Un sistema de almacenamiento térmico también puede ser integrado a la planta, que usualmente se ensambla junto con un gran campo de colectores que producen potencia adicional para unas horas de almacenamiento; así, para un sistema híbrido, se puede tener una mayor participación de la energía solar en la producción de electricidad, ya que la planta operaría con energía solar en momentos que no haya irradiancia solar directa.

Antes de 1984, más de 10 pruebas y demostraciones de los procesos termosolares fueron hechas basadas en canal parabólico (tabla 1.2). Desde 1984, varias plantas termosolares de canal parabólico para la generación de electricidad han sido operadas comercialmente por Luz Internacional Ltd. en California. Entre los años de 1984 a 1991, fueron añadidos anualmente de 30~60 MW de capacidad termosolar; hoy en día, 354 MW de sistemas generadores de electricidad termosolares han sido instalados y se han producido mas de 5,000 GWh hasta ahora. Sin embargo, en 1991 los planes de expansión de las instalaciones de canal parabólico en California fueron frenados por una política por demás estricta que llevaron a la desaparición de la compañía LUZ Internacional.

Con toda esta experiencia, los sistemas de Canal Parabólico es la tecnología solar más desarrollada para producir electricidad a gran escala disponible actualmente. Se tienen negociaciones con Marruecos, España, Irán, India, México e Israel para la puesta en marcha de más sistemas de este tipo. Los últimos sistemas de Canal Parabólico (VI-IX) alcanzaron eficiencias anuales de 0.13~0.18 con un máximo de 0.215. Actualmente, nuevos tubos absorbedores para la generación directa de vapor a alta presión y alta temperatura son desarrollados a fin de evitar el uso de Fluidos Térmicos y lograr bajos costos de investigación y operación, además de que el deterioro ambiental es menor.

Actualmente se construye una planta de 52 MW_e en la isla de Creta, Grecia. Este proyecto se llama THESEUS (*THE*rmal *SOL*ar *EU*ropean *PO*wer *ST*ation), como parte del programa térmico de la Comisión Europea de Energía. Lo construyen varios consorcios internacionales, por ejemplo: Pilkington "Solar International".

El proyecto THESEUS se construye en el área de Frangokastelló, costa sur oeste de Creta, provincia de Sfakia. Los niveles de irradiancia solar promedio que ahí se tiene son de 2,300 kWh/m², que es comparable al desierto del Sahara y al 90% de los niveles del desierto de Mojave en California. El sistema de generación de potencia es un ciclo Rankine convencional, con vapor recalentado. Cuenta con una sistema de combustión para suministrar vapor en días con insolación baja. Su factor de capacidad será del 44.3%, la parte solar es de 55.2%, con una eficiencia pico solar del 23%. La temperatura alcanzada por el aceite en los colectores solares fue de 391 °C a una presión de 100 bar.

Tabla 1.2: Plantas de canal parabólico construidas en el mundo (Langniß, et. al, 1997).

<i>Planta (país)</i>	<i>Potencia (MW)</i>	<i>Modo de operación</i>	<i>Período de servicio</i>
Coolidge (USA)	0.15	Solar	1980~1982
Sunshine (Japón)	1.0	Solar	1981~1984
IEA-DCS (España)	0.5	Solar	1981~1985
STEP-100 (Australia)	0.1	Solar	1982~1985
SEGS I (USA)	14.0	Híbrido	1985~hoy
SEGS II (USA)	30.0	Híbrido	1986~hoy
SEGS III-IV (USA)	30.0	Híbrido	1987~hoy
SEGS V (USA)	30.0	Híbrido	1988~hoy
SEGS VI-VII (USA)	30.0	Híbrido	1989~hoy
SEGS VIII (USA)	80.0	Híbrido	1990~hoy
SEGS IX (USA)	80.0	Híbrido	1991~hoy

Ventajas del Sistema de Canal Parabólico en la Generación Eléctrica:

- Tecnología segura con más de 5000 GWh de experiencia operativa, usando aceite mineral como fluido de transferencia térmica.
- Factibilidad de operación como sistema híbrido simple usando combustóleo o gas natural.
- Alto factor de planta con energía solar, (más del 80%).
- Componentes solares modulares con gran producción potencial.
- Estrategia de operación simple.
- Posibilidad de cogeneración.

Desventajas del Sistema de Canal Parabólico en la Generación Eléctrica.

- La temperatura de operación alcanzada por el fluido térmico está restringida a ~400 °C.

- La temperatura del vapor está restringida a ~ 370 °C en el modo solar (~ 510 °C en el modo de combustible fósil); por lo que la energía solar y la reserva de combustible fósil es convertida a electricidad con una relativa baja eficiencia del ciclo de vapor.
- Los colectores requieren de soportes muy estables para los espejos.
- Inercia térmica considerable del fluido de transferencia térmica.
- Altas pérdidas radiativas debido al movimiento en un solo eje.
- Se necesita agua para enfriamiento y limpieza.

1.6.3 Sistema de Generación Eléctrica con Receptor Central.

En este tipo de sistema, el colector consiste de un gran campo de espejos planos llamados helióstatos, cuyo movimiento es en dos ejes para reflejar la luz del sol (únicamente radiación directa) a un receptor localizado en el centro del campo y montado en lo alto de una torre (figura 1.12).

En varias plantas alrededor del mundo se probaron torres con diferentes clases de fluidos térmicos, tales como generación directa de vapor en un receptor tubular, receptor abierto basado en aire, receptor tubular con sal fundida, receptor de película y otros, todos ellos generalmente emplean un ciclo de potencia convencional basado en vapor para convertir el calor en trabajo; no obstante, el sistema de aire permite temperaturas de operación arriba de 800 °C, mejorando la eficiencia del ciclo de vapor.

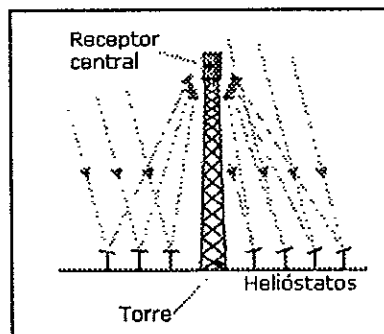


Figura 1.12: Esquema de un sistema de helióstatos con torre central.

Una reserva de calor puede ser incorporada al sistema para atenuar las fluctuaciones de la alimentación solar, y así mejorar la recolección de energía; tal es el caso del receptor tubular con sal fundida, que está especialmente adaptado para mejorar el almacenamiento de calor, además de que es ambientalmente compatible.

La adaptación de un sistema híbrido en las plantas solares de este tipo es posible usando combustóleo o gas natural como reserva. El intervalo de potencia de diseño típico para estas plantas es de $30\sim 160$ MW.

Desde 1980, ocho plantas experimentales y demostrativas con la tecnología de receptor central han sido construidas (tabla 1.3); la más grande fue de 10 MW, llamada "Solar one" en Barstow, California, con un absorbedor tubular de generación directa de vapor. Actualmente, se cambió el concepto de esta planta para operar con un receptor tubular de sal fundida ("Solar two"). Un receptor abierto de aire fue propuesto por el consorcio *PHOEBUS*, que está formado por compañías europeas e institutos de investigación.

El consorcio terminó el estudio de factibilidad en 1990 y considera construir una planta de 30 MW en Jordania. Una demostración con receptores térmicos basados en aire y de mediana escala (2.5 MW_h) fue puesta en marcha exitosamente en la Plataforma Solar de Almería, España, como el principio del Programa tecnológico de Receptores Solares de Aire (TSA).

Junto con el desarrollo de receptores solares también se trabaja en receptores cerámicos para altas temperaturas en ciclos cerrados, los cuales requieren ventanas de cuarzo colocadas enfrente del material absorbedor. SODEAN, España, está elaborando un estudio de factibilidad de un ciclo combinado híbrido de potencia para la cogeneración de electricidad y calor, basados en receptores centrales de generación directa de vapor.

Tabla 1.3: Plantas de receptor central construidas en el mundo (Langniß, et. al, 1997).

<i>Planta (país)</i>	<i>Capacidad (MW)</i>	<i>Tipo de refrigerante</i>	<i>Período de servicio</i>
Eurelios (Italia)	1.0	Agua / vapor	1980~1984
Sunshine (Japón)	1.0	Agua / vapor	1981~1984
IEA-CRS (España)	0.5	Sodio	1981~1985
Solar One (USA)	10.0	Agua / vapor	1982~1988
CESA 1 (España)	1.2	Agua / vapor	1983~1984
Themis (Francia)	2.5	Sal fundida	1983~1986
MSEE (USA)	0.75	Sal fundida	1984~1985
SES-5 (URSS)	5.0	Agua / vapor	1985~1989
PHOEBUS-TSA (España)	2.5	Aire	1992~ hoy
Solar Two (USA)	10.0	Sal fundida	1995~ hoy

Ventajas del Sistema de Receptor Central en la Generación Eléctrica:

- Alta eficiencia de captación de irradiancia solar.
- Alta temperatura de trabajo del vapor.
- Adaptación simple de sistemas híbridos basándose en combustóleo o gas natural.
- Alta disponibilidad de potencia de más del 94%.

- Componentes solares modulares (helióstatos) con un alto potencial de producción a gran escala.
- Estrategia simple de operación.
- Se tiene posibilidad de cogeneración.

Desventajas del Sistema de Receptor Central en la Generación Eléctrica:

- Pérdidas considerables de energía térmica debido al ciclo abierto de aire (PHOEBUS).
- La energía solar y la reserva de combustible fósil se convierten a electricidad con una relativa baja eficiencia del ciclo de vapor.
- Los heliostatos requieren soportes muy estables para los espejos y un movimiento en dos ejes.
- Se requiere agua para la limpieza de los espejos (hay varias alternativas de limpieza disponibles).

1.6.4 Sistema de generación eléctrica con plato parabólico y motor Stirling.

En estos sistemas, el colector solar es un reflector en forma de plato parabólico (paraboloide de revolución) y el sistema de conversión de calor a electricidad (motor Stirling) está montado en un soporte simple localizado en el foco del paraboloide; cuentan con un dispositivo de movimiento en dos ejes, ya que sólo pueden ser usados con radiación directa para la generación de electricidad (figura 1.13). El absorbedor de calor del motor Stirling, generalmente es un tubo de alta conductividad térmica enfriado con gases como hidrógeno o helio, que son los fluidos de trabajo usados en sistemas de este tipo, los cuales se calientan a alta temperatura, expandiéndose para impulsar un pistón recíprocante que opera en un ciclo termodinámico cerrado regenerativo de cuatro pasos; este tipo de motores tiene capacidad para operar con otra fuente energética diferente a la solar, alta eficiencia, bajas emisiones, larga vida útil y operación muy silenciosa

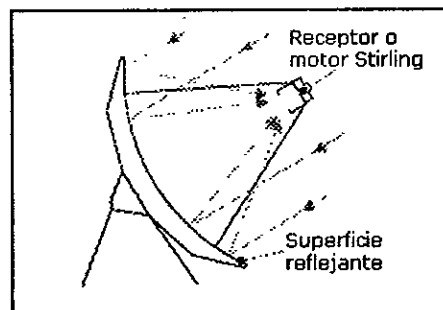


Figura 1.13: Esquema de un paraboloide con motor Stirling.

Estos sistemas son altamente modulares, ya que al ser unidades independientes de 10~50 kW de potencia, pueden ser conectadas para formar una gran red generadora de electricidad, para así integrar una planta de más de 1 MW_e. Su versatilidad permite la adaptación de sistemas híbridos, sin embargo, esto no ha sido probado (Stine y Diver, 1994).

En 1991 se construyeron seis unidades de sistemas con membrana extendida como superficie reflectora en un plato parabólico con motor Stirling tipo V-160 de 9 kW de potencia, por Schlaich, Bergemann y compañía de Stuttgart, Alemania; las cuales se montaron en Almería, España, y varios lugares de Alemania (tabla 1.4).

El motor Stirling V-160 tiene una temperatura de trabajo de 620 °C, con una eficiencia global máxima en la conversión de energía solar a electricidad de 0.203. "Cummins Power Generation, Inc." (CPG) de Columbus, Indiana, fue la primera compañía en el ámbito mundial que usó un motor *Stirling de pistón libre* para la generación de electricidad con energía solar; esta compañía hizo pruebas con tres prototipos de 5 kW_e; cuya eficiencia de diseño fue arriba de 0.19.

La compañía "Sunpower, Inc." desarrolló un motor Stirling tipo pistón libre de 9 kW_e con un alternador lineal; el gas de trabajo fue Helio a una temperatura de 629 °C. La compañía Aisin Seiki Co., Ltd, de Ciudad Kariya, Japón; construyó el motor NS30A con una potencia de 30 kW_e, tal proyecto fue llevado a cabo conjuntamente entre el Gobierno de Japón y "New Energy and Industrial Development Organization" (NEIDO); este motor fue de cuatro pistones y doble acción, que operó con Helio a 683 °C. Una de estas unidades se probó con un concentrador solar *McDonnell*, en la ciudad de Kariya.

Otros tres motores con una potencia de 8.5 kW montados sobre concentradores de membrana extendida Cummins CPG-460, se usaron para la generación de electricidad en la isla Miyako, localizada a 290 km al suroeste de Okinawa; en este caso, para proveer energía después del ocaso, a cada sistema se le incorporó una batería electroquímica Zinc-Bromo de 30 kWh de capacidad.

Las compañías "Stirling Thermal Motors, Inc." de Ann Arbor, Michigan; y "Detroit Diesel Corp." de Detroit, Michigan, diseñaron un sistema solar de generación de potencia incorporándole un motor Stirling STM4-120 de 25 kW_e de potencia; este paquete es apropiado para la integración con una amplia variedad de concentradores solares.

Tabla 1.4: Sistemas con Motor *Stirling* a escala mundial (Trieb, et. al, 1997).

Planta (País)	Potencia (kW)	Apertura (m ²)	Tipo de Reflector	Gas de Trabajo	Período de Operación
Vanguard (EUA)	25	91	Espejos de vidrio en forma de mosaico	Hidrógeno	1984~1985

McDonnel (EUA)	25	91	Espejos de vidrio de primera superficie	Hidrógeno	1984~1988
SBP (Arabia Saudita)	52.5	227	Membrana extendida de acero con vidrio/plata	Hidrógeno	1984~1988
SBP (España, Alemania)	9	44.2	Membrana extendida de acero con vidrio/plata	Helio	1991~hoy
Cummins CPG (EUA)	7.5	41.5	Membrana extendida de plástico aluminizado	Helio	1992~hoy
Aisin/Miyako (Japón)	8.5	44	Membrana extendida de plástico aluminizado	Helio	1992~hoy
STM-PCS (EUA)	25	n.a.	Colector no incluido.	Helio	1994~hoy

Ventajas del Sistema de Plato Parabólico con Motor Stirling en la generación de electricidad:

- Unidades modulares automantenidas.
- Altas relaciones de concentración, temperaturas de trabajo y eficiencias.
- Amplia experiencia con plantas de potencia pequeñas y unidades simples.
- Opciones para distribución, así como para sistemas centralizados de abastecimiento eléctrico.
- Sistemas altamente modulables, no hay restricción de escalamiento.
- Operación y mantenimiento simples.

Desventajas del Sistema de Plato Parabólico con Motor Stirling en la generación de electricidad:

- La integración con sistemas de reserva basándose en combustibles fósiles aún no está disponible.
- Baja disponibilidad de potencia y sólo se tiene unas cuantas horas de carga total al año.
- Requiere de soportes estructurales rígidos y de un sistema de movimiento perfecto, lo que lleva a tener altos costos de inversión.
- No se tiene experiencia con grandes sistemas escalados.
- Requiere agua para limpieza.

1.6.5 Sistema de generación eléctrica con Chimenea Solar.

Si un área plana expuesta al Sol se cubre con vidrio, el suelo y el aire debajo de él se calentarán hasta aproximadamente 35 °C arriba de la temperatura ambiente (Efecto Invernadero). Si a dicha cubierta se le da una pequeña inclinación hacia el centro y una chimenea alta se instala en ese punto, el aire caliente ascenderá formando una corriente con

una velocidad arriba de 15 m/s en la entrada de la chimenea; tal corriente de aire puede usarse para la generación de electricidad mediante un generador eólico de rotación horizontal (figura 1.14). El principio de operación del colector permite el uso de irradiancia solar directa y difusa; el suelo debajo de la cubierta transparente actúa como un reservorio de calor permitiendo a la planta trabajar con potencias reducidas durante algunas horas después del ocaso. Este tipo de planta puede diseñarse para potencias de 30~100 MW (Schlaich, 1994).

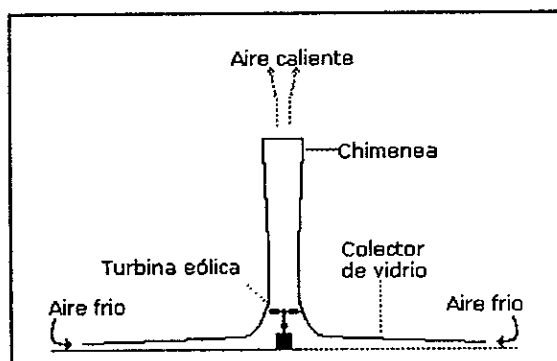


Figura 1.14: Esquema de una chimenea solar.

La primera planta experimental de este tipo se construyó con una potencia de 50 kW, durante los años 1981-1982 en Manzanares, España; patrocinada por el gobierno alemán y operada en cooperación con la paraestatal Unión Eléctrica Española Fenosa. La chimenea tenía una altura de 200 m y el colector cubría un área de 45 000 m². Durante los siete años de operación de esta planta, desde 1982 a 1989, se ganó mucha experiencia; entre 1986 y 1989, la planta fue conectada a la red nacional eléctrica; en 1987, el sistema acumuló 3157 horas de trabajo incluyendo 244 horas en la noche. El prototipo de Manzanares fue desmantelado después del período experimental.

Ventajas del sistema de Chimenea Solar en la generación de electricidad:

- El colector de vidrio puede usar irradiancia directa y difusa.
- El suelo bajo el colector actúa como reservorio de calor, evitando fluctuaciones violentas, además de suministrar energía después de la puesta del Sol.
- Fácilmente disponible y bajos costos de construcción.
- Operación simple y totalmente automática.
- No requiere agua.

Desventajas del sistema de Chimenea Solar en la generación de electricidad:

- Eficiencia de conversión muy baja (~1%).

- No es posible adaptar sistemas híbridos.
- Las horas equivalentes de carga máxima están restringidas a aproximadamente 2500 h/año.
- Se requieren áreas grandes de terreno completamente planas para el colector.
- Se requieren cantidades grandes de materiales para la chimenea y el colector.
- Para potencias grandes se requieren chimeneas muy altas (750 m para una planta de 30 MW).

1.6.6 Sistema de Generación Eléctrica con Estanque Solar.

Un estanque solar con gradiente salino es generalmente un gran reservorio de agua con fondo negro que absorbe la irradiancia solar difusa y directa, almacenando el calor acumulado en forma de salmuera caliente. Para evitar corrientes convectivas dentro del estanque y con ello pérdidas de calor a través de la superficie, el estanque se divide típicamente en tres zonas (figura 1.15):

- 1) Un estrato o **zona superior** de convección estrecha, con agua de baja densidad y baja concentración de sal. La convección en esta capa es causada por el viento y pérdidas superficiales.
- 2) Una **zona intermedia** de 1~1.5 m de profundidad no convectiva, con un incremento diferencial en la concentración de sal conforme aumenta la profundidad. El gradiente salino evita el ascenso de las capas de agua más profundas y calientes, de tal forma que esta capa actúa como un aislante transparente para el estanque, permitiendo que la luz del Sol llegue hasta las zonas más profundas, pero evita las corrientes convectivas desde el fondo hasta la superficie.
- 3) Una **zona inferior** de 2~4 m de profundidad con una alta concentración de sal (en algunos casos saturada). El peso específico en esta capa es extremadamente alto, de esta manera se previene el ascenso de salmuera caliente hacia las otras capas; dentro de ella la concentración de sal es constante por lo que el calor puede ser distribuido uniformemente mediante una convección interna. La profundidad de esta zona define la capacidad de almacenamiento térmico del estanque.

Tomando en cuenta estos principios, la zona superficial convectiva puede estar fría, mientras que la zona profunda puede tener una temperatura de 90 °C o más; así, las pérdidas térmicas son pequeñas. El agua que proviene de la zona de almacenamiento (la más profunda)

es retirada y bombeada a un cambiador de calor que actúa como evaporador en un ciclo Rankine orgánico (CRO). El fluido de trabajo orgánico con un bajo punto de ebullición permite la operación del ciclo Rankine a temperaturas por debajo de 100 °C; la eficiencia de conversión de este ciclo es de aproximadamente 1%.

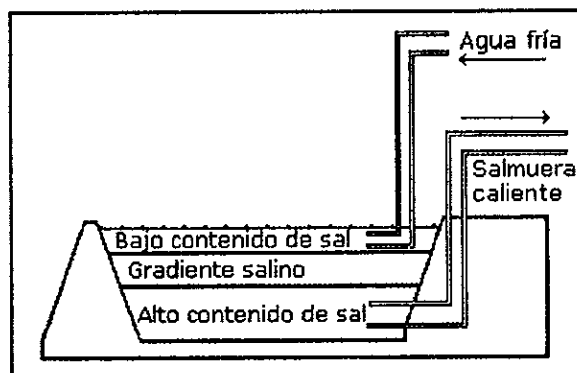


Figura 1.15: Esquema de un estanque solar y las zonas que lo forman.

Los estanques solares de gradiente salino fueron descubiertos con un fenómeno natural en 1902. La Fundación para la Investigación Científica y "Ormat Turbines Co." de Yavne, en 1977 fundaron una compañía llamada "Solmat Systems", la cual construyó una planta demostrativa de 150 kW_e en Ein Boqek, que está en la riberas del Mar Muerto. Esta planta se acopló a la red eléctrica israelí en 1979, y trabajó exitosamente durante siete años.

La experiencia ganada con este sistema condujo al proyecto SPPP de 5 MW_e, planta construida en Beith Ha'Arava en 1984; que fue financiada parcialmente por el gobierno israelí (tabla 1.5). Debido a las restricciones del presupuesto, la superficie de diseño del estanque (1 km²), fue reducida a poco menos de un cuarto de dicha área (210 000 m²), aunque la puesta en operación fue exitosa. Otras plantas más pequeñas basadas en estanques solares se hicieron en Alice Springs, Australia, en 1985 y en El Paso, Texas, en 1986. El proyecto de El Paso incluyó cogeneración de electricidad (70 kW_e) y calor de proceso (330 kW_t) para desalinización (Tabor, 1990).

Tabla 1.5: Estanques solares desarrollados a escala mundial (Trieb, et. al, 1997).

Planta (país)	Potencia (kW)	Área del Estanque (m ²)	Período de operación
Ein Boqek (Israel)	150	6 250	1979~1986
Beith Ha'Arava (Israel)	5000	250 000	1984~1989
Alice Springs (Australia)	15	1 600	1985~1989
El Paso (EUA)	70/330	3 350	1986~hoy

Ventajas del sistema de Estanque Solar en la generación de electricidad:

- Capacidad de almacenamiento única, que es inherente al concepto de planta.
- Adecuado para la operación con carga pico, intermedia y base, únicamente en modo solar.
- Adecuado para la cogeneración.

Desventajas del sistema de Estanque Solar en la generación de electricidad:

- Eficiencia de conversión muy baja (~1%).
- Grandes requerimientos de terreno.
- Se necesita una calidad de sal alta y una considerable cantidad de agua de repuesto.
- Dificultad para estabilizar el gradiente salino en zonas con viento.
- Dificultad del mantenimiento de la tubería inmersa en el estanque.
- Largos tiempos de construcción e instalación para estanques de gran tamaño.

1.6.7 Sistema Fotovoltaico en la generación de electricidad.

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos basados en semiconductores capaces de convertir la luz solar en corriente directa. El material más importante para la fabricación de las fotoceldas es el Silicio en forma de monocristales, policristales, amorfo o estructuras de película fina (figura 1.16). Las celdas solares pueden trabajar tanto con radiación directa como radiación difusa para la generación de electricidad. Dichas celdas son encapsuladas en módulos que pueden conectarse en serie y en paralelo, para formar grupos que proporcionan un alto voltaje y potencia, fácilmente escalables.

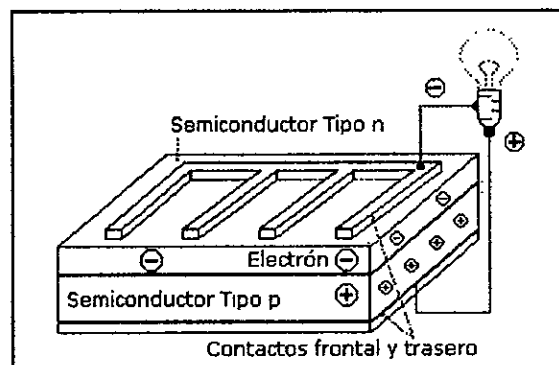


Figura 1.16: Esquema de una celda fotovoltaica.

Generalmente, los módulos se arreglan en grupos de unos cuantos kW's, que se conectan individualmente a un inversor que permite convertir de corriente directa a corriente alterna con un punto máximo de potencia coordinado. Estos grupos se ordenan en largos arreglos

conectados en paralelo, formando una red que alimenta la energía generada a una estación de transformadores.

Los módulos se pueden montar en un soporte fijo o sobre un dispositivo de seguimiento solar. Los sistemas fotovoltaicos aislados necesitan una batería adicional para el almacenamiento de energía o un sistema convencional de reserva (como un generador diesel) con el fin de obtener energía eléctrica suficiente y confiable para periodos de baja intensidad de irradiación solar.

Las celdas solares fueron desarrolladas en las primeras investigaciones de los programas espaciales, en las décadas de los 50's y 60's. Las adaptaciones a aplicaciones terrestres tuvieron lugar después de la crisis energética al principio de los años 70's; posteriormente, se registró un incremento continuo en la producción mundial de fotoceldas hasta alcanzar, en nuestros días, una capacidad de producción mayor a los 80 MW al año (Johanson, 1993).

Mientras que el mercado principal está concentrado en aplicaciones de tamaño pequeño, existen algunos sistemas conectados en red cuya capacidad está en el orden de un megawatt. Recientemente Alemania, Suiza y Austria implementaron programas de utilización de celdas fotovoltaicas con sistemas conectados en red de 1~5 kW cada uno, con el fin de promover el desarrollo y comercialización de dichos sistemas. Actualmente, Japón y el resto de la Unión Europea están desarrollando programas similares (tabla 1.6).

Tabla 1.6: Instalaciones de gran tamaño con celdas fotovoltaicas (Trieb, et. al, 1997).

<i>Planta (país)</i>	<i>Potencia (kW-CD)</i>	<i>Sistema de Seguimiento solar</i>	<i>Inicio de operación</i>
Neurather See (Alemania)	358	No	1991
Rendsburg (Alemania)	70	No	1991
PLUG Casaccia (Italia)	100	No	1991
PLUG Manfredonia (Italia)	300	No	1992
Seewalchen (Austria)	40	No	1992
Mont-Soleil (Suiza)	560	No	1992
Neufeld Bern (Suiza)	75	No	1992
Bellinzona (Suiza)	100	No	1992
PVUSA Davis (APS) (EUA)	479	No	1992
PVUSA Davis (IPC) (EUA)	188	1 eje	1993
PVUSA Davis (SSI) (EUA)	174	1 eje	1993
Kerman (EUA)	502	1 eje	1993
Serre-Salerno (Italia)	3300	no	1994
Toledo PV-1 (España)	1000	parcial	1994

Ventajas de los sistemas Fotovoltaicos en la generación de electricidad:

- No tienen partes móviles (~10%).
- Vida útil muy larga.
- Bajos requerimientos de mantenimiento.
- Existen opciones tanto para sistemas centralizados de generación eléctrica como para sistemas distribuidos.
- Se tiene modularidad de los sistemas; no existen restricciones de escalamiento.
- Existe larga experiencia en la tecnología fotovoltaica, además de que hay componentes comerciales.

Desventajas de los sistemas Fotovoltaicos en la generación de electricidad:

- Eficiencia relativamente baja (sistemas comerciales ~10%).
- A pesar de una producción de 80 MW al año en celdas, la inversión en esta fotoceldas todavía tiene costos muy elevados.
- Las horas anuales de carga plena son restringidas.
- No es posible implementar sistemas híbridos, únicamente sistemas de reserva totalmente con combustible fósil o redes interconectadas.
- Las opciones de almacenamiento electroquímico también son muy caras.

1.6.8 Comparación entre Sistemas.

Los diferentes conceptos de generación eléctrica a partir de energía solar están representados por una selección de "plantas de referencia" que se consideran como típicas según lo establecido actualmente, por lo que los datos disponibles corresponden a casos específicos de estudio o reportes de desempeño. Esto implica que las condiciones meteorológicas, operacionales y de demanda son ligeramente diferentes para los sistemas seleccionados, de tal forma que se dificulta la comparación directa entre ellos. Sin embargo, algunas conclusiones generales se derivan de los datos presentados.

La mejor eficiencia anual de conversión de energía solar a eléctrica fue alcanzada por los sistemas de concentración: Plato Parabólico con Motor Stirling ($\eta = 16\%$), Canal Parabólico ($\eta = 21.5\%$) y Receptor Central base aire PHOEBUS ($\eta = 14.1\%$). Estos sistemas tienen requerimientos relativamente bajos de terreno.

Únicamente los sistemas híbridos (canal y receptor central) ofrecen una alta disponibilidad de potencia para operación con carga base y pico; esto los convierte en los sistemas más adecuados para aplicaciones útiles a gran escala.

Tabla 1.7: Comparación de las principales tecnologías termosolares desarrolladas hasta la fecha (Trieb, et. al, 1997).

	Tipo de Planta		Canal	Phoebus	Chimenea	Plato	Estanque	Celdas
	Parabólico	Parabólico				Motor Stirling	Solar	Fotovoltaicas
Desempeño Técnico								
Potencia estimada			80	30	30	1	5	0.385
Radiación horizontal anual global	[MW]		2 176	2 276	2 300	2 165	1 850	1 807
Radiación anual de diseño	[kWh/m ² a]		2 364	2 500	2 300	2 349	1 850	2 050
Horas anuales de carga total	[h/a]		4 200	3 760	2 894	1 753	4 316	1 977
Capacidad de almacenamiento	[h]		0	0	13	0	12	0
Área requerida por el colector	[m ²]		470 265	160 428	3 803 913	4 675	925 055	3 571
Tipo de combustible			Combust. #2	Gas Natural	Solar	Solar	Solar	Solar
Consumo específico de combust.	[kJ/kWh]		6282	6185	0	0	0	0
Parte solar anual	[%]		49.4	50.2	100.0	100.0	100.0	100.0
Eficiencia anual de conversión (energía solar a electricidad)			0.149	0.141	0.010	0.160	0.013	0.104
Otras especificaciones			Enfriado seco	Enfriado húmedo	---	Membrana extendida	Gradiente salino	Monocristales de Silicio
Impacto Ambiental								
Superficie usada para el colector	[m ²]		1 316 741	641 711	3 994 109	14 960	971 308	7 143
Agua requerida para el proceso	[m ³ /d]		3 222	0	0	0	11 507	0
Agua para limpieza del colector	[m ³ /d]		1 176	401	0	12	0	0
Emissiones relativas de CO ₂	[%]		44.3	33.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Costos de Inversión*								
Campo de colectores solares	[MMD]		114.43	30.69	52.41	7.32	5.89	3.26
Otros componentes solares	[MMD]		18.00	21.92	74.86	0.00	1.86	0.67
Equipo generador de potencia	[MMD]		83.11	37.40	0.00	0.00	5.60	0.00
Costo total de inversión	[MMD]		237.09	99.01	139.99	8.05	14.70	4.32
Costo unitario total de inversión	[US\$/kW]		2 964	3 300	4 666	8 046	2 939	11 236
Costos de Operación*								
Capital	[MMD/a]		22.38	9.34	13.21	0.76	1.39	0.41
Personal	[MMD/a]		2.14	1.45	0.19	0.11	0.11	0.04
Operación y mantenimiento	[MMD/a]		4.74	1.98	0.35	0.16	1.47	0.04
Seguro	[MMD/a]		0.48	0.20	0.28	0.02	0.03	0.01
Combustible	[MMD/a]		7.85	3.43	0.00	0.00	0.00	0.00
Costo total anual de operación	[MMD/a]		37.59	16.41	14.03	1.05	3.00	0.50
COSTO DE LA ELECTRICIDAD	[US\$/kWh]		0.112	0.145	0.162	0.600	0.139	0.655

*Costos promedio de 1997.

Debido a la gran capacidad inherente de almacenamiento, los estanques solares también tienen relativamente alta disponibilidad de energía. La hibridación de un estanque solar es posible, pero no factible, debido a las bajas eficiencias del Ciclo Rankine Orgánico. Una mayor desventaja de los estanques solares son sus grandes requerimientos de agua y sal. Con ello se forman las diferentes zonas con gradiente salino; lo que limita su aplicación a áreas donde tanto el agua como la sal estén fácilmente disponibles.

La Chimenea Solar fue calculada con precios del vidrio, acero y concreto para el sur de Europa. En los países en desarrollo, con precios y niveles de salario más bajos, los costos de la planta pueden escalarse a valores más bajos, ya que estos materiales generalmente se producen a escala nacional.

Las tecnologías más convenientes para pequeñas y medianas aplicaciones aisladas son las fotovoltaicas y los sistemas de plato parabólico con motor Stirling, normalmente en combinación con baterías electroquímicas de almacenamiento para los primeros. Si se requiere una disponibilidad de alta potencia o si las plantas operan en una red descentralizada, una unidad de reserva adicional basado en combustible fósil debería estar instalada. Las emisiones de las plantas son comparadas a una arbitrariamente definida como "sistema energético actual", el cual es caracterizado por una emisión típica de CO₂ de 1.05 kg/kWh generado. Naturalmente, sólo los sistemas híbridos producen emisiones a la atmósfera.

La comparación muestra que cada tecnología tiene fortalezas y debilidades, y una decisión final en pro o contra puede tomarse considerando las circunstancias propias de cada sitio. Además, cada tecnología base tiene variantes avanzadas con diferentes desempeños y costos. Para tener una visión general y tomar una decisión es necesario consultar con especialistas de cada tecnología; lo cual, es un proceso que consume dinero y tiempo.

1.7. La Energía Solar en México

La producción nacional de energía eléctrica a partir de energía solar se limita a unos cuantos kW's instalados con paneles de celdas fotovoltaicas, cuya aplicación principal se da en alumbrado; mientras que tecnologías del tipo termosolar para la generación de electricidad todavía están en etapa experimental y de investigación, llevada a cabo por algunas instituciones tales como el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Centro de Investigaciones en Energía, etc. Ya que el interés es mundial, se está en posibilidad y a tiempo de asimilar y desarrollar algún tipo de tecnología termosolar para aplicación comercial, sin esperar a adquirir plantas eléctricas de este tipo compradas a alto costo en el exterior.

En México el único mercado de tecnologías termosolares es del colector solar plano, cuya área de dominio se ubica en las grandes ciudades. Tal fenómeno se debe a que sólo ellas poseen problemas de contaminación considerables y porque es donde se encuentra el poder económico capaz de pagar esta tecnología; de tal forma que mediante el uso de estos colectores se puede contribuir un poco a reducir las fuentes de gases contaminantes, y minimizar el proceso de deterioro ecológico que se sufre actualmente.

Hoy en día se ha introducido el ciclo combinado para mejorar la eficiencia termodinámica de estos sistemas, además de que se estudia la posibilidad de generar directamente el vapor en el campo de concentradores. Con esto se espera lograr llevar los precios de generación a niveles competitivos con las plantas termoeléctricas convencionales. Las predicciones de la Agencia Internacional de Energía, la colocan entre US\$0.05 a US\$0.07 por kWh.

1.7.1 La Energía Solar como recurso nacional.

En 1975 el Instituto de Ingeniería de la UNAM generó la primera versión de los mapas de irradiación global diaria promedio mensual para México, utilizando datos de insolación de 54 estaciones meteorológicas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Posteriormente, mediante la ampliación de la base de datos proporcionada por el SMN, se publicó la actualización de dichos mapas de irradiación. El modelo aplicado por Rafael Almanza, investigador del Instituto de Ingeniería, tiene desviaciones menores al 10 por ciento; tal modelo fue desarrollado en la India, situación que hizo más confiable su aplicación en México, ya que tanto la latitud, como los climas en ambos países son semejantes. Actualmente este modelo es el más consultado en el ámbito nacional para estimar las cantidades totales de radiación diarias sobre superficies horizontales.

Los datos que se presentan a continuación corresponden a la aplicación del modelo en los registros que se han obtenido en las diferentes estaciones meteorológicas instaladas en las principales ciudades de la República. Para propósitos de análisis estos datos se consideran confiables, sin embargo, se sugiere consultar la obra original si requiere de mayor precisión o bien de utilizar curvas de nivel para localidades intermedias.

La irradiación media anual en nuestro país, es del orden de los 5 kWh/m² en promedio diario. Por otro lado, en términos generales la problemática existente para la evaluación de la irradiancia solar, se plantea al nivel de los siguientes puntos:

- Mantenimiento y calibración de los equipos de medición.
- Control de calidad.
- Problemas asociados al manejo de datos.
- Falta de técnicos capacitados para la operación de las estaciones solarimétricas.

- Falta de elaboración de manuales especializados.
- Falta de un centro especializado para la concentración de datos de irradiancia solar.

Sin embargo, con la tecnología de satélites se ha abierto la posibilidad de evaluar la irradiancia solar en la superficie terrestre por medio de diferentes tipos de imágenes. De tal forma que los satélites estacionarios proporcionan información más confiable que la que se tiene en la actualidad, pero para contar con ella es necesario calibrar las imágenes con mediciones en tierra para diferentes puntos de la República Mexicana, esto con la finalidad de mejorar los algoritmos de análisis utilizados. Además, tal información se recibe en tiempo real, por lo que puede ser usada para analizar el funcionamiento de plantas termosolares y fotovoltaicas.

Con el uso de imágenes de satélites, se podría prescindir de costosas redes solarimétricas terrestres. No obstante, la red existente en México puede servir como un importante punto de referencia para la interpretación de dichas imágenes.

1.7.2 Experiencias de Sistemas Termosolares en México.

Desde la década de los 70's, en México se han hecho diferentes desarrollos en el área termosolar, la mayoría de ellos basados en el sistema de colectores planos y solamente uno fue desarrollado bajo el esquema de canal parabólico. Los proyectos más sobresalientes se describen en las tablas 1.8 a 1.15:

Tabla 1.8: Proyecto "Tonatiuh".

Institución Ejecutora	Subsecretaría de mejoramiento del ambiente Secretaría de Salud Pública Sociedad Sofretes de Francia
Lugar	San Luis de la Paz, Guanajuato
Fecha	1975
Participantes	?
Descripción	Consistió en una central de generación eléctrica termosolar de 30 kW, con freón como fluido de trabajo. Tenía 1500 m ² de colectores planos. El proyecto incluía 10 instalaciones de bombeo de aproximadamente 40 m ² de colectores planos y una bomba hidráulica que usaba gas LP como fluido de trabajo; este tipo de estación fue distribuida en varios estados, pero a potencias de 1kW.
Tiempo de operación	---
Estado actual	En ruinas
Comentarios	Se utilizó tecnología extranjera

Tabla 1.9: Proyecto "Centro Médico Nacional 20 de Noviembre, ISSSTE".

Institución Ejecutora	Aquasol S.A. de C.V. (módulo solar) ICA (constructora)
Lugar	México, D.F.
Fecha	1993
Participantes	Jaime Sotomayor, Carlos Sotomayor y Octavio García
Descripción	Consta de 1000 m ² de área de captación alucobre y cobre en módulos de 1.9 m ² a circulación forzada para calentar agua de todo el hospital. Su capacidad es de 50 a 60 m ³ diarios.
Tiempo de operación	Desde 1994 a la fecha.
Estado actual	En operación.
Comentarios	Se utilizó tecnología nacional.

Tabla 1.10: Proyecto "Calentamiento de agua en instalaciones del sector hotelero".

Institución Ejecutora	CELSOL, S.A. de C.V.
Lugar	Hotel Cancún Palace, Cancún Q. Roo.
Fecha	Febrero de 1994.
Participantes	Celsol
Descripción	Consta de 468 colectores solares planos con una superficie de captación de 936 m ² para calentar 85000 litros de agua al día a 55 °C.
Tiempo de operación	Desde su instalación a la fecha.
Estado actual	En reparación.
Comentarios	Se construyó con tecnología propia.

Tabla 1.11: Proyecto "Instalaciones deportivas del club UNAM, Pumas".

Institución Ejecutora	Energía y Ecología S.A. (módulo solar) ICA. (construcción)
Lugar	México, D.F.
Fecha	1996
Participantes	Octavio García, Juan José Díaz Infante, Diego Alfonso Sámano
Descripción	Se trata de un campo inicial de 170 m ² con expansión al doble para el agua caliente de baños y cocina. Cuenta con respaldo fotovoltaico de emergencia, y en fase de pruebas un sistema híbrido solar-eólico para iluminación de emergencia.
Tiempo de operación	Desde su construcción a la fecha.
Estado actual	En pruebas y operación parcial.
Comentarios	Se utilizó tecnología local y extranjera.

Tabla 1.12: Proyecto "Centro Campestre Ecológico Asturiano".

Institución Ejecutora	Adrian's de México, Energía y Ecología (módulo solar).
Lugar	Carretera Cuautla-Chalco km 57
Fecha	1991
Participantes	Octavio García, J.J. Díaz Infante, D.A. Sámano
Descripción	Está formado por un área de concentradores planos de casi 4000 m ² , dividida en dos campos: uno de 1800 m ² que abastece a una alberca de olas de 1500 m ³ , el otro para alberca de olas de 2500 m ³ . Además, cuenta con otros dos campos de 1000 m ² cada uno para uso de agua caliente en baños, vestidores y usos generales.
Tiempo de operación	1991 a la fecha.
Estado actual	En operación, sin embargo el destinado a la alberca con olas ha fallado debido a que no se tomo en cuenta la convección forzada.
Comentarios	Construido con tecnología propia.

Tabla 1.13: Proyecto "Sistema Solar para los Baños de la UAM Iztapalapa".

Institución Ejecutora	UAM-Iztapalapa, Heliotecnica S.A. de C.V.
Lugar	Unidad Iztapalapa de la UAM, México D.F.
Fecha	1989
Participantes	Jorge Encinas, Jorge Chernikoff, Alberto Valdés.
Descripción	Consta de 197.6 m ² de colectores solares planos y un termotanque de 10,000 litros para abastecer de agua caliente a los baños del gimnasio.
Tiempo de operación	Operó ininterrumpidamente durante dos años hasta que los colectores se fracturaron al parecer por congelamiento.
Estado actual	En reparación y funciona parcialmente.
Comentarios	Se utilizó tecnología propia.

Tabla 1.14: Proyecto "Planta Solar Experimental".

Institución Ejecutora	Instituto de Ingeniería UNAM
Lugar	México, D.F.
Fecha	1980-1982
Participantes	Rafael Almanza, José Luis Fernández, Felipe Muñoz, Alberto Valdés, Eugenio Montes, Enrique Barrera.
Descripción	Consta de un Sistema de Generación fototérmica de 10 kWe a partir de un campo de 16 módulos de concentradores tipo canal parabólica de 34.5 m ² c/u. La generación se realizó sobre la base de un ciclo Rankine binario con aceite térmico en la etapa de colección de energía y agua para la generación de potencia.
Tiempo de operación	Operó parcialmente de 1982 a 1988.
Estado actual	Se realizan experimentos de generación directa de vapor en los tubos absorbedores usando cuatro módulos para generar 2.24 kW.
Comentarios	Sirvió de base para un desarrollo tecnológico nacional.

Tabla 1.15: Proyecto "Centro Deportivo Luis Donaldo Colosio".

Institución Ejecutora	Secretaría de Obras del Gobierno del Estado de Tlaxcala y Bufete de Tecnología Solar, S.A. de C.V.
Lugar	Tetla, Tlaxcala.
Fecha	1994
Participantes	Ing. Rodolfo Martínez Strevel
Descripción	Está formado por un sistema de 290 colectores marca Sunway de 1.9 m ² cada uno, dando un área total de 551 m ² . Con ello se calienta el agua para una alberca olímpica y regaderas.
Tiempo de operación	1994 a la fecha.
Estado actual	En buenas condiciones y funciona en su totalidad.
Comentarios	Cuenta con dos calderas pequeñas de gas LP como apoyo, ya que la zona es muy fría y con viento. Se han comprobado ahorros del 70 % de gas.

La producción nacional de energía eléctrica comercial a partir de energía solar, utilizando el intercambio térmico, todavía está en cero. Sin embargo, es factible que en un futuro cercano CFE invierta en la instalación de una planta solar-ciclo combinado en el norte del país.

Para México se plantea la posibilidad de instalar un sistema de Ciclo Combinado más Planta Solar de diseño avanzado, de tal forma que se utilizarían dos tecnologías comprobadas. Cuyas ventajas son (Estrada, 1996):

- Aumento de la capacidad máxima.
- Mejora de las eficiencias del ciclo Rankine y Brayton.
- Reducción de las emisiones contaminantes.
- Creación de una nueva industria y empleo.

También se puede utilizar a escala industrial como sistema de cogeneración, por el cual se producen simultáneamente dos manifestaciones energéticas (calor y electricidad) a partir de una fuente de energía primaria. Ya que los sistemas termosolares pueden ser usados en un intervalo de temperaturas que va desde 100 a 500 °C; por lo que son capaces de satisfacer las necesidades térmicas (vapor de proceso o agua caliente) de la mayoría de industrias.

1.8. Evaluación de Externalidades Ambientales

Con el fin de abarcar el impacto ambiental que tiene la captación de diferentes fuentes de energía primaria para la conversión en energía térmica y/o eléctrica, se desarrolla este punto como externalidades. Las cuales se refieren al costo monetario asignado a la degradación del ambiente por el uso de cualquier fuente energética.

La figura 1.17 muestra una comparación de emisiones de dióxido de carbono provenientes de diferentes formas de generación de electricidad. El valor cero de la biomasa, se debe a la consideración de que el CO₂ neto, tiene un ciclo, que consiste en quemar la biomasa para generar CO₂ para luego ser absorbido y utilizado durante el crecimiento de ésta.

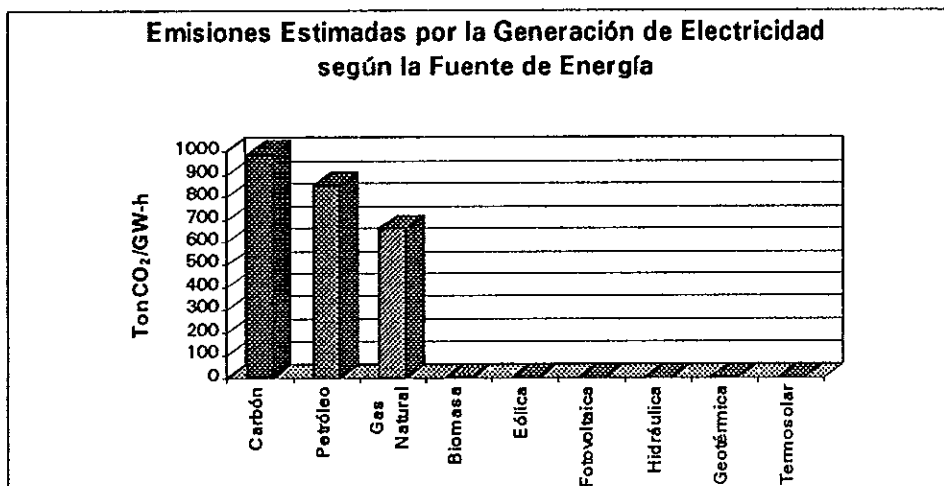


Figura 1.17: Emisiones relativas de CO₂ provocadas por diferentes sistemas de generación eléctrica⁹.

En el artículo de Brower, et al (1993), revisado por *The Union of Concerned Scientists*, se propone un tabulador (tabla 1.16) para evaluar las externalidades o costos de recuperación ambiental por uso de diferentes fuentes de energía primaria para la producción de electricidad.

Tabla 1.16: Costos de las externalidades para algunos tipos de fuentes de energía de acuerdo con la cantidad de energía eléctrica generada.

Gas Natural	0.5 ¢/kWh a 1 ¢/kWh
Petróleo	1.5 ¢/kWh a 2 ¢/kWh
Carbón	2.5 ¢/kWh a 3 ¢/kWh

El impacto global que tienen esas emisiones provocan la mayoría de los cambios climáticos a escala mundial, aunque el CO₂ no es el único gas que afecta. De modo que se debería asignar un costo de recuperación del ambiente según la cantidad de residuos que se produzcan. Para con ello tender a una recuperación gradual de nuestro planeta. Además, dicho costo sirve como impulso para la aplicación de fuentes renovables de energía.

⁹ Fuente: American Solar Energy Society.

CAPÍTULO II

BASES TEÓRICAS

Después de una descripción general de las tecnologías termosolares, en este capítulo se establecen los fundamentos teóricos en los que se apoya este trabajo de investigación. Se incluye los conceptos básicos de óptica aplicada a concentración de energía solar mediante un concentrador de canal parabólico; posteriormente se establecen las características fisicoquímicas del vidrio utilizado; y finalmente se da una explicación sobre la técnica de erosión iónica, cómo se aplica, qué pasa durante el proceso y cómo se implementa.

2.1. Óptica de concentración.

Un concentrador de canal parabólico está formado por una superficie reflejante depositada sobre un sustrato, este último está soportado por una estructura que tiene el perfil de una parábola. La parte receptora está formada por un tubo absorbedor circular con un apropiado recubrimiento selectivo de color negro, además está encerrado en un tubo de vidrio transparente al vacío para evitar pérdidas por convección; dicho tubo se coloca a lo largo del eje focal del canal parabólico (Jiefeng, et al, 1995).

Cada módulo de concentrador de canal parabólico se apoya sobre dos soportes terminales, en uno de los cuales se encuentra el sistema de seguimiento solar, formado por una celda fotosensible y un motor, que tiene que ser muy preciso para mantener a los rayos solares sobre una línea normal al eje focal de la parábola sobre la estructura de recepción. Así, la radiación incidente se absorbe por el fluido de trabajo que circula a través del tubo absorbedor, este fluido puede ser aceite mineral, sal fundida o agua (Thomas y Guven, 1985).

El desempeño de cualquier sistema de energía solar mejora si la eficiencia del colector se incrementa; por lo que ésta puede maximizarse si dicho incremento no significa un gran aumento en el costo del colector. Los parámetros que afectan la eficiencia del colector son (Rabl, et al. 1982):

- a) Condiciones de operación, como son la insolación, la disposición del movimiento (norte-sur, este-oeste), temperatura de operación, flujo del fluido de trabajo, etc.
- b) Propiedades de los materiales, como la reflejancia y la absortancia.
- c) Tipo de receptor, que incluye la forma del absorbedor, características de su superficie y el diámetro del tubo.
- d) Geometría del concentrador, como es el radio de concentración, el ángulo de margen y la apertura de la parábola.

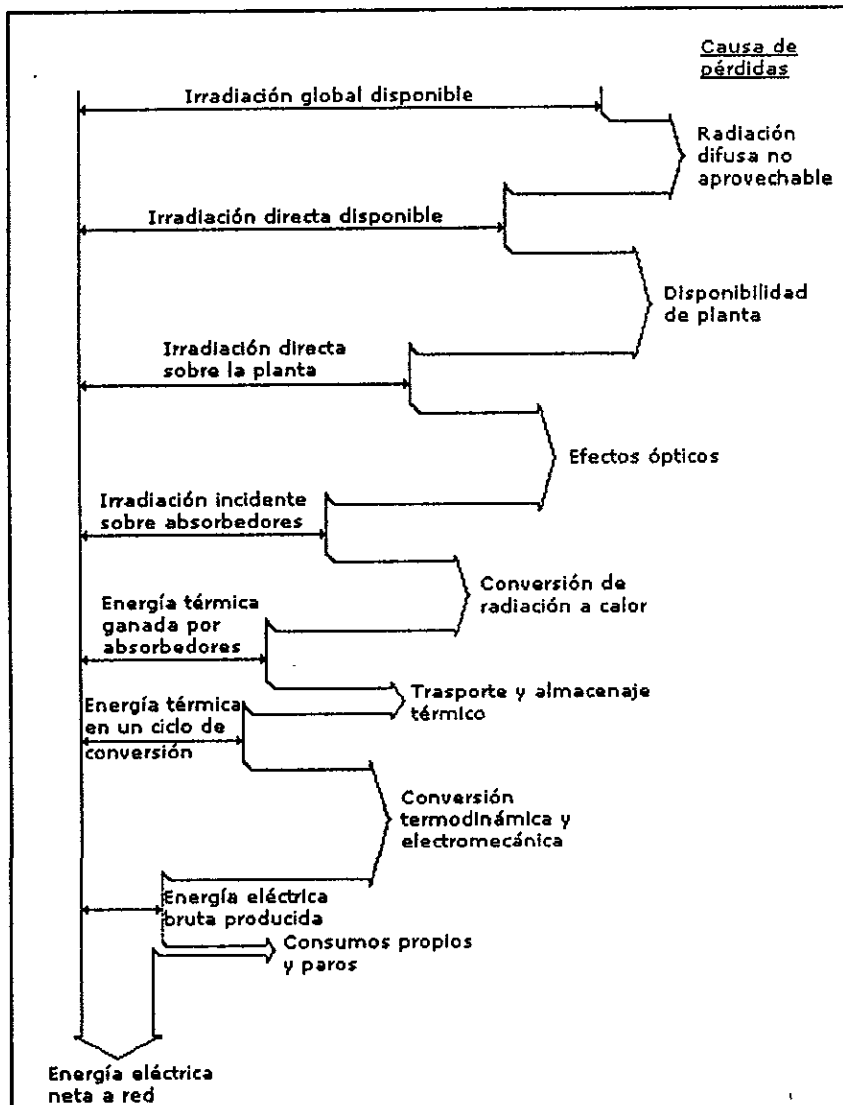


Figura 2.1: Diagrama de Sankey que representa las pérdidas energéticas de un concentrador de canal parabólico (Winter, et al. 1991).

Considerando las características mencionadas, las condiciones de operación pueden variar de una instalación a otra, pero la reducción de costos por unidad de producción requiere una uniformidad general en el diseño.

Los parámetros de diseño de un concentrador de canal parabólico pueden ser clasificados en geométricos y funcionales; los primeros se refieren a todas las características físicas, como es el diámetro del tubo absorbedor, el diámetro del tubo de vidrio envolvente y el radio de concentración; mientras que los segundos, se refieren a las características de desempeño y comportamiento del concentrador de canal parabólico, como es la eficiencia óptica, la eficiencia térmica instantánea y de todo el día, y las pérdidas térmicas del tubo absorbedor. Estos parámetros son altamente influenciados por las propiedades de los materiales utilizados y por los errores ópticos asociados con el sistema. Las propiedades a considerar de los materiales son: la reflejancia del espejo, la transmitancia de la cubierta de vidrio y la absorción del tubo absorbedor. Los errores se pueden deber a los defectos en el material reflejante, en la estructura de soporte, en la localización del tubo absorbedor con respecto al eje focal del concentrador de canal parabólico y a una mala alineación de éste con respecto al Sol provocada por errores del sistema de seguimiento (Thomas y Guven, 1985).

La reflejancia solar es la propiedad óptica más importante de los espejos de primera superficie para aplicaciones en energía solar, y sobre la cual se concentra este proyecto. En años recientes, el trabajo de investigación sobre este tipo de espejos ha sido desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, con la tecnología de Descarga Luminosa y la de Cañón de Electrones, cuyos esfuerzos se han concentrado principalmente en las siguientes áreas (Jiefeng, et al. 1995):

- 1) En la película reflejante de Aluminio, la cual depende de la razón entre el espesor y la velocidad de deposición, así como en el mejoramiento de la adherencia de la película sobre el sustrato de vidrio.
- 2) En la capa protectora, la cual debe ser escogida y preparada para que tenga una alta transparencia y sea ópticamente durable bajo varias condiciones de fabricación.
- 3) Pruebas de estabilidad ante agentes ambientales, mediante procesos acelerados de intemperismo.

El cuarzo (SiO_2), como película protectora, si se evapora adecuadamente forma una capa que muestra poca absorción en el espectro ultravioleta y en el visible, y tiene un índice

de refracción que es idéntico al del cuarzo fundido, lo cual es esencial para los espejos de primera superficie. Las películas de cuarzo se utilizan para el recubrimiento de superficies de semiconductores y como recubrimiento óptico, brindando una muy buena protección al medio ambiente.

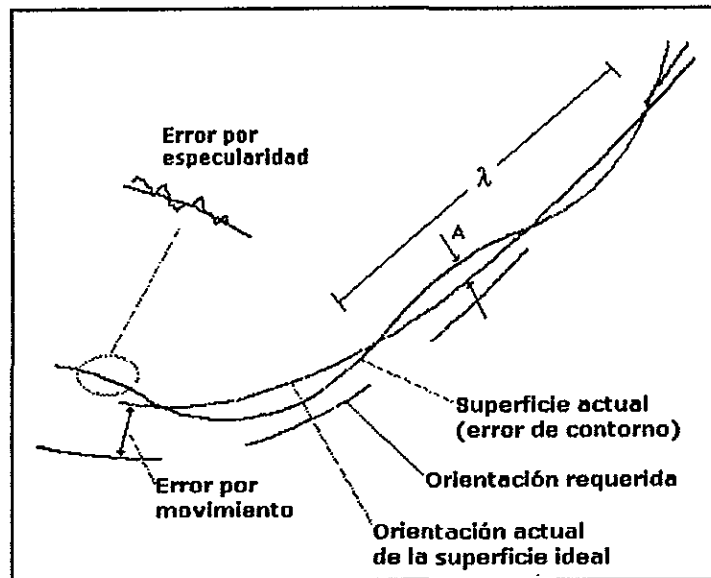


Figura 2.2: Esquema de los posibles errores de una superficie reflejante (Winter, et al. 1991).

2.2. El vidrio.

En esta sección se da una descripción general sobre la composición y propiedades del vidrio, así como la influencia de ciertas sustancias para las diferentes aplicaciones. Además, se describe la manera de cómo se llegó a determinar de la temperatura de reblandecimiento.

2.2.1. Generalidades.

De acuerdo a la definición de la "American Society for Testing Materials", vidrio es un producto inorgánico fundido que se ha enfriado sin cristalizar. La composición de un vidrio puede representarse en moles por ciento o en peso por ciento. La primera forma es adecuada para investigaciones estructurales, por ejemplo, para establecer si un compuesto actúa como formador de red o como modificador. Sin embargo, en las fábricas y laboratorios de la industria del vidrio la composición se da solamente como porcentaje en peso. En la preparación de una composición vítrea se puede proceder de la siguiente forma: se añade el nuevo constituyente al vidrio base, el cual se calcula como el 100%; o de otra manera se pone también la arena igual al 100% y se añaden a ésta las demás sustancias. Sin embargo, la mayor parte de las

veces se prepara un nuevo vidrio sustituyendo gradualmente uno de los constituyentes, lo cual tiene como ventaja que sólo experimenta variación uno de los óxidos que constituyen el vidrio.

Al dejar enfriar una masa fundida de materia vítrea, se alcanza finalmente la temperatura de la primera formación de cristales, siempre que el enfriamiento sea lo suficientemente lento. Si este proceso se lleva a cabo en varias masas fundidas de igual composición cualitativa, pero cuantitativamente diferentes, y se unen las temperaturas correspondientes a la primera aparición de cristales, se obtiene la llamada "*curva de liquidus*", por debajo de la cual existe casi siempre una parte todavía líquida. Si se unen entre sí las temperaturas de solidificación completa se obtiene la "*curva de solidus*". En los sistemas de tres o más componentes ya no se obtienen curvas, sino superficies. Si la temperatura desciende todavía más, muchos de los cristales formados experimentan transformaciones, pasando de las variedades estables a altas temperaturas a las estables a bajas temperaturas. Si la masa fundida se enfría, por último, a la temperatura ambiente, se forman agregados cristalinos que son productos de devitrificación típicos para cada composición química de la masa fundida (Salmang, 1962)

2.2.2. Vidrios Sílico-Cálcico-Sódicos.

En la figura 3.1 se representa el vértice que interesa en la tecnología del vidrio, del importante sistema $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, que es el sistema base de casi todos los vidrios planos y huecos.

Este sistema ternario no está representado en la forma usual de un diagrama triangular de Gibbs, sino que se ha pasado a un sistema de coordenadas rectangulares, además de que solamente se representa la parte de más interés técnico, la cual corresponde a composiciones comprendidas entre 0 y 24% de Na_2O y de 4 a 20% de CaO (figura 2.3). El resto hasta 100% es de SiO_2 . En el centro se puede observar el máximo correspondiente al $\text{Na}_2\text{O}.3\text{CaO}.6\text{SiO}_2$.

En los vidrios industriales se hacen variar las composiciones para conseguir condiciones de elaboración más sencillas o para modificar algunas propiedades; la mayor parte de las veces esto se consigue añadiendo Al_2O_3 , MgO , B_2O_3 , ZnO , etc. Sin embargo, se pueden conseguir también las propiedades deseadas eligiendo una composición adecuada del sistema base.

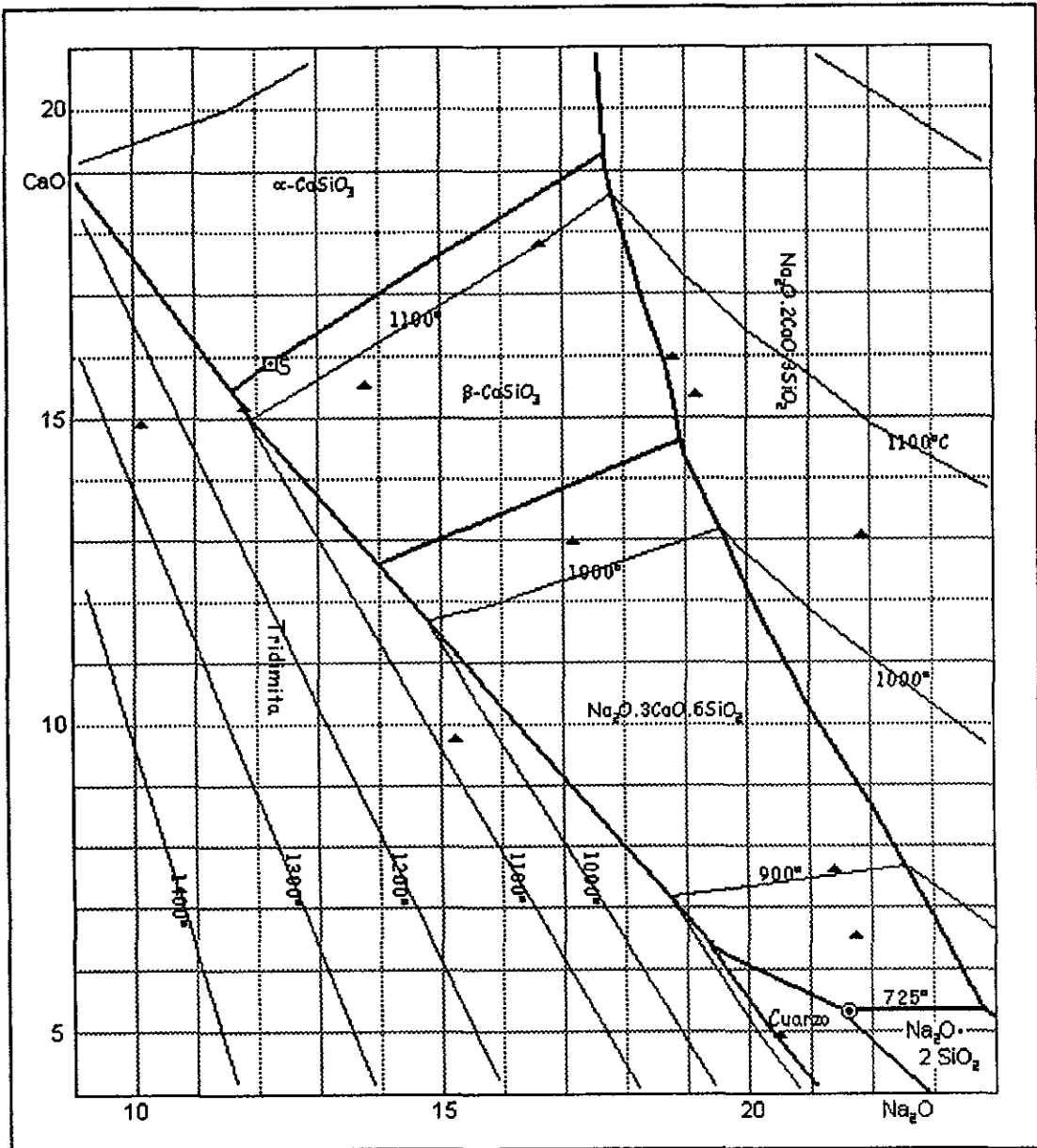


Figura 2.3: Diagrama de devitrificación (Salmang, 1962).

El punto de transformación y el punto de reblandecimiento disminuyen linealmente al aumentar la cantidad de Na. En la representación triangular, las líneas de igual temperatura de transformación y del mismo coeficiente de dilatación se cortan formando una red, lo cual se representa en el diagrama de la figura 2.4.

Si se añade Al_2O_3 (trióxido de aluminio o alúmina) se observa: una disminución de la temperatura de fusión; la devitrificación se detiene marcadamente; un fuerte aumento a la resistencia al lavado; un aumento en la resistencia al choque térmico; y la dureza junto con la tenacidad se ven influidas favorablemente.

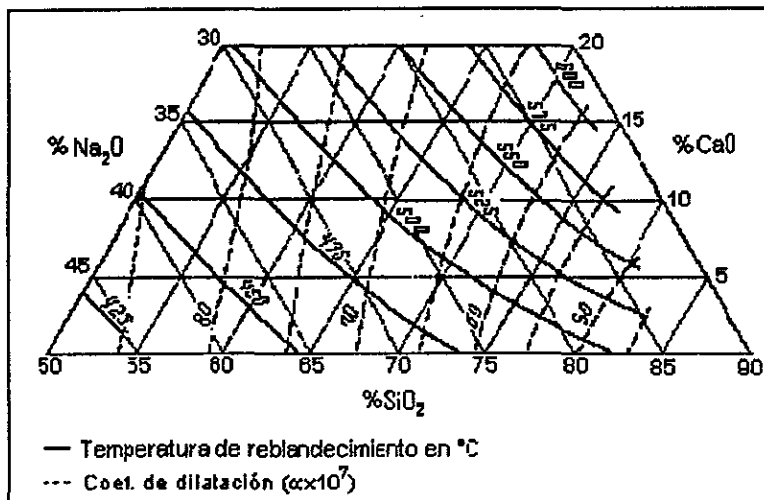


Figura 2.4: Diagrama de líneas de reblandecimiento (Salmang, 1962).

Si se añade MgO (óxido de magnesio), la temperatura de "liquidus" y la velocidad de cristalización disminuyen un 10% por cada 1% de MgO. Si se añade B₂O₃ (trióxido de boro) hasta un 1.5%, disminuyen ligeramente la temperatura de fusión y el coeficiente de dilatación. Al incorporar BaO (monóxido de bario) en pequeñas cantidades, disminuye la resistencia química al principio y después con rapidez; disminuye la temperatura de reblandecimiento y la dilatación térmica aumenta; la densidad crece linealmente con el aumento de BaO; el módulo de elasticidad, el índice de refracción y la duración de la fusión disminuyen ligeramente; mientras que las propiedades de elaboración se mejoran.

La determinación de la importante temperatura de reblandecimiento no se lleva a cabo la mayor parte de las veces ópticamente, sino con ayuda de un dilatómetro o también se puede determinar con la temperatura a la que empieza a alargarse una fibra de vidrio suspendida. Este método tiene la ventaja de que puede realizarse a una determinada viscosidad. Esta temperatura de reblandecimiento depende del tratamiento térmico previo. En la tabla 2.1 se ven ejemplos del intervalo de temperatura entre reblandecimiento y congelación para diferentes vidrios.

Tabla 2.1: Temperaturas de congelación y reblandecimiento para diferentes vidrios.

Tipo de vidrio	Temperatura de congelación [°C]	Temperatura de reblandecimiento [°C]
Pyrex	440	580
de botella	440-490	500-580
de borato	370	480
de cristal	350	435
de termómetro	390-450	520-540

Con esta tabla podemos poner en evidencia la influencia de la composición química en un par de propiedades de los vidrios. La figura 2.4 es un diagrama que muestra las relaciones entre los coeficientes de dilatación y las temperaturas de reblandecimiento para los vidrios cálcico-sódicos.

La vida de una superficie de un vidrio con fractura es muy corta. A causa de la rotura se originan enlaces libres por desgarramiento de los tetraedros de SiO_2 y de sus compuestos adyacentes. Incluso en el vacío, apenas se puede evitar la saturación de estos enlaces libres dispuestos espacialmente. Cuando se consigue evitar su saturación, las valencias libres se emplean en la desaparición de las grietas. Sobre tales superficies de rotura reciente, se adhiere muy fuertemente el polvo de vidrio.

Bajo la denominación de *sorción* se consideran la totalidad de las reacciones de superficie. La absorción tiene lugar en el interior y la adsorción sobre la superficie. La limpieza de la superficie con mezcla crómica aumenta en un 40% la superficie específica.

En la degasificación del vidrio a temperaturas crecientes se encuentra un máximo de pérdida de gas entre 200 y 300 °C, después sigue un mínimo entre 350 y 450 °C, y a partir de entonces se observa un rápido aumento.

Una superficie de vidrio de sílice, plana, completamente libre de agua, absorbe agua a la temperatura ambiente, primero monomolecularmente, después en una capa de grosor creciente que depende de la temperatura y de la presión de vapor. La separación de la capa monomolecular es posible únicamente a temperaturas superiores a 200 °C y bajas presiones.

Las películas de agua observadas sobre la superficie del vidrio no dependen del contenido de bases; su espesor sobre el vidrio de sílice y sobre platino es el mismo. Finalmente, el agua penetra en el interior. Se puede medir la fuerza de adsorción de una superficie vítrea si se colocan sobre ella trazas de bromuro de lauril-trimetil-amina.

El agua que se contrae lentamente indica una buena fuerza reticular con formación de una capa molecular permanente, lo cual se favorece cuanto más orientadas están las moléculas de la superficie. Dicha superficie contiene zonas hidrófilas e hidrófobas, las primeras predominan en el vidrio mientras que en los metales predominan las segundas.

Las gotas de agua son retenidas en el vidrio por los grupos hidrófilos y su expansión se estorba por los hidrófobos. El grado de mojado se reduce por los gases absorbidos. El vidrio no tiene ninguna adhesión en el aire seco.

2.2.3. Ataque químico de la superficie del vidrio.

El ataque del vidrio por agua, ácidos y especialmente por soluciones alcalinas es completamente diferente entre sí. Mientras que los dos primeros agentes disuelven, principalmente, las partes básicas existentes; la sosa destruye toda la materia vítrea. Este ataque es independiente del tiempo y de la agitación; depende de la temperatura y de la concentración, haciendo que la rotura de los enlaces Si-O-Si determinen la velocidad, seguido de la adsorción de los iones (OH)⁻; sin embargo la existencia de otros iones puede retardar el proceso.

El contacto con el agua determina la salida de iones Na⁺ del vidrio y la entrada de iones H⁺ en él, según la Ley de la Difusión. Esto no es un intercambio de iones ya que existen variaciones químicas en la materia vítrea manteniéndose la neutralidad electrónica del vidrio.

El proceso de corrosión debido a la acción del agua, comienza por la fijación de los grupos (OH)⁻ en los grupos (SiO₄)⁻ de la superficie. A esto sigue el acoplamiento de los grupos (ONa)⁻ después de la lixiviación de los álcalis, así como la fijación adicional de moléculas de agua. Esta hidrólisis conduce a formaciones estables, porque el apantallamiento y neutralización de las cargas de los iones Si⁴⁺ tienen lugar dentro de un elemento de volumen pequeño, por formación de complejos (ejemplo: $Si^{4+}O_6^{2-}H_{8-x}^+Na_x^+$). Estos complejos pueden considerarse como sales sódicas hidratadas del ácido orto-silícico, además son solubles en agua, pudiéndose difundir y no evitan un ataque posterior. Lo mismo sucede en el caso de ataque por ácidos.

La corrosión alcalina se puede disminuir adicionando aluminatos al vidrio, ya que al polimerizar los grupos silicato de la superficie con grupos aluminato da lugar a la formación de una película que evita una siguiente corrosión. El apantallamiento de los iones Si⁴⁺ se completa con una reacción de polimerización, con lo cual los iones Si⁴⁺ y Al³⁺ se unen a los iones OH⁻ y adoptan una coordinación octaédrica. La capa polimerizada impide la difusión del resto de los productos, formados después, de peso molecular más pequeño (Salmang, 1962).

La presencia de ácidos y álcalis diluidos tiene poca influencia sobre la descomposición del vidrio. En ocasiones pueden catalizarlas, como las lejías, ya que en la descomposición del vidrio queda siempre libre lejía alcalina y el ácido silícico se hace soluble; por lo que los vidrios ricos en SiO₂ y en B₂O₃ son más resistentes a los ácidos que al agua y más resistentes al agua que a los álcalis. Decimos entonces que la resistencia a la corrosión se eleva al aumentar el contenido de SiO₂.

2.2.4. Curvatura del vidrio.

La composición del vidrio cálcico-sódico que utilizamos en este proyecto es la siguiente: 67.7% de SiO_2 , 15.6% de Na_2O , 5.6% de CaO , 4.0% de MgO , 2.8% de Al_2O_3 , 2.0% de BaO , 1.5% de B_2O_3 y 0.6% de K_2O . Este es un vidrio de tipo flotado, que por las características de su fabricación, se puede contar con una superficie bastante más plana (que la de un vidrio elaborado con otros procesos) en la que se deposita la película de material reflejante.

La temperatura de reblandecimiento del vidrio flotado que se utilizó, fue determinada de la siguiente manera: se localizó en una región del diagrama de temperaturas de reblandecimiento (figura 2.4) la composición del vidrio anteriormente citada; de dicho diagrama se seleccionó un intervalo de temperaturas, el cual fue desde $530\text{ }^\circ\text{C}$ hasta $600\text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T \approx 70\text{ }^\circ\text{C}$). En ese intervalo se llevaron a cabo pruebas para la determinación de los puntos de reblandecimiento de los vidrios con los que se trabajó. Se usaron vidrios de tipo "flotado" y de tipo convencional, de diferentes tamaños de superficie, pero con el mismo espesor (3 mm).

2.3. El Proceso de Crecimiento de una Película Delgada

Según Wasa y Hayakawa (1992), cualquier tipo de proceso de deposición de películas delgadas, químico o físico, involucra tres etapas principales:

- a) Producción de los átomos, moléculas o especies iónicas apropiadas.
- b) Transporte de las especies anteriores hacia el sustrato a través del medio.
- c) Condensación sobre el sustrato.

La formación de una película delgada sólida se lleva a cabo vía nucleación y un proceso de crecimiento, el cual se describe a continuación:

1. Las especies unitarias provenientes del blanco, al impactarse sobre la superficie del sustrato pierden su velocidad (componente normal), y son físicamente adsorbidas en ella.
2. Las especies inicialmente adsorbidas no se encuentran en equilibrio térmico con la superficie del sustrato, por lo que están en movimiento constante sobre ella. En este proceso, interactúan entre ellas mismas, formando grandes agrupaciones o núcleos.

3. Los grupos o núcleos formados son termodinámicamente inestables, por lo que con el tiempo pueden tender a desorberse según los parámetros de deposición. Cuando un grupo colinda con otras especies adsorbidas y llegan a tener determinados valores de dichos parámetros antes de desorberse, estos comienzan a crecer en tamaño. Después de alcanzar un tamaño crítico seguro, el grupo de especies alcanza la estabilidad termodinámica y se dice que la barrera de nucleación ha sido superada. Este paso involucra la formación de un tamaño crítico, quimioadsorbido, estable y se le llama "etapa de nucleación".

4. El crecimiento del núcleo crítico, tanto en número como en tamaño, se da hasta que se alcanza cierto valor en la densidad de saturación de la nucleación. La densidad de nucleación y el tamaño promedio de los núcleos dependen del valor de los parámetros tales como la energía de acumulación de especies, la razón de apilamiento, las energías de activación de adsorción, la difusión térmica, la temperatura, topografía y naturaleza química del sustrato, etc.

Un núcleo puede crecer paralelamente al sustrato por difusión superficial de las especies adsorbidas, y perpendicularmente a él por apilamiento de las especies incidentes. En general, sin embargo, la razón de crecimiento lateral en esta etapa es mucho mayor que la de crecimiento perpendicular. A los núcleos en crecimiento se les llaman islas.

5. La siguiente etapa es la de *coalescencia*, en la cual las pequeñas islas comienzan a unirse unas con otras, en un intento de reducir el área superficial del sustrato. Esta tendencia a formar grandes islas termina con una aglomeración y aumenta por el incremento de la movilidad superficial de las especies adsorbidas debido a una mayor temperatura. En algunos casos, la formación de nuevos núcleos puede ocurrir en áreas recientemente expuestas como consecuencia del efecto de coalescencia.

6. Grandes islas crecen juntas, dejando canales y agujeros sin recubrir el sustrato. La estructura de la película en esta etapa cambia desde un tipo de islas discontinuas hasta un tipo de red porosa. Una película completamente continua se forma al rellenarse dichos canales y agujeros.

2.4. Consecuencias Estructurales del Proceso de Crecimiento para Películas Delgadas

La microestructura y los detalles topográficos de una película delgada hecha de un material dado, dependen de la cinética de crecimiento, de la temperatura del sustrato, de la naturaleza química, fuente y energía de las especies de impurezas, de la topografía del sustrato y del ambiente gaseoso.

Estos parámetros influyen la movilidad de adsorción de especies sobre la superficie del sustrato: energía cinética de las especies incidentes, razón de depósito, sobresaturación (ej.: el valor de la presión de vapor entre la concentración de la solución por arriba de los requerimientos de condensación a la fase sólida bajo condiciones de equilibrio termodinámico), la condensación o coeficiente de adhesión (ej.: la fracción del total de espacios adsorbidos sobre el sustrato) y el nivel de impurezas.

1. *Microestructura*: el tamaño de los granos formados durante el depósito puede crecer cuando la sobresaturación decrece y se incrementa la absorción de especies en la superficie. Cuando se tiene la suficiente energía cinética, la movilidad superficial se reduce debido a la penetración de las especies incidentes en el sustrato, resultando un tamaño de grano pequeño. Este efecto de la energía cinética de las especies impactantes sobre el tamaño de grano es más pronunciado a mayores temperaturas del sustrato; tal efecto es más significativo para películas relativamente más delgadas.
2. *Rugosidad de la superficie*: a condiciones de baja nucleación y alta sobresaturación, la densidad de los núcleos iniciales es alta y su tamaño crítico es pequeño. Una medición cuantitativa del factor de rugosidad es la razón del área real efectiva entre el área geométrica disponible.
3. *Densidad*: se puede conocer mediante la determinación del espesor de la película por métodos gravimétricos. Un comportamiento general observado en películas delgadas es el decrecimiento de la densidad con el decrecimiento del espesor.
4. *Adhesión*: la adherencia de una película sobre un sustrato depende de la naturaleza química, limpieza y de la topografía microscópica de la superficie del sustrato. Esta propiedad se mejora con valores altos de: energía cinética de las especies incidentes, energía de adsorción del depósito y densidad inicial de nucleación.

La presencia de contaminantes sobre la superficie del sustrato puede incrementar o disminuir la adhesión, dependiendo si la energía de adsorción crece o decrece respectivamente. También la adhesión de una película puede mejorarse mediante más centros de nucleación sobre el sustrato, por ejemplo, con el uso de sustratos de grano fino o sustratos precubiertos con el material adecuado. Las pérdidas de adherencia y depósitos porosos se dan bajo condiciones de sobresaturación y vacío pobre.

2.5. La Erosión Iónica para fabricar películas delgadas

La erosión de materiales mediante el bombardeo con iones positivos de gas noble es el proceso al alto vacío más antiguo para la producción de películas delgadas (Pulker, 1984). La causa de la erosión del cátodo de descarga luminosa, algunas veces como efecto indeseable, fue descubierta hace más de 200 años por Grove en 1852 en Inglaterra y Plücker en 1858 en Alemania, durante experimentos con descargas de gas.

Más tarde, en 1877, el proceso de *sputtering* en metal fue aplicado para la producción de espejos, posteriormente se utilizó para la decoración de artículos con películas de metales nobles. Alrededor de 1930, se usó para aplicaciones eléctricas con películas conductoras de oro sobre la cera del fonógrafo de Edison. A partir de 1955, esta técnica ha experimentado un renacimiento.

La Erosión Iónica se lleva a cabo cuando una superficie sólida es bombardeada con partículas energizadas, como por ejemplo iones acelerados, provocando que los átomos de dicha superficie sean desprendidos y dispersados hacia todas direcciones debido a las colisiones de dichas partículas cargadas con energía (Jiefeng, Almanza, et al. 1995).

La erosión iónica se inicia con la primera colisión entre las partículas incidentes del gas residual y los átomos de la superficie del sólido llamado "blanco", seguido de una segunda colisión, una tercera y así sucesivamente. El desplazamiento de los átomos superficiales del blanco pueden eventualmente ser más isotópicos debido a las sucesivas colisiones, hasta que finalmente los átomos se desprenden de la superficie y viajan a través del gas energizado, hasta condensarse sobre el sustrato. A esto le llamamos "*deposición por erosión iónica*" (Jiefeng, Almanza, et al. 1995).

2.5.1. Corriente Directa.

Al aplicar una diferencia de potencial entre dos electrodos que se encuentran a cierta distancia uno de otro y que están inmersos en un gas neutro a baja presión (vacío), el flujo de corriente que pasa a través de dicho gas puede ser insignificante debido a la alta resistencia eléctrica.

Si la resistencia del gas neutro es mayor que la resistencia del circuito en general, el voltaje entero cae uniformemente a través del espacio existente entre los electrodos. Pero si el cátodo es forzado a emitir algunos electrones por una fuente externa de corriente directa, el campo eléctrico existente los acelera hacia el ánodo. En su camino, estos electrones chocan con las moléculas del gas neutro y las ionizan, lo cual hace que con cada nueva colisión se emitan nuevos electrones, hasta que el número total de ellos que alcanza el ánodo es mayor que el número producido originalmente en el cátodo. Los iones que resultan de esas colisiones también son acelerados por la acción del campo eléctrico, pero en dirección del cátodo. Bajo estas condiciones una pequeña corriente fluirá entre los electrodos.

Si se aplica un voltaje lo suficientemente alto, algunos de los iones que chocan en el cátodo causarán una emisión secundaria de electrones desde la superficie del cátodo. Los electrones secundarios también son acelerados por el campo eléctrico y provocan nuevas colisiones generando más iones y electrones. Estos dos procesos de ionización, por electrones de impacto y electrones secundarios emitidos por un choque iónico, controlan la cantidad de corriente (I) que fluye a través del gas y puede describirse mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{I_0 \cdot e^{(\alpha d)}}{1 - r[e^{(\alpha d)} - 1]} \quad (\text{ecuación 2.1})$$

Donde: I --- total de corriente que llega al cátodo.

I_0 --- cantidad de corriente directa (electrones primarios) alimentada al cátodo.

α --- número de iones producidos por unidad de tiempo.

d --- distancia entre electrodos.

r --- número de electrones secundarios emitidos por los iones incidentes.

Si se eleva el voltaje entre los electrodos, el número de electrones producidos por unidad de tiempo (α) y el número de electrones secundarios emitidos por los iones incidentes (r) se incrementan, lo que hace al denominador de la ecuación anterior tender a cero, por tanto la

cantidad de corriente (I) se eleva rápidamente y tiende al infinito. En ese momento la resistencia eléctrica (o impedancia) del gas se vence produciendo ciertas manifestaciones como la formación de un "gas encendido" (halo luminoso) o descarga luminosa; a este fenómeno le llamamos "gas breakdown".

2.5.2. Regiones del Plasma.

Después de romper con la resistencia eléctrica del gas ionizado ocurre una descarga luminosa, que es cuando decimos que el gas "se encendió". En ese momento aparecen regiones diferentes y la distribución del potencial entre los dos electrodos ya no es uniforme.

La figura 2.5 es una gráfica típica del comportamiento de la descarga de CD, en ella se ven separadas claramente las diferentes regiones que se presentan en el espacio, sin embargo, en la realidad la descarga luminosa se observa como una entidad continua en la que a simple vista es difícil diferenciar cada una de las regiones que se describen a continuación (Dobrowolski y Pekelsky, 1992):

- a) *Halo Catódico*.- Es una capa luminosa muy angosta que generalmente se puede observar junto al cátodo. Este halo surge cuando los iones decaen de su estado excitado, es decir, que la luz visible emitida en esta región se debe a la pérdida de la excitación del gas neutro en la superficie del sólido bombardeada por él.
- b) *Espacio Oscuro de Crookes*.- Esta es una región muy importante para la descarga con CD, ya que en un principio el voltaje entre los electrodos es uniforme pero cuando se forma el resplandor y el gas comienza a emitir luz visible, casi todo el voltaje aparece a través de esta región; el cual acelerará los iones positivos desde la región negativa del halo luminoso hacia el cátodo, donde se lleva a cabo la emisión de electrones secundarios con una probabilidad aproximada de 0.1 a 0.05 (es decir que se deben colisionar con la superficie del cátodo alrededor de 10 a 20 iones para liberar un electrón secundario), y también son causantes de la erosión iónica del cátodo. En esta región, los electrones secundarios también son acelerados por el campo eléctrico hacia el ánodo para entrar a la región negativa del halo luminoso, su velocidad es mayor que la de los iones positivos, por lo que la densidad de electrones es menor que la densidad de los iones presentes.
- c) *Halo Negativo*.- Esta región se caracteriza por tener densidades electrónicas y iónicas casi iguales, típicamente en el intervalo de 10^9 a 10^{11} cm^{-3} . Esto se debe al tamaño del campo

eléctrico en el Espacio Oscuro de Crookes, el cual hace que los electrones lo atraviesen rápidamente y algunos de ellos alcanzan la orilla del Halo Negativo, así comienzan a producir cantidades significativas de pares ión-electrón; el predominio de la carga positiva decae rápidamente y comienza una región neutral formada por aproximadamente el mismo número de iones y electrones. En esta región los electrones ocultan a los iones, ya que estos últimos no son influenciados por la existencia de los electrodos y se mueven a través del Halo Negativo por difusión más que por la influencia del campo eléctrico. A esta región luminosa negativa se le llama "Plasma".

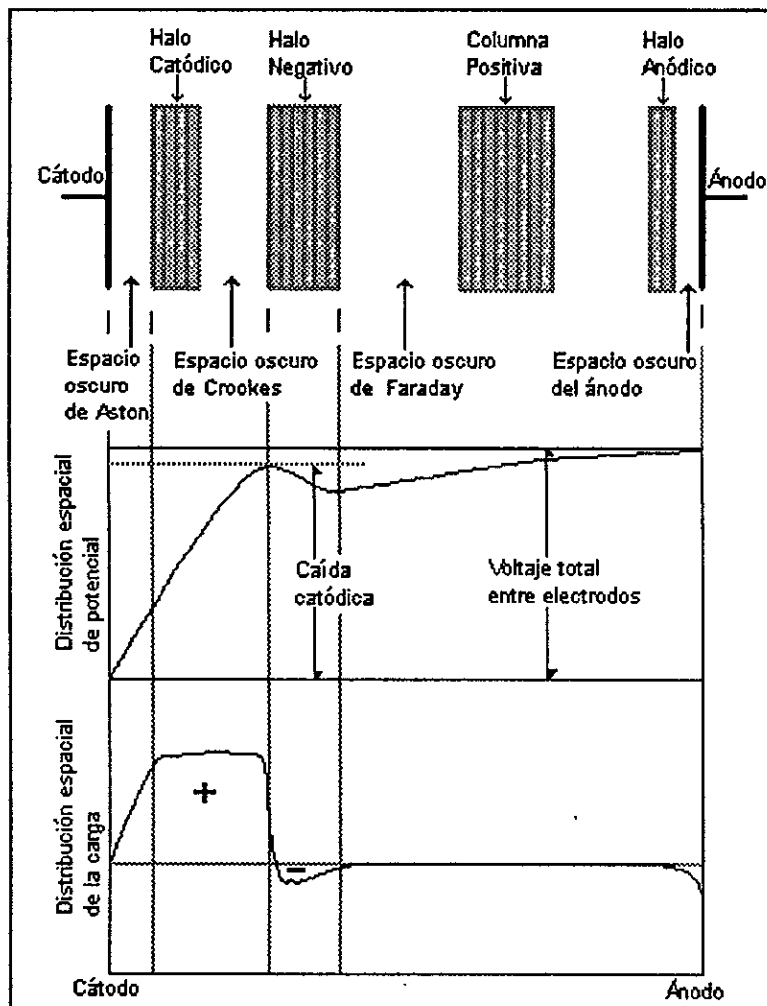


Figura 2.5: Regiones del plasma (Rosnagel, et. al,1990).

d) *Espacio Oscuro de Faraday.*- Cuando los electrones entran a la región del Halo Negativo, prácticamente poseen la totalidad de la caída de potencial del cátodo. Esta energía se pierde a través de una serie de ionizaciones sucesivas o excitaciones por colisión. Eventualmente la energía de los electrones se reduce al punto en el que ya no pueden producir iones adicionales. En la orilla más lejana del Halo Negativo, donde ya no se

produce ningún ion adicional, los electrones comienzan a acumularse, formando una región de insignificante carga negativa, en la cual los electrones no tienen la suficiente energía para causar otra ionización o excitación, por tanto es una región oscura.

- e) *Columna Positiva*. - Después de pasar a través del Espacio Oscuro de Faraday por difusión, los electrones son acelerados por un pequeño campo eléctrico local hacia el ánodo de una manera similar al descrito en la ecuación anterior pero con $r=0$. A esta región se le llama "Columna Positiva".

El Espacio Oscuro de Faraday y la región de Columna Positiva, generalmente no juegan un papel muy importante en el proceso de formación y mantenimiento del plasma (aunque son muy importantes para las descargas que son usadas como fuentes luminosas). Si el ánodo se mueve cada vez más cerca hacia el cátodo, la Columna Positiva puede apagarse y el Espacio Oscuro de Faraday puede desaparecer, en el caso de nuestro proyecto esta distancia puede oscilar entre 10 y 16 cm, sin que se presenten algún tipo de problemas.

En la figura 2.6 se observa un esquema de la dirección de las líneas del campo magnético y eléctrico en la superficie de cualquier blanco en un magnetrón plano.

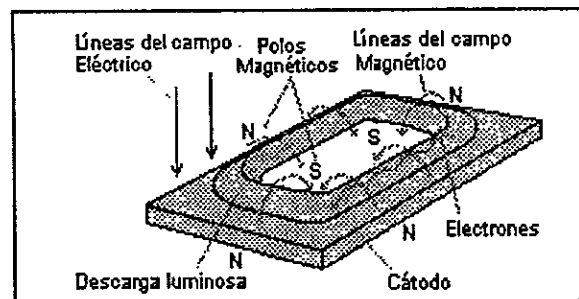


Figura 2.6: Plasma sobre el blanco de un magnetrón plano .

2.5.3. Efecto de la temperatura del sustrato durante el proceso de erosión.

La temperatura del sustrato tiene un efecto mayor sobre las propiedades de la película que cualquier otro parámetro de la evaporación. Como se esperaba, una razón de deposición rápida tiende a formar películas con baja densidad; sin embargo, este efecto es relativamente pequeño para lo usado normalmente.

Las películas de cuarzo depositadas por erosión iónica con fuente de radio frecuencia sobre un sustrato con temperaturas en alrededor de 450 °C parecen estar más compactas que las depositadas a una temperatura de casi 100 °C; lo cual se aplica para un blanco de silicio

puro que al ser evaporado reacciona con el oxígeno presente en el plasma. Lo anterior se manifiesta al comparar la posición de las bandas de absorción en el espectro de las películas hechas por erosión iónicas y las películas hechas con un método térmico-oxidante, ya que la forma de las primeras (baja temperatura) es más grande que las de las hechas a altas temperaturas. La principal diferencia se da en las bandas medias (Pliskin, et al. 1967).

2.5.4. Arcos producidos durante el proceso de erosión iónica.

La física de los arcos de plasma y su origen, ha recibido una gran atención durante los últimos 5 años. El problema físico de mayor interés, es el aumento de la ionización de un gas inmerso en un campo eléctrico, y el subsecuente agotamiento de las características aislantes de dicho gas cuando está en estado neutro, sin que éste haya alcanzado una saturación de corriente, por lo que puede conducir aún más corriente; así un plasma o una descarga luminosa se da en un gas conductor.

Un arco, es un evento local que ocurre en la cámara donde se lleva a cabo la evaporación y que es perjudicial para el proceso. Los arcos son pequeños cortocircuitos con densidades altas de energía, que tienen el efecto de una explosión en miniatura. Cuando ocurre alguno cerca de la superficie del blanco o de la superficie de la cámara de vacío, causan una pequeña fusión local del material; este material en parte es expulsado y puede dañar a la sustancia que está siendo procesada, además de acumularse sobre cualquier otra superficie. Este tipo de erosión puede contaminar al blanco así como degradar la estructura que soporta a todo el equipo (Grove, 1995). Los principales tipos de arcos son (Scholl, 1995):

- a) *Interacciones entre el plasma y el blanco:* ocurren en el espacio oscuro de Crookes cuando es "puenteado" por un flujo muy fuerte de electrones, que pudo haberse originado por el agotamiento de una región aislante sobre el blanco u otra fuente de electrones provenientes de la superficie del mismo blanco. La inversión del voltaje de dicho blanco, inmediatamente apagará estos arcos.

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

- c) *Interacciones entre el escudo del magnetrón y el sustrato*: se forma un arco entre el escudo del magnetrón y el sustrato si la diferencia de potencial entre ellos es reforzada súbitamente. Esto puede causar daño a la película depositada. Cuando ocurre un daño de este tipo con Corriente Directa se le llama "mousebite".
- d) *Interacciones entre el blanco y el escudo del magnetrón*: estos arcos se hacen cuando se tiene una baja impedancia, se pueden formar desde el blanco a tierra (usualmente con un espacio oscuro en el escudo), por un trastorno directo del gas en el espacio intervenido o por la presencia de un puente conductor como puede ser una "escama u hojuela" del material depositado. Estos arcos o cortos pueden conducir en ambas direcciones e invertir el voltaje del blanco sin que sea seguro apagarlos.

En general, los arcos son causados por partículas contaminantes que están sobre la superficie del blanco o sobre estructuras cercanas; por la contaminación aislante sobre el blanco, que algunas veces es causada por la redeposición de la corriente de vapor sobre la superficie del blanco; por irregularidades microscópicas o inclusiones dentro de la superficie del blanco u otros componentes del magnetrón que puedan ser capaces de emitir un campo; por sustancias reactivas en el gas residual, que pasan inadvertidas en la alimentación de gas o se introducen por un mal vacío dentro de la cámara, formando compuestos aislantes con el material del blanco.

2.6. La evaporación térmica para fabricar películas delgadas

El número de átomos o moléculas evaporadas de una superficie sólida o líquida depende mucho de la temperatura. Como ya se conoce, el equilibrio de la presión de vapor se puede obtener en un sistema termodinámicamente cerrado. Sin embargo, en la práctica no se llega a tal equilibrio porque el ambiente que rodea a la fuente del vapor, actúa como un desvaporizador. Los átomos evaporados se condensan en cualquier parte que este a menor temperatura que la fuente de vapor. Con tales consideraciones se formuló una ecuación que expresa la razón de evaporación molecular con respecto al tiempo (Wasa y Hayakawa, 1992):

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dN}{dt} = \alpha_e \left(\frac{P_e - P_h}{\sqrt{2\pi \cdot m \cdot k \cdot T}} \right) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde: dN --- número de átomos evaporados
 A --- área superficial [cm^2]

- t --- tiempo [s]
- α_e --- coeficiente de evaporación
- p_0 --- presión hidrostática [Torr]
- m --- masa atómica [g/gmol]
- k --- constante de Boltzmann [J/K]
- T --- Temperatura [K]

Existen varios métodos para llevar a cabo una evaporación; el escoger alguno depende principalmente del tipo de material utilizado y de la pureza requerida para la película a fabricar, además, en la práctica también influye el tipo de instalación disponible y los equipos con los que se cuenta.

Todos los métodos de evaporación térmica requieren de una presión mínima de 1×10^{-3} Pa (1×10^{-5} mbar), y solamente en el caso de algunos materiales se permiten presiones en una magnitud mayor. Los principales métodos son:

- Calentamiento directo con resistencia.
- Calentamiento indirecto con resistencia.
- Calentamiento con haz de electrones (cañón de electrones).
- Cañón de deflexión.
- Cañón de telefoco.
- Calentamiento con laser.
- Calentamiento con alta frecuencia.
- Técnicas *flash*.
- Evaporación continua.

Para los propósitos de este proyecto se cuenta con una presión mínima de 4×10^{-3} Pa (4×10^{-5} mbar), la cual es suficiente para evaporar aluminio. A continuación se describen de manera muy general los dos primeros métodos de la lista.

- a) La evaporación por calentamiento directo se lleva a cabo mediante una sublimación del material en forma de barra o cable sujetado entre dos electrodos, por lo que se calienta en forma directa debido al flujo de corriente. Esta técnica se utiliza rara vez en materiales como C, Fe, Ti y Rh.

b) El Calentamiento indirecto con resistencia, es un método más común. La sublimación del material se lleva a cabo en un contenedor hecho de Mo, Ta, W o C, que puede tener forma de tira, rizo, bote, etc. En algunas ocasiones se utilizan recipientes cerámicos hechos de Al_2O_3 y BeO, BN o BN/TiB₂. El contenedor se calienta por medio del flujo de corriente eléctrica y transfiere el calor para sublimar o evaporar el material. Se pueden llevar a cabo reacciones químicas durante la evaporación, éstas pueden llegar a ser indeseables cuando contaminan la película formada.

Uno de los métodos de evaporación más usados, es el de calor por radiación, cuya fuente es generalmente una resistencia de tungsteno en forma de espiral, sobre la cual se monta el material a evaporar, por lo que debe ser un material con punto de fusión relativamente bajo.

En la figura 2.7 se muestra un esquema del montaje de un filamento de W sobre dos barras de material conductor (por ejemplo cobre). Dichos electrodos se conectan a la fuente de alimentación de energía, dentro de una cámara a una presión máxima de 5.5×10^{-5} mbar.

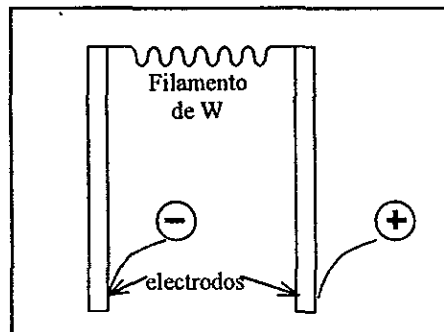


Figura 2.7: Esquema del montaje de filamento sobre dos electrodos.

CAPÍTULO III

MÉTODO EXPERIMENTAL

En este capítulo se realiza la descripción de los objetivos del proyecto, de las especificaciones técnicas, el funcionamiento de cada uno de los equipos utilizados en el proyecto, y se describe el método experimental implementado, tanto en el laboratorio de Implantación de Iones perteneciente al Instituto de Física como en la Planta Termosolar perteneciente al Instituto de Ingeniería, ambas dependencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

3.1 *Objetivos del proyecto*

- El objetivo principal es construir espejos de aluminio de primera superficie con un perfil parabólico, para los concentradores de la planta termosolar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, sobre sustratos de vidrio comercial cal-sosa flotados de 3 mm de espesor.
- Tales espejos se desarrollarán mediante la tecnología de erosión iónica al alto vacío con magnetrón plano, y con la posibilidad de usar la técnica de evaporación con filamento para la fabricación de la película reflejante.
- La vida útil de los espejos debe ser de al menos 10 años y con una reflejancia mínima de 0.85.; además se montarán en campo para quedar expuestos a las condiciones atmosféricas de la Ciudad de México.
- Para la construcción de los espejos se utilizarán materiales accesibles en México y de bajo precio; además se determinará su costo de fabricación como proyecto experimental

3.2 Descripción del equipo

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, la técnica de depósito para la fabricación de películas delgadas que se empleó en este proyecto fue la de "Erosión Iónica con Magnetron Plano" (*Planar Magnetron Sputtering*); la cual requiere de equipos de laboratorio complejos, por lo que para describirla los equipos se agrupan en diferentes sistemas según la función que desempeñan, éstos son:

- Sistema de doblado de vidrio.
- Sistema de limpieza.
- Sistema de bombeo o vacío.
- Sistema de erosión iónica o "*sputtering*".
- Sistema de control de presión.
- Sistema de movimiento mecánico.

Además, se cuenta con los equipos de control de calidad usados para probar, bajo condiciones normales y extremas de operación, el desempeño de cada espejo elaborado; éstos son: una cámara de intemperismo, un medidor de reflejancia, un medidor de energía solar (piranómetro) y un multímetro para medir la concentración de los espejos.

Todos ellos son necesarios para la fabricación de los espejos de primera superficie aplicables al aprovechamiento de la energía solar, con miras a una producción industrial por medio de la tecnología de Erosión Iónica.

3.2.1 Sistema de doblado de vidrio.

El desarrollo de este proyecto comenzó a partir de vidrios planos comerciales, y un molde hecho en los inicios de construcción de la planta termosolar del la UNAM. Tal molde sirvió como modelo para la fabricación de dos moldes más pequeños.

El molde inicial estaba hecho de madera con una superficie de lámina de acero inoxidable de 2 mm de espesor, fue fabricado por un experto carpintero y técnicos que comprobaron la buena curvatura de este molde.

Los moldes pequeños fueron hechos para este proyecto con un material que no se deformara en el momento de fraguar y que aguantara una temperatura de 600 °C sin romperse, tal material fue Masa-roca.

Para el calentamiento del vidrio se modificó un horno donado por la CFE hace 25 años, al cual se le adicionó material aislante de fibra cerámica, un control electrónico de temperatura y nueve resistencias de 750 W cada una, de tal forma que la temperatura máxima fue de 700 °C con un control de ± 12 °C. Las medidas de este horno fueron 70 cm de frente x 72 cm de profundidad x 72 cm de alto. Además se fabricó un soporte con ángulo de hierro de 1.3 cm (1/2") de ancho para mantener los dos moldes dentro del horno.

3.2.2 Sistema de limpieza.

Al abrir la cámara de vacío entra aire atmosférico, que contiene muchas impurezas y humedad, las que se adsorben sobre la superficie de metal de la cámara y en el resto de los equipos que en ella se encuentran, por lo que es necesario aplicar algún tipo de limpieza que disminuya la cantidad de partículas indeseables. Para ello se usa un cátodo para descarga luminosa, que está hecho con una barra circular de aluminio de 90 cm de diámetro, la cual se suspende en el interior de la cámara sin que haga contacto con ella ni con ninguno de los equipos. Para sujetarla se aísla con un material cerámico que se sostiene desde la boquilla #6 (figura 3.1). La alimentación de energía eléctrica se hace por medio de una fuente de corriente directa de alto voltaje fabricada en el Instituto de Física con una capacidad máxima de 5000 volts y 1 ampere.

Al activar la fuente de potencia con una presión mínima necesaria de 1.3 Pa (10 μ m Hg) en el interior de la cámara, ioniza las moléculas de gas, de tal forma que se genera un plasma con la finalidad de bombardear la superficie de todo lo que se encuentre dentro de la cámara de vacío, desorbiendo las moléculas que están ocluidas sobre dichas superficies. Este sistema se pone en funcionamiento antes de cada evaporación, típicamente a 3,000 V y 0.5 A. durante 20 minutos.

3.2.3 Sistema de Erosión Iónica.

Para llevar a cabo la evaporación de un material por medio del método de Erosión Iónica (*sputtering*) se requiere de una presión especial denominada como "alto vacío", por lo que se usa un recipiente completamente sellado que es la Cámara de Vacío (figura 3.1); también se necesita equipo para proporcionar la energía suficiente que provoque la ionización del gas dentro de la cámara y con ello se lleve a cabo la erosión del material a evaporar, tales equipos son: una fuente de corriente directa y una fuente de radio frecuencia; cada una de ellas se conectan a unos equipos llamados magnetrones (figura 3.2); en uno de ellos está montada

una placa del material reflejante (Al) y en el otro una placa del material protector (SiO_2). Para controlar el espesor de cada una de las películas que se depositan sobre el sustrato, se cuenta con un medidor de espesores, el cual proporciona información únicamente como referencia preliminar durante el proceso de erosión debido a que el sustrato está en constante movimiento. A continuación se describen cada uno de los equipos mencionados:

a) Cámara de Vacío.

Es un tanque horizontal (figura 3.1) de acero al carbón con 15 mm de espesor sin recubrimiento interno y de fabricación nacional. Tiene un diámetro interno de 1.35 m y una longitud total de 1.55 m, por lo que su volumen es aproximadamente de 2.2 m^3 . Cuenta con 11 boquillas a través de las cuales se introducen todas las conexiones necesarias para llevar a cabo la fabricación de los espejos; una de las boquillas es de 50 cm de diámetro, la cual se une por medio de una brida a la bomba de difusión.

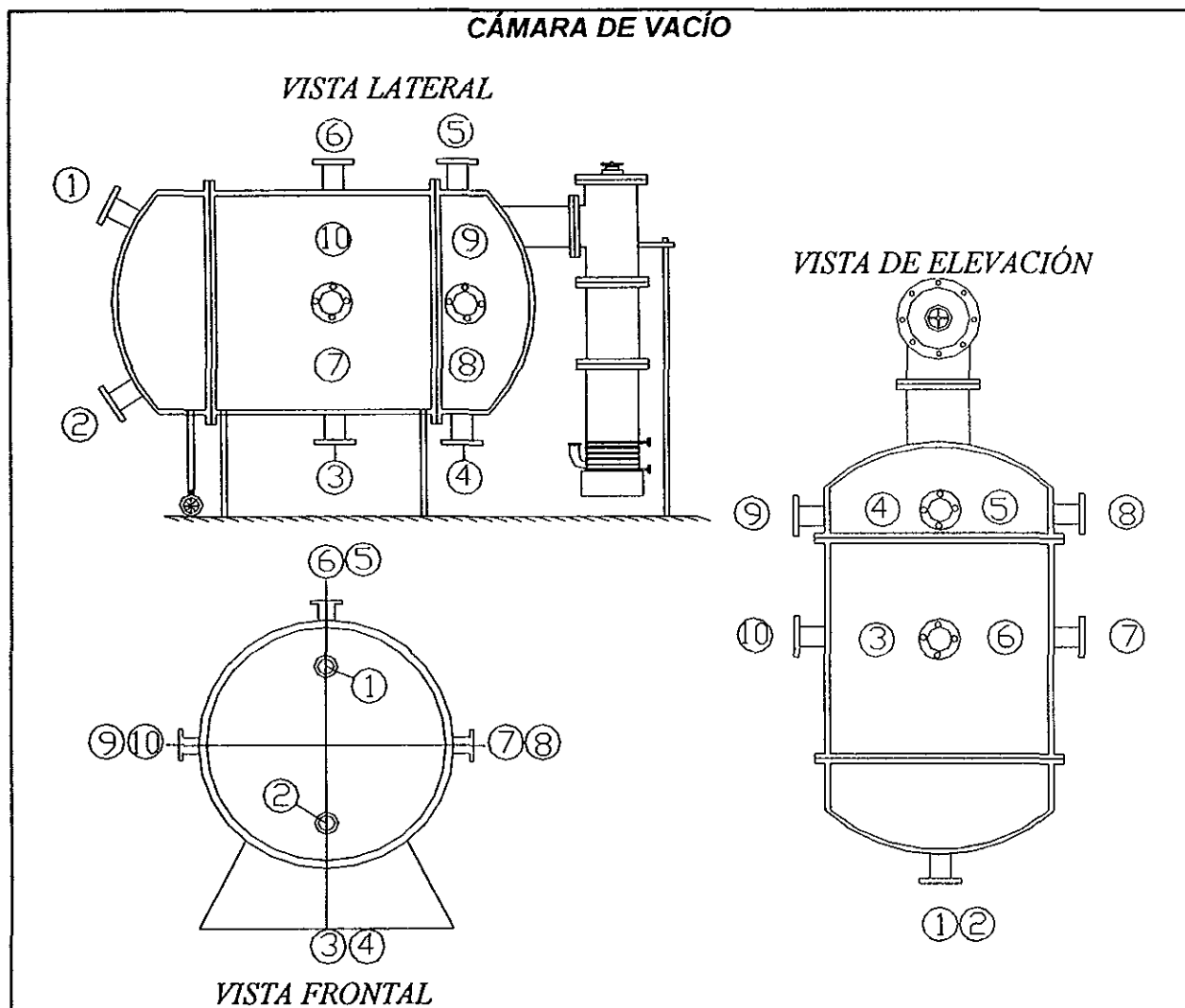


Figura 3.1: Esquema de la Cámara de Vacío. Vista frontal, lateral y de elevación

Tabla 3.1: Descripción de las boquillas de la Cámara de Evaporación.

No. de Boquilla	Diámetro (cm)	Longitud del cuello (cm)	Función
1	11	15	- Mirilla de observación
2	11	2	- Mirilla de observación
3	11	2	- Conexión para el sistema de movimiento
4	11	15	- Válvula #3 para la bomba rotatoria de pre-vacío
5	11	2	- Entrada y salida de la línea de agua de enfriamiento para el serpentín de la placa de cobre
6	11	15	- Conexión de energía para el cátodo de limpieza
7	11	15	- Ninguna
8	16	15	- Censores para los medidores de presión - Entrada de la línea de gas inerte para magnetrones - Válvula de aguja para entrada de aire
9	11	2	- Conexión para el medidor de espesores
10	16	15	- Alimentación de energía para los magnetrones - Entrada y salida de las líneas de agua de enfriamiento para los magnetrones

Las boquillas 1 y 2 sirven como mirillas ya que tienen instalado un vidrio circular cuyo espesor es suficiente para mantener el diferencial de presión entre el interior y exterior de la cámara sin que se corra riesgo alguno de ruptura. Estas mirillas son muy útiles para observar el color del plasma y en general todo el funcionamiento del equipo que está dentro del tanque.

El acceso a su interior se hace a través de una de las tapas, la cual cuenta con una bisagra y una rueda de apoyo para moverla a modo de puerta; ésta se cierra con dos pernos de 15.8 mm (5/8"), como comentario adicional se requiere de dos personas para poder cerrar dicha tapa, ya que debido al aro-sello (*o-ring*) de vitón que hace el sello de la puerta se impide que se cierre con facilidad. Una vez hecho algo de vacío, es imposible abrir la cámara sin que haya una entrada previa de aire para igualar la presión interna con la externa, para ello se tiene una válvula de aguja en la boquilla no. 7.

b) Fuente de Corriente Directa.

Se utilizó una fuente de corriente directa de la marca *Advanced Energy*, modelo MDX-1.5k; cuyas especificaciones eléctricas son: potencia máxima de salida 1500 W; voltaje de salida 1600 V (en voltaje de choque); voltaje de ignición (del plasma al alto vacío) 900 V, 1200 V; alimentación 208/220 V de corriente alterna, 50/60 Hz \pm 10%, 13.4 A; factor de potencia de 0.6; impedancia estándar; regulación 0.2% de variación; tiempo de suministro de la magnitud

de control 1 a 10 segundos o 1 a 10 minutos. Especificaciones físicas: 175.3 mm (alto) x 266.7 mm (ancho) x 400 mm (largo); peso de 8.6 kg.

Esta fuente tiene un circuito supresor de arcos (*Arc-Out™*), el cual proporciona múltiples niveles de eliminación y amortiguamiento para varios tipos de arcos en el ambiente del magnetrón. Este circuito en conjunto con la baja energía almacenada a la salida ha demostrado muy buenos rendimientos para la fabricación de películas de Aluminio.

La energía de salida de esta fuente se puede regular de tres maneras: voltaje constante, corriente constante o potencia constante, lo que la hace muy versátil para el manejo. Su uso se limita exclusivamente para la erosión iónica de materiales conductores, que en este caso fue Aluminio. Además, cuenta con un interruptor térmico en caso de que se sobrecaliente; ya que usa aire como refrigerante, cuyas condiciones de temperatura deben ser mínimo 0 °C y máximo 35 °C, con una humedad relativa que este dentro del intervalo de 15 a 85 %.

c) Fuente de Radio Frecuencia.

Se utilizó una fuente marca *Advanced Energy*, modelo RFXII-1250; con las siguientes especificaciones eléctricas: frecuencia de 13.56 MHz \pm 0.005%; potencia de salida máxima de 1250 W en 50 Ω , que puede regularse desde 0.5% al 100% de uno en un watt; alimentación de 220 V corriente alterna, 3 fases, 50/60 Hz y 12 A. Especificaciones físicas: 267 mm (alto) x 483 mm (largo) x 177 mm (ancho); peso de 15.9 kg. Utiliza agua como refrigerante con un flujo mínimo de 3.78 L/min (1 gal/min) a una temperatura máxima de 25 °C.

Este tipo de fuente puede ser usado para cualquier tipo de blanco, tanto para un material conductor como para un material dieléctrico, por lo que en este proyecto se usó para la erosión iónica de cuarzo. Cuenta con interruptores automáticos como protección interna de varios tipos, los cuales se activan por: sobrecalentamiento, sobrevoltaje, sobrecorriente, potencia reflejada muy alta y por corto circuitos. Se recomienda mantenerla muy bien refrigerada, de tal forma que se protejan los circuitos internos, además de que el tiempo de operación aumenta con potencias relativamente altas (>800 W) sin que se active el interruptor térmico.

d) Acoplador de Impedancias.

Para poder utilizar la fuente de radio frecuencia se requiere de un sintonizador o acoplador de impedancias (*Impedance-matching Network*) cuya función es transformar las características resistivas y capacitivas del plasma a valores de aproximadamente 50 Ω (figura 3.2), es decir, acopla el valor de la impedancia que predomina dentro de la cámara de vacío al valor que requiere la fuente de radio frecuencia para trabajar.

El sintonizador que se utilizó para este proyecto es de la marca *Advanced Energy* modelo AZX-10, el cual consta de dos partes: el Sintonizador y el Módulo de Control de Sintonía (MCS). El primero se monta junto a la cámara, de tal forma que quede lo más cerca del magnetrón que alimenta para optimizar la transferencia de energía, y puede controlarse a través del MCS, con otro sistema de control o también puede funcionar como una unidad automática; mientras que el segundo puede colocarse en el lugar más conveniente para el operador, de tal forma que controle debidamente al sintonizador.

El MCS cuenta con una función llamada "valor predeterminado" y otra llamada "micro barrido" (*Microsweep®*), que al trabajar juntas garantizan los tiempos más pequeños de sintonizado. La primer función obliga a los capacitores a permanecer en una posición predeterminada en la cual el plasma no se altere. Mientras que la segunda, compensa las pequeñas variaciones de impedancia que se dan dentro de la cámara de vacío; si el plasma no enciende con la función de valor predeterminado, la función de micro barrido hace variar la posición del capacitor hasta caer dentro del pequeño intervalo de valores que hacen encender dicho plasma.

El MCS asegura una transferencia suave del modo manual al automático; es decir, mantiene constante la posición del capacitor mientras se acciona el interruptor de cambio de modo, con el fin de reducir el desgaste del capacitor. La pantalla de esta parte del acoplador proporciona la siguiente información: DC bias, picos de RF, punto predeterminado en serie y desviado, etc.

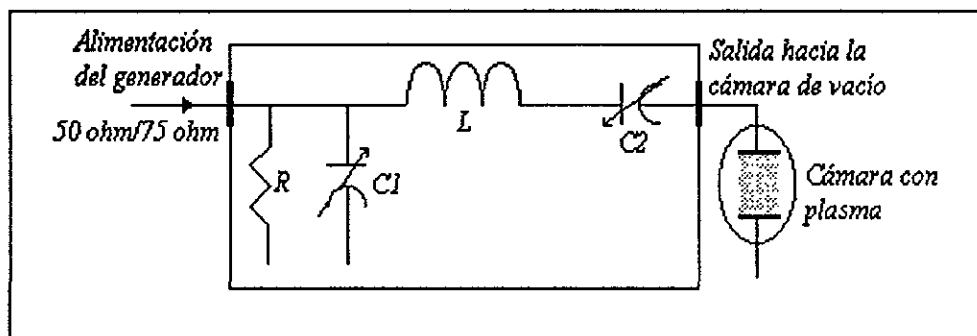


Figura 3.2: Esquema de un acoplador de impedancias simple.

Las especificaciones generales del MCS son: alimentación de 110/220 V ca $\pm 10\%$, 50/60 Hz, una fase, 450 mA máximo; intervalo del *Microsweep®* $\pm 10\%$; tamaño de 178 mm (alto) x 216 mm (ancho) x 389 mm (largo).

Las especificaciones generales del Sintonizador son: desempeño de hasta 100 kVA; potencia reflejada menor al 1% del intervalo entre 150 W a 2500 W; frecuencia de 13.56 MHz;

potencia de entrada para el control de 24 V, 2 A; tiempo típico de sintonización de un segundo; peso de 9.1 kg; tamaño de 152 mm (alto) x 241 mm (ancho) x 399 mm (largo); todo el sistema requiere agua de enfriamiento con un flujo mínimo de 75.7 L/h (20 gal/h) a una temperatura máxima de 27 °C.

e) *Magnetron.*

Se utilizaron dos magnetrones planos rectangulares como cátodos del tipo "Sunsource", de la marca *Materials Science*. Cuyas especificaciones son:

Espesor del blanco: para materiales magnéticamente no permeables, se pueden usar blancos con espesor de 1.3 a 1.9 cm (0.5" a 0.75"). Para materiales permeables, se debe tener un espesor mínimo de 0.5 cm (0.2").

Fuerza del campo magnético: es muy importante que se mantenga un campo magnético uniforme sobre toda el área de erosión, el perfil magnético de cada magnetron debe ser dado por el fabricante. Un sobrecalentamiento o lesión física del módulo magnético hace que el desempeño del imán disminuya.

El valor del campo magnético medido sobre la superficie de un blanco no permeable de 1.3 cm de espesor, generalmente es de 0.03 Tesla (300 Gauss); este campo debe ser uniforme con una diferencia máxima entre dos puntos cualquiera de $\pm 5\%$, sobre el área de erosión puestos en una misma línea a los lados de un eje de simetría; también, la uniformidad debe ser $\pm 10\%$ entre dos puntos que estén dentro del mismo radio dentro de los extremos del área de erosión.

Intervalo de presión: La presión máxima de trabajo es de 133 Pa (1 Torr), sin embargo, la mejor eficiencia de trabajo de un magnetron se da alrededor de 2.7 Pa (2×10^{-2} Torr) o menos con gas argón. La presión mínima de trabajo, es la presión a la que se da el halo luminoso con un blanco enfriado directamente de 9.53 mm (0.375") de espesor y son 6.7×10^{-2} Pa (5×10^{-4} Torr).

Presión mínima del sistema: Para poder trabajar con magnetrones de este tipo se recomienda llegar a una presión de vacío cercana a 6.7×10^{-7} Pa (5×10^{-9} Torr); sin embargo, esto depende de la capacidad del sistema de vacío con el que se trabaje.

Agua de enfriamiento: La temperatura de entrada puede ser la temperatura ambiente, pero la temperatura de salida no debe ser mayor a 60 °C; el flujo debe ser de 1 galón por minuto por cada 5 kW de potencia suministrada; la presión del agua debe ser como máximo de 2.44 kg/cm² (34.7 psia); el pH debe estar en el intervalo de 6 a 8; la resistividad debe ser mayor o igual a 50 k Ω . El agua se conduce a través de dos mangueras externas de 3/8", dos tubos de conexión de 3/8", y tres tubos internos de la misma medida.

Materiales de construcción: La siguiente tabla muestra los materiales con los que están hechas las diferentes partes que componen a un magnetrón.

Tabla 3.2: Materiales de construcción de los magnetrones.

Parte del magnetrón	Material de construcción
Cuerpo del cátodo	Cobre OFHC
Sujetadores del blanco	Acero AISI 304
Placa de soporte del blanco	Acero estándar AISI
Aislantes	Teflón
Aro-sellos	Vitón
Imanes	Aleación de Nd-Fe-B (Neodimio-Hierro-Boro), encapsulados en una densa resina epóxica de alta duración
Conexiones de mangueras	Latón
Líneas de agua	Polipropileno
Escudo exterior	Acero AISI 304
Pestaña de ajuste del escudo	Acero AISI 304

De los dos magnetrones, uno fue para la erosión iónica de Aluminio y el otro para la erosión iónica de cuarzo (SiO_2) (figura 3.3). El magnetrón con blanco de cuarzo tiene como soporte de éste una placa de cobre totalmente adherida, con el fin de compensar la poca conductividad térmica y eléctrica del SiO_2 , también le sirve para mejorar su resistencia mecánica a esfuerzos producidos cuando se fija al cuerpo del magnetrón, así como cuando se calienta y/o enfría (figura 3.4). Los blancos deben de tener un excelente contacto con la placa de respaldo para lograr una conductividad térmica y eléctrica uniforme en toda su masa; lo cual se logra aplicando un pegamento especial que conduce el calor y la electricidad. Ambos blancos tienen una superficie de 127 x 254 mm (5" x 10"), el blanco de aluminio utilizado tuvo un espesor de 12.7 mm (0.5"), mientras que el de cuarzo fue de 6.35 mm (0.25").

La parte frontal del escudo es un marco de acero sujeto con tornillos para ajustar la distancia con respecto al blanco; ya que según sea el material a erosionar así será la distancia de dicho marco; en general, ésta puede estar en el intervalo de 1 a 7 mm. Si está mal ajustada o no uniforme, se favorece la formación de arcos y por tanto habrá inestabilidad en el plasma. Para el caso específico del aluminio se recomiendan 4 mm y para el cuarzo 6 mm.

Los imanes permanentes son extremadamente sensibles a la corrosión cuando son expuestos al agua o aire; por lo que nunca se debe dañar o tratar de penetrar la cubierta epóxica de protección que se encuentra alrededor de la cámara en la que están los imanes. La conexión de la alimentación de energía al magnetrón con blanco de cuarzo se hace a través de un tubo de cobre recubierto con plata, que en uno de los extremos tiene soldado un tornillo y en el otro un agujero en forma de zapata; mientras que la conexión del magnetrón con blanco de aluminio se hace con un cable coaxial de 50Ω rodeado de una malla de hierro; dicho cable tiene una zapata para fijarlo al magnetrón y una conexión de presión que se conecta a la fuente de CD.

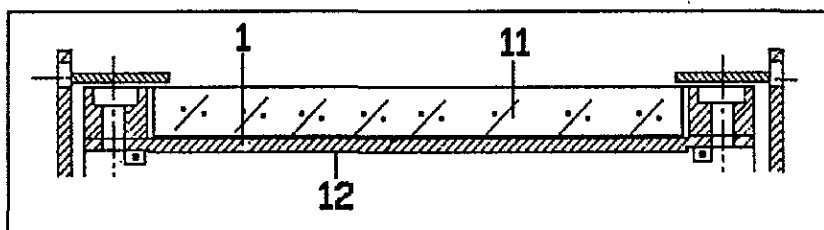


Figura 3.3: Parte superior del Magnetrón con blanco de Cuarzo (SiO_2).

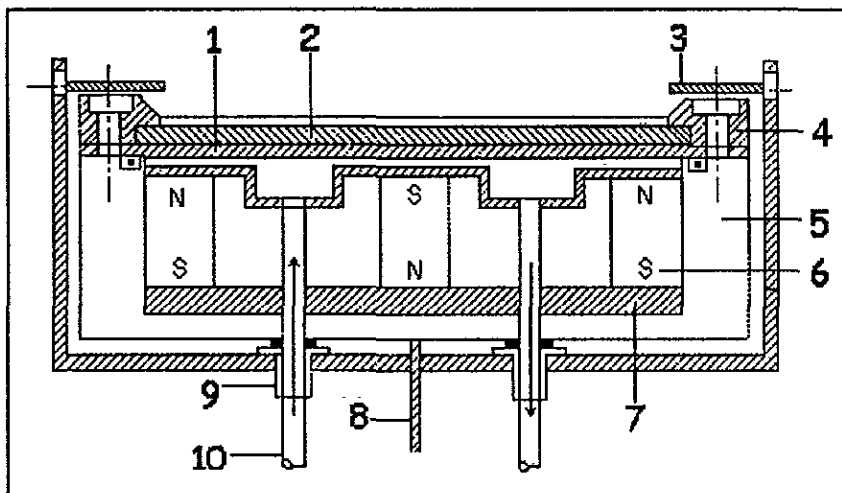


Figura 3.4: Magnetrón completo con blanco de Aluminio.

Donde:

- | | |
|---|--|
| 1.- Placa de soporte del blanco. | 7.- Placa de Hierro. |
| 2.- Blanco de Aluminio
(material conductor). | 8.- Conexión a la fuente de poder. |
| 3.- Escudo. | 9.- Aislante. |
| 4.- Sujetador del blanco. | 10.- Agua de enfriamiento. |
| 5.- Cuerpo del Magnetrón. | 11.- Blanco de Cuarzo
(material dieléctrico). |
| 6.- Imanes permanentes. | 12.- Adhesivo conductor de calor. |

f) Medidor de Espesores.

Se usó un aparato marca Kronos, modelo QM-301, consta de dos partes: el detector de espesores, que posee una fina membrana de cuarzo cubierta con una película de oro cuya función es servir como detector del material evaporado; dicha membrana funciona a partir de oscilaciones que se convierten en impulsos eléctricos, ya que tiene incorporado un oscilador para hacerla vibrar, y según se deposita material sobre dicha membrana, éste hace que la frecuencia de oscilación cambie y por tanto también cambia el impulso eléctrico que se manda al exterior, de tal forma que en la pantalla se despliega el resultado; requiere de agua de enfriamiento a una temperatura máxima de 25 °C.

El cable de salida de la membrana sale de la cámara de vacío y se conecta a un aparato que se encarga de traducir la señal generada durante la evaporación, de tal forma que en la pantalla se da un valor en kÅ.

Debido a que el medidor de espesores tiene una posición fija y el sustrato se mueve constantemente, tal información solamente proporciona un valor aproximado de cuánto es el espesor sobre el vidrio; es decir, el medidor de espesores nos da una idea de cuánto material se ha depositado sobre la superficie del sustrato para formar la capa reflejante y protectora de un espejo de primera superficie.

Cuando en la pantalla hay una indicación de que la lectura se salió del intervalo de medición, quiere decir que la membrana detectora se saturó con el material depositado, por lo que se debe cambiar por una nueva.

3.2.4 Sistema de bombeo o generador de vacío.

Este sistema se debe escoger con base al tamaño de la cámara de vacío, de la presión que se requiere y de la velocidad de extracción de los gases. El sistema escogido debe ser capaz de mantener la presión de operación por un tiempo relativamente grande, con un bajo costo de operación y un fácil mantenimiento.

Para poder obtener una presión lo suficientemente baja, la extracción del aire dentro de la cámara se hizo en dos etapas: una de pre-vacío y otra de alto vacío. Entre los principales sistemas de bombeo de pre-vacío o medio y bajo vacío se encuentran las bombas de tipo centrífugas de etapas múltiples, las rotatorias con sello de agua, las de movimiento alternativo o bombas de vacío seco y las rotatorias con sello de aceite. Para los sistemas de alto vacío se utilizan bombas de difusión, iónicas, de sublimación, turbomoleculares y criogénicas.

a) Bomba mecánica rotatoria para pre-vacío.

Para hacer el prevacío se utilizó una Bomba Rotatoria de Desplazamiento Positivo con sellos de aceite, ésta permite evacuar el gas del interior de la cámara directamente a la atmósfera hasta lograr una presión de 1.3 Pa (1.3×10^{-2} mbar). En ella, el desplazamiento del gas se produce debido a la rotación de uno o más miembros dentro de una caja estacionaria, estos miembros pueden ser paletas o alabes que giran muy cerca de dicha caja en un punto determinado, por lo que a cada ciclo de las paletas, un volumen de gas del sistema se expande y es atrapado en una cámara dentro de la bomba, se comprime por el movimiento de las paletas y se elimina por una válvula de descarga.

En este proyecto se utilizó una bomba de desplazamiento positivo con sellos de aceite marca Sargent Welch, modelo 1397, impulsada por un motor eléctrico monofásico de 754 W (1 hp) y una capacidad de 500 L/min; con ella se alcanzó la presión de 1.3 Pa (1.3×10^{-2} mbar) en aproximadamente 1.5 horas, sólo si el interior de la cámara de vacío no había estado expuesto al ambiente durante más de 12 horas.

La conexión a la cámara de vacío cuenta con dos líneas para su funcionamiento; la primera está conectada a la boquilla #4 (figura 3.1) de la cámara de vacío en la cual hay una válvula de plato (válvula 3) de 100 mm de diámetro; mientras que la segunda línea está conectada a la bomba de difusión, de tal forma que la bomba mecánica servía para el desalojo de los gases extraídos por la bomba de difusión.

b) Bomba de difusión para alto vacío.

La bomba de difusión cuenta con un depósito de aceite cuya característica principal es su muy baja presión de vapor, por lo que tiene integradas unas resistencias de calentamiento. De tal forma que hacen hervir al aceite dentro del depósito; éste sube a través de conductos especiales hasta la parte superior de la bomba, cuya salida son unas toberas en las que el vapor de aceite se eyecta a alta velocidad en dirección descendente a través de chorros múltiples, impulsando hacia abajo a las moléculas de aire provenientes del interior de la cámara de vacío. Posteriormente, dicho vapor se condensa al entrar en contacto con diversas superficies frías tales como la pared de la bomba, la cual tiene un enfriamiento permanente con agua que circula dentro de tubos de cobre en forma de espiral. Las moléculas del gas que se quieren expulsar pasan a través de una serie de rejillas que impiden su regreso (figura 3.5) y son retiradas de la línea de descarga mediante una bomba auxiliar, que en este caso es la Bomba Rotatoria con sellos de aceite que se usa para el pre-vacío.

El máximo vacío que se puede alcanzar depende, hasta cierto punto, de la presión de vapor del líquido de la bomba y de la temperatura de las superficies de condensación. Para

aumentar la eficiencia de condensación de nuestra bomba de difusión, se colocó una trampa fría basada en nitrógeno líquido, entre ella y la cámara de vacío. Esto funciona ya que a medida que la temperatura de enfriamiento disminuye se reduce el retorno de las moléculas de gas hacia la cámara de vacío, haciendo que éstas alcancen una temperatura cercana a su punto de condensación. De esta manera se pueden alcanzar presiones muy por debajo de la presión de vapor del líquido de la bomba; así, en nuestro equipo se pudieron lograr presiones de hasta 10^{-4} Pa.

Los líquidos usados para las bombas de difusión son el mercurio y aceites de baja presión de vapor; entre ellos se encuentran aquellos hechos a base de compuestos siliconados, cuya molécula es muy estable a alta temperatura y lo suficientemente pesada como para lograr transferir el momentum mínimo a las moléculas de gas que se quieren desechar, de tal forma que alcanzan la velocidad mínima de expulsión. Además, no son tóxicos y no reaccionan con los materiales usados para la construcción de los sistemas de vacío; sin embargo, hay que tener mucho cuidado de no ponerlos en contacto con sustancias oxidantes a altas temperaturas, porque se degradan rápidamente provocando una gran pérdida debido a su alto precio.

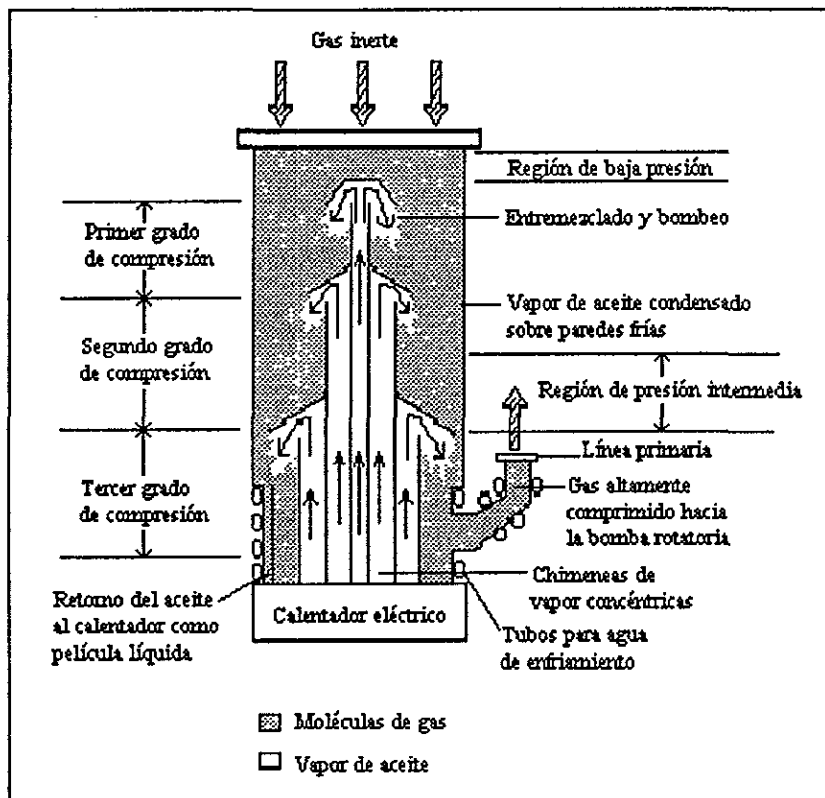


Figura 3.5: Esquema de una bomba de difusión.

La bomba de difusión utilizada en este proyecto era marca Leybold, con una capacidad de 4000 L/s; usaba aceite siliconado de baja presión de vapor tipo DG 704 marca Varian especial para alto vacío. Con él alcanzamos a mantener una presión absoluta mínima constante de 10^{-3} Pa. Para sellar la entrada a esta bomba se cuenta con dos válvulas de plato, una (válvula 2) se localiza en el conducto que se conecta con la cámara de vacío y la otra (válvula 1) se localiza en la línea que se conecta con la bomba rotatoria con sello de aceite.

3.2.5 Sistema de control de presión.

La presión es una de las propiedades que más fácilmente se pueden medir de un gas. En términos generales, es la magnitud de la fuerza normal o perpendicular que actúa sobre un área determinada de la superficie del fluido, por lo que la fuerza que éste ejerce sobre las paredes del recipiente que lo contiene siempre será perpendicular y en todas direcciones. La unidad utilizada en el Sistema Internacional es el Pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ bar}$).

Cuando las moléculas que se encuentran en el interior de un recipiente ejercen una fuerza normal contra sus paredes menor que la fuerza ejercida por las moléculas del exterior, se dice que el recipiente está al vacío; en otras palabras, podemos decir que el vacío se da cuando el interior de un recipiente se encuentra a una presión menor que la atmosférica.

a) Indicadores de presión.

La presión en el interior de la cámara de vacío se registró con un medidor analógico marca Pennwalt Corp., modelo TB-3, cuyo intervalo de medición va desde la presión atmosférica de 75.5 kPa, hasta 1.3 Pa; sin embargo, para los requerimientos de este proyecto no fue suficiente. Cuando la presión llegaba a 1.3 Pa entraba en funcionamiento un medidor digital de cátodo frío cuyo intervalo de medición va desde 2 hasta 1×10^{-4} Pa.

Los sensores de ambos medidores de presión se colocaron en la boquilla #8 (figura 3.1). En esta misma boquilla estaba instalada una válvula de aguja cuya función era el llenado de la cámara de vacío con aire para el momento que se quiera cambiar un vidrio; también por este mismo orificio ingresaba la línea de alimentación de gas que se conectaba a los magnetrones.

b) Gases utilizados y su infraestructura.

Para llevar a cabo la erosión iónica del Aluminio y Cuarzo se requieren condiciones de presión muy específicas. Una de estas condiciones es el vacío máximo disponible (presión mínima permitida por el sistema), ya que según sea su valor así será la pureza de los gases que pueden alimentarse para la formación del plasma.

Después de alcanzar el vacío máximo permisible con la bomba de difusión (alrededor de 1×10^{-3} Pa) se inyecta argón como gas inerte con el que se hace el control de presión durante todo el proceso de fabricación del espejo. Adicionalmente, se usa una fracción de oxígeno exclusivamente para el depósito de la película de cuarzo.

Los gases utilizados para este proceso requieren una infraestructura mínima necesaria, por lo que a continuación se menciona la usada para este proyecto:

- Un tanque de 14 litros con argón grado cromatográfico, marca Linde, con una pureza mínima de 99.998 %; presión inicial de 13790 kPa.
- Un tanque de 14 litros con oxígeno grado UAP SD (ultra alta pureza), marca Linde, con una pureza mínima de 99.8 %; presión inicial de 13790 kPa.
- Un tanque esférico de 0.61 litros de volumen que soporta una presión máxima de 12257 kPa (125 kg/cm^2); en él se hace la mezcla de los gases mencionados anteriormente.
- Mangueras especiales de teflón para alta presión o para vacío que funcionan como líneas de conducción de los gases.

Cada tanque cuenta con un regulador de presión y a la salida de cada uno de ellos se colocó una válvula de paso con el fin de cortar el suministro de gas en caso de emergencia. Adicionalmente, se instaló un instrumento llamado "*Manifold*" marca *J/B industries Inc.*, que consta de dos válvulas, tres mangueras y dos manómetros; una de las mangueras se conecta a una bomba rotatoria de vacío marca *Franklin Electric*, modelo *Varian SD-300* con un motor de 560 W (3/4 hp), cuya función es vaciar toda la línea de alimentación de gas; otra se conecta a una "T" en la que convergen las líneas que vienen de los tanques con argón y oxígeno, y la tercera va a otra "T" a la cual llega la línea que viene de la válvula de salida del tanque esférico y sale una línea que va directamente a la válvula de control de flujo, que es una válvula de diafragma marca *Nupro*.

Antes de entrar a la cámara de vacío existe una válvula de aguja que permanece abierta todo el tiempo y sólo se cierra cuando se le da mantenimiento a la válvula de control. Una vez dentro de la cámara de vacío, la línea de alimentación de gas, que es un tubo de cobre de 4.8 mm (3/16") de diámetro, se conecta a cada uno de los magnetrones.

3.2.6 Sistema de movimiento del vidrio.

Para la obtención de espejos con la mayor área posible, se tuvo la necesidad de instalar un sistema de movimiento longitudinal del vidrio. Con dicho sistema se logró hacer espejos de

hasta 60 cm de longitud por 30 cm de ancho, lo que finalmente permitió fabricar un concentrador de canal parabólico con una superficie reflectiva en forma de mosaico, con el menor número de piezas. Ya que las limitaciones principales fueron el área útil erosionable de los blancos en cada magnetrón y el tamaño de la cámara de vacío.

Para llevar a cabo el diseño de este sistema se pensó que debería ser lo más sencillo y práctico posible, por lo que se decidió implementar lo siguiente: al riel de un antiguo carro de telex se le hicieron las modificaciones necesarias para adaptarlo a la cámara de vacío y al carro que corre sobre dicho riel se le adaptó un soporte para la placa de cobre que sirve de apoyo para el sustrato de vidrio y como medio de enfriamiento de éste. Por la parte inferior del carro se colocó una cremallera, cuya función fue la de transmitirle movimiento proveniente de un engrane montado en una barra de acero horizontal soportada por "bujes" de latón a la estructura de apoyo general; en el otro extremo de dicha barra horizontal se colocó un engrane cónico de 45° que recibe el impulso de otro engrane igual pero colocado verticalmente, de tal forma que se forma un ángulo de 90°. Este segundo engrane estaba montado sobre una barra de acero vertical, con medidas de 1.27 cm de diámetro y 60 cm de longitud.

La barra vertical se hizo pasar por la boquilla #3 de la cámara de vacío a través de una brida diseñada especialmente para permitir el movimiento giratorio y a la vez impedir la entrada de aire; esto se consiguió con dos aro-sellos colocados en los extremos del conducto que atraviesa dicha brida, junto con baleros en cada extremo de la barra que le daban la fijeza necesaria para su buen desempeño. Una vez en el exterior, la barra vertical se conectó a un motor eléctrico marca *Dayton* de 50 W (1/15 hp), cuya alimentación era a una línea de 110 V, monofásica.

Sobre la placa de cobre que estaba soportada por el carro, por un lado se apoyaba el vidrio (sustrato) y por el otro se le soldó un serpentín de tubería de cobre de 4.76 mm (3/16") de diámetro para el agua de enfriamiento, que al salir de la placa se enrollaba en forma de espiral con el fin de que se pueda alargar y contraer con el movimiento. Cabe mencionar que todo este sistema no lleva ningún tipo de lubricación dentro de la cámara debido a las condiciones de vacío en las que se trabaja, sólo en la parte que hace contacto con la brida que lo sostiene, se le coloca un poco de grasa de silicón especial para alto vacío y en la parte externa entre la brida y la barra vertical lleva un poco de grasa grafitada.

El sello entre la barra vertical y la brida que la sostiene tiene que ser total, ya que al presentar movimiento pone en peligro el alto vacío. Para ello se usan dos bridas, una con un agujero central de 0.5 mm más de diámetro que el de la barra y un espesor de 12.7 mm, además de que se atornilla directamente a la boquilla #4 del tanque (figura 3.1); mientras que

la otra presenta un cuello largo de 70 mm de longitud en cuyo extremo inferior se coloca un balero para el rodamiento de la barra, además de que se atornilla a la primera brida por presentar un diámetro más pequeño; el sello lo hacen dos aro-sellos (*o-rings*) de vitón, uno se coloca entre ambas bridas y el segundo aro-sello se coloca dentro de una caja que está 5 mm arriba del balero, además, esta brida con cuello largo presenta un orificio ubicado a la mitad de la distancia de los aro-sellos, por el cual sale un tubo de cobre que se conecta a una bomba rotatoria de vacío marca *Franklin Electric*, modelo *Varian SD-200* cuyo motor tiene una potencia de 372 W (1/2 hp). La principal finalidad de dicha bomba fue garantizar un buen vacío de trabajo sabiendo que existe un vacío previo entre la cámara de vacío y el exterior. Todo este sistema se encuentra conectado en la boquilla #3 (figura 3.1).

El motor se controló por medio de un arreglo de circuitos y un potenciómetro, que sirve para regular la velocidad de rotación y por tanto, el movimiento del vidrio frente a cada magnetrón. Además puede girar en cualquier sentido para acomodar el vidrio en la mejor posición en el momento que se requiera. El número total de vueltas para una carrera completa es de 4 1/4 y el movimiento frente a cada magnetrón es de 3 vueltas totales.

3.2.7 Preparación del sistema de vacío.

Una vez cerrada la cámara de vacío y la válvula para llenado de la cámara con aire, se abre la válvula 1 que está en la boquilla #4 (figura 3.1) de la cámara, para luego encender la bomba rotatoria además del indicador analógico de presión, cuando éste marca alrededor de 13.3 Pa se conecta la bomba de difusión que tarda media hora en calentar el aceite. Una vez caliente, se cierra la válvula 3 y se abren las válvulas 1 y 2, para que trabaje la bomba de difusión, quedando la rotatoria como auxiliar. De esta manera se llega a la presión mínima requerida.

3.2.8 Operación del sistema de inyección de gases.

Cuando se ha logrado el vacío máximo con todas las válvulas de control de gases cerradas, se abre la válvula roja del "*Manifold*" y la válvula de salida del regulador de presión de tanque con argón, luego se trabaja con la válvula de control de flujo regulando la presión a las condiciones que se requieren para la evaporación de Aluminio.

Para la evaporación de cuarzo se hace primero la mezcla de gases en el tanque esférico, controlando las cantidades de cada uno por medio de presiones parciales; una vez

hecha la mezcla, se cierran todas las válvulas de manejo de gases y sólo se abre la que está a la salida del tanque esférico además de trabajar con la de control de flujo.

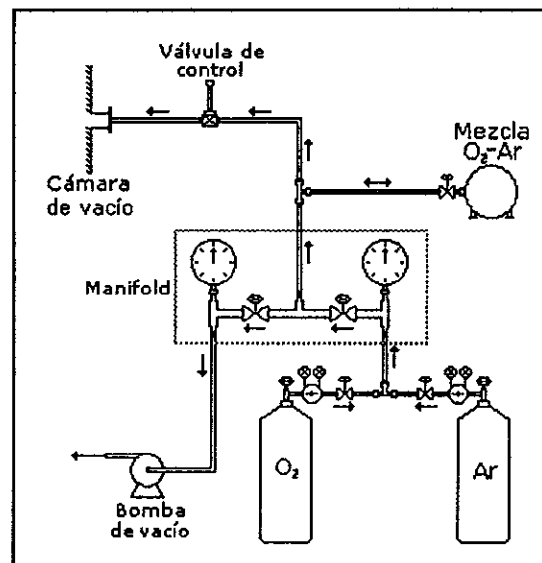


Figura 3.6: Esquema del sistema de alimentación de gases.

3.3 Método experimental

A continuación se da una descripción general de la metodología de operación para todo el equipo que interviene en el proceso de fabricación de los espejos. Se comenzó con espejos planos para corroborar las condiciones de operación establecidas en etapas anteriores de este proyecto; posteriormente se utilizaron espejos cóncavos con la curvatura definida, empleados para la fabricación del concentrador de canal parabólico.

3.3.1 Doblado de vidrio.

El doblado del vidrio comenzaba con la fabricación del molde de masa-roca a partir del molde de acero inoxidable. Este material tiene una consistencia muy parecida a la masa de maíz, de tal forma que es perfectamente moldeable y cuando fragua su deformación es despreciable. Tiene un período de manejo de 5 horas y la dureza total la alcanza en 72 horas. Ya hechos los moldes, se colocaban en el horno y se calentaban a 150 °C durante tres horas para quitarles el exceso de humedad.

Como sustrato para los espejos se utilizó vidrio comercial cal-sosa del tipo "flotado" de tres mm de espesor; su característica principal consiste en la buena planaridad y homogeneidad de sus caras, lo que favorece a una baja especularidad (< 5 mrad). Debido al

proceso de fabricación del vidrio, una de las caras es más "plana" que la otra, por lo que su identificación se hizo por medio de una lámpara de luz ultravioleta, cuya radiación al incidir sobre las trazas de estaño, da un efecto de fluorescencia. Las placas de vidrio utilizadas tienen una dimensión de 600x300 mm, a las cuales hay que darles un tratamiento especial de limpieza para garantizar una buena adherencia de la película reflejante durante las pruebas de intemperismo.

Los vidrios se limpiaban y se colocaban sobre los bordes de cada molde (figura 3.6); el control se fijaba en 600 °C y se dejaba trabajar, hasta que alcanzara la temperatura indicada en un período de aproximadamente dos horas. Ya que alcanzaba la temperatura especificada, permanecía en ella durante una hora para posteriormente apagar el control. Se dejaba enfriar todo durante un período de 18 horas.

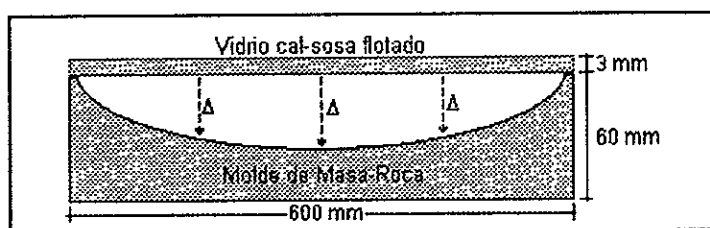


Figura 3.7: Esquema del proceso de doblado de un vidrio plano.

3.3.2 Limpieza del sustrato de vidrio.

Una vez dada la curvatura a los vidrios se procedía a la limpieza exhaustiva de los mismos. El proceso de limpieza requiere que sean rotos los enlaces entre las moléculas contaminantes, así como los enlaces entre estas moléculas y el vidrio. De tal forma que la técnica elegida depende de los componentes del sustrato, del tipo de impurezas y del grado de limpieza que se quiere lograr. Si no se tiene una buena limpieza, la vida útil del espejo se reduce considerablemente, ya que la adherencia de la película reflejante a él no será muy buena, por lo que no aguantará mucho tiempo estando a la intemperie (Ramírez, M. 1990).

El método que se utilizó para llevar a cabo la limpieza es el siguiente:

- 1) El vidrio se lava con detergente y agua corriente (algunas veces con agua destilada), tallado con una esponja suave para no rallarlo. Una vez limpio, se seca con una pistola industrial de aire caliente.
- 2) Se introduce en un baño de mezcla crómica ($H_2SO_4 + K_2Cr_2O_7 + H_2O$) a una temperatura aproximada de 80 °C en un intervalo de tiempo de 20 a 30 minutos.

- 3) Se saca del baño y se lava con agua (de preferencia destilada) teniendo cuidado de no mandar al drenaje los residuos de la mezcla. Además, se seca con aire caliente.
- 4) Una vez seco, se introduce en un baño de alcohol isopropílico, dándole una ligera frotada con guantes de plástico durante 5 minutos, para que con un esfuerzo mecánico se eliminen las posibles impurezas que aún estén adheridas al vidrio.
- 5) Finalmente se seca nuevamente con aire caliente y con un paño suave seco (franela limpia).

La mezcla crómica se prepara disolviendo dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en una mezcla con 80% de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y 20% de agua. Las cantidades utilizadas fueron: 400 mL de H_2O , 1600 mL de H_2SO_4 y 50 g de $K_2Cr_2O_7$; para dar un total de 2 L de mezcla crómica cuya coloración es rojo oscuro por la presencia del ion Cr^{6+} , que es un agente oxidante muy poderoso el cual se reduce a Cr^{3+} conforme se utiliza y reacciona con materia orgánica haciendo que parte de ella se transforme en compuestos solubles en agua. La mezcla cambia su coloración a verde claro ya que predomina la presencia del ion Cr^{3+} . Ambos iones son tóxicos, por lo que cuando la mezcla ya no sirve tiene que confinarse o darle un tratamiento basado en sales de hierro, quedando un polvo que se confina por su toxicidad.

Para comprobar la limpieza del sustrato de vidrio se le hace la prueba de mojado con agua (*water break test*): "si un sustrato limpio se extrae de un recipiente con agua pura, una película continua de agua permanecerá en su superficie. Lo cual indica que hay un buen mojado entre el sustrato y el agua".

Una vez limpio el vidrio, se coloca en el soporte de placa de cobre adaptado sobre el carro que se encuentra en el interior de la cámara de vacío, se fija con unos pequeños sujetadores hechos de alambre de acero en el Instituto de Ingeniería. Una vez fijo, se cierra la puerta de la cámara de vacío con los pernos y tuercas correspondientes.

3.3.3 Generación de vacío y limpieza con descarga luminosa.

Al cerrar la cámara de vacío y comprobar que las demás válvulas están cerradas, se abre la válvula #3 (figura 3.1), se enciende la bomba rotatoria y el medidor analógico de presión. Después de una hora de bombeo se observa que la presión está en 20 Pa (200 μ m de Hg), en ese momento se conecta la bomba de difusión y se abren las válvulas para la circulación del agua de enfriamiento de dicha bomba. Después de media hora, el aceite de la bomba de difusión ya está lo suficientemente caliente como para generar vacío, por lo que se cierra la válvula #3 (ver tabla 3.1) y se abre completamente la válvula #1 (que se encuentra en

la línea de unión de la bomba de difusión y la bomba mecánica); de esta manera la bomba rotatoria funciona como bomba auxiliar para la bomba de difusión.

La válvula #1 (que se encuentra entre la cámara de vacío y la bomba de difusión) se abre ligeramente (3 vueltas) para poder hacer la limpieza con descarga luminosa. Tal limpieza se hace de la siguiente manera: una vez que el indicador de presión analógico llegó al mínimo se abre la válvula de salida del regulador de presión del tanque con argón, también la válvula roja del "manifold"; posteriormente se abre la válvula de control, con la cual se ajusta la presión en el interior del tanque en un intervalo de 1.33 a 2.66 Pa (10 a 20 μm de Hg). Después de que se alcanza esta presión, se enciende la fuente de corriente directa para la descarga luminosa (sección 3.1.2) y se ajusta en 3000 V para luego controlar la cantidad de corriente en aproximadamente 0.5 A con la válvula de control de presión, que está en la boquilla #5 (figura 3.1).

Si se presentan arcos y chispas en el interior de la cámara de vacío, se baja la intensidad del voltaje así como la presión de trabajo hasta que desaparezcan y pueda trabajarse a las condiciones descritas inicialmente. La descarga se aplica en un intervalo de tiempo que va típicamente de 15 a 30 minutos, dependiendo de las condiciones a las que estuvo expuesta la cámara mientras estaba abierta.

Para finalizar esta limpieza, se cierra la válvula de control y se espera a que baje la presión para apagar la fuente de alto voltaje. Una vez apagada, se abre completamente la válvula #2 (figura 3.1), se apaga el indicador analógico de presión y se enciende el indicador digital. Además se agregan aproximadamente 10 L de nitrógeno líquido a la parte superior de la bomba de difusión para facilitar el condensamiento de los gases y por tanto la presión sea más baja, dando un mejor vacío. Una vez que el indicador de presión marca 4.0×10^{-3} Pa (4.0×10^{-5} mbar) podemos decir que el equipo está listo para iniciar el experimento, aunque es recomendable esperar a que la presión baje aún más.

Durante la limpieza con descarga luminosa, se llevan a cabo los siguientes fenómenos superficiales (Brawn, R. 1970):

- Calentamiento directo del interior de la cámara debido al choque de partículas cargadas.
- Desorción de impurezas por el bombardeo continuo de electrones, de iones de baja energía y de partículas neutras.
- Modificación de la superficie del vidrio por la adición continua de las partículas que conforman el plasma

3.3.4 Erosión iónica del Aluminio.

Antes de dar paso a la alimentación de energía se debe ajustar la presión de operación con argón, siguiendo el mismo procedimiento que el usado para la descarga luminosa; después de muchas pruebas, se fijaron valores que pueden oscilar desde 5×10^{-2} Pa (5×10^{-4} mbar) hasta 7.5×10^{-2} Pa (7.5×10^{-4} mbar). El valor mínimo de presión se determinó por prueba y error en 4.8×10^{-2} Pa (4.8×10^{-4} mbar), ya que con presiones más bajas no se daba el halo luminoso, es decir, la cantidad de moléculas de argón presentes en la cámara era tan baja que no era suficiente para crear la corriente de electrones secundarios y por tanto el plasma necesario con el cual se inicia la erosión iónica (capítulo II); mientras que el máximo valor se fijó en esa cantidad, para trabajar a las presiones más bajas posibles, ya que entre más alto es el vacío mejor calidad de película reflejante se tiene.

Cuando ya se tienen las condiciones de presión adecuadas, algo muy importante es el agua de enfriamiento para los magnetrones y placa de cobre con la que se refrigera el sustrato. Para llevar a cabo esta parte del experimento, primero hay que revisar que las conexiones de la fuente de corriente directa hacia el magnetrón con blanco de Aluminio estén colocadas debidamente (tanto las tierras físicas, como los cables que conducen la energía de alimentación). Una vez hecho esto, se acciona el interruptor principal de la fuente de CD que se encuentra en la parte posterior de la misma; luego se enciende el interruptor frontal, se presiona el botón de "setpoint" para ajustar los valores iniciales de operación, cuyo control puede ser con potencia, voltaje o cantidad de corriente. El experimento se llevó a cabo controlando la potencia, dando un valor inicial de 150 W que serán suministrados paulatinamente al sistema en un tiempo de 8 segundos.

Una vez ajustados estos valores, se acciona el botón de encendido con el cual se da el paso de energía de la fuente de CD al magnetrón, y si no hay ningún problema la potencia sube rápidamente prendiéndose el indicador de plasma. En ocasiones, se forman arcos eléctricos entre la placa que sirve como blanco y el escudo del magnetrón o entre dicha placa y el plasma de argón, haciendo que el indicador de formación de arcos, contenido en la fuente, se prenda constantemente durante aproximadamente 3 minutos, para luego entrar en estado estable.

Cuando se lleva a cabo la erosión iónica de Aluminio en alto vacío, la superficie del blanco queda con el material en estado puro, sin embargo, al abrir la cámara y dejarla expuesta a la atmósfera, entra aire cuyo oxígeno reacciona con el Aluminio de la superficie creando una capa de óxido de aluminio (Al_2O_3), la cual tiene varios angstroms (Å) de espesor. Por lo que al formarse el plasma de argón, los cationes tienen que destruir la capa formada

evaporándola primero; con ello las condiciones del sistema cambian y tienen que pasar varios minutos (de 5 a 90 minutos) antes de que se lleve a cabo el "sputtering" o erosión iónica del Aluminio. Una vez iniciado éste, la potencia se mantiene constante, sin embargo, el voltaje sube rápidamente y la cantidad de corriente baja ligeramente, hasta que se adquiere el estado estacionario con el cual ya se trabaja.

Posteriormente se acciona el motor, que mueve el carro que soporta al vidrio, de manera continua pasando enfrente al magnetrón lo más lento posible una y otra vez en un intervalo de tiempo que va de 15 a 20 minutos aproximadamente.

La potencia a la cual se trabaja varía desde 350 a 400 W, dependiendo del espesor de la película de Aluminio que se requiera y la cantidad de corriente que se maneja, la cual permanece estable en un intervalo que va desde 0.52 a 0.72 A. De acuerdo al resultado de las pruebas, no es conveniente darle más potencia, ya que la fuente puede sobrecalentarse y se acciona el interruptor térmico, que impide continuar la operación durante aproximadamente 10 minutos, hasta que la fuente se haya enfriado.

Cuando se ha cumplido con el tiempo planeado, se baja la potencia de la fuente de CD poco a poco hasta llegar a cero, se acciona el interruptor de "apagado" para interrumpir el paso de energía hacia el magnetrón y luego el interruptor frontal para apagarla, dejando que el ventilador funcione por unos minutos más para enfriar adecuadamente todos sus componentes; así como el agua de enfriamiento de los magnetrones se deja circular un rato más. También se cierra la válvula de control de presión y la válvula de salida del regulador de presión del tanque de argón.

Los problemas principales que se presentaron y las decisiones que se tomaron para resolverlos se expondrán en el siguiente capítulo. Después de unos minutos de haber terminado con la erosión iónica del Aluminio, se apaga el interruptor principal de la fuente de CD y se corta el agua de enfriamiento de los magnetrones y de la placa de cobre. El flujo de agua de enfriamiento sólo se interrumpe en el caso de que no se lleve a cabo la erosión iónica del cuarzo para la formación de una película protectora.

Otra de las variables a considerar, y que es de las más importantes, es la distancia que hay entre electrodos, ya que la cantidad de corriente y el voltaje se dan en función de dicha distancia y de la presión dentro de la cámara. Después de varias pruebas se determinó que la distancia óptima era de 13.5 cm, sin embargo, el sistema trabajaba perfectamente en el intervalo de 10 a 16 cm de separación.

A continuación (tabla 3.3) se describe una corrida típica de la erosión iónica de Aluminio a las condiciones óptimas de operación:

Tabla 3.3: Datos de operación para una corrida típica en la que se forma una capa reflejante de aluminio.

<i>Presión (Pa)</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Corriente (A)</i>	<i>Voltaje (V)</i>	<i>Tiempo (min.)</i>	<i>Comentarios</i>
8.0×10^{-2}	150	0.68	212	0	Halo luminoso de inmediato
6.1×10^{-2}	200	0.91	216	3	
6.2×10^{-2}	250	1.08	230	10	
6.3×10^{-2}	300	1.08	279	29	
6.3×10^{-2}	300	0.55	539	30	Comienza la erosión iónica
6.1×10^{-2}	350	0.63	549	33	Se coloca el vidrio enfrente del magnetrón
6.5×10^{-2}	350	0.63	550	50	Fin de la elaboración de la película de Al.

3.3.5 Erosión Iónica del Cuarzo (SiO_2).

Para llevar a cabo esta última parte del proceso de fabricación del espejo se requiere una mezcla de gases compuesta aproximadamente por 30% de oxígeno y 70% de argón (% en volumen). Para determinar esta proporción se tuvieron que hacer muchas pruebas con diferentes proporciones de cada gas; además, en un principio, cada tanque de gas tenía su propia línea con su propia válvula de control de presión, las cuales llegaban a una unión "T" antes de entrar a la cámara de vacío, lo cual no dio buenos resultados para el control de presión, por lo que se decidió cambiar el sistema como ya se explicó en la parte 3.1.5. de este capítulo. El procedimiento que se siguió para la elaboración de la mezcla de gases, después de todas las modificaciones al sistema, es el siguiente:

- 1) Se cierran todas las válvulas del sistema de control de presión, excepto las válvulas del "manifold" y la válvula de paso de entrada del tanque esférico.
- 2) Se conecta la bomba de vacío Varian CD-300, la cual desecha todo el gas que se encuentre en las líneas de este sistema y en el tanque esférico, durante aproximadamente 10 minutos.
- 3) Una vez hecho el vacío, se cierra la válvula azul del "manifold" y se desconecta la bomba; a continuación, se abre la válvula de paso del tanque con oxígeno y se regula la presión hasta 172.4 kPa (1.76 kg/cm^2), se deja así por unos 3 minutos y se cierra la válvula de paso.
- 4) Se abre la válvula de paso del tanque con argón, teniendo cuidado de que la presión a la salida del regulador sea superior a la existente en el tanque esférico, se regula la presión

hasta que alcance valores de 861.8 kPa (8.79 kg/cm²), también se deja así durante unos 3 minutos y luego se cierra la válvula de paso del tanque con argón y la válvula roja del "manifold". De esta manera se deja abierta la válvula de paso del tanque esférico, el cual queda aislado del resto del sistema y conectado directamente a la válvula de control de presión.

- 5) Una vez hecha la mezcla ya se puede empezar a trabajar con el magnetrón con blanco de cuarzo, además de que la presión dentro de la cámara de vacío ya está en valores de 1×10^{-3} Pa (1×10^{-5} mbar).

Después de estar lista la presión en la cámara se enciende la fuente de radio frecuencia, se abren las llaves para el agua de enfriamiento de los magnetrones, de la placa de cobre y de la fuente misma. Se abre la válvula de control de presión y se ajusta hasta que el indicador digital marque 8×10^{-1} Pa (8×10^{-3} mbar), en ese momento se activa el interruptor de "comienzo" de la fuente y se ajusta a 3 W el indicador de "potencia de entrada" (*set point*), en ese momento se forma el plasma dentro de la cámara de vacío. Una vez que el magnetrón se ha "encendido" (inicio del halo luminoso) se ajusta la presión para que el indicador oscile entre 2.0×10^{-1} Pa (2.0×10^{-3} mbar) y 2.8×10^{-1} Pa (2.8×10^{-3} mbar). Poco a poco se incrementa la potencia a una velocidad de aproximadamente de 2 W/s hasta llegar a un total de 800 W, este valor puede variar de acuerdo a las condiciones de rapidez de deposición del cuarzo y a las variaciones de presión que se tengan dentro de la cámara; el intervalo típico de potencia de operación que se utilizó fue de 700 a 900 W.

El tiempo del proceso de deposición se comenzaba a contar desde el momento en que el espejo se colocaba justo enfrente del magnetrón, ya que durante el proceso de arranque estaba colocado de manera que el haz de plasma no le afectara.

Ya que el espejo está enfrente del magnetrón, se acciona el motor de movimiento hacia un lado y otro a la mínima velocidad posible, de tal forma que el espejo pase varias veces enfrente del blanco de cuarzo; en ocasiones el motor se ve afectado por la radiación electromagnética que se refleja de la cámara, de tal forma que éste no se puede controlar bien, por lo que la velocidad de movimiento se incrementa.

Durante todo el proceso de deposición del cuarzo hubo que controlar manualmente la presión, ya que nunca está estable, además hay que vigilar el valor de potencia reflejada que no debe ser mayor al 1% de la potencia que indica el "punto de entrada". Se observó que al colocar un ventilador externo para enfriar la fuente, ésta trabajaba mejor ya que no se calienta tanto y el interruptor térmico no se acciona tan fácilmente, así podemos trabajar a 950 W durante más de una hora.

Las condiciones de operación fueron variadas, por lo que se hicieron muchas pruebas hasta determinar qué factores influyen más para la formación de una buena película de cuarzo que cumpla con las condiciones deseadas. Al término del experimento, se debe disminuir la potencia paulatinamente hasta llegar a cero, en ese momento accionábamos el interruptor de "paro" y apagábamos el controlador del acoplador de impedancias. Si la fuente está muy caliente el interruptor principal no se apaga hasta que se enfría y el agua de enfriamiento se deja circular durante unos minutos más. Posteriormente cerramos la válvula de control y la válvula de paso para el tanque esférico; se apaga el indicador de presión y cerramos la válvula #1, que cierra el paso del gas entre la cámara de vacío y la bomba de difusión, la cual se desconecta para ya no seguir calentando el aceite.

El agua de enfriamiento de la bomba de difusión sigue circulando, así como la bomba rotatoria hace su labor de auxiliar. En el momento que el aceite está frío, se cierran las llaves del agua de enfriamiento y se apaga la bomba rotatoria. Para evitar que el producto final no se afectara por un cambio de presión y temperatura rápido, la cámara de vacío se abría hasta el siguiente día y así no se dañara la película de aluminio-cuarzo formada.

En la tabla 3.4 se da una corrida típica de la erosión iónica del cuarzo a condiciones óptimas de operación. En ella se dan muchos puntos de lectura a una potencia media para poder describir el comportamiento en un amplio intervalo.

El tiempo total durante el cual el espejo se dejó enfrente del magnetrón fue de 60 minutos. La presión es difícil de controlar, por lo que se trabajó con un intervalo de tolerancia de ± 0.05 Pa alrededor de 0.22 Pa. El parámetro que se trató de mantener constante fue la polarización de los electrodos (*DC bias*), por lo que la potencia de alimentación variaba un poco entre cada corrida para un mismo valor del "*bias*". Conforme se hacían más pruebas, el comportamiento del equipo mejoraba, con la condición de no abrir la cámara de vacío por más de 2 horas. Algunas veces, se notaba la formación de zonas con forma esférica "más iluminadas" que el resto del espacio en la cámara, esto por la formación de plasma en dichas zonas.

La erosión del cuarzo presentó un comportamiento más sensible a la separación entre electrodos, ya que las condiciones de presión variaban ligeramente. Sin embargo, el proceso de evaporación se llevaba a cabo de manera satisfactoria en el mismo intervalo que la erosión del Aluminio (de 10 a 16 cm de separación), con ligeros ajustes a la presión. Este último parámetro es muy importante, ya que dependiendo de él, así será la curvatura máxima (longitud de la flecha de curvatura) que podrá tener un vidrio para la fabricación de espejos parabólicos.

Tabla 3.4: Datos de operación para una corrida típica en la que se forma una capa protectora de Cuarzo (SiO_2).

<i>Presión [Pa]</i>	<i>Potencia Alimentada [W]</i>	<i>Potencia Reflejada [W]</i>	<i>Potencia Pre-establecida [W]</i>	<i>*DC bias [V]</i>	<i>Plasma</i>	<i>Tiempo [h:min:s]</i>	<i>Comentarios</i>
0.80	5	1	3	+01	no	00 :00 :10	
0.21	102	1	100	-12	no	00 :01 :10	
0.22	202	1	200	-24	si	00 :02 :10	
0.26	313	1	310	-35	si	00 :04 :00	
0.18	402	1	400	-36	si	00 :04 :55	
0.25	502	1	500	-42	si	00 :05 :55	
0.26	603	1	600	-50	si	00 :06 :50	
0.19	703	1	700	-57	si	00 :07 :50	
0.24	763	1	760	-60	si	00 :09 :20	
0.20	783	1	780	-61	si	00 :10 :20	
0.20	783	1	780	-60	si	00 :11 :00	inicia depósito
0.24	703	1	700	-60	si	00 :13 :00	
0.20	713	1	710	-61	si	00 :18 :00	
0.26	723	1	720	-61	si	00 :22 :00	
0.24	723	1	720	-62	si	00 :43 :00	
0.19	723	1	720	-62	Si	00 :56 :00	
0.19	723	1	720	-61	Si	01 :11 :00	fin de prueba

* Polarización entre electrodos

Donde:

- *Presión [Pa]*: establece el valor registrado en el punto donde se encuentra el sensor de presión dentro de la cámara de vacío, por lo que se asume que la presión en la zona de los magnetrones será ligeramente mayor.
- *Potencia Alimentada [W]*: se refiere a la cantidad de energía por unidad de tiempo que la fuente alimenta al magnetrón.
- *Potencia Reflejada [W]*: se refiere a la cantidad de energía que se refleja hacia la fuente, por lo que se resta a la potencia alimentada.
- *Potencia Pre-establecida [W]*: se refiere al valor que el usuario fija en la fuente y equivale a la potencia alimentada menos la reflejada.
- *DC bias [V]*: es la diferencia de potencial establecida entre electrodos, tiene un valor negativo ya que el punto de referencia es la alimentación de energía a cátodo.
- *Plasma*: se refiere a la formación del plasma dentro de la cámara de vacío.

Durante esta etapa de desarrollo de espejos de primera superficie con áreas aplicables a energía solar, específicamente para la planta termosolar del Instituto de Ingeniería, se fabricaron 20 espejos cóncavos y 5 planos con vidrios comerciales, en 8 meses de trabajo. No todos fueron satisfactorios, ya que algunos salieron con tonalidad blanca por el exceso de aluminio y otros transparentes por la falta del mismo elemento. Poco a poco, al modificar las condiciones de elaboración de las capas reflejante y protectora, se fueron obteniendo resultados más alentadores; hasta que se cumplió con el objetivo del proyecto al fabricar el concentrador montado en campo (figura 4.2). Estos espejos tienen una película protectora de cuarzo que presenta una baja absorción de la radiación UV y visible, tanto para espejos planos, como para espejos curvos.

3.3.6 Método alternativo para la evaporación de aluminio

Como ya se mencionó en el capítulo dos, otra manera de llevar a cabo la evaporación del aluminio es por medio del calentamiento de un filamento de tungsteno o molibdeno colocado entre dos electrodos de cobre.

Debido a la disminución del campo magnético de los imanes del magnetrón con blanco de aluminio (pureza 99.99%), se utilizó el calentamiento indirecto de alambre de aluminio (pureza de 99.999%) colocado en un filamento de tungsteno (W) (figura 3.8).

La alimentación de energía se hizo con una fuente de soldador con generador. La cual alimentaba un promedio de 280 A y 40 V, durante un período de cinco minutos. El procedimiento para llevar a cabo esta evaporación fue el siguiente:

1. Se prepara todo el sistema de vacío hasta llegar a la presión más baja posible ($\leq 5.5 \times 10^{-4}$ mbar).
2. Se conectan los electrodos de la fuente de soldar a los "atravesadores" de la brida colocada en la boquilla #5.
3. Se enciende la fuente de soldar y se espera un minuto con el regulador en el mínimo.
4. Se comienza a mover el regulador de la fuente para incrementar poco a poco la alimentación al filamento de W.
5. Cuando el filamento se enciende, se deja fijo el regulador y se espera un minuto.
6. Se incrementa poco la alimentación hasta que el aluminio se funde y comience a hervir.
7. Cuando hierve el aluminio, el soporte móvil, donde se encuentra el sustrato de vidrio, debe moverse rápidamente de un extremo al otro durante dos minutos.

8. Al acabarse el aluminio se da por concluida la evaporación y se ejecuta el procedimiento para la evaporación reactiva de cuarzo.

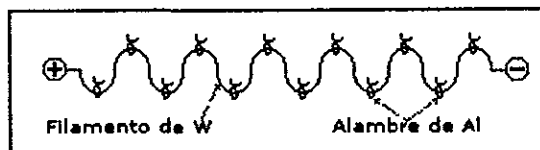


Figura 3.8: Esquema de colocación del alambre de Al en el filamento de W.

Cabe hacer notar que es muy importante tener contacto visual con el filamento de W, de tal forma que se pueda identificar en cada momento de la evaporación los pasos a seguir. Si se da más carga a los electrodos, las gotas de aluminio formadas hierven tan violentamente, que se caen del filamento y no se pueden recuperar.

3.3.7 Armado del concentrador con forma de mosaico en la planta Termosolar.

Después de haber fabricado todos los espejos necesarios para cubrir el área de un segmento de concentrador para la planta termosolar del Instituto de Ingeniería; se seleccionó uno de los soportes de fibra de vidrio que estuviera en mejor estado, se limpió adecuadamente y se trazó sobre su superficie las marcas para colocar los espejos perfectamente alineados

La colocación de los espejos se llevó a cabo muy cuidadosamente. Como adhesivo se utilizó pegamento de silicón, el cual demostró resistir la degradación provocada por los factores ambientales en los espejos planos elaborados durante la etapa anterior a este proyecto y que llevan a la fecha dos años en la intemperie.

El concentrador con espejos de vidrio de primera superficie se colocó en uno de los módulos solares junto a otro segmento hecho con papel comercial 3M tipo SA-85P, para comparar resultados de evaluación en condiciones similares de operación. Ambos concentradores se alinearon y con ello se pudo dar comienzo a la evaluación de sus desempeños.

3.3.8 Evaluación de las pérdidas de concentración.

Las evaluaciones hechas a los espejos debían comenzar con la medición de las reflejancias especulares totales (esto antes del armado del concentrador) en el Reflectómetro de Espectro Solar. Para ello se hicieron diferentes mediciones distribuidas uniformemente en toda el área de cada espejo y se tomaba un valor promedio para determinar su calidad.

Posteriormente, una vez montados en el soporte de fibra de vidrio e instalados en campo, se procedió a medir la pérdidas de radiación alrededor del tubo absorbedor, así como la cantidad de radiación incidente sobre el mismo.

Para ello, se utilizó un dispositivo con una celda fotovoltaica, cuyo diámetro era de 5.4 cm de longitud, pero se recubrió parte de su superficie con una lámina cortada al ancho del tubo absorbedor (2.4 cm), de tal forma que el área total expuesta de la celda era de 12.2 cm² (figura 3.8). Esto con el fin de que la irradiancia alrededor del tubo no alterara la lectura específica para cada zona.

La diferencia de potencial generada en la fotocelda se mediría en tres zonas: en la parte del foco en donde está el tubo absorbedor y a ambos lados de él con una distancia equivalente al ancho del tubo (2.4 cm), es decir, sobre una línea perpendicular al eje focal abarcando el área expuesta de la fotocelda.

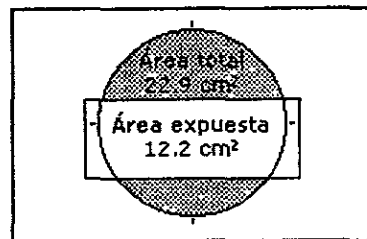


Figura 3.9: Esquema de la fotocelda utilizada para la evaluación de los concentradores solares.

Con la celda fotoeléctrica se pudo medir una diferencia de potencial al conectarla a un multímetro digital, de tal forma que al colocarla en el lugar correcto por un instante (< 2 segundos), se tenía una lectura en el foco de la parábola y en sus alrededores.

De esta forma se podría comprobar la simetría de concentración, y de forma indirecta las pérdidas por el enfoque y especularidad de los espejos.

Se debe tener presente que las pérdidas a medir son función de la planaridad de los espejos, del factor de forma y del error de seguimiento. Lo que da como resultado una gran influencia de la especularidad en este tipo de evaluación.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos con la aplicación del método experimental (capítulo 3), posteriormente se establece el análisis de dichos resultados. De los cuales el más importante se refiere a la comparación entre el concentrador de espejos con sustratos de vidrio y el concentrador con espejo comercial marca 3M, ambos evaluados en campo.

4.1 Fabricación de los moldes

Uno de los objetivos de este proyecto fue utilizar vidrio comercial cal-sosa como sustrato de los espejos de primera superficie. En una etapa anterior de este proyecto, se determinó la temperatura de reblandecimiento de este tipo de vidrio, para una curvatura cualquiera en forma de catenaria (debido a que la presentación en el mercado del vidrio es en forma plana). En este trabajo se requirió adaptar este método de doblado para una curvatura parabólica exacta.

Por un lado, el modelo que se siguió para la geometría de los espejos solares, fue el perfil del molde original con el que se construyeron los soportes usados en la planta termosolar del Instituto de Ingeniería, UNAM. Tales soportes tienen una apertura de 2.5 m, el foco a 0.625 m del vértice y un ancho de 1.14 m cada uno. El campo de concentradores estaba constituido por 16 módulos divididos en cuatro partes, y cada parte estaba formada por tres soportes de fibra de vidrio.

Por otro lado, debido a las limitaciones de la cámara de vacío donde se fabricaron los espejos y al tamaño de los magnetrones (superficie de erosión útil), sólo se tenía espacio disponible para fabricar espejos de 0.6 x 0.3 m como tamaño máximo; de modo que para cubrir el área de un soporte se requirió de 16 espejos acomodados en forma de mosaico, dando un área total reflejante de aproximadamente 3.12 m².

Como referencia se utilizó un soporte prácticamente igual al anterior, al cual se le instaló espejo comercial de aluminio marca 3M tipo SA-85P, cuya área total era de 3.24 m², instalado en cuatro partes. El área total de cada soporte (Ar_T en m²) (ecuación 4.1) está dada por la longitud de arco de la parábola (ecuación 4.2) multiplicada por el ancho de ésta. En la tabla 4.1 se especifican las medidas de ambos concentradores.

$$Ar_T = L \cdot a \tag{Ecuación 4.1}$$

$$L = \sqrt{4x^2 + y^2} + \frac{y^2}{2x} \operatorname{Ln} \frac{2x + \sqrt{4x^2 + y^2}}{y} \tag{Ecuación 4.2}$$

Donde:

$\overline{ABC} = L$ = longitud de arco de la parábola [m] x = distancia del vértice al eje de apertura [m]
 a = ancho del soporte con perfil parabólico [m] y = $\frac{1}{2}$ de la longitud de apertura [m]

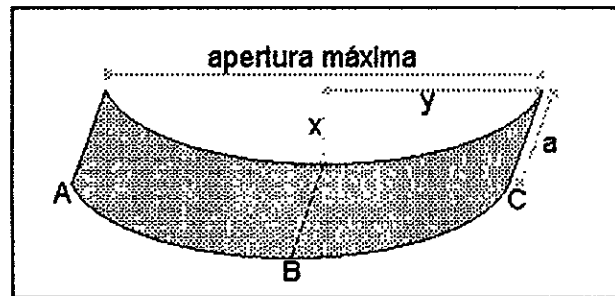


Figura 4.1: Soporte con perfil parabólico.

Tabla 4.1: Medidas generales de los concentradores evaluados.

	Tipo de espejo	Sustrato de Vidrio	Comercial 3M SA-85P
Apertura total del soporte	[m]	2.508	2.509
Distancia vértice – foco	[m]	0.625	0.625
Ancho del soporte	[m]	1.142	1.142
Longitud del arco de la parábola	[m]	2.876	2.877
Área total disponible	[m ²]	3.284	3.285
Apertura de la superficie con espejo	[m]	2.372	2.452
Distancia vértice – línea de apertura	[m]	0.609	0.628
Ancho de la superficie con espejo	[m]	1.14	1.14
Longitud del arco de la parábola	[m]	2.74	2.83
Área total reflejante	[m ²]	3.12	3.24
Reflejancia inicial		0.85	0.85
Peso total	[kg]	45	26

La selección del material con el que se fabricaron los moldes comenzó cuando se propusieron las siguientes opciones: cemento refractario, arcilla, yeso, porcelana moldeable y masa-roca.

Se seleccionó al material "Masa-roca^{MR}" (anexo A1); que es una especie de cemento basado en puzolanas, microfibras sintéticas y naturales, cementantes, y aditivos, que al hidratarse se comporta como una masa sumamente moldeable cuya contracción durante el fraguado es despreciable, además este material se puede someter a temperaturas de hasta 800 °C sin perder sus propiedades; con dichos moldes se dio forma a los vidrios que posteriormente se convirtieron en espejos.

De manera general, un material mejor que la masa-roca es la arcilla moldeable, pero por su alto costo se hizo imposible su adquisición.

La aplicación del procedimiento para la fabricación de los moldes fue la siguiente:

- 1) Se requirió dar la forma exacta a los moldes de masa-roca, por lo que se utilizaron los moldes originales (de lámina de acero) con los que se fabricaron los soportes de fibra de vidrio que estaban en la planta termosolar.
- 2) Se modificó un horno perteneciente al Instituto de Ingeniería para alcanzar una temperatura de 600 °C, con el fin de llegar arriba del punto de reblandecimiento de este tipo de vidrio.

El fraguado del material se alcanzaba aproximadamente 5 horas después de humedecerlo, para luego dejarlo reposar envuelto en tela de franela muy húmeda con el fin de evitar fisuras por un secado rápido.

Como estructura de soporte, se colocaron internamente dos tipos de malla electrosoldadas: fina de 2 mm de diámetro y gruesa de 3 mm de diámetro. Esto con el fin de contrarrestar los esfuerzos mecánicos transversales y longitudinales producidos durante el ciclo de calentamiento y enfriamiento del molde.

Se construyeron únicamente dos moldes a la vez, por las limitaciones de espacio en el horno y por tratarse de una figura simétrica con respecto al vértice de la parábola. Así, solamente se necesitaron ocho vidrios, con una tipo de curvatura y ocho con el otro tipo para formar el mosaico completo. Adicionalmente, se utilizaron cuatro espejos más sin curvatura, los cuales se colocaron en los extremos longitudinales.

4.2 Doblado del vidrio

Para llevar a cabo el doblado del vidrio, se necesitó un horno cuyas dimensiones debían ser las adecuadas para dar cabida al menos a dos moldes juntos. Por tal motivo, se modificó un horno perteneciente a la sección de Enrocamientos del Instituto de Ingeniería, cuyas dimensiones fueron las adecuadas para las necesidades de este proyecto (0.7 m frente x 0.72 m profundidad x 0.72 m alto).

El medio de calentamiento del horno eran resistencias tipo tira de 62 cm de longitud y capacidad de 750 W cada una. La capacidad inicial del horno era de 2,250 W y se aumentó a 6,750 W (200% más).

El material aislante con el que estaban rellenas las paredes del horno era fibra de vidrio, cuya aplicación se recomienda para un intervalo de temperatura que va desde 200 hasta 450 °C (Perry, 1992), por lo que fue necesario cambiarlo por otro adecuado para una temperatura de 600 °C. Así se escogió la fibra cerámica de la marca Kaowool® en dos presentaciones, una como 'colcha' de 5.1 cm de espesor (2 in) y 128 kg/m³ de densidad (8 lb/ft³), instalada dentro de las paredes, y otra como 'tabla' de 5.1 cm de espesor (2 in) y 256 kg/m³ de densidad (16 lb/ft³), instalada como recubrimiento interno del horno; de tal forma que el interior quedó instalado tipo mufla. Las características del material se dan en el anexo A.2.

Una vez instalado el nuevo aislante, se montaron las resistencias en conexión delta, a una línea de tres fases de 220 V. De esta manera quedaron tres bancos de tres resistencias (2,250 W) cada uno colocados en la base y en las paredes laterales del interior del horno, descansando sobre la tabla de fibra cerámica.

El control de temperatura se hizo por medio de un controlador analógico, que mediante un termopar tipo k, detectaba la temperatura en el interior para mandar la señal de encendido o apagado de las resistencias. Dicha señal la recibía un dispositivo llamado Relevador de Estado Sólido, cuya función era la de interrumpir la alimentación de energía a los bancos de resistencias. Se instalaron tres relevadores en total, uno por fase, con capacidad de 20 A cada uno. El modelo utilizado fue el G2PA-220B-VD de la marca Omron y fabricación japonesa.

Ya instalado el sistema de control se procedió a calcular la curva de calentamiento del horno sin ningún tipo de carga en su interior, primero con la capacidad inicial de tres resistencias, cuya ecuación de regresión se expresa en la figura 4.2.

Esta gráfica sirve para estimar el tiempo mínimo de calentamiento y mínimo de enfriamiento del horno, con el fin de calcular la duración total de una prueba con un intervalo de error pequeño y además para la buena planeación del experimento.

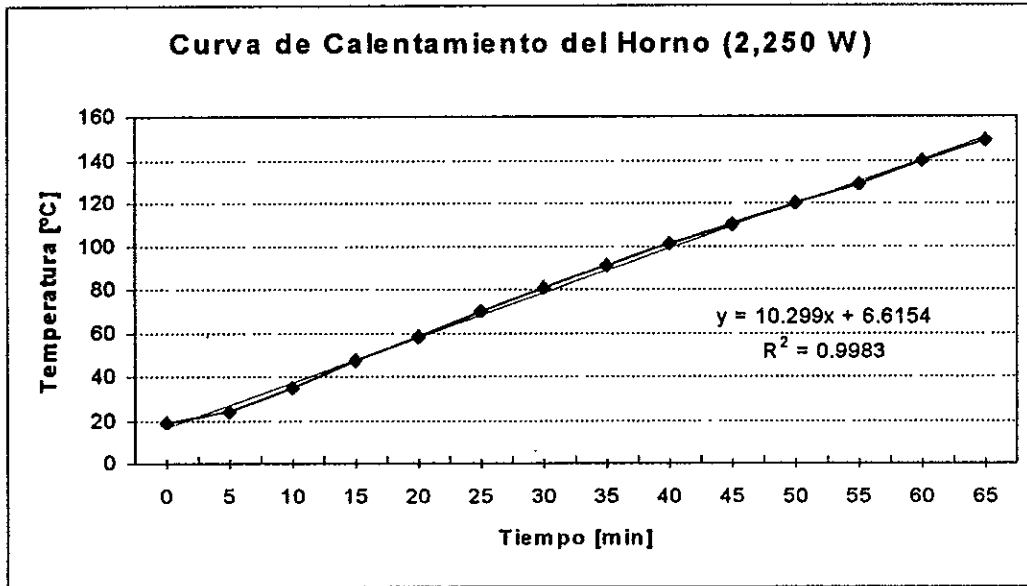


Figura 4.2: Calentamiento del horno sin carga y tres resistencias.

Posteriormente, se hicieron pruebas para establecer la curva de calentamiento del horno sin carga y a capacidad máxima, dando como resultado la gráfica expuesta en la figura 4.3. Su comportamiento se pudo modelar con una función polinomial de tercer grado, de modo que esta gráfica pudo aplicarse durante el desarrollo de esta parte del proyecto, al doblar todos los vidrios con toda la potencia disponible.

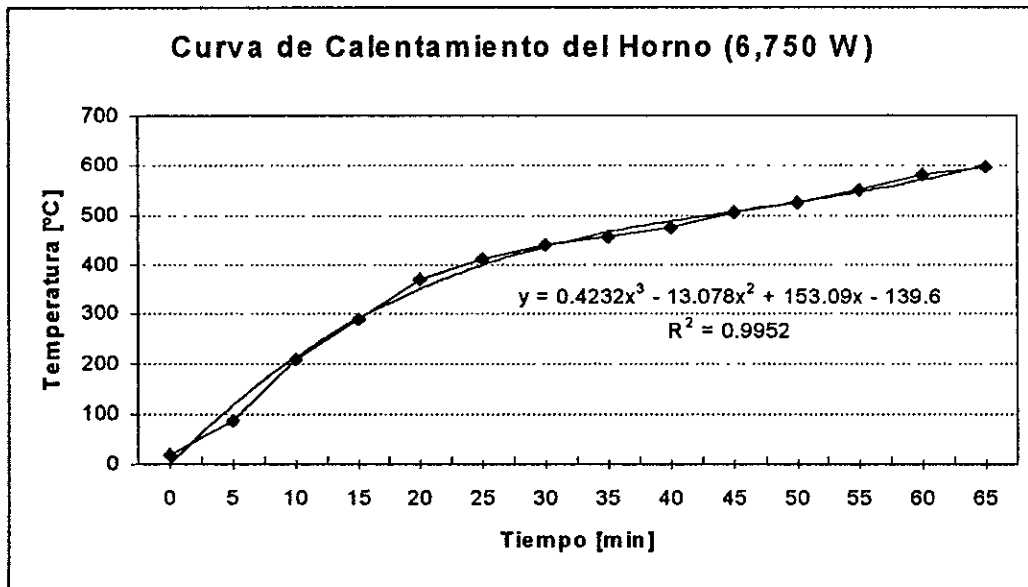


Figura 4.3: Calentamiento del horno a capacidad máxima (nueve resistencias) sin carga.

En las figuras 4.4 y 4.5 se muestran los resultados del doblado de algunos vidrios, primero con carga de un molde, un vidrio y el soporte de ángulo de hierro que se construyó para colocar los moldes dentro del horno.

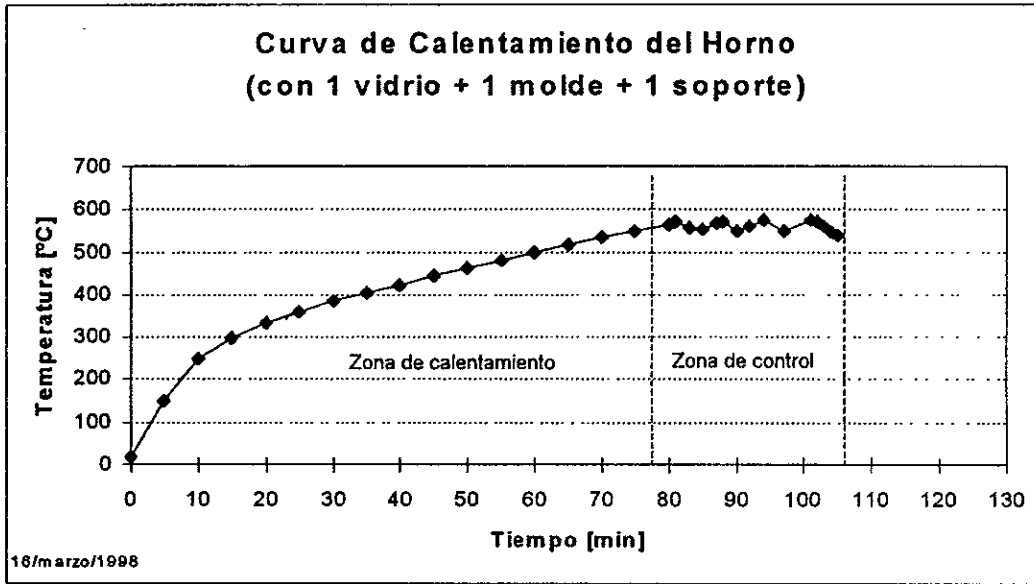


Figura 4.4: Calentamiento y control del doblado de un vidrio.

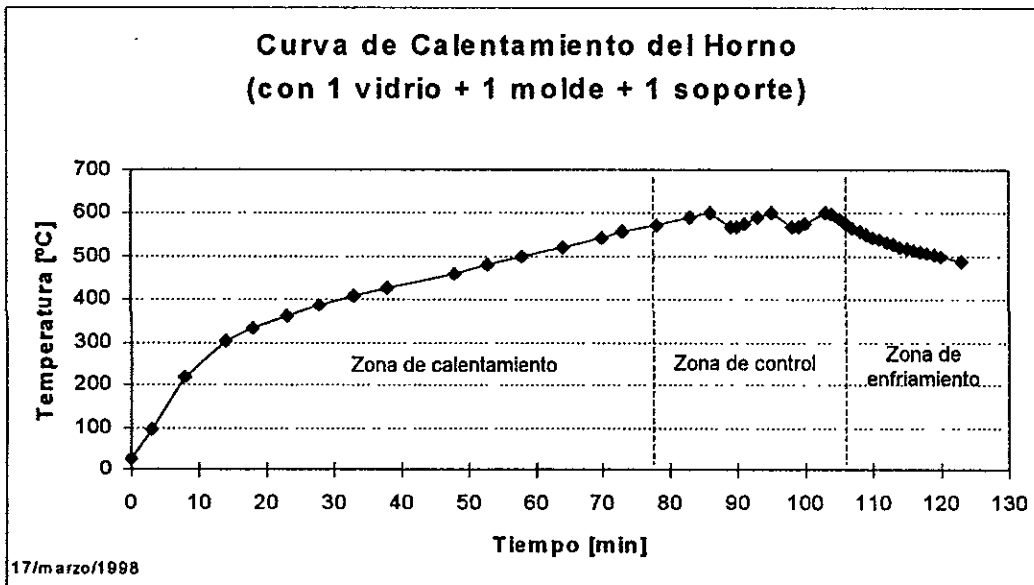


Figura 4.5: Calentamiento, control y parte del enfriamiento en el doblado de un vidrio.

En la figura 4.6 se observa el comportamiento de la mayor parte del proceso de doblado, ya que se puede ver claramente la zona de calentamiento, control a una temperatura (610 °C) y enfriamiento, que se recomienda hasta 150 °C para retirar el vidrio del horno.

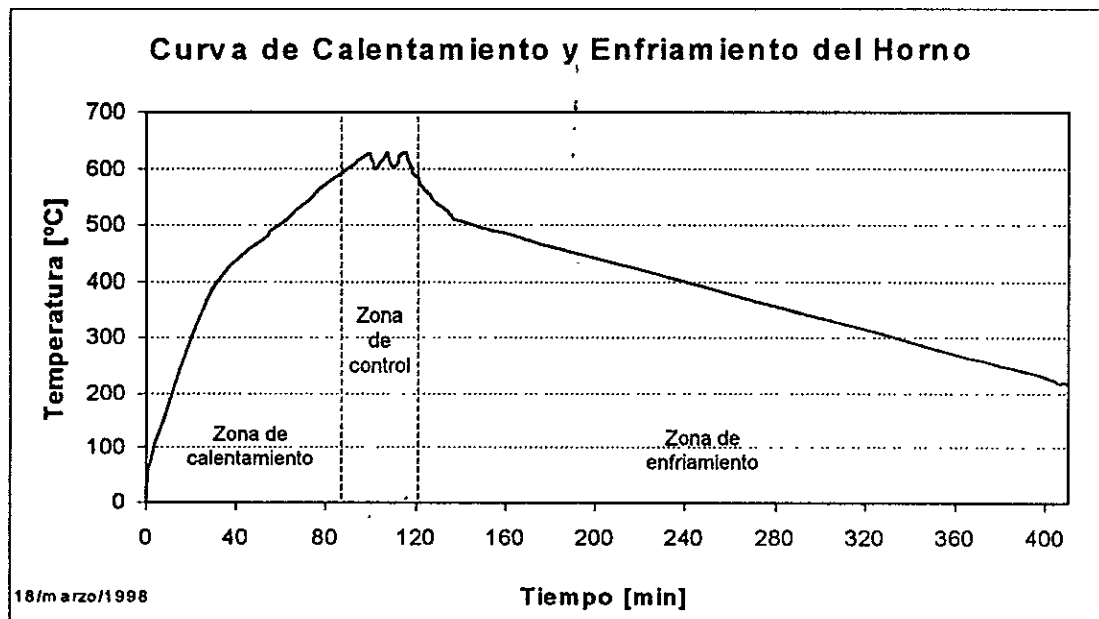


Figura 4.6: Calentamiento, control y enfriamiento del doblado de un vidrio.

El resto de los vidrios se doblaron en lotes de dos, de tal forma que la curva de calentamiento se representa en la siguiente figura:

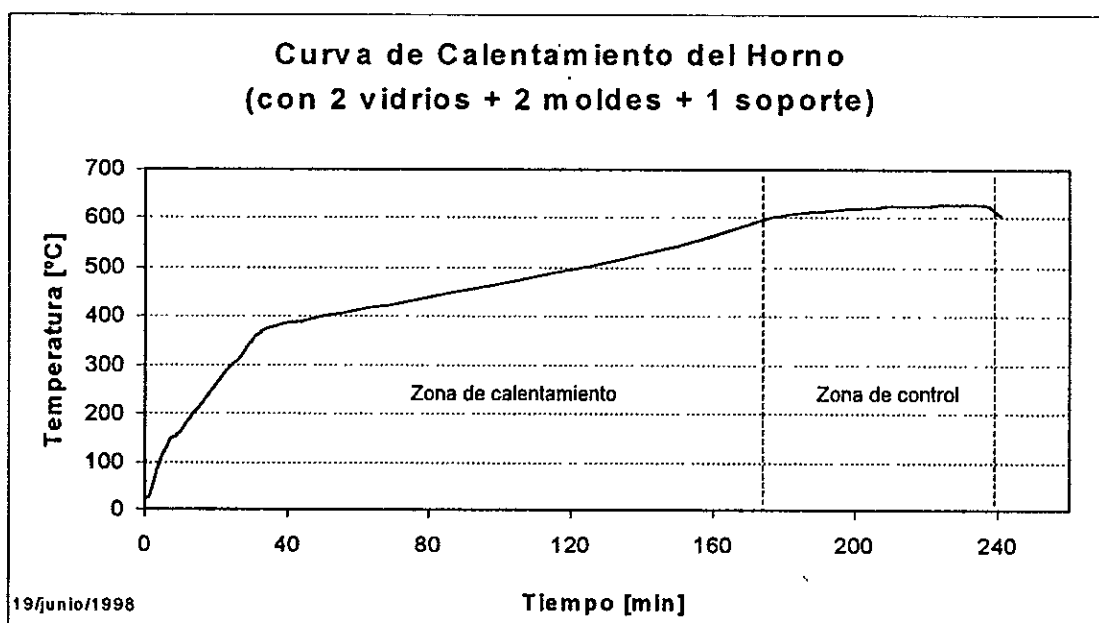


Figura 4.7: Calentamiento del doblado de dos vidrios.

Para desarrollar las curvas de calentamiento (figuras 4.2 y 4.3) se utilizó un termómetro digital Omega® modelo 871-A, cuyo error era de $\pm 1^\circ\text{C}$ y su capacidad máxima de $1,370^\circ\text{C}$. También se utilizó para comprobar y registrar la temperatura en el interior del horno, ya que el controlador no contaba con una pantalla que la indicara.

En las figuras anteriores podemos observar que el calentamiento inicial en el horno, se da de manera rápida debido a que se está en un punto muy cercano al equilibrio térmico con el exterior, por lo que es fácil alejarse de él. Conforme pasa el tiempo y aumenta la temperatura en el interior de horno, es más difícil alejarse del equilibrio y por tanto la curva va tendiendo a una asíntota horizontal.

Una vez que las resistencias están en equilibrio y ceden al medio un flujo de calor constante, las pérdidas hacia el exterior también son constantes; de tal forma que la temperatura en la superficie externa del horno es función del coeficiente de transferencia de calor del material aislante. Así, cuando se llega a la etapa de control a 600°C en el interior del horno, se tienen condiciones de estado estacionario y la temperatura en la superficie externa llega a ser de aproximadamente 90°C .

Para minimizar los riesgos de quemaduras del personal por contacto con la superficie del horno, se colocaron rótulos con el aviso: "Cuidado Superficie Caliente", en cada una de las caras del horno, además se delimitó el área que ocupó dicho equipo

Se debe tener mucho cuidado de que la superficie del molde esté libre de basura o granos de masa-roca, ya que pueden afectar severamente la curvatura del vidrio y por tanto la planaridad del mismo. Por tal motivo, antes de iniciar el doblado de cada lote se limpiaba perfectamente la superficie de cada molde; una vez que el vidrio estaba en proceso de doblado, no existía ningún recubrimiento que protegiera su superficie externa, aunque esto no importaba, ya que no existía ningún riesgo de que algún fragmento de la tabla de fibra cerámica cayera encima de él.

Durante todo el proyecto se dio curvatura a un total de 30 vidrios, lo que incluye la etapa de pruebas y mejoras, así como la de productos finales. Cada lote de dos vidrios tardaba en calentarse a 600°C aproximadamente dos horas, permanecía una hora más en un intervalo de control de $\pm 12^\circ$, aunque en ocasiones (como se puede observar en las figuras 4.4 a 4.7) este intervalo era más grande, y la etapa de enfriamiento duraba más de ocho horas para alcanzar una temperatura de 150°C .

Bajo estas condiciones, se debe tener cuidado en el momento de retirar el vidrio del interior del horno, ya que existe el riesgo de una quemada. En cuanto al vidrio, el choque térmico que sufre no es muy grande y aguanta perfectamente.

4.3 Fabricación de las películas: reflejante de aluminio y protectora de cuarzo

Para fabricar la película reflejante en los espejos de primera superficie, durante la etapa anterior de este proyecto (Martínez, 1997), se utilizó un magnetrón plano con blanco de aluminio (99.99% de pureza), tamaño de 12.7 x 25.4 cm (5 x 10 in) y 1.3 cm (1/2 in) de espesor.

Debido a que en el proceso de erosión iónica, el 95% de la energía de los iones que bombardean al blanco se pierde en forma de calor a lo largo de toda la placa, y sólo el 5% se aprovecha para generar iones secundarios que están relacionados con átomos evaporados (Pulker, 1984), el sistema de enfriamiento con agua dentro de los magnetrones se vuelve indispensable para disipar el calor generado en la superficie y transmitido al interior, lo que incluye la protección de los imanes permanentes (sección 2.5).

Durante uno de los experimentos falló el suministro de agua de enfriamiento y el magnetrón se sobrecalentó durante un periodo aproximado de 30 minutos, de tal forma que los imanes permanentes sufrieron un aumento de temperatura, por lo que la densidad del campo magnético disminuyó aproximadamente un 17%, de un valor de 300 Gauss hasta 250 Gauss en promedio (Anexo B). Con esos valores, la densidad iónica de la zona del plasma que estaba junto al blanco no era suficiente para provocar la erosión de la placa de aluminio, por lo que se tomó la decisión de cambiar a otra técnica de evaporación.

El método o técnica que se utilizó para fabricar la película de aluminio fue la de Evaporación con Filamento de Tungsteno. La cual consistió en colocar un filamento de Tungsteno (W) en forma de espiral (12 espiras totales) entre dos barras de cobre de 1 cm de lado, que funcionaban como electrodos. A ellas se conectaban dos cables de cobre sin aislamiento calibre 0 AWG, con diámetro de 9.525 mm (3/8 in) y 7 hilos con diámetro de 3.175 mm (1/8 in) cada uno, cuya alimentación se hacía a través de una brida especial, cuyas salientes de cobre (llamadas "barras atravesadoras") se conectaban a una fuente de soldar con generador.

La fuente de alimentación se trabajó a un promedio de 280 A y 40 V durante un intervalo promedio de tiempo igual a 4~5 minutos, valores necesarios para provocar el calentamiento del filamento y consecuentemente la fusión y evaporación del alambre de aluminio, cuya pureza era de 99.999%.

En este procedimiento se debe tener mucho cuidado de colocar la cantidad suficiente de aluminio en cada espira del filamento, ya que si se sobrepasa, al formarse la gota de aluminio puede caer sin llegar a evaporarse.

La eficiencia de evaporación del aluminio fue de aproximadamente del 60%, es decir, que el 40% del aluminio se desperdicia al caerse cuando se funde. Por otro lado, no todo el aluminio evaporado llega a depositarse sobre sustrato, ya que se pierde por lo menos el 80% al depositarse en el resto de la cámara de vacío. Al tomar en cuenta las consideraciones anteriores se tiene un rendimiento máximo del 10% global.

Para fabricar la película protectora se utilizó un magnetrón plano con blanco de cuarzo (SiO_2 al 99.99% de pureza) con un tamaño de 12.7 x 25.4 cm (10 x 5 in) y espesor de 0.65 cm (1/2 in). Para llevar a cabo la erosión iónica del SiO_2 se utilizó una fuente de Radio Frecuencia con una potencia máxima de 1.25 kW, con el cátodo inmerso en una mezcla gaseosa reactiva de 70% Argón (grado cromatográfico, 99.998% de pureza) y 30% Oxígeno (grado ultra alta pureza, 99.99%).

Después de depositar la película de aluminio, se procedía al depósito de la película de cuarzo. En la tabla 4.2 se muestra una corrida típica para los espejos de esta etapa, en ella se muestran los valores óptimos para las condiciones de ese momento y que son prácticamente los mismos que para las pruebas hechas en etapas anteriores del proyecto (Martínez, 1997), el significado de cada columna se da en la sección 3.3.5. de este trabajo. Es de suma importancia mantener la cámara de vacío en buenas condiciones de limpieza para evitar la formación de arcos, entre otros fenómenos.

Tabla 4.2: Corrida típica con fuente de radio frecuencia.

Presión [Pa]	Fwd [W]	Rfl [W]	Setpoint [W]	DCbias [V]	Tiempo [h:min:s]	Comentarios
0.82	51	1	50	-004	00:00:20	
0.28	101	1	100	-010	00:00:50	
0.24	201	1	200	-011	00:01:40	
0.25	302	1	300	-027	00:02:30	
0.40	402	1	400	-035	00:03:10	
0.24	502	1	500	-041	00:03:45	
0.33	602	1	600	-046	00:04:35	
0.22	702	1	700	-050	00:05:35	
0.36	802	1	800	-055	00:07:00	Vidrio enfrente
0.29	902	1	900	-059	00:10:00	Algunas chispas
0.31	902	1	900	-059	00:20:00	Algunas chispas
0.28	953	2	950	-060	00:30:00	Algunas chispas
0.29	953	2	950	-060	00:40:00	Plasma por zonas
0.40	1006	3	1000	-061	00:50:00	
0.34	1005	3	1000	-061	01:00:00	Fin de prueba

*La presión mínima registrada antes de la prueba fue de 4.6×10^{-3} mbar

Durante la fabricación de la película protectora de cuarzo, se tuvieron pequeños problemas con arcos formados entre el escudo del magnetrón y el blanco, pero se resolvieron al limpiar perfectamente el interior de la cámara de vacío junto con todos los componentes de su interior.

Por otro lado, hay que tener cuidado de ajustar la distancia que hay entre el escudo y el blanco, que en el caso del aluminio fue de 4 mm y en el caso del cuarzo fue de 5 mm. Una vez uniforme dicha distancia, el riesgo de arco se minimiza. Sin embargo, para futuras pruebas, hay que estar conscientes de que conforme se hagan más evaporaciones, más probabilidades hay de que se acumule un poco de material entre los dos elementos ya mencionados y formen un contacto que provoque corto circuito, por lo que hay que limpiar periódicamente al magnetrón para evitar estos problemas.

4.4 Fabricación del concentrador y montaje en campo

Como ya se mencionó en el capítulo 3, el montaje de los espejos sobre un soporte de fibra de vidrio se llevó a cabo trazando sobre éste líneas guía, dejando dos milímetros de separación entre espejos. Tal espacio se dejó para evitar el roce de un vidrio con otro cuando todo el soporte estuviera en movimiento, ya sea durante la instalación en campo o durante el proceso de enfoque en cada prueba.

Se comprobó que el error en el haz de concentración provocado por dichas separaciones, no fue significativo, ya que durante la fabricación de los moldes se tomó en cuenta este espacio.

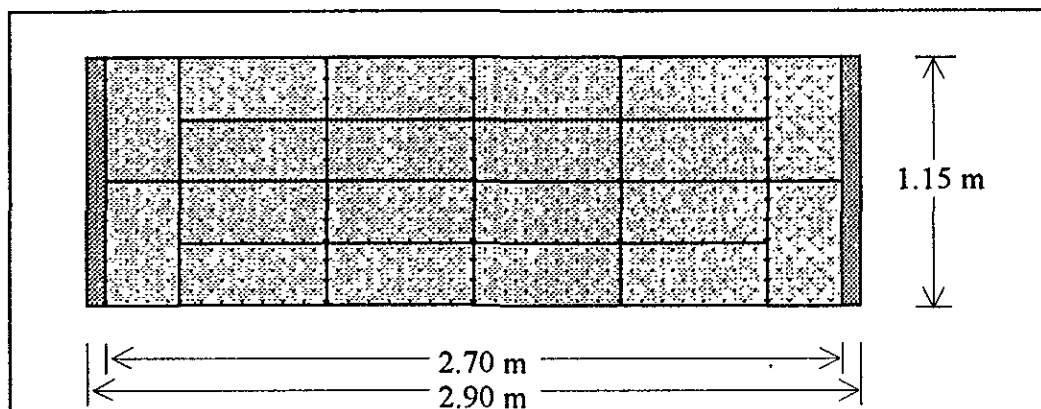


Figura 4.8: Esquema de la distribución de los espejos en el concentrador de canal parabólico (vista de elevación).

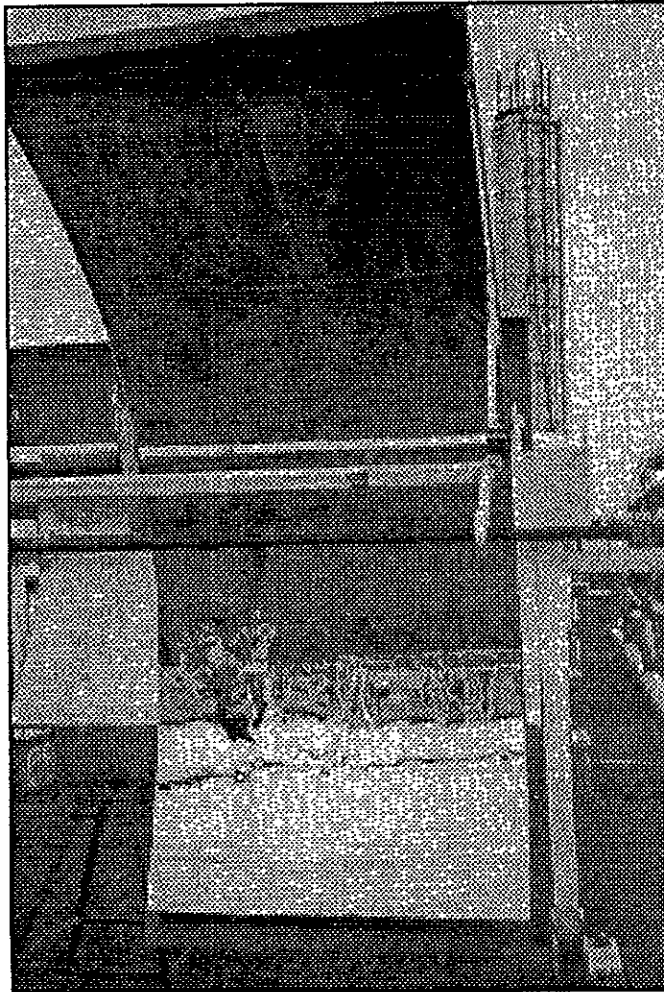


Figura 4.9: Fotografía del concentrador solar de canal parabólico con espejos de aluminio en sustratos de vidrio.

Para fijar cada uno de los espejos, se aplicó una película de silicón en el reverso del vidrio, de tal forma que pasado el tiempo de secado, cada espejo quedó fijo sobre el soporte y se formó el mosaico. Además, entre las separaciones que existían entre los espejos también se aplicó silicón para evitar la acumulación de tierra y humedad.

Cuando un concentrador no está en uso, su posición es como la que se muestra en la figura 4.10, por lo que la parte más cercana al piso está expuesta a mayor degradación por los agentes naturales que actúan sobre el piso, de modo que por motivos de seguridad (como evitar choques del concentrador durante la instalación, piedras del terreno que pegaran en los extremos durante los días de inactividad, etc.), los espejos no cubrieron completamente el área del soporte, de tal forma que se dejó un espacio de 10 cm en cada extremo sin cubrir, lo que se puede apreciar en la figura 4.9. El área total cubierta fue de 3.12 m^2 (20 espejos en total), con una apertura de 2.37 m.

El montaje en campo, se hizo sobre uno de los soportes ya existentes en la planta termosolar del Instituto de Ingeniería, UNAM. El concentrador se fijó con tornillos de 3/8 in. y

para protegerlo se cubrió con una lona de plástico. Se observó que la deformación sufrida por el soporte debido al peso de los espejos no fue significativa, ya que el molde original tiene una apertura de 2.52 m, valor igual al que tiene el concentrador cuando está enfocado.

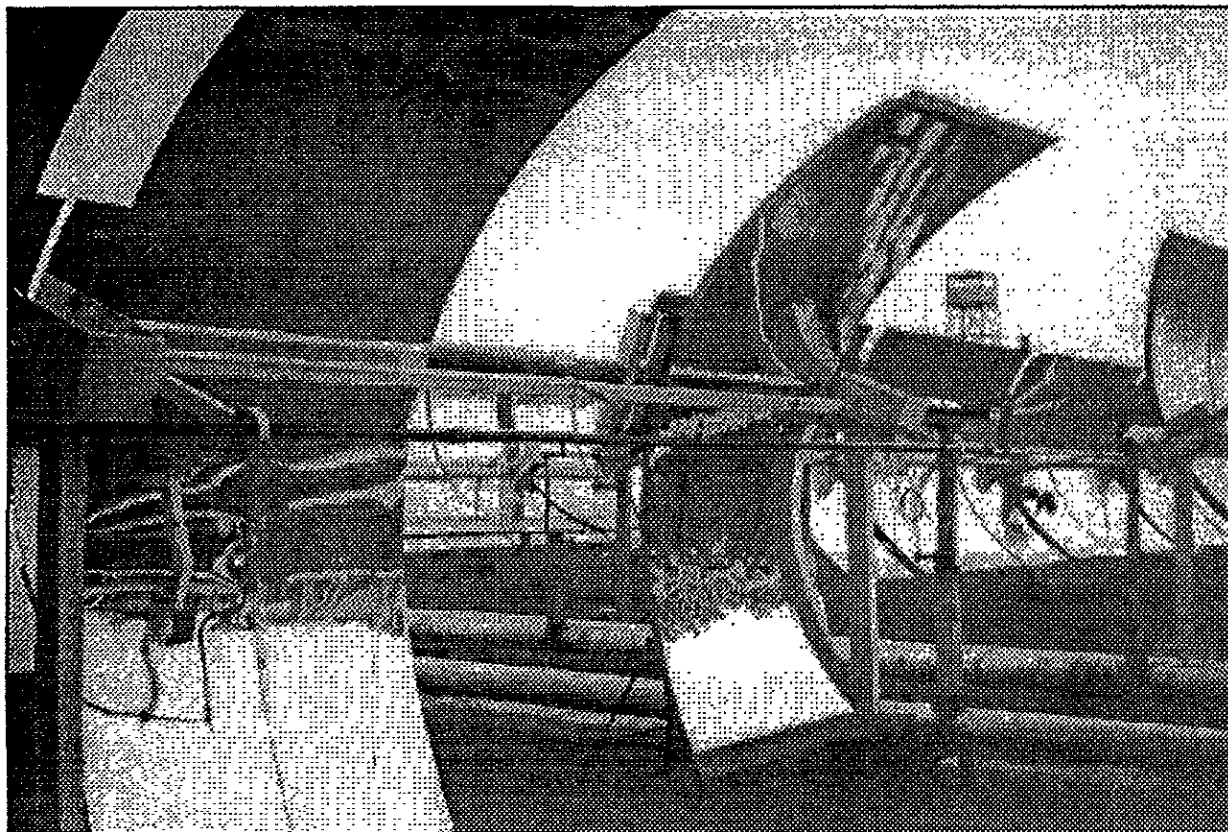


Figura 4.10: Fotografía de dos concentradores de canal parabólico con espejos de aluminio. Uno con espejos comerciales en sustrato de acrílico marca 3M (izquierda) y otro con espejos desarrollados en el Instituto de Ingeniería en sustratos de vidrio comercial de 3mm de espesor (derecha).

4.5 Pruebas de concentración

La evaluación del haz de concentración, en cuanto a enfoque e intensidad, producido por el mosaico de espejos del concentrador se hizo por medio de una serie de celdas fotoeléctricas, que se colocaron perpendicularmente al eje de focal del canal parabólico, y en el vértice de cada una de las hileras de espejos. De tal forma que, a partir de la diferencia de potencial generada en dichas celdas y medida con un multímetro sobre el foco de la parábola donde se colocaba el tubo absorbedor de 2.54 cm de diámetro, se cuantificó la eficiencia de concentración en cuatro zonas del mosaico de espejos, algunas de las mediciones se exponen en las tablas 4.3 y 4.4. En la figura 4.11 se esquematiza la zona del tubo absorbedor en la que se tomaron las mediciones.

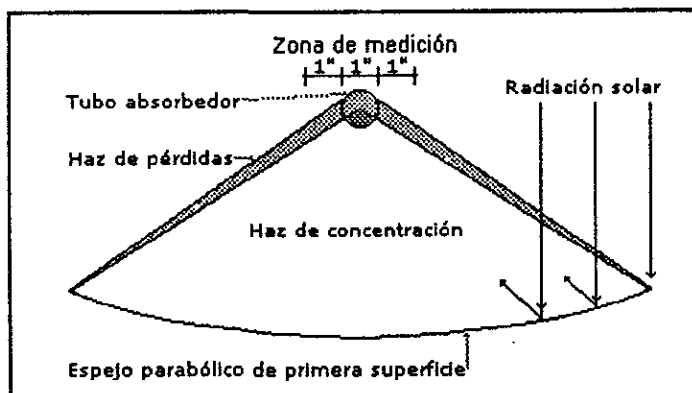


Figura 4.11: Esquema del haz de concentración y pérdidas del concentrador de canal parabólico.

Con el fin de llegar a establecer una comparación entre el concentrador con espejos de vidrio y el concentrador con espejo comercial de aluminio PMMA marca 3M SA-85P, se tomaron dos lecturas diferentes, una para cada uno de ellos. Esta última lectura sirvió para comparar el desempeño en el enfoque del mosaico de espejos, ya que la superficie del espejo comercial era más plana.

Tabla 4.3: Ejemplos de mediciones de pérdidas de energía alrededor del tubo concentrador.

Concentrador con espejo 3M			Concentrador con espejo de vidrio		
Irradiancia [mV]					
Hora del día	Global	Max	Hora del día	Global	Max
12:35	43.7	53.6	12:30	43.9	53.8
Distancia*	Norte	Sur	Distancia*	Norte	Sur
3 cm	73	78	3 cm	61	56
6 cm	40	38	6 cm	38	35
9 cm	24	26	9 cm	31	29
Irradiancia [mV]**					
Hora del día	Global	Max	Hora del día	Global	Max
12:10	45.1	54.0	12:05	42.8	53.2
Distancia*	Norte	Sur	Distancia*	Norte	Sur
3 cm	75	81	3 cm	63	58
6 cm	42	41	6 cm	40	38
9 cm	28	31	9 cm	24	19

*La distancia es con respecto al tubo absorbedor.

**Condiciones semibrumosas, algo de nubosidad y contaminación

En la tabla anterior, la referencia define la hora del día en que se llevó a cabo la medición, junto con la lectura tomada al colocar la fotocelda en posición horizontal hacia arriba (irradiancia global) y para tener un dato de comparación en el momento en que el

concentrador esté enfocado y por tanto en funcionamiento se tomó la lectura cuando la fotocelda hacia arriba con la inclinación del Sol (irradiancia máxima). Los datos promedio de las tablas 4.3 y 4.4 se expresan de manera gráfica en las figuras 4.12 y 4.13.

Las mediciones de irradiancia solar, hechas indirectamente por una fotocelda (área de aproximadamente de 12.2 cm²) cuya respuesta se daba en mV, también se llevaron a cabo por cada sección de espejo en cada concentrador, es decir, para cada una de las cuatro hileras longitudinal de espejos en sustratos de vidrio se tomó una lectura y para los espejos comerciales fueron dos secciones. Un ejemplo de este tipo de mediciones se escribe en las tablas 4.5 y 4.6.

Las mediciones expuestas en la siguiente tabla se refieren a lecturas tomadas directamente en el foco de cada concentrador, donde además se establece la irradiancia global y máxima cuando se expone la fotocelda directamente al sol en posición horizontal y con inclinación respectivamente.

Tabla 4.4: Algunas mediciones de irradiancia hechas en el foco de cada concentrador.

Hora del día	Global	Max			
11:10	39.4	48.0	Foco	Global	Max
Concentrador con espejo 3M			292.4	39.2	50.3
Concentrador con espejo de vidrio			331.3	41.8	51.8
Hora del día	Global	Max			
11:30	42.5	51.4	Foco	Global	Max
Concentrador con espejo 3M			315.3	42.8	51.3
Concentrador con espejo de vidrio			346.8	40.5	51.0
Hora del día	Global	Max			
11:50	44.6	54.7	Foco	Global	Max
Concentrador con espejo 3M			303.0	45.7	54.2
Concentrador con espejo de vidrio			348.2	46.6	54.8
Hora del día	Global	Max			
12:00	45.3	56.4	Foco	Global	Max
Concentrador con espejo 3M			318.0	45.8	56.7
Concentrador con espejo de vidrio			353.0	47.9	56.8

*Nota: todos las cantidades de Irradiancia solar tienen unidades de mV.

Se dice que es una medida indirecta ya que se asume que el valor de irradiancia solar es directamente proporcional al voltaje generado por una celda fotoeléctrica. Además, cada fila longitudinal de espejos presenta una lectura de voltaje ligeramente diferente, lo mismo ocurre con el espejo comercial 3M. Esto se debe a la diferencia de especularidad de cada sección.

Tabla 4.5: Ejemplo de mediciones hechas en el foco de cada fila de espejos de vidrio.

	Medición 1*	Medición 2*	Promedio*
Global inicial	50.1	50.8	50.5
Fila 1	347	350	349
Fila 2	343	340	342
Fila 3	352	349	351
Fila 4	341	336	339
Global final	49.3	48.9	47.5

*Nota: Todos los valores de Irradiancia solar están expresados en mV.

Tabla 4.6: Ejemplo de mediciones hechas en el foco de cada fila de espejos comerciales 3M.

	Medición 1	Medición 2	Promedio
Global inicial	48.4	48.3	48.4
Fila 1	318	314	316.0
Fila 2	306	308	307.0
Global final	47.2	47.1	47.2

*Nota: Todos los valores de Irradiancia solar están expresados en mV.

Todas las pérdidas de irradiancia solar se midieron, por cada fila de espejos de cada concentrador, a 3 cm con respecto a los extremos norte y sur del tubo absorbedor ya que su orientación es este-oeste. Además, como referencia se tomó la lectura de irradiancia solar antes y después de cada medición, esto con el fin de evidenciar la poca variabilidad de las condiciones en ese momento. Algunas de las lecturas tomadas se exponen en las tablas 4.7 y 4.8, a continuación:

Tabla 4.7: Lecturas generadas por pérdidas de Irradiancia en los espejos de sustrato de vidrio.

Global inicial		48.9	50.3	49.6
Global final		50	49.8	49.9
		Pérdida 1 [mV]	Pérdida 2 [mV]	Promedio [mV]
Fila 1	Norte	45	55	50
	Sur	35	38	37
Fila 2	Norte	51	52	52
	Sur	47	41	44
Fila 3	Norte	55	52	54
	Sur	42	44	43
Fila 4	Norte	65	62	64
	Sur	43	49	46

Tabla 4.8: Lecturas generadas por pérdidas de Irradiancia solar en los espejos comerciales.

Pérdida [mV]		
Global		47.4
Fila 1	Norte	48
	Sur	44
Fila 2	Norte	60
	Sur	63
Global		45.3

En las figuras 4.12 y 4.13 se puede observar el perfil de distribución de la irradiancia solar concentrada en el tubo absorbedor y en sus alrededores.

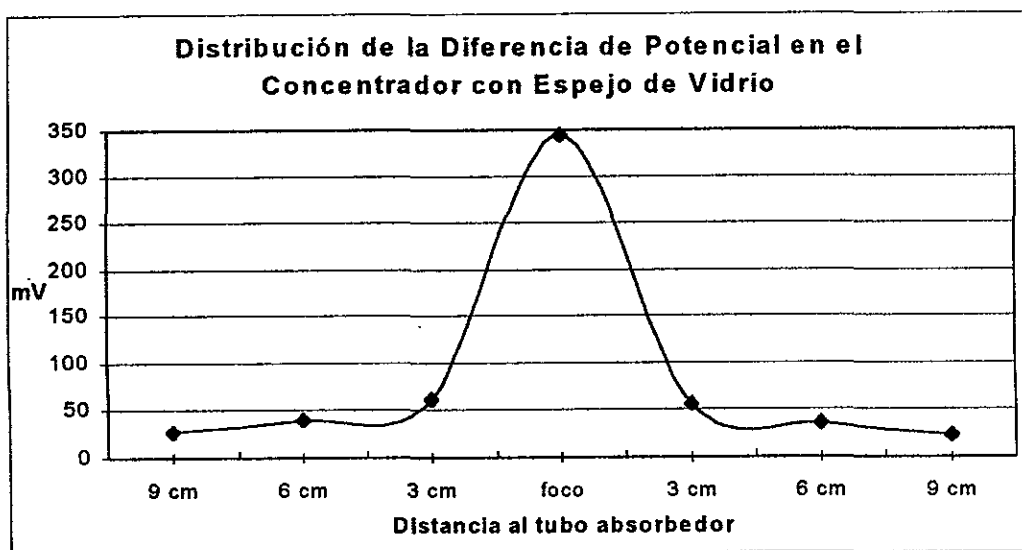


Figura 4.12: Perfil de pruebas en campo del concentrador con espejos en sustratos de vidrio.

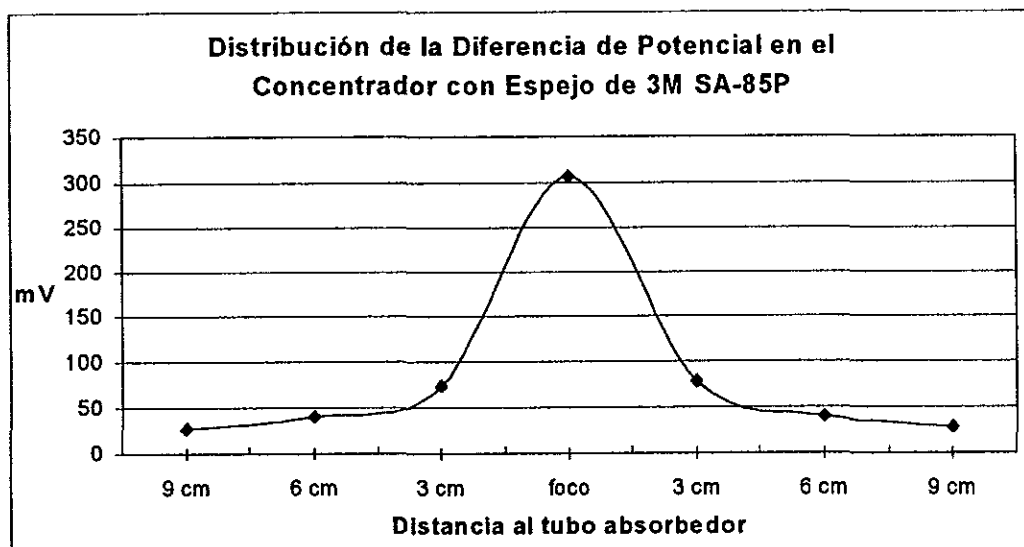


Figura 4.13: Perfil de pruebas en campo del concentrador con espejos comerciales 3M.

4.6 Análisis de resultados

Como primera parte de este análisis se encuentra el desempeño del horno que se utilizó para doblar los espejos, así como el material que se utilizó para los moldes. Posteriormente se desarrollará la discusión del resto de los resultados.

4.6.1 Proceso de fabricación de los espejos.

De acuerdo con la ecuación 4.3, el flujo de calor promedio que circulaba a través de las paredes del horno fue de 1533 J/s (5518.7 kJ/h), de tal forma la temperatura promedio en el exterior de dichas paredes era de 90 °C y en el interior de 600 °C, a régimen estacionario.

Las pérdidas estimadas representan el 22.7% de la capacidad instalada. Es indudable que se pueden minimizar estas pérdidas, no obstante, debido a las limitaciones de espacio no se pudo colocar un aislante de mayor espesor.

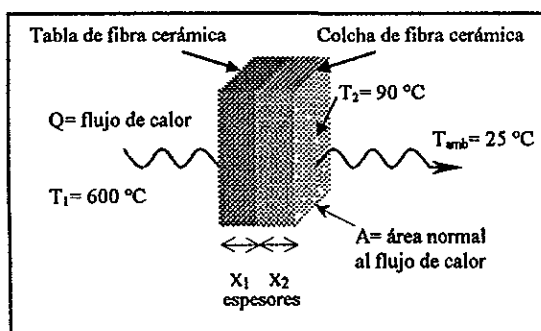


Figura 4.14: Esquema del flujo de calor a través de las paredes del horno.

$$Q = \frac{(T_1 - T_2) \cdot A}{\frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2}} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

- Donde:
- Q --- flujo de calor del interior al exterior del horno [J/s]
 - T_i --- temperatura de la superficie en cada punto [°C]
 - x_i --- espesor del aislante [m]
 - k_i --- conductividad térmica del aislante [W/(m·°C)]

La cantidad de calor perdido puede considerarse alta, sin embargo, debido a las limitaciones de espacio y al costo de los materiales aislantes y refractarios necesarios para un mejor aislamiento, no se justificó el gasto en ellos.

El sistema de control estuvo bien diseñado, ya que mantenía la temperatura en un intervalo bastante aceptable ($\pm 2\%$ de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$) y las partes que lo componían fueron suficientes para mantener la intermitencia necesaria en la alimentación de corriente a las resistencias.

Con el horno usado, fue necesario un tiempo de dos horas para llegar a la temperatura de reblandecimiento del vidrio y una hora más para que adquiriera la curvatura del molde.

En cuanto al desempeño de los materiales durante el calentamiento, se observó que el material masa-roca[®] a alta temperatura depende mucho del fraguado, ya que según la humedad con la que cuente al principio de las pruebas, así sería el tiempo de vida útil para el doblado de vidrios.

Sin embargo, después de cierto tiempo siempre se hizo quebradizo y poco a poco se separaba de la estructura de malla que le daba soporte. Por tal motivo, siempre hubo que tener cuidado de revisar la superficie y curvatura de los moldes, ya que en promedio su vida útil fue de 6 ciclos de calentamiento y enfriamiento, en el que permanecían aproximadamente una hora a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Así, hubo necesidad de construir diez moldes en total.

Debido a que el magnetrón con blanco de aluminio sufrió una baja en el campo magnético de los imanes, se tuvo que cambiar de método para fabricar la película reflejante. De tal forma que se utilizó la técnica de evaporación por calentamiento indirecto, es decir, se instalaron dos filamentos de tungsteno (W) conectados en paralelo a un par de electrodos.

La ubicación de los filamentos se hizo a una distancia tal que dividían al espejo en tres partes, es decir, a 10 cm de los bordes del espejo. La razón de tal ubicación se debió a que de esta manera se tendría una evaporación uniforme sobre el sustrato de vidrio y por tanto una película más homogénea. Los parámetros de esta evaporación se dan en la tabla 4.9:

Tabla 4.9: datos de una corrida típica para la evaporación con filamento de W.

Cantidad de aluminio:	~ 0.4 g
Cantidad de corriente:	280 A*
Diferencia de potencial:	40 V**
Tiempo de evaporación:	4 minutos
Eficiencia:	10 %

*Medición hecha con un amperímetro de gancho.

**Medición hecha con un voltmetro digital.

En cuanto a la evaporación de la película protectora de cuarzo, mediante la técnica de erosión iónica con magnetrón plano se tiene un caso típico en la tabla 4.4.

Se observó que durante la evaporación reactiva de cuarzo, con fuente de radio frecuencia, se producían algunos arcos entre el plasma y el blanco, entre el blanco y el escudo del magnetrón, y ocasionalmente entre el plasma y la cámara de vacío.

Tales arcos se debían a depósitos de residuos carbónicos adsorbidos en las paredes de la cámara de vacío y cuerpo del magnetrón. Para corregir este defecto, se hizo una limpieza exhaustiva con agua y alcohol isopropílico de todo el interior de la cámara; de esta forma se eliminaron las descargas y las subsiguientes evaporaciones reactivas de cuarzo procedieron sin problemas.

En general, se comprobó que las condiciones óptimas de operación para la fabricación de la película protectora de cuarzo son las que se expresan en la tabla 4.10, las que se mantuvieron prácticamente constante aún antes de la limpieza total.

Tabla 4.10: Parámetros típicos para la fabricación de la película de SiO₂ con magnetrón plano.

Presión de arranque:	0.85 Pa (8.5×10^{-3} mbar)
Presión de operación:	0.3 Pa \pm 0.03 Pa (3.0×10^{-3} mbar)
Potencia de evaporación:	900 W (para un blanco de 5x10 in y ¼ in espesor)
Potencial entre electrodos (DCbias):	> -060 V
Potencia reflejada:	< 1% de la potencia de evaporación
Tiempo de exposición:	50 minutos
Composición del gas:	70% argón – 30% oxígeno
Tamaño del sustrato:	0.3x0.6 m

4.6.2 Funcionamiento en campo.

La metodología para llevar a cabo el análisis de los datos recolectados en campo, y con ello la evaluación de los concentradores, fue la siguiente:

- 1) Se vaciaron los datos de voltaje producido por la fotocelda en dos tablas, una para las pérdidas alrededor del tubo y otra para los valores en el foco de cada concentrador (tablas 4.3 a 4.8).
- 2) Se calculó la variación de los datos y su promedio, tomando en cuenta las variaciones de la irradiancia solar en cada instante para cada medición y se normalizaron los datos para compensar la diferencia de áreas.
- 3) Se asumió que las pérdidas de energía solar, debido a la especularidad y al enfoque del concentrador, eran significativas solamente a 2.4 cm de distancia a cada lado del tubo

absorbedor. Por lo que la lectura registrada en el foco que sumó con la de las pérdidas y de esa manera se establecía el 100% de la irradiancia captada.

- 4) De modo que para calcular la fracción de incidencia de la irradiancia solar reflejada, se dividió la lectura obtenida sobre el foco entre la suma de lo expuesto en el punto 3.
- 5) Este procedimiento se aplicó para cada una de las mediciones hechas. De tal forma que, para generalizar los resultados se calculó una desviación estándar y un promedio para cada zona de medición.

En las tablas 4.11 y 4.12 se establecen los datos ya procesados, en ellas aparece el porcentaje de pérdidas, el promedio de los valores y la desviación que estos presentaron en todas las mediciones para cada concentrador. Así se cuantifica el grado de afectación del enfoque y la especularidad.

Se debe tomar en cuenta que las lecturas tomadas varían según la época del año en que se lleva a cabo, ya que el ángulo de inclinación del Sol cambia, sin embargo el rendimiento será constante.

El resultado de los análisis se expresa en las siguientes tablas:

Tabla 4.11: Concentrador parabólico con espejos en sustratos de vidrio.

Vidrio	Foco	Perdida N	Perdida S	Σ de pérdidas	Total	% Pérdidas	% Útil
Fila 1	348.5	50.0	36.5	86.5	435.0	19.9%	80.1%
Fila 2	341.5	51.5	44.0	95.5	437.0	21.9%	78.1%
Fila 3	350.5	53.5	43.0	96.5	447.0	21.6%	78.4%
Fila 4	338.5	63.5	46.0	109.5	448.0	24.4%	75.6%
Promedio	344.8	54.6	42.4	97.0	441.8	21.9%	78.1%

Tabla 4.12: Concentrador parabólico con espejos comerciales.

3M	Foco	Perdida N	Perdida S	Σ de pérdidas	Total	% Pérdidas	% Útil
Fila 1	316.0	48.3	44.0	92.3	408.3	22.6%	77.4%
Fila 2	307.0	60.0	63.0	123.0	430.0	28.6%	71.4%
Promedio	311.5	54.2	53.5	107.7	419.2	25.6%	74.4%

Se tiene que el porcentaje de pérdidas en el proceso de concentración de la energía solar está un poco por arriba del esperado, ya que de un valor de 15% estimado se obtuvo un 21.9%, en el concentrador prototipo de espejos con sustrato de vidrio. En el otro concentrador las pérdidas se estimaron en 25.6 %.

Tal valor se debe principalmente a la especularidad de cada uno de los espejos, cuyo efecto sumado es significativo. Esta afirmación se apoya en las evidencias visuales del haz de concentración, cuya forma sobre el tubo absorbedor era muy irregular. Además se debe añadir el error que se tiene por la orientación del concentrador con respecto al sol y el error por el perfil de cada uno de los espejos, así como del soporte mismo.

Se observó que el esquema de mosaico es funcional para este tipo de concentrador solar y que con la debida alineación para cada parte puede llegar a formarse un espejo que funcione como uno de tamaño mayor.

Por otro lado, se asumió que el valor de reflejancia de los mejores espejos obtenidos en la etapa anterior a este proyecto (0.86) fue el mismo que el de los construidos en este trabajo. Tal simplificación se apoya en la gran cantidad de pruebas hechas con anterioridad (Martínez, Correa, et al, 1997).

Para poder comparar los resultados de la medición de reflejancias, se elaboró la tabla 4.13 en la que especifican los valores de cada uno de los espejos comerciales probados en la planta termosolar del Instituto de Ingeniería, UNAM. Tres de ellos tienen un tiempo de exposición de al menos 16 años a la intemperie, mientras que los espejos de primera superficie elaborados en la primera etapa del proyecto y los de plata comercial marca 3M, llevan tres años de exposición. Por último están los concentradores montados en Agosto de 1998, que son el objeto de este trabajo.

Tabla 4.13: Reflejancia especular de algunos espejos comerciales después de 2 y 16 años de exposición a la intemperie en la planta Termosolar del Instituto de Ingeniería, UNAM (Almanza, et al, 1998).

Tipo de Espejo	Reflejancia $\rho_s(\pm 0.001)$		Tiempo [años]	Comentario
	Inicial	Final		
FEK – 244 (PMMA con aluminio)	0.86	0.73	16	Efecto túnel y corrosión.
Kingston (Aluminio Electropulido)	0.86	0.49	16	Placa de aluminio muy opaca.
Aluminio en PMMA (Acrílico con 3 mm de espesor)	0.85	0.72	16	Efecto túnel y corrosión. Espejos mexicanos.
3M ECP – 305 (PMMA con plata)	0.95	0.92	2.5	Efecto túnel, corrosión y agrietamiento del acrílico.
Espejos de aluminio de primera superficie planos.	0.85	0.83	2.5	Sustrato de vidrio bien. Películas en buenas condiciones.
3M SA – 85P (de aluminio) (PMMA con inhibidores de UV)	0.85	0.84	<1	Inicio de efecto túnel, se raya fácilmente.
Espejos de aluminio de primera superficie curvos	0.85	0.85	<1	No presentan ningún tipo de degradación.

Se puede observar que el valor de reflejancia en los espejos de primera superficie con tres años de exposición cumple con el objetivo de tener una vida útil larga, por lo que se estima la misma vida útil para los espejos de este proyecto. Aunque la extrapolación a 10 años tiene cierta incertidumbre, podemos decir que es un resultado bastante alentador, ya que al hacer las mejoras pertinentes en ciertas deficiencias del sistema, se pudieron mejorar las propiedades de los espejos, al punto de equipararse con las de los espejos hechos por otros métodos.

Finalmente, se puede establecer con los resultados obtenidos de los espejos, una evidencia suficiente como para decidir si tales espejos pueden llegar a utilizarse en una planta termosolar. El manejo de la cantidad de oxígeno, como variable durante la fabricación de la película protectora de cuarzo, es determinante para la obtención de espejos de alta reflejancia y alta resistencia a la intemperie, sin embargo, se requiere perfeccionar la técnica para obtener espejos de alta calidad empleando el mínimo de recursos y tiempo.

El problema de la diferencia de espesores continuó hasta el final de las pruebas sin llegar a ser significativo ya que se pudo minimizar, sin embargo, se puede resolver en etapas futuras de desarrollo. Este problema está directamente relacionado con la especularidad y por tanto afecta directamente al valor de reflejancia.

Después de siete meses de instalado en campo, sin ningún tipo de protección más que un mantenimiento periódico de limpieza, cada uno de los espejos ha soportado los embates de los factores climáticos de la Ciudad de México, ya que a simple vista no se detecta ningún tipo de degradación o deterioro.

Como ejemplo de las condiciones ambientales en esta ciudad están las emisiones anuales de diferentes contaminantes, las cuales se exponen en la tabla 4.14.

Tabla 4.14: Emisiones anuales de los principales contaminantes en la Ciudad de México¹.

SO ₂	45,468 ton/año
CO _x	2,358,141 ton/año
NO _x	128,646 ton/año
HC	1,025,579 ton/año
Partículas suspendidas	451,614 ton/año

¹ Fuente: Instituto Nacional de Ecología, Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México 1995-2000, SEMARNAP, México, (1995).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este proyecto de investigación se plantearon dos objetivos fundamentales, el primero estableció la necesidad de desarrollo y fabricación de un prototipo de colector solar de canal parabólico utilizando vidrio cal-sosa flotado comercial como sustrato de la superficie reflejante, y el segundo consistió en desarrollar la metodología para la fabricación de dichas películas reflejantes con técnicas de evaporación al vacío en espejos de primera superficie.

A continuación se describen las conclusiones y recomendaciones obtenidas de este proyecto, las cuales se pueden tomar en cuenta en trabajos futuros, de tal forma que sirvan como base sólida para mejorar lo ya hecho.

5.1. Conclusiones

La conclusión principal de este proyecto establece como eficiencia de concentración promedio, obtenida para el concentrador fabricado con espejos de aluminio de primera superficie, igual a 78.1%. Mientras que para el concentrador de espejos comerciales 3M SA-85P fue de 74.4%. Sin embargo, se puede mejorar probablemente a 85% al disminuir las pérdidas por especularidad. Las que en su mayoría se debieron principalmente a que durante el proceso de curvado, un alto porcentaje de vidrios no mantuvo la planaridad original.

La reflejancia promedio de los espejos se estableció en 0.85, valor que se comprueba indirectamente con la cantidad de pérdidas obtenidas y se estima una vida útil de al menos diez años (Martínez, I. Tesis de Licenciatura, 1997).

Para lograr un rendimiento máximo del estado actual de los concentradores, se deben usar tubos absorbentes de mayor diámetro, preferentemente de 5.08 cm (2 in). Con ellos se

puede aprovechar al máximo el haz de concentración, lo que reduciría las pérdidas significativamente-

La fabricación de espejos para los concentradores de canal parabólico de la planta termosolar del Instituto de Ingeniería es factible y eficiente, sin embargo, por ser un proyecto de investigación se tienen costos de fabricación altos, pero que es posible disminuirlos considerablemente en un corto plazo.

La tecnología de erosión iónica es muy eficiente y aplicable en procesos industriales para la fabricación de espejos solares, además es ambientalmente compatible porque no tiene subproductos tóxicos ni peligrosos, sin embargo aun tiene costos de operación relativamente elevados.

Los concentradores se instalaron en campo el día 4 de Agosto de 1998, de modo que a la fecha llevan aproximadamente 8 meses a la intemperie, lo que incluye una temporada de lluvias que es la que más los degrada. Por lo que, las pruebas de intemperismo acelerado llevadas a cabo con anterioridad se comprobarán con los resultados que se obtengan de la evaluación del desempeño de los espejos montados en campo.

El uso de los parámetros de evaluación obtenidos en la etapa anterior de este proyecto es válido, ya que los valores de reflejancia de los nuevos espejos estuvieron en el intervalo de los reportados con anterioridad. Sin embargo, se puede elevar la reflejancia especular de los espejos fabricados utilizando otros materiales de protección o con un control más fino de la presión dentro de la cámara de vacío, durante la evaporación del cuarzo.

Se pudo desarrollar de manera satisfactoria el procedimiento para la fabricación de espejos de aluminio de primera superficie con perfil parabólico para los colectores solares de la planta del Instituto de Ingeniería, UNAM. Tal procedimiento es factible de escalarse para una etapa de producción industrial.

La integración de un mosaico de espejos para completar la superficie de un colector solar de canal parabólico es factible y práctica. Sin embargo, cada segmento debe poseer la curvatura exacta y colocado perfectamente en el lugar que le corresponde. Esto se podría extrapolar a un diseño de mosaico con espejos de 60 x 60 cm o cualquier otro tamaño.

El calentamiento durante el doblado del vidrio debe ser a una temperatura promedio de 600 °C con una tolerancia de oscilación de $\pm 2\%$ y un tiempo de permanencia aproximado de una hora. De lo contrario, la curvatura del vidrio se hace irregular, ya que se forman ondulaciones transversales a lo largo de la superficie.

Para la curvatura de los espejos es necesario que los moldes estén libres de cualquier basura o granitos acumulados, ya que pueden marcar la superficie del vidrio. Además, es importante la ausencia de huecos o cualquier otro defecto de fabricación del molde.

El material utilizado para la fabricación de los moldes, la Masa-roca^{MR}, es excelente para dar la curvatura exacta por su gran plasticidad y poca contracción durante el fraguado. Sin embargo, es demasiado susceptible a las condiciones de preparación, al punto de que si no se sigue estrictamente el procedimiento de preparación, se vuelve quebradizo y no aguanta ni un solo ciclo de calentamiento y enfriamiento en el horno.

El uso de silicón, como medio para fijar los espejos, es una forma sencilla y rápida de armar el concentrador. Durante las pruebas en campo no presentó ningún problema, sin embargo, para una mayor cantidad de espejos no es práctica esta solución, ya que se necesitaría un sistema que permita cambiar los espejos que se deterioren por la intemperie o por un accidente durante el mantenimiento.

Además de la tecnología de Erosión Iónica con magnetrón plano, se puede utilizar otras con una eficiencia de depósito menor, pero que para fines prácticos, el resultado que arrojan es competitivo con el primero. En este trabajo se utilizó la evaporación de aluminio en filamento de tungsteno, con lo cual se obtuvieron resultados semejantes a de "sputtering".

5.2. Recomendaciones

Como cálculo adicional para una mejor caracterización del concentrador de canal parabólico, se plantea como un trabajo futuro la necesidad de definir una función tal que cuantifique y describa el llamado "concentrator error cone" (Romero, 1994). Tal función (cono error de concentración) se calcula según la metodología estandarizada en *Sandia National Laboratories*.

Se recomienda mezclar la masa-roca con arena muy fina para aumentar su resistencia a la temperatura, ya que con los ciclos de enfriamiento y calentamiento el choque térmico degradaba el material de manera significativa. Se recomienda arena por la gran cantidad de sílice que contiene, el cual es un material resistente a la temperatura de doblado del vidrio, que al combinarse con los componentes de la masa-roca mejora sus propiedades.

Para lograr una mejor uniformidad en la planaridad del mosaico de espejos, se recomienda llevar a cabo la fabricación de piezas con un tamaño de 60 x 60 cm, el cual corresponde al tamaño máximo que puede introducirse a la cámara de vacío. Sin embargo, debido al tamaño de los magnetrones, sería necesario abrir la cámara de vacío para darle una vuelta de 180° a la misma cara del vidrio con el fin de aluminizar una mitad a la vez, cubriendo con alguna película protectora la mitad que no se esté recubriendo. Tal procedimiento no debería afectar significativamente a la calidad de las películas, lo cual sería necesario evaluar. Por otro lado, se debe tener especial cuidado con el manejo de vidrios de este tamaño por parte del personal que los construya, limpie e/o instale; ya que por el tamaño puede llegar a costar mucho cualquier espejo roto.

Es muy importante mantener un indicador de agua de enfriamiento durante la fabricación de las películas reflejante y protectora con magnetrón plano, de esta manera se puede minimizar el riesgo de sobrecalentamiento de los imanes. Esto se recomienda principalmente para el espejo de 60 x 60 cm, ya que durante la segunda evaporación sólo con magnetrones, se podría correr el riesgo de calentar la primera mitad de espejo ya terminado, degradándose considerablemente.

Para garantizar una película uniforme de aluminio usando la técnica de evaporación con filamento, se recomienda colocar pequeñas cantidades de aluminio en cada espira del filamento. Además de no aumentar la alimentación de corriente de golpe, sino muy lentamente y hasta que el tungsteno se ponga ligeramente rojo.

La fabricación de más concentradores para la planta termosolar del Instituto de Ingeniería de la UNAM requerirá un nuevo sistema de soporte de los espejos. Con el fin de hacer un mosaico dinámico, para que cada una de sus partes sea prácticamente independiente una de la otra y puedan enfocarse de manera óptima. Así podrán minimizarse las pérdidas por orientación y movimiento, además de que el peso es mayor.

Es importante establecer un vínculo entre este trabajo de investigación y el aspecto práctico aplicado a escala industrial. Ya que es muy factible aplicar este conocimiento al desarrollo de plantas generadoras de energía eléctrica a partir de energía solar en el norte de la República Mexicana.

BIBLIOGRAFÍA

Almanza, R.; Mazari, M.; Soriano, R. *Uso de una Cámara de Intemperismo para probar la Segunda Generación de Espejos Solares*. 1991. Informe Interno, Instituto de Ingeniería, Proyecto 0118, UNAM.

Almanza, R.; Muñoz, F. *Ingeniería de la Energía Solar*. 1994. El Colegio Nacional. México.

Almanza, R.; Valdés, A.; et al. *Estudio del Comportamiento de Sistemas Solares Térmicos para Generar Electricidad en 5 Comunidades de Sonora o Baja California*. 1990. Informe interno, Instituto de Ingeniería, Proyecto 0102, UNAM.

Bazán, J. *Intemperización de Espejos para uso en Energía Solar*. 1989. Tesis de licenciatura. F.Q. UNAM.

Becerril, D. *Instalaciones Eléctricas Prácticas*. 1993, 11ª edición, Editado por el Ing. Diego Becerril, profesor de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del I.P.N., D.F., México.

Böer, K. *Advances in Solar Energy, an Annual Review of Reserch and Development, Vol. 11*. 1997, American Solar Energy Society, Inc. USA. 390-392 p.

Brawn, R. *Thin Film Substrates*, Handbook of Thin Technology. 1970. McGraw-Hill. U.S.A.

Brower, M., et. al. *Powering the Midwest: Renewable Electricity for the Economic and the Enviroment*. 1993. A report by the Union of Concerned Scientists, Cambridge, MA, USA.

Cruz, F.; Estrada, C.; et. al. *Caracterización del DEFRAC, Parte I: Estudio Térmico*. Informe del Centro de Investigación en Energía, UNAM. 1996, pp. 170-176.

Cruz, F.; Estrada, C.; et. al. *Caracterización del DEFRAC, Parte II: Estudio Óptico, Primeros Resultados*. Informe del Centro de Investigación en Energía, UNAM. 1997, pp. 160-165.

Dobrowolski, J.; Pekelsky, J. *Practical Magnetron Sputtering System for the Deposition of Optical Multilayer Coatings*. Applied Optics, Vol 31, No. 19. 1992.

- Duffie, J.; Beckman, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 1991. (2nd edition). Wiley. New York, U.S.A.
- Este, G.; Westwood, W. *Quasi Direct-Current Sputtering Technique for the Deposition of Dielectrics at Enhanced Rates*. Journal of Vacuum Science and Technology. Vol 6, No. 3. U.S.A. 1987.
- Estrada, C. y Álvarez, G. *Las Energías Renovables y el Heptágono Energético*. Vector de la Ingeniería Civil, No 9, enero 1998, 19-22 pp.
- Estrada, C.; et. al. *Tecnologías Termosolares Emergentes para la Generación de Electricidad*. Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. y Laboratorios Nacionales Sandia, 1996. Albuquerque, Nuevo México, E.U.A.
- Grove, T. *Arcing Problems Encountered During Sputter Deposition of Aluminum*. Application notes, Advanced Energy Industries, Inc. 1995.
- Hertlein; Klaiss; y Nitsch. *Cost Analysis of Solar Power Plants*. 1990. American Solar Energy Society.
- Hoffman, D. *A Sputtering Wind*. Journal of Vacuum Science and Technology. Vol 3, No. 3. U.S.A. 1985.
- Instructions of the Solar Spectrum Reflectometer Model SSR-ER and the Transmissivity Attachment Model SSR-T. Devices & Services, Co. Dallas, Texas, USA.
- Jiefeng, C.; Almanza, R.; Mazari, M.; Correa, G. *Aluminum First Surface Solar Mirrors With Silicon Dioxide Protection Film (Al-SiO₂)*. Institute of Engineering Series, No. E-62. Instituto de Ingeniería, UNAM. México. 1995.
- Jiefeng, C.; Almanza, R.; Mazari, M.; Correa, G. *Theory and Practice of Planar Magnetron Sputtering*. Institute of Engineering Series. No. E-63. Instituto de Ingeniería, UNAM, México. 1995.
- Johansson, T. B.; Kelly, H.; et al. *Renewable Energy-Sources for Fuels and Electricity*. 1993. Island Press, Washington, D.C. USA.

- Jones, R.; Winters, H.; Maissel, L. *Effect of Oxygen on the RF Sputtering Rate of SiO₂*. Journal of Vacuum Science and Tecnology. Vol 5, No. 3. U.S.A. 1967.
- Jones, S.; Neal, D.; et. al. *VSHOT: A Tool for Characterizing Large, Imprecise Reflectors*. 1997. Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA. SAND-96-2272C.
- Kalogirou, S.; Lloyd, S.; Ward, J. *Modelling, Optimisation and Performance Evaluation of a Parabolic Trough Solar Collector Steam Generation System*. Solar Energy, Vol, 60, No. 1, 1997, pp. 49-59.
- Kennedy, C.; Jorgensen, G. *Progress in the Development of Advanced Solar Reflectors*. National Renewable Energy Laboratory.
- Kennedy, C.; Smilgys, R.; et. al. *Optical Performance and Durability of Solar Reflector Protected by an Alumina Coating*. 1996. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-471-21413, No. SE612033.
- Maissel, L.; Glang, R. *Handbook of Thin Film Technology*. 1970. MacGraw-Hill. U.S.A.
- Maniv, S.; Westwood, W. *Surface Oxidation Kinetics of Sputtering Targets*. Surface Science. U.S.A. 1980.
- Masera, O.; Astier, M. *Metodología para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS)*. 1996. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA)
- Meinel, A.; Meinel, M. *Applied Solar Energy (an Introduccion)*. 1976. Addison-Wesley Publishing Co. U.S.A: pp. 165-174.
- Morales, A.; Ajona, J. *Durability and Performance Test of Sol-Gel Front Surface Silver Mirrors*. 1996. IER-CIEMATT, España.
- Nicolas, R.; Duran, J. *Generalization of the Two-Dimensional Optical Analysis of Cylindrical Concentrators*. Solar Energy. Vol 25, U.S.A. 1980.

- Normas Técnicas Para Instalaciones Eléctricas, Parte I: Instalaciones para el Uso de Energía Eléctrica*. 1994, SECOFIN-IPN, México, pp. 68-83.
- Pliskin, W.; Davidse, P.; Lehman, H.; Maiseel, L. *Properties of Insulating Thin Films Deposited by RF Sputtering*. 1967. IBM Journal. U.S.A.
- Pulker, H. *Coating on Glass*. Elsevier Science Publishers, Netherlands, 1984, 170-171, 191-198, 213 pp.
- Rabl, A.; Bendt, P.; Gaul, H. *Optimization of Parabolic Trough Solar Collectors*. Solar Energy. Vol 29, No. 5. Great Britain. 1982.
- Ramírez, M. *Construcción de Espejos de Plata de Primera Superficie para Aplicaciones en la Energía Solar*. 1990. Tesis de Maestría. DEPMI, UNAM.
- Reporte final de la Comisión Parlamentaria del Gobierno Federal Alemán: "Protección de la atmósfera terrestre", Bonn, Alemania, 1995.
- Riveros, H.; Oliva, A. *Graphical Analysis of Sun Concentrating Collectors*. Solar Energy. Vol 36, No. 4. U.S.A. 1986.
- Romero, V. CIRCE2/DEKGEN2: A Software Package for Facilitated Optical Analysis of 3-D Distributed Solar Energy Concentrators. 1994, Sandia National Laboratories, Report SAND91-2238, pp. 15-21.
- Rossnagel, S.; Cuomo, J.; Westwood, W. *Handbook of Plasma Processing Technology*. 1990. Noyes Publications, New Jersey, U.S.A. 14-66, 160-180 pp.
- Salmang, H. *Fundamentos Físico-Químicos de la Fabricación del Vidrio*. 1962. Editorial Aguilar. España.
- Schlaich, J. *Solar Thermal Electricity Generation*. Structural Engng Int. 1994, Vol. 4, No. 2, 76-81 pp.
- Scholl, R. *Reactive SiO₂ Sputtering Using Advanced Energy's Sparc-IE™*. 1995. Advanced Energy Industries, Inc.

Seddon, I. *Opportunities in Thin Film to Meet Energy Needs*. 1977. SPIE Vol. 111, Business Side of the Optical Industry III.

Shortis, M.; Johnston, G. *Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part I: Measurements of Surfaces*. Journal of Solar Energy Engineering, 1996, Vol. 118, pp. 146-150.

Shortis, M.; Johnston, G. *Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part II: Assessment of Surfaces*. Journal of Solar Energy Engineering, 1997, Vol. 119, pp. 286-291.

Solar Thermal. Technical Information Guide. 1985. Solar Energy Reserch Institute; U.S. Department of Energy.

Status Report on Solar Trough Power Plants. 1996. Pilkington Solar International GmbH. Cologne, Germany.

Stine, W. And Diver, R. *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*. 1994. Sandia National Laboratories, Albuquerque, Nuevo México.

The Advanced Energy® MDX 1.5k Magnetron Drive, User Manual. 1997. Advanced Energy Industries, INC. Fort Collins, Colorado, USA.

Thomas, A.; Guven, H. *Parabolic Trough Concentrators Design, Construction and Evaluation*. Abstracts of Selected Solar Energy Technology. 1985.

Trieb y Franz. *Solar Electricity Generation*. 1995, Institut für Technische Thermodynamik.

Trieb, F.; Langniß, O.; Klaiß, H. *Solar Electricity Generation – A Comparative View of Technologies, Costs and Environmental Impact*. Solar Energy, Vol. 59, 1997, No. 1-3, pp. 89-99.

Wasa, K. y Hayakawa, S. *Handbook of Sputter Deposition Technology, Principles, Technology and Applications*. 1992. Noyes Publications, U.S.A. 10-11, 13-19 pp.

Winter, D.; Sizmann, R.; Vant-Hull, L. *Solar Power Plants, Fundamentals, Technology, Systems, Economics*. 1991. Springer-Verlag, U.S.A.

ANEXOS

ANEXO A

PROPIEDADES DE MATERIALES

Entre los materiales nuevos que fueron usados en este proyecto de investigación, como material de apoyo, se encuentran la Masa-Roca^{MR} y la fibra cerámica. El primero, es un material de origen mexicano cuyo desarrollo ha alcanzado niveles comerciales, y el segundo es un material aislante que sirve de alternativa a otros más comunes (tales como el asbesto, la fibra de vidrio, lana mineral, etc.). A continuación se presentan las propiedades físicas y químicas más importantes para cada uno de ellos y una descripción general de su aplicación, uso y precauciones.

A.1. La Masa-Roca^{MR}.

En general, la masa-roca es una composición de puzolanas, cementantes, microfibras sintéticas y naturales, agregados y aditivos, que al hidratarse se comportan como pasta moldeable, de consistencia similar a la masa de maíz, que al fraguar se convierte en piedra artificial. Sus principales características son:

- No escurre.
- Tiene gran resistencia a la flexión, compresión y tensión.
- Tiene gran plasticidad.
- Es impermeable.
- Presenta buena resistencia al ataque de agentes químicos.
- Su contracción durante el fraguado es despreciable.
- Los tiempos de fraguado son adaptables.
- No es tóxica, ni corrosiva.

Tabla A.1: Principales especificaciones técnicas:

Compresión	360 kg/cm ²
Flexión	95 kg/cm ²
Tensión	50 kg/cm ²
Permeabilidad	10 ⁻¹⁴ m/s
Deformación al esfuerzo	0.002
Revenimiento	nulo
Tiempo de fraguado	Inicial: 3 a 5 horas Final: 28 días (9 días 80%)
Peso específico	2.05 kg/dm ³

La masa-roca está disponible en varias presentaciones que se describen en la tabla A.2. Se puede aplicar a obras civiles, arquitectónicas y artísticas.

Tabla A.2: Diferentes materiales Masa-Roca.

Tipo de Masa-Roca	Ingeniería	Impermeable	Artes plásticas	Resanador
Uso	Construcción	Contención y conducción de agua	Actividades artísticas	Restauración y rescate estructural
Granulometría	Gruesa	Media	Fina	Gruesa
Particularidad	Gran resistencia mecánica	Impermeabilidad	Gran plasticidad	Mayor adhesividad y resistencia mecánica

A.1.1. Modo de empleo general para los materiales Masa-roca®.

1) Consideraciones preliminares:

Al ser un concreto de alta resistencia reduce el peso, los grosores y se agrandan los espacios; puede sustituir tabiques, bloques, ladrillos, tejas, yesos falsos y otros materiales equivalentes, así como plásticos reforzados, resinas y cerámicas o barros.

En su manejo se aplican las técnicas del ferrocemento para la construcción de cubiertas, muros y figuras. Para un armado de metal horizontal se aplica Masa-Roca en forma de laminados o tortillas, y para superficies verticales se aplica con cuchara y caja de soporte.

El proceso de curado requiere de agua, por lo que se debe tomar en cuenta su abasto. Otra consideración importante es el clima e insolación que existan en la zona donde se vaya a aplicar, ya que la humedad en combinación con la temperatura pueden hacer variar el proceso de fraguado. Mientras fragua, no debe mojarse

2) Herramientas y equipo.

- Cincel, maceta de albañil y martelina para remover las posibles partes desprendidas, pinturas o cualquier material que funcione como separador en el lugar de aplicación.
- Esponja para humedecer el área, escoba, cepillo y cubeta con agua limpia para asear el área.
- Guantes de látex para protección de las manos durante la aplicación. Pala, cuchara, llana, brocha y un recipiente de plástico con boca ancha, ya sea artesa o charola para amasar la masa-roca.
- Cartones húmedos y plásticos grandes, o un rollo de hule espuma delgado o arenas.
- Una cubeta con agua limpia y una toalla para aseo personal.
- Para el manejo de metales de refuerzo: amarrador, tijeras para metal, garrucha, segueta y pinzas; mallas desplegadas o de gallinero y alambre recocado.

3) Cálculo de material:

La cantidad de masa-roca que se va a usar se calcula según la tabla A.3. Se recomienda sumar el 10% a lo calculado por remates y encapsulados que surjan. Si se adicionan pigmentos se debe sumar 15% de material pigmentado por si se requiere para aplicaciones posteriores.

Tabla A.3: Rendimientos aproximados por metro cuadrado según su espesor.

Área [m ²]	Espesor [mm]	Peso aprox*. [kg]	Recomendaciones
1	3	6	Mínimo recomendado para recubrimientos aparentes.
1	4	8	Mínimo recomendado para impermeabilizar.
1	5	10	Mínimo recomendado para cubiertas sin carga (con metal de refuerzo).
1	10**	20	Mínimo recomendado para cubiertas con carga ligera (con metal de refuerzo).
1	15**	30	Mínimo recomendado para cubiertas con tránsito ligero (con metal de refuerzo).
1	20**	40	Mínimo recomendado para cubiertas con tránsito medio (con metal de refuerzo).
1	50**	100	Mínimo recomendado para losas de entrapiso (con metal de refuerzo).

*1 litro = 2.1 kg de masa-roca, 1 litro = 1 mm x 1 m²

** Se pueden aplicar agregados para economizar.

4) Preparación de la superficie:

La superficie de aplicación debe estar libre de grasa, asfalto, plástico, etc., o cualquier otra sustancia que funcione como separador. Para estructuras metálicas como malla de gallinero, metal desplegado, tela para criba y alambre, se debe limpiar los recubrimientos que tengan; luego se aplica con brocha una mezcla 3:1 de masa-roca aguada con pegamento blanco y se espera a que se seque, con el fin de aumentar la adherencia a las estructuras metálicas.

Para aplicar masa-roca sobre masa-roca, basta con picar la parte ya sólida con una martelina, se moja hasta saturar y se aplica la parte nueva sobre el área a cubrir.

5) Preparación del material:

La preparación de este material debe lograrse una consistencia similar al barro, plastilina o masa de maíz. Esto se logra agregando agua limpia al polvo masa-roca en una cantidad equivalente al 20% en peso del material, es decir, de 180 a 200 mL de agua por kg de masa-roca.

Se deja reposar la mezcla 10 minutos y después se amasa, para grandes cantidades se prepara como mezcla de cemento. Una vez amasada, se prueba la consistencia haciendo una bola y apretándola con la mano, no debe escurrir ni quedar quebradiza, debe estar como plastilina y no doblarse. De esta manera se comprueba si necesita agua o material.

6) Aplicación del material:

La aplicación puede ser hecha de varias formas, pero debe tomarse en cuenta lo siguiente:

- El agregar más agua a la masa-roca de la recomendada, puede aumentar su adherencia, pero disminuye su resistencia.
- Por sus contenidos de fibra y gránulos, no debe arrastrarse el material sobre la superficie, sino depositarse y extenderse, con el fin de no retirar las fibras.
- La falta de humedad genera falta de plasticidad, por lo que en ciertas circunstancias deberá mojarse con frecuencia, según se vaya secando.

La aplicación en superficies flexibles o con armado de metales sin cimbra, puede ser hecha por pastillaje o tortillas. Esto consiste en depositar el material sobre una tabla o recipiente rectangular plano, con un plástico como separador.

Para dar el espesor uniforme, se utilizan dos tablas como rieles que tengan el espesor deseado, se pone otro plástico arriba y se amasa con un tubo para lograr una especie de

tortilla. Una vez hecha, se retira el plástico superior, se deposita la masa sobre la superficie a aplicar; se hace un poco de presión y se retira el plástico. Esta operación se repite hasta cubrir el total del área. Si quedan algunos huecos entre secciones, se aplican pequeñas porciones para emparejar con la ayuda de una cuchara de albañil.

Sobre superficies verticales se sigue el mismo procedimiento, solamente que se debe armar un soporte en forma de rectángulo que se coloca sobre la superficie a recubrir, con el fin de no dejar fluir a la masa que se aplica.

La aplicación sobre superficies rígidas se hace con una cuchara de albañil o a mano (con guantes de látex). Para ello, se debe tener húmeda, tanto la superficie como el instrumento de aplicación; además de tener mucho cuidado al no separar las fibras del material, por lo que se deben aplicar movimientos uniformes y largos, y presión suficiente para el espesor deseado.

7) Fraguado, curado y cuidados:

Estos productos tienen un tiempo máximo de trabajo de cinco horas, durante las cuales sólo basta con humedecer para recuperar la plasticidad. Posteriormente se debe mantener inmóvil la aplicación durante un tiempo mínimo de ocho horas.

Este tipo de aplicaciones deben mantenerse húmedas durante un tiempo de 100 horas y lograr su resistencia estructural. En el caso de grandes áreas, se puede lograr un curado óptimo con papel periódico, cartón, rollos de hule espuma o arena saturada de agua al cubrir toda la aplicación, con plástico sobre ellos. De esta forma sólo hay que rehumedecer una o dos veces al día durante cinco días.

A.1.2. Precauciones generales para trabajar con estos materiales.

Los materiales hechos con masa-roca contienen sílice alcalino antes y durante el fraguado, por lo que se recomienda lo siguiente:

1. Se deben usar herramientas y guantes de látex.
2. En caso de no usar guantes, evitar la exposición de manos al material por tiempos mayores de 15 minutos, ya que el material reseca la piel. Se debe enjuagar y secar las manos en cada intervalo de tiempo.
3. Se debe evitar el contacto del material con ojos y heridas. Si ocurre, lavar perfectamente la parte afectada inmediatamente con agua limpia.
4. El polvo no se debe ingerir ni inhalar.
5. El material debe almacenarse en un lugar seco.

La Masa-roca^{MR} se compró a un distribuidor llamado Grupo Inqualli, localizado en la calle Piñones #44, colonia Rancho Colorines, Tlalpan, México, D.F. C.P. 14380. Teléfono: 673-7417

A.2. La Fibra Cerámica.

La fibra cerámica utilizada en la modificación del horno fue de la marca Kaowool®, en tres presentaciones diferentes: colcha, tabla y a granel.

La presentación en forma de colcha tiene muy baja conductividad térmica, gran resistencia al choque térmico y baja capacidad de almacenamiento de calor. No contiene materiales orgánicos que puedan contaminar la atmósfera de un horno a temperaturas elevadas. Está disponible en diferentes densidades y espesores:

Tabla A.4: Densidades de las presentaciones de colcha de fibra cerámica.

3 lb/ft ³	(48 kg/m ³)	10 lb/ft ³	(160 kg/m ³)
4 lb/ft ³	(69 kg/m ³)	12 lb/ft ³	(192 kg/m ³)
6 lb/ft ³	(96 kg/m ³)	15 lb/ft ³	(240 kg/m ³)
8 lb/ft ³	(126 kg/m ³)		

Tabla A.5: Propiedades químicas y físicas de los diferentes tipos de colcha de fibra cerámica.

Tipo de Colcha		Blanket B	Blanket	Blanket S	Cerablanket®	Cerachem®	Cerachrome®	Maffec™	Fibra Pyro-Log™	
									Grado R	Grado ZR
Color		Blanco	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco	Azul/Verde	Blanco	Blanco	Blanco
Densidad	[lb/ft ³]	4-8	3-12	4-12	4-8	4-8	4-8	6-8	8-15	10-15
Espesor	[in]	1-2	1/8-2	1/4-2	1/4-2	1/2-2	1/2-2	1/4-1	6	6
Temp. Máxima	[°C]	982	1260	1260	1316	1427	1427	1593	1316	1427
Punto de fusión	[°C]	1760	1760	1760	1760	1760	1760	---	1760	1760
Límite de uso continuo	[°C]	982	1093	1093	1177	1316	1317	1482	1177	1316
Análisis Químico (% en peso con base después de calentamiento)										
Alúmina	Al ₂ O ₃	40-48	45	45	46	35	43	72	47	37.5
Sílica	SiO ₂	45-55	53	53	54	50	54	28	53	47
Zirconia	ZrO ₂	---	---	---	---	15	---	---	---	15.5
Óxido de Cr	Cr ₂ O ₃	---	---	---	---	---	3	---	---	---
Otros		1-2	1-2	1-2	trazas	trazas	trazas	trazas	trazas	trazas

Las tablas de fibra cerámica están fabricadas a partir de caolín con un proceso de purificación en horno. Estas tablas poseen un rígido autoaporte de aislamiento, están disponibles en varios tamaños y espesores, y poseen certificación para varios usos a altas temperaturas.

Estas tablas tienen almidón como aglomerante, por lo que la primera vez que se calientan debe programarse el horno a su máxima capacidad. La eliminación de este material comienza a los 400 °C, por lo que las tablas se pondrán de un color gris humo para posteriormente quedar de color blanco. Además, se forma gran cantidad de humo.

Tabla A.6: Propiedades químicas y físicas de los diferentes tipos de tabla de fibra cerámica para baja temperatura.

Tipo de Tabla		Ceraboard®-3S	Ceraboard LTI	Ceraboard 18C	Kaowool® M	TR®-1S	Superez® 2000
Color		Canela	Canela	Canela	Beige	Beige	Blanco
Densidad	[lb/ft ³]	18	20	16	16	20	25
Espesor	[in]	1-2	1/4-1/2	1-2	1/4-3	1-4	1-7
Temp. Máxima	[°C]	949	1093	1260	1260	1038	1093
Punto de fusión	[°C]	---	---	---	1760	---	---
Límite de uso continuo	[°C]	---	---	---	892	---	---
Expansión lineal	[%]						
24 h @ 816 °C					1.2		
24 h @ 927 °C		1.5					
24 h @ 982 °C					2.2		
24 h @ 1038 °C						2.3	
24 h @ 1093 °C			2.0		2.8		2.8
24 h @ 1260 °C				3.5			
Módulo de ruptura	[kg/cm ²]	5.0	7.0 - 8.4	5.0	7.0 - 9.2	5.1	3.5
Análisis Químico (% en peso con base después de calentamiento)							
Alúmina	Al ₂ O ₃	28	30	47	42	11	5
Sílica	SiO ₂	46	57	50	56	49	83
Óxido de Ca	CaO	17	11	1	---	14	7
Óxido de Mg	MgO	4	2	---	---	15	---
Otros		5	Trazas	2	2	10	4
Pérdidas por Ignición		6	6	6	4 - 7	---	5

La fibra cerámica en bulto o a granel es muy útil para rellenar pequeños espacios o para moldear recubrimientos. Se fabrican en diferentes composiciones, tamaños y diámetros de fibra, densidades y lubricación; todo ello se aplica para cada necesidad específica.

Tabla A.7: Propiedades químicas y físicas de los diferentes tipos de fibra cerámica en bulto.

Tipo de Bulto		Kaowool®	Cerafiber®	Cerachem®	Cerachrome®	Saffil®
Color		Blanco	Blanco	Blanco	Azul/Verde	Blanco
Temp. Máxima	[°C]	1260	1316	1427	1427	1649
Punto de fusión	[°C]	1760	1760	1760	1760	1816
Límite de uso continuo	[°C]	1093	1177	1316	1371	1538
Gravedad esp. (ASTM C135)		2.56	2.65	2.65	2.65	3.3
Calor específico (@ 982 °C)	[J/(kg·K)]	1088.57	1088.57	1088.57	1088.57	1046.7
Fuerza de tensión de fibra	[kg/cm ²]	10545	---	---	---	20387
Módulo de tensión de fibra	[N/cm ²]	8.4x10 ⁶	---	---	---	29.6x10 ⁶

Análisis Químico (% en peso con base después de calentamiento)

Alúmina	Al ₂ O ₃	45	46	35	43	96
Sílica	SiO ₂	53	54	50	54	4
Zirconia	ZrO ₂	—	—	15	—	—
Óxido de Cr	Cr ₂ O ₃	—	—	—	3	—
Otros		1 - 2	Trazas	Trazas	Trazas	—

La fibra cerámica se compró a un distribuidor llamado Refractarios Sajuri, S.A. de C.V., ubicado en la calle Zahuatlán #366, colonia La Romana, Tlalnepantla, Estado de México, C.P. 54030, Teléfonos: 5565-8216, 5565-8281, fax: 5390-1979.

ANEXO B

PARÁMETROS QUE AFECTAN LA FORMACIÓN DE LAS PELÍCULAS Al-SiO₂.

Durante la etapa anterior de este proyecto, se llevaron a cabo varias pruebas de evaluación a todos los espejos de primera superficie fabricados. Se obtuvo una serie de parámetros que son los que afectan directamente a la formación de las películas, que a continuación se describen.

B.1. Presión

Entre menor sea la presión dentro de la cámara de vacío, mejor será la calidad de la película depositada sobre el sustrato, ya que la trayectoria libre media de una partícula erosionada es mayor a presiones más bajas, debido a que en su recorrido lleva a cabo menos cantidad de colisiones con los átomos del gas presentes en el plasma, aunque su dirección siempre está afectada por el campo magnético y eléctrico.

Sin embargo, como ya se explicó (capítulo II), se requiere de una presión mínima para que el flujo de partículas ionizadas sea el suficiente como para iniciar el halo luminoso. Otra ventaja de trabajar a las presiones más bajas posibles, es que disminuye la cantidad de partículas contaminantes presentes en la cámara.

Utilizando la técnica de erosión iónica con magnetrón plano para la evaporación de aluminio, se trabajó a una presión de arranque de $\sim 8 \times 10^{-2}$ Pa (8×10^{-4} mbar); la presión normal de operación fue de 6×10^{-2} a 7×10^{-2} Pa (6×10^{-4} a 7×10^{-4} mbar); y la presión mínima para mantener el plasma se determinó en 1.5×10^{-2} Pa (1.5×10^{-4} mbar), ya que abajo de ella el halo luminoso se apagaba. Durante todo el proceso de evaporación de aluminio se observó que la presión se mantenía prácticamente constante, ya que su intervalo de oscilación fue de ± 0.002 Pa.

El caso de la evaporación de cuarzo fue más complicado, en ella la presión dependía de la potencia suministrada al magnetrón y de la composición del gas de reacción (Argón-Oxígeno), los cuales afectaban directamente a los valores de Polarización entre electrodos. La presión de arranque debe estar en el intervalo de $8 \sim 9 \times 10^{-1}$ Pa ($8 \sim 9 \times 10^{-3}$ mbar) para obtener un valor de potencia reflejada de uno o cero watts; si se arranca por debajo de este valor de presión la potencia reflejada se eleva más allá de 50 W. Una vez formado el halo luminoso, la

presión de operación se mantenía en el intervalo de $2.5\sim 3.2\times 10^{-1}$ Pa ($2.5\sim 3.2\times 10^{-3}$ mbar). Las mejores películas se obtuvieron a estas condiciones, junto con concentraciones de oxígeno del 30% y un tiempo de evaporación de aproximadamente 1 hora a una potencia preestablecida de 900 W y una polarización entre electrodos de -60 V.

B.2. Temperatura

Una de las ventajas en el uso de magnetrones es que la temperatura de operación alcanzada no es tan alta (< 400 °C), además de que las tasas de depósito son bastante elevadas. Según Pliskin (1967), la temperatura del sustrato es uno de los parámetros que más influyen en la formación de la película de cuarzo, como ya se explicó en el capítulo II. Concluyó que las películas de cuarzo depositadas a baja temperatura presentan una mayor índice de refracción que las hechas con alta temperatura. La calidad de la película mejora, si la erosión iónica se lleva a cabo en una atmósfera oxidante a una temperatura de 400 °C.

Las películas de cuarzo obtenidas por este método, tendrán una estequiometría incompleta; ya que sus espectros presentan bandas de absorción en el infrarrojo corridas y más anchas que los de aquellas donde no hay deficiencia de oxígeno, lo que corresponde exactamente a dos átomos de oxígeno. De la determinación del contenido de oxígeno para una película hecha por erosión iónica con magnetrón en una atmósfera reactiva, se obtuvo una fórmula de la siguiente forma: SiO_{1.95} (Correa, 1997).

En el equipo utilizado durante este proyecto, no se tiene un control de la temperatura, ni siquiera un indicador de ella. Sin embargo, se puede controlar indirectamente según la potencia suministrada por la fuente de radio frecuencia y el tiempo que dure la erosión del cuarzo.

B.3. Presión parcial de oxígeno.

Este es un parámetro exclusivo para la evaporación de cuarzo, ya que se requiere cierta cantidad de oxígeno en el gas que forma el plasma para llevar a cabo una reacción de recomposición del cuarzo evaporado. En general, la estructura molecular del depósito sobre el sustrato, muchas veces, no corresponde a la estructura molecular de la sustancia original.

La primer etapa de este proyecto utilizó exclusivamente atmósfera de Argón para la fabricación de la película de cuarzo; con ella los espejos presentaron una coloración amarilla en varias tonalidades, lo que indica la presencia de monóxido de silicio, y algunas veces hasta

aparición de una película "quemada". Este problema se solucionó añadiendo pequeñas cantidades de oxígeno (30%) al gas que forma el plasma, para que de esta manera los átomos de Oxígeno y Silicio reaccionaran entre sí, recomponiendo la estructura molecular del cuarzo.

La fracción de oxígeno se determinó mediante el método de prueba y error. Se observó que los mejores resultados se obtenían con cantidades de oxígeno de entre el 20 y 30 % de la presión total en la cámara.

Para porcentajes de oxígeno inferiores a los mencionados la coloración amarilla no se eliminaba, por lo que ya no se trabajó con esas cantidades; mientras que para porcentajes mayores, la velocidad de depósito disminuía apreciablemente, lo cual se pudo haber compensado aumentando la cantidad de potencia suministrada por la fuente, sin embargo, ésta se calentaba demasiado, al punto que se accionaba el interruptor térmico.

En las últimas pruebas se trabajó con una potencia de 2.5 W/cm², en las cuales se observó que la velocidad de depósito del cuarzo disminuía aproximadamente a la mitad si se pasaba de un 5% a un 20% de oxígeno presente en el gas de alimentación, lo cual está acorde a lo que se expone en el artículo de Jones y Winters (1967).

A presiones parciales de oxígeno superiores al 45%, el aumento en la potencia suministrada por la fuente no influye en la velocidad de depósito, ya que del total, prácticamente la mitad se utiliza en erosionar los átomos de oxígeno presentes en el blanco. Así, la saturación de oxígeno ocurre cuando la tasa de reemplazo es superior a la de remoción, haciendo que la superficie del blanco sea siempre una capa de óxido. Al llegar a este punto, cualquier aumento en la potencia no será suficiente como para tener algún aumento en la tasa de remoción.

B.4. Calidad de las películas depositadas.

Según la geometría del magnetrón utilizado, así será la cantidad de energía que requiere para llevar a cabo la erosión iónica. El magnetrón plano no presenta simetría radial, por lo que necesita mayor cantidad de energía que un magnetrón cilíndrico. Lo anterior se debe a que la distribución del área de erosión tiene una forma de anillo elíptico, de tal forma que en el centro y en las esquinas del blanco no se lleva a cabo ningún fenómeno de erosión y sólo ocurren algunos arcos ocasionales que marcan el material.

Es en esta zona donde se forma el plasma que conduce al material erosionado al sustrato sobre el cual se deposita. Debido a la acción del campo magnético, las partículas provenientes del blanco adquieren una dirección preferencial perpendicular a la superficie del

blanco, de esta manera asumimos que la desviación que pueden sufrir en su trayectoria es mínima y por tanto despreciable, por lo que el depósito sobre el sustrato también tendrá una forma toroidal un tanto elíptica y el espejo adquiere una figura en forma de anillos elipsoidales de colores (figura B.1).

Si se aplica movimiento al vidrio, para cubrir toda su superficie que es mayor a la de erosión, se puede lograr un espesor relativamente uniforme de las películas depositadas y en consecuencia la forma de anillo desaparece o se desvanece.

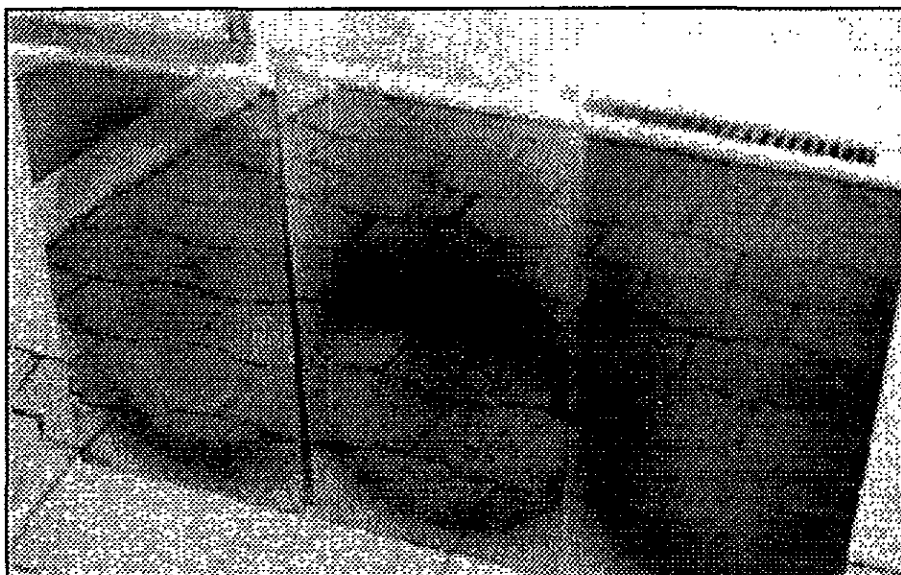


Figura B.1: Fotografía en la que se comparan algunos de los primeros espejos. A la izquierda espejo con un espesor variable de la película de SiO₂, además presenta SiO. Al centro y a la derecha, espejos degradados por el sobrecalentamiento de la película de aluminio durante su fabricación.

En las primeras pruebas, el espejo fabricado quedaba con una apariencia de "quemado", es decir, tenía una coloración muy oscura (figura B.1). Esto ocurría bajo ciertas condiciones de operación:

- La cámara de vacío estuvo abierta durante más de 21/2 meses, por lo que la cantidad de impurezas adsorbidas en su interior pudieron haber contaminado a las capas de Al y SiO₂ depositadas.
- No se utilizó enfriamiento para la placa de cobre que soporta al sustrato durante la evaporación del cuarzo ni en la de aluminio, ya que la tubería estaba tapada (fue destapada después de estas pruebas), por lo que al aumentar la temperatura del sustrato, el oxígeno presente reacciona con la película de aluminio formando Al₂O₃.

Una uniformidad aceptable de cada una de las películas depositadas se puede obtener con un movimiento constante y parejo del vidrio frente a los magnetrones, ya que de esta manera se favorecen ángulos de incidencia homogéneos de las partículas erosionadas,

minimizando la porosidad y estructuras similares; la tensión mecánica, que hace tener una degradación acelerada; diferente índice de refracción en cada sección del espejo; disminución de la reflectividad; etc. En general, se dice que la película adquiere propiedades direccionales y homogéneas.

Se observó que alejando el sustrato de los magnetrones, se podían obtener películas más uniformes, sin embargo, la tasa de depósito disminuye por lo que hay que suministrarle mayor potencia al sistema. De esta manera se hicieron pruebas a diferentes distancias, y se determinó que los mejores resultados se obtenían en un intervalo de 100 a 160 mm de distancia entre el sustrato y el escudo del magnetrón; el sistema permitía alejar el sustrato no más allá de 180 mm, por lo que no se pudieron hacer pruebas a esta distancia.

Las variables a considerar para un mejoramiento en la calidad de los espejos, son aquellas sobre las que podemos tener control, como son: la potencia suministrada por cada una de las fuentes (CD y RF); el tiempo de depósito; la presión; y la concentración de oxígeno presente en el gas suministrado. Los efectos de esta última variable se observan en la figura 6.5, en la que se comparan un espejo hecho a las condiciones óptimas de operación y uno hecho en una atmósfera sólo de argón.

De manera indirecta, se pueden controlar las variables tales como: la polarización entre electrodos, que como ya se explicó (capítulo I), es un indicio de la energía de las partículas del plasma, la cual provoca una elevada movilidad de los electrones con respecto a la de los iones del gas y que producen una carga negativa en la superficie del blanco. La presencia de la coloración amarilla, sugiere la presencia de monóxido de silicio (es su coloración característica), lo cual nos da indicios de la presencia de iones de elevada energía y de la descomposición de la molécula de SiO₂, con altas tasas de depósito.

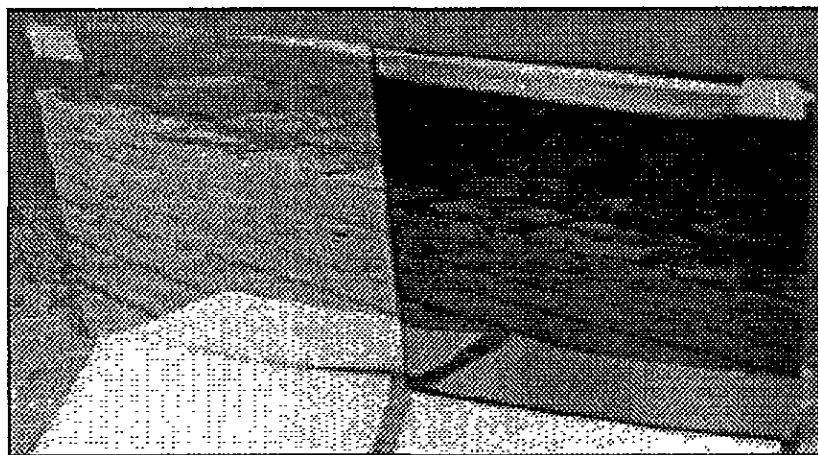


Figura B.2: Fotografía en la que se comparan los espejos hechos en una atmósfera con oxígeno al 30% (izquierda) y sólo argón (derecha).

ANEXO C

PÉRDIDA DEL CAMPO MAGNÉTICO EN UN MAGNETRÓN

El campo magnético de un imán se puede caracterizar según la magnitud que nos interese medir. De acuerdo con el Sistema Internacional de unidades, las unidades que se utilizan para caracterizar un campo magnético se describen en la tabla C.1.

Tabla C.1: Unidades para caracterizar un campo magnético.

Magnitud	Unidad	Símbolo	Equivalencia
Flujo magnético	weber	Wb	V·s
Densidad de flujo magnético	tesla gauss	T ---	Wb/m ² 1x10 ⁻⁴ T
Fuerza del campo magnético	ampere por metro	---	A/m
Momento magnético dipolar	weber-metro	---	Wb·m

En este proyecto la magnitud que más nos interesa para el buen desarrollo de los experimentos, es la densidad de flujo magnético.

De acuerdo con las especificaciones del fabricante, *Materials Science*, el pico de campo magnético medido paralelo a la superficie de un blanco magnéticamente no permeable y de 1.27 cm (0.5 in) de espesor, debe ser típicamente de 300 gauss (0.03 T). Este valor debe ser uniforme a lo largo del área de erosión con una diferencia máxima de $\pm 5\%$ entre dos puntos cualquiera localizados en la misma línea transversal del magnetron. Y la diferencia entre dos puntos cualquiera localizados en el mismo radio dentro del área de erosión no debe ser mayor a $\pm 10\%$.

Si por alguna razón falta el suministro de agua de enfriamiento a los magnetrones, el calor que se genera por el choque de los iones sobre la superficie del blanco se transmite a todo el cuerpo, incluyendo a los imanes. Tal efecto provoca el aumento de la temperatura en ellos, pudiendo llegar a la llamada *Temperatura de degradación*, punto en el que la densidad del campo magnético disminuye considerablemente.

El efecto que tiene el campo magnético en los arcos producidos se relaciona directamente con la intensidad de éste, ya que su función es la de concentrar mayor número de electrones que puedan ionizar una mayor cantidad de átomos y por tanto incrementar el

número de especies erosionadas. Cuando la densidad del campo magnético se altera y no es uniforme, se crean gradientes de campo alterando la red de flujo, por lo que el campo eléctrico se concentra en un punto tal que puede llegar a producir una descarga entre el plasma y el escudo del magnetrón o este último y el blanco.

Las restricción de temperatura de salida del agua de enfriamiento es de 60 °C como máximo; si se sobrepasa este valor, los imanes hechos de una aleación especial de Ne-Fe-B pueden llegar a sufrir un daño permanente. Además, si la temperatura es lo suficientemente alta, la placa de protección de los imanes se puede reblandecer y deformarse a tal punto que el aro-sello (*o-ring*) dentro del cuerpo del magnetrón ya no puede cumplir su función. La consecuencia de esto, es que el agua de enfriamiento se escapa y provoca contaminación dentro de la cámara de vacío, aunado al efecto de no permitir la presión mínima suficiente para llevar a cabo cualquier tipo de evaporación dentro de ella.

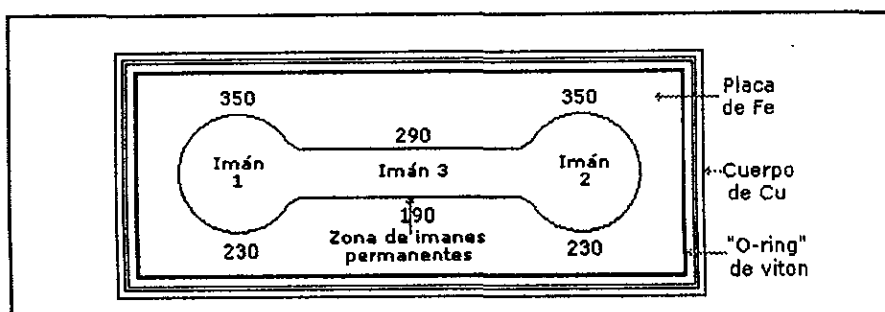


Figura C.1: Esquema de la distribución de los imanes en el magnetrón con blanco de aluminio y valores de la densidad del campo magnético después del sobrecalentamiento.

La densidad de campo magnético se midió en cada uno de los magnetrones (con y sin blanco), para ello se utilizó un sensor especial (basado en el 'Efecto Hall' de campos magnéticos) del laboratorio de alto vacío en el Instituto de Física de la UNAM. El proceso de medición se llevó a cabo de la siguiente forma: el sensor, que está formado por una placa pequeña de cuarzo, se colocó a una distancia de 1.27 cm (0.5 in) de la superficie de los imanes, es decir, cuando la medición se hizo con el blanco puesto, el sensor se colocó exactamente junto al blanco y cuando dicha placa no estaba, el sensor quedaba flotado sobre la placa de hierro que recubre a los imanes.

La lectura de dicha medición se daba directamente en gauss, de tal forma que los resultados para el magnetrón con blanco de cuarzo fueron satisfactorios, ya que en cualquier punto se cumplía con las condiciones del fabricante (> 300 gauss). Sin embargo, con el magnetrón cuyo blanco era aluminio, los valores obtenidos eran por debajo de lo especificado por el fabricante. En la figura C.1 aparece esquematizada la distribución de los valores de

densidad del campo magnético según la disposición de los imanes en la superficie del magnetrón.

Tal efecto ya no es posible reparar, ya que con la temperatura la composición molecular de los imanes se degrada, generándose otra serie de compuestos que impiden el aumento de la densidad del campo magnético.

ANEXO D

COSTO DE FABRICACIÓN DE LOS ESPEJOS

Este proyecto de investigación se llevó a cabo en colaboración con el Instituto de Física y fue financiado por el Programa Universitario de Energía (PUE) y la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM.

Parte del equipo utilizado ya existía, como la cámara de vacío, las bombas mecánica y de difusión en el Instituto de Física; el horno, el molde para los espejos y los soportes de fibra de vidrio en la planta termosolar del Instituto de Ingeniería. Mientras que el resto, así como las materias primas se compraron con el financiamiento dado.

En las tablas D.1 y D.2 se establecen los costos de los equipos utilizados, así como de todo el material y sustancias necesarias para llevar a cabo la fabricación de espejos de primera superficie con la tecnología de magnetron plano. La referencia se toma con precios de 1998, algunos nacionales y otros de Estados Unidos.

Tabla D.1: Costo de los materiales utilizados:

Material	Precio** (USD)	Precio** (pesos)	Volumen [dm ³]	Peso [kg]	Costo unitario [\$/kg]
Blanco de aluminio (99.99%)	\$300.00	\$3,015.00	0.410	1.11	\$2,725.73
Blanco de cuarzo (99.98%)	\$500.00	\$5,025.00	0.205	0.54	\$9,257.19
Vidrio flotado cal-sosa (1 m ²)	\$16.02	\$161.00			
Nitrógeno líquido (litro)	\$1.83	\$18.40	1.00	0.81	\$22.77
*Dicromato de Potasio (kg)	\$12.16	\$122.18	0.37	1.00	\$122.18
*Ácido sulfúrico (3.5 L)	\$3.26	\$32.75	3.5	6.42	\$5.10

*Grado industrial ** Tipo de cambio = \$10.05/dolar

Tabla D.2: costo de los equipos utilizados.

Equipo	Precio (USD)	Precio* (pesos)
Fuente de CD	\$7,500.00	\$75,375.00
Fuente de RF	\$20,000.00	\$201,000.00
Magnetrones	\$17,000.00	\$170,850.00
Horno	\$2,000.00	\$20,100.00
Equipo periférico	\$1,200.00	\$12,060.00
TOTAL	\$47,700.00	\$479,385.00

*Tipo de cambio = \$10.05/dolar

La tarifa de energía eléctrica considerada es para media tensión, también denominada OM, y corresponde al tipo de energía utilizada por la mayoría de las industrias ubicadas en muchos de los parques industriales en la Ciudad de México y zona metropolitana. Este tipo de energía se utiliza para industrias medianas con requerimientos de hasta 35 kV y para una demanda menor de 100 kW mensuales. En cuanto al agua de enfriamiento se tiene que la unidad de consumo es de 200 m³; las tarifas varían en función del consumo y el nivel correspondiente lo establece cada municipio, mismos que fijan los cambios de tarifas. En la tabla D.3, se establece el precio de cada tarifa.

Tabla D.3: Tarifa eléctrica OM y de agua para la zona centro de México¹.

	D.F.	Toluca
Energía eléctrica		
Cargo por kW de demanda máx. medida	\$51.415	\$51.415
Cargo por kWh de energía consumida	\$0.38437	\$0.38437
Agua		
Consumo de 200 m ³	\$215.00	\$202.00

En la tabla D.4, se establecen los tiempos de operación promedio de cada equipo consumidor de electricidad, su potencia de operación y el cálculo del costo del consumo eléctrico según las tarifas ya mencionadas.

Tabla D.4: Operación de los equipos utilizados.

Equipo	Operación [h]	Capacidad [W]	Consumo [kWh]	Cargo consumo [\$]	Cargo capacidad [\$]
Horno	3	6750	20.25	7.78	31.55
Fuente de CD	0.2	350	0.07	0.03	1.82
Fuente de RF	1	850	0.85	0.33	4.41
Bomba mecánica	5	746	3.73	1.43	3.87
Bomba de difusión	3	1500	4.5	1.73	7.79
Total	12.2	10196	29.4	11.30	49.44

Por otro lado, las sustancias que se ocupan para la limpieza del vidrio también tienen un costo dado, sin embargo la cantidad propuesta en la tabla D.5, se puede ocupar para la limpieza de 20 vidrios en total. Al tratarse de sustancias relativamente tóxicas, se debe incluir un factor que incluya su costo de tratamiento, ya que el producto final de tal procedimiento debe confinarse por tratarse de productos que requieren de purificación.

¹ Tarifas tomadas de la página web de la Comisión Federal de Electricidad y de la Comisión Nacional del Agua.

Tabla D.5: Sustancias para la limpieza de los vidrios.

Sustancia	Precio	Cantidad Inicial*	Costo*	Costo por espejo
	[\$/L]	[L]	[\$]	[\$]
Agua	\$0.0011	2	\$0.0022	\$0.0001
Ácido sulfúrico	\$9.36	2	\$18.72	\$0.94
Dicromato de potasio [kg]	\$122.18	0.05	\$6.11	\$0.31
Mezcla		4	\$24.83	\$1.24

*Esta cantidad alcanza para 20 espejos

Finalmente, para el calcular el costo de fabricación de un espejo de primera superficie sólo se consideró el costo de operación, ya que los costos fijos asociados por concepto de inversión, uso y depreciación del equipo se considerarían en el momento de elaborar un proyecto a escala industrial

Después de cotizar a precios actuales y según lo establecido en las tablas anteriores, el costo de fabricación de un espejo de aluminio de primera superficie es de \$256.48 en moneda corriente. Tal valor está formado por diferentes componentes que se expresan en la tabla D.6.

Tabla D.6: Principales Costos de operación (en pesos) para la fabricación de un espejo.

Aluminio alta pureza =	\$0.15
Cuarzo alta pureza =	\$1.70
Nitrógeno líquido =	\$110.40
Vidrio flotado cal-sosa =	\$28.98
Electricidad =	\$60.74
Mano de obra =	\$52.50
Agua de enfriamiento =	\$0.77
Sustancias de limpieza =	\$1.24
TOTAL=	\$256.48

El total de la tabla anterior se refiere a un espejo con medidas de 30 x 60 cm, de modo que para un metro cuadrado se tiene un costo de \$1,425.00/m² (US\$141.80/m²).

Es importante mencionar que la bomba de difusión es un equipo con 30 años de antigüedad, la cual requiere nitrógeno líquido para trabajar eficientemente, por lo que si se cambiara por tecnología actual, como una bomba "turbomolecular", este servicio desaparecería y solamente el consumo eléctrico aumentaría ligeramente (mucho menos que el costo del nitrógeno líquido). En cuanto a la mano de obra, se puede llegar a operar solamente con una persona al incorporar al sistema un controlador automático de flujo de gases, de modo que el costo de este punto se reduciría a aproximadamente \$30.00.

De esta forma, el costo de fabricación de un espejo, medidas de 30 x 60 cm, puede llegar a ser de \$123.6, es decir \$686.60/m² (US\$68.30/m²), lo que representa un 48.18% del costo expresado en la tabla D.6.

En cuanto a la prospectiva de producción industrial, se sabe que Grupo Vitro aplica la tecnología de Erosión Iónica con Magnetron para la fabricación de películas delgadas sobre sustratos de vidrio plano, cuya aplicación se da en fachadas de edificios o para reducir la cantidad de luz solar en una vivienda u oficina. Por lo que se tendría que pensar en una adaptación de este tipo de tecnología para la producción de espejos curvos con perfil parabólico.

Como información adicional para referencia sobre el costo de espejos comerciales, se tiene que los espejos de acrílico con aluminio depositado, conocidos como ECP-85P de la compañía 3M, actualmente tienen un costo de US\$1.10/ft² (US\$11.85/m²); sin embargo, los instalados actualmente en la planta termosolar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, después de siete meses presentan algunos puntos donde se ha iniciado su degradación y el polvo que se deposita sobre ellos los raya fácilmente. Lo que nos motiva a seguir con esta línea de investigación para tratar de bajar nuestros costos de fabricación de espejos y lograr precios competitivos en el ámbito industrial.

ANEXO E

EVALUACIÓN DE SUTENTABILIDAD ENTRE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CICLO COMBINADO CONTRA UN SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-CICLO COMBINADO

En este anexo se pretende ejemplificar la aplicación de la tecnología de canal parabólico, proponiendo una región del norte de México. Se trata de aplicar los conceptos de desarrollo sustentable descritos por Astier y Masera (1996).

E.1. Generalidades

Existen varias definiciones de Desarrollo Sustentable, entre ellas está la que menciona Masera (1996) al decir que es "el proceso mediante el cual se cubrirían de manera permanente las necesidades materiales y espirituales de todos los habitantes del planeta sin deterioro o incluso mejora de las condiciones ambientales que le dan sustento". Entre los objetivos generales del Desarrollo Sustentable está el de satisfacer las necesidades humanas esenciales, comenzando por las necesidades de los más pobres; promover la diversidad cultural y el pluralismo; reducir las desigualdades entre individuos, regiones o naciones; conservar y aumentar los recursos base existentes; aumentar las posibilidades de adaptación a las perturbaciones naturales y antropogénicas; desarrollar tecnologías de bajo consumo de recursos, adaptadas a las circunstancias socio-ecológicas locales y que no signifiquen riesgos importantes para las generaciones presentes y futuras; generar estructuras productivas, de distribución y consumo que brinden los servicios y bienes necesarios, propicien el empleo total y el trabajo con sentido, con la finalidad de mejorar las capacidades de desarrollo de los seres humanos.

El concepto de sustentabilidad de un sistema puede tener diferentes nociones: como un concepto puramente biofísico para un recurso natural determinado, como un concepto biofísico usado para un grupo de recursos o en un ecosistema, y como un concepto biofísico, social y económico; por lo que dependiendo del enfoque que se le dé, así será la noción que tendrá el trabajo a desarrollarse.

Para llevar a cabo estos objetivos, se plantearán estrategias de tipo "transformadoras" con el fin de cumplir con los objetivos planteados inicialmente. Con ellas se pretende hacer un cambio sustancial en el uso de fuentes de energía primaria para la generación de electricidad,

lo que implica un cambio en el empleo de los patrones de uso de los recursos naturales y en las políticas actuales. Todo esto requerirá de una mayor participación y control local, redistribución de los recursos productivos, reorientar el desarrollo científico y tecnológico, y crear un nuevo orden económico nacional.

Para una discusión sobre Desarrollo Sustentable se debe tomar en cuenta que se habla de un proceso y por tanto de un concepto dinámico, en el que se necesita establecer prioridades; y del concepto genérico de Desarrollo Sustentable se debe llegar a determinar su especificidad y concreción a escala local y regional.

En este anexo se tendrá un enfoque biofísico, social y económico, en el que se plantea la necesidad de utilizar recursos renovables con gran disponibilidad en nuestro país como una fuente de energía primaria de apoyo para la generación de electricidad en una planta de ciclo combinado con energía solar; para ello, la sustentabilidad se medirá en términos físicos, pero tomando en cuenta las interacciones con lo social, lo económico y con el ecosistema.

Para el desarrollo de un trabajo de este tipo, se sugiere tomar en cuenta las siguientes preguntas: ¿qué se va a sostener?, ¿durante cuánto tiempo? y ¿en qué escala espacial?. Estas preguntas involucran conceptos sociales, económicos y biofísicos, los cuales deben de ser evaluados tan profundamente como el alcance del estudio que se está haciendo. En el caso de este proyecto se hará una evaluación bastante superficial, tomando a la sustentabilidad como una característica multivariable de un sistema socio-ambiental, que involucra el responder preguntas complementarias, tales como: ¿sustentabilidad para quién?, ¿quién la llevará a cabo? y ¿cómo se llevará a cabo?. Entonces, se deben entender e integrar la pluralidad de las preferencias, las prioridades, las percepciones y desigualdades de articulación en los objetivos de lo que se va a sostener con una aplicación adecuada a las diferentes escalas de análisis.

Este anexo contempla la evaluación de sustentabilidad entre dos sistemas de generación de electricidad: uno es ciclo combinado (común); y el otro es un sistema híbrido de solar-ciclo combinado.

E.2. Definiciones

Los medios para conseguir los objetivos deseados son variados, por lo que para enfatizar la sustentabilidad ecológica a largo plazo se debe impulsar: el uso eficiente de energía y recursos; fomentar el uso de fuentes de energía renovables y con ello reducir el uso

de combustibles fósiles; reducir los costos y aumentar la eficiencia y la viabilidad económica en el uso de fuentes alternas de energía.

Desde el punto de vista ambiental, la sustentabilidad de un sistema híbrido solar-ciclo combinado para la generación de energía eléctrica dependerá básicamente del manejo que conlleve a la optimización de los procesos siguientes:

- Reducción en el consumo de gas natural, si se reduce este consumo también se reducirá la emisión de gases invernadero a la atmósfera.
- Preservación e integración de la biodiversidad, al utilizar concentradores de canal parabólico se requiere de una gran extensión de terreno, por lo que es importante localizar el campo de concentradores afectando lo menos posible a la flora y fauna de la región.

Socialmente, la generación de energía eléctrica debe beneficiar a todas las comunidades del país, sin importar dónde éstas se encuentren; para de esta manera proporcionar a la población energía que puede servir para aumentar el potenciamiento de las capacidades, la autogestión y los mecanismos de cooperación locales, con lo cual se puede decir que se ha impulsado un proceso socialmente activador, para con ello mejorar las condiciones de todos aquellos a los cuales llegue esa energía y mejorar sus condiciones de vida y las de sus futuras generaciones.

E.3. Atributos Sistémicos¹

Los atributos sistémicos sirven para caracterizar de manera esquemática a un sistema sustentable que será analizado, los principales son:

- a) *Productividad*. Es la habilidad del sistema para proveer el nivel requerido de bienes y servicios. Representa el valor del atributo para un período de tiempo determinado.
- b) *Equidad*. Es la habilidad del sistema para distribuir la productividad (beneficios y costos) de una manera justa. Esto implica una distribución de la productividad entre los beneficiados o afectados en el presente o en el futuro.

¹ Masera, O.; Astier, M. Metodología para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sustentabilidad. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Aplicada. 1996. México

- c) *Estabilidad*. Se refiere a la propiedad del sistema de tener un estado de equilibrio dinámico estable. Es decir, se puede mantener la productividad del sistema en un nivel no decreciente a lo largo del tiempo bajo condiciones promedio o normales.
- d) *Resiliencia*. Es la capacidad de retomar al estado de equilibrio o mantener el potencial productivo después de que el sistema haya sufrido perturbaciones graves.
- e) *Confiabilidad*. Se refiere a la capacidad del sistema de mantenerse en niveles cercanos al equilibrio ante perturbaciones usuales del ambiente.
- f) *Adaptabilidad o Flexibilidad*. Es la capacidad de encontrar nuevos niveles de equilibrio ante cambios de largo plazo en el ambiente. También es la capacidad de búsqueda activa de nuevos niveles de productividad.
- g) *Autodependencia o Autogestión*. Es la capacidad de regulación y control por parte del sistema de sus interacciones con el exterior. Incluye procesos de organización y los mecanismos del sistema socio-ambiental para definir endógenamente sus propios objetivos, sus prioridades, su identidad y sus valores.

También se enfatiza que la sustentabilidad de un sistema depende tanto de sus propiedades endógenas como de sus vínculos con el exterior y con otros sistemas. Es decir, que se deben tomar en cuenta tanto las propiedades del sistema como las propiedades y relaciones estructurales del mismo. Los atributos se han diseñado para aplicarse a los sistemas de manejo como un todo, incluyendo aspectos sociales, económicos y ambientales o tecnológicos; por lo que concentrarse en los atributos antes mencionados permite que el desarrollo de indicadores de sustentabilidad se oriente a prioridades sistémicas fundamentales, con lo que se evitan largas listas de factores y variables puramente descriptivas.

E.4. Definición Operativa de un Sistema de Manejo Sustentable¹

En términos operativos, un sistema de manejo sustentable será aquél que permita simultáneamente:

- Conseguir un nivel alto de productividad mediante el uso eficiente y sinérgico de los recursos naturales y económicos.
- Proporcionar una producción confiable, estable y resiliente a perturbaciones mayores en el transcurso del tiempo, asegurando el acceso y disponibilidad de los recursos

productivos, el uso renovable, la restauración y protección de los recursos locales, una adecuada diversidad temporal y espacial del medio natural y de las actividades económicas y mecanismos de distribución del riesgo.

- Brindar adaptabilidad o flexibilidad para amoldarse a nuevas condiciones del entorno económico y biofísico, mediante procesos de innovación y aprendizaje y el uso de opciones múltiples.
- Distribuir justa y equitativamente los costos y beneficios del sistema entre diferentes grupos afectados o beneficiados, asegurando el acceso económico y la aceptación cultural de los sistemas propuestos.
- Poseer un nivel aceptable de autodependencia para poder responder y controlar los cambios inducidos desde el exterior, manteniendo su identidad y sus valores.

Con lo anterior se plantean cinco atributos generales de sustentabilidad que servirán de base para el diseño de indicadores:

- 1) *Productividad*, la cual se puede evaluar midiendo eficiencia, retornos promedio obtenidos y disponibilidad de recursos.
- 2) *Estabilidad*, confiabilidad y resiliencia, que se pueden evaluar con la tendencia y variación del retorno promedio, con la calidad, conservación y protección de recursos, con la renovabilidad en el uso de recursos, con la diversidad espacial y temporal del sistema, con la relación entre ingresos al sistema y costo de oportunidad, con la evolución de empleos generados y con los mecanismos de distribución de riesgos.
- 3) *Adaptabilidad*, la cual se puede evaluar con el intervalo de opciones técnica y económicamente disponibles, con la capacidad de cambio e innovación, y con el fortalecimiento de la relación entre el proceso de aprendizaje y la capacitación.
- 4) *Equidad*, que se puede evaluar con la distribución de costos y beneficios entre participantes y grupo objetivo, y con el grado de "democratización" en el proceso de toma de decisiones.
- 5) *Autodependencia*, se puede evaluar con la forma de participación, la organización y con el control sobre el sistema y la toma de decisiones.

E.5. Elementos Conceptuales y Desarrollo del Proyecto

En esta parte se desarrollará el proyecto de sustentabilidad siguiendo la metodología propuesta por Masera (1996), la cual consiste en:

- a) Determinar los objetivos de la evaluación, en los que se definen los sistemas de manejo a evaluar, sus características y el contexto socio-ambiental de la evaluación.
- b) Seleccionar los indicadores, con los que se determinan los puntos críticos para la sustentabilidad del sistema, los criterios de diagnóstico y se derivan los indicadores de sustentabilidad.
- c) Medir y monitorear los indicadores, que incluyen el diseño de los instrumentos de análisis y el procedimiento utilizado para obtener la información deseada.
- d) Obtener y presentar resultados, con los cuales se compara la sustentabilidad de los sistemas de manejo analizados, se indican los principales obstáculos para la sustentabilidad y los aspectos positivos que más la favorece, a la vez que se dan sugerencias para mejorar la sustentabilidad del sistema de manejo innovativo. >

E.5.1. Objetivo de la Evaluación. Definición del Sistema de Manejo.

La planificación del abastecimiento de la demanda de electricidad es un tema de suma importancia para el futuro del país, considerando, por un lado, la imperiosa necesidad de desarrollo económico de la nación y el crecimiento de la población, y por el otro, la asignación del capital para financiar dicho crecimiento.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) pronostica un crecimiento de la demanda eléctrica de 5 a 6 % anual en los próximos años, por lo que se requiere de un gran esfuerzo de crecimiento en capacidad instalada de producción de electricidad pero con nuevos esquemas de desarrollo. Un objetivo básico para el sector eléctrico sería iniciar una transición de un sistema eléctrico centralizado a uno geográficamente distribuido y descentralizado; para que en caso de que exista amplia disponibilidad de recursos naturales, se podría enfocar el uso de fuentes renovables de energía. En este esquema, se plantea una reducción en el tamaño de las centrales y su mayor dispersión geográfica.

En este trabajo se llevará a cabo una evaluación de sustentabilidad entre un sistema tradicional de producción de energía eléctrica mediante una planta de Ciclo Combinado de 316 MW que emplearía gas natural como fuente de energía primaria, y un sistema innovativo de producción de energía eléctrica con una planta híbrida Solar-Ciclo Combinado, la cual emplearía 80 MW termosolar y 236 MW de gas como fuentes de energía primaria.

Debido a la existencia de economías de escala se escogió la planta solar de mayor capacidad, es este caso de 80 MW (es posible instalar de mayor capacidad pero implica ocupar un área de terreno superior al millón de metros cuadrados). Esta capacidad no es arbitraria, como ejemplo se presenta la ley PURPA (*Public Utility Regulatory Policies Act*) en

Estados Unidos, ya que surge por los límites establecidos para pequeños productores. Así utilizaremos esta capacidad de generación de canal parabólico, pues es ésta la información de experiencia y costos de la que disponemos. Para ciclo combinado se seleccionaron turbinas ABB GT24 de 236 MW y 316 MW, que se utilizarán en las diferentes alternativas

A continuación se listan los principales determinantes para caracterizar a los sistemas propuestos:

E.5.1.1. Componentes bio-físicas del sistema.

Para poder hacer un buen uso de las tecnologías termosolares se requiere que la localización de los sistemas propuestos sea en una zona con alta irradiancia solar durante la mayor parte del año, por lo que se propone como lugar de construcción de la planta el norte del país, en especial el Estado de Sonora (figura E.1).

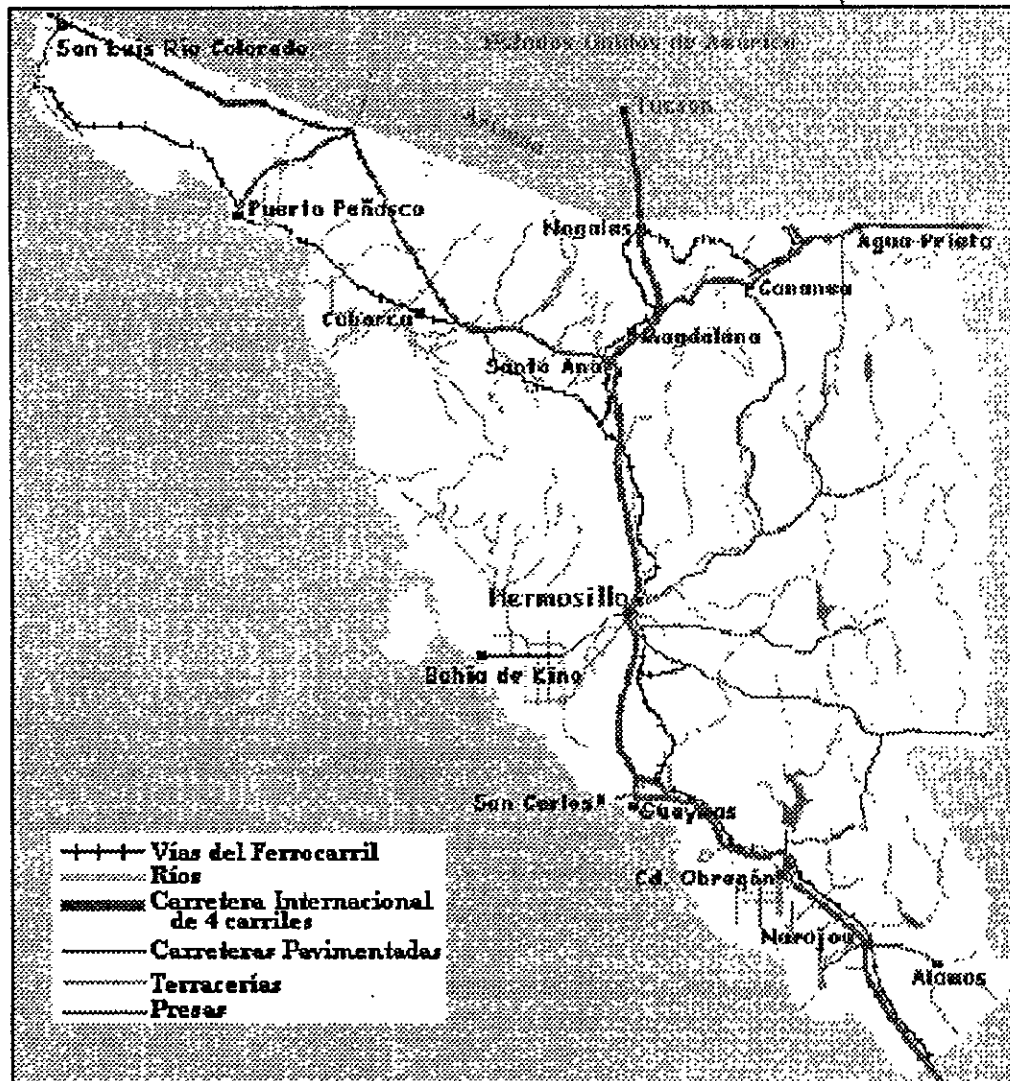


Figura E.1: Estado de Sonora.

Dentro de Sonora se propone la Planicie Costera Noroccidental, la cual forma una faja de 1400 km de largo, limitada al este por la Sierra Madre Occidental y al oeste por el Golfo de California, por lo que tiene 250 km de ancho al norte (Sonora) y 75 km de ancho al sur (Nayarit), con una elevación media de 100 m. Es una región plana con suave pendiente hacia el mar, interrumpida con cerros profundamente erosionados o colinas y bajas sierras rodeadas de conos aluviales muy tendidos. Desde la frontera hasta el río Yaqui se presentan grandes áreas de típicas llanuras desérticas, arreicas y en su mayor parte criptorreicas, donde es posible encontrar médanos en forma de media luna.

a) Clima del Estado de Sonora:

El Estado de Sonora tiene climas secos extremosos (figura E.2), con una temperatura media anual de 20°C en los valles y en la costa, mientras que en la región serrana es de 16°C, con máximas de 56 °C y mínimas de -10 °C. La zona norte de Sonora se caracteriza por un clima seco desértico en las planicies cercanas a la costa; templado lluvioso en la región serrana y seca esteparia en el resto. La precipitación es de 50 a 350 mm en el Noroeste y de 400 a 600 mm en el resto de la entidad. En la zona sur el clima es seco desértico y muy cálido y con una precipitación pluvial de 266 mm en el verano.

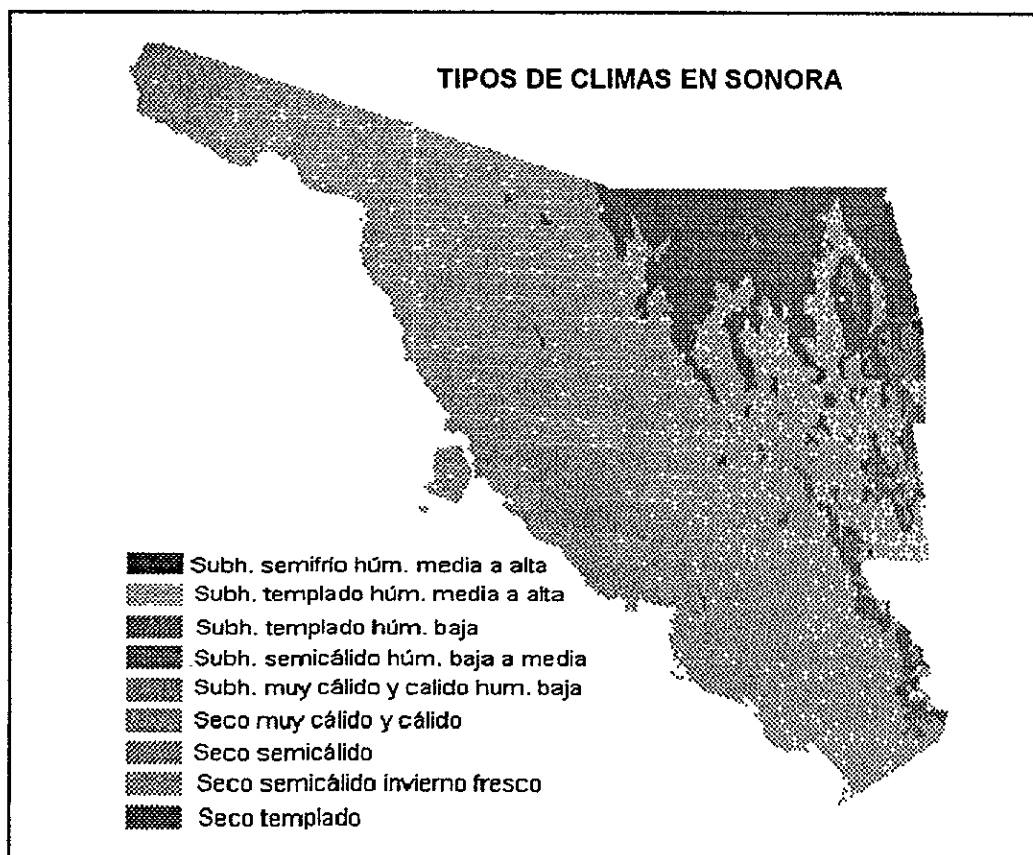


Figura E.2: Tipos de clima del Estado de Sonora.

b) Vegetación del Estado de Sonora:

En la figura E.3 se presenta lo siguiente: los matorrales ocupan la mayor superficie del estado (38.07%), donde predominan: (1) la ganadería extensiva, y (2) la extracción de especies silvestres con fines comerciales (mezquite, orégano, chiltepin) y artesanales (palo fierro, entre otros). Las áreas sin uso aparente le siguen en extensión (17.29%). Los pastizales son las áreas eminentemente ganaderas y ocupan el 13.06%. Los bosques cubren el 12.57% del estado, están ubicados en la Sierra Madre Occidental, y formados por asociaciones pino-encino, encino- pino y pino, y aunque existe una infraestructura, su explotación sigue siendo casi artesanal. Las áreas con valor minero están bien distribuidas en el estado (6.28%); y predominan los yacimientos cupríferos y auríferos. El 6.01 % está condicionada para la ganadería. Las zonas agrícolas del estado (4.89%) son áreas bajo riego en la mayor parte. La ganadería intensiva (granjas avícolas, porcícolas, establos lecheros y corrales de engorda) aunque ocupan menos área (1.15%) son económicamente muy importantes.

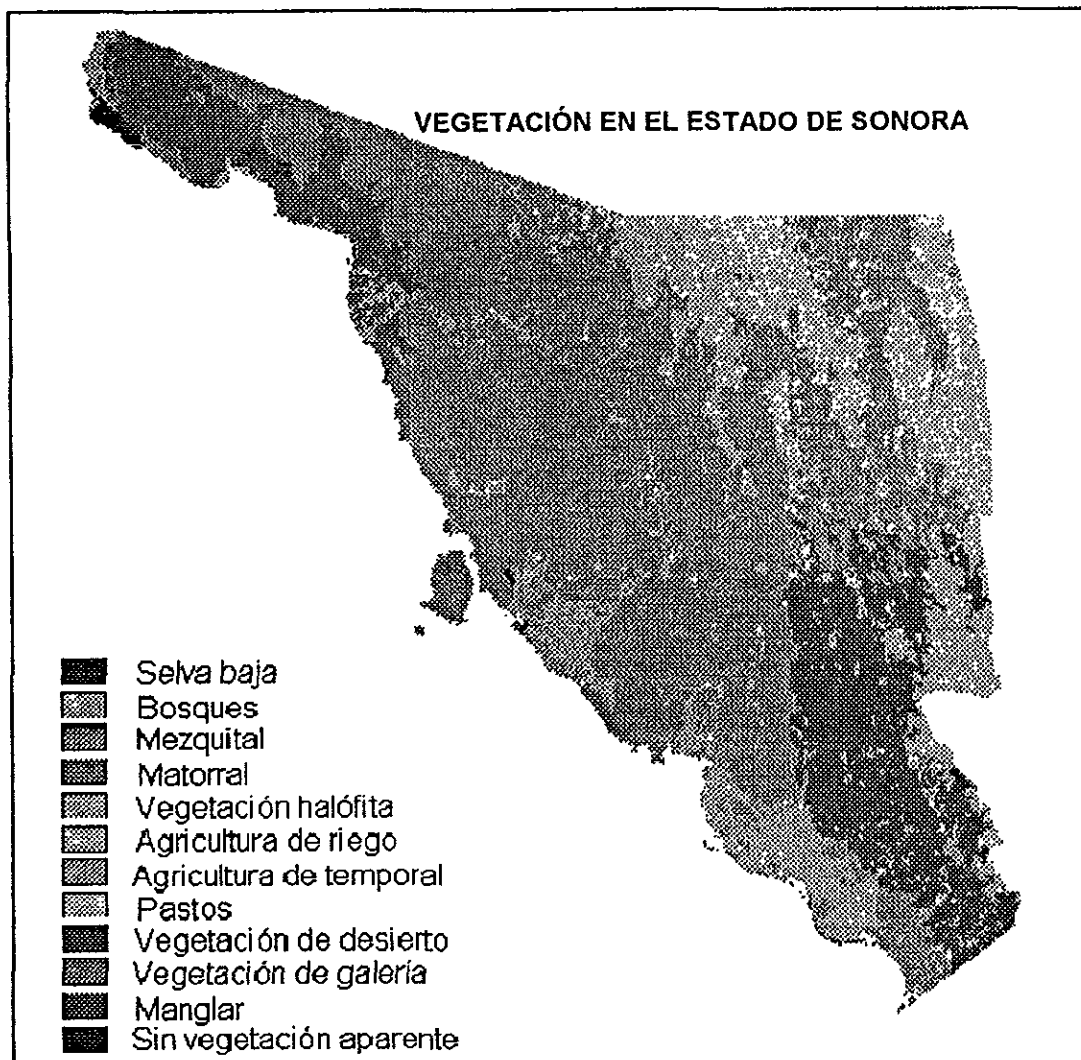


Figura E.3: Distribución de la vegetación en el Estado de Sonora.

c) Salinidad del suelo en el Estado de Sonora:

El 90.77% del territorio no presenta problemas salinos; sin embargo, existe casi un 10% que está afectado por sales en diferentes niveles. Es sódico en un 1.75%, es salino-sódico en un 2.57%, es fuertemente salino - fuertemente sódico en un 1.82% y es salino fuertemente sódico en un 1.63%. El 62.3 % de los suelos agrícolas son normales, mientras que el resto son salino-sódicos (15.9 %), tienen problemas de salinidad (12.4 %), son fuertemente salinos (3.2 %), son fuertemente salino-sódicos (2.3 %), tienen problemas de sodicidad únicamente (1.7 %), y fuertemente sódicos, en parte medianamente salinos, 0.8 %, y otra parte fuertemente salinos, 1.4 %. Los problemas de salinidad se encuentran principalmente en los Distritos de Riego de Caborca y Costa de Hermosillo y en los Valles Yaqui y Mayo, pero los más importantes por extensión y la dificultad de erradicar, son los suelos salino-sódicos que se encuentran en el Valle del Yaqui y en la llanura deltaica salina (abanicos de San Luis Río Colorado)

d) Fuentes fijas de contaminación del aire:

Mediante el modelo de simulación Sistema de Información Rápida en Impacto Ambiental (SIRIA) se analizaron emisiones fugitivas y conducidas, considerando inventarios de: granjas porcícolas, basureros, centros urbanos, minas, extractivas e industrias. En algunos casos se usaron factores de emisiones. En nueve municipios del Estado de Sonora, se agrupan casi el 85% de la población y cerca del 65% de las actividades productivas; en esa proporción ocurre la carga de emisiones contaminantes a la atmósfera, que presumiblemente generan 251.2 Mg/año de partículas suspendidas totales, 48,037.8 Mg/año de Hidrocarburos, y 399.5 Mg/año de óxidos de Carbono en diferente composición

e) Cuencas hidrológicas:

El estado de Sonora tiene 12 cuencas hidrológicas, donde el mayor consumo doméstico se realiza en la Cuenca del Río Sonora, que además de pasar por la capital del Estado, también atraviesa a las poblaciones más antiguas de él; le sigue en orden de importancia la Cuenca del Río Yaqui que, además de ser la más grande ubica a las concentraciones humanas resultantes del auge agrícola por las construcciones de obras hidráulicas, y en forma similar, se encuentra la Cuenca del Río Mayo. Esta aseveración se refleja en los consumos de agua para actividades agropecuarias, donde el Río Yaqui, y Mayo son los que utilizan más agua, a partir de las dos presas Alvaro Obregón, y Adolfo Ruiz Cortines, respectivamente. Desde el punto de vista del desarrollo industrial, también estas tres regiones hidrológicas contribuyen con el mayor consumo de agua, y de igual forma el sector servicios.

E.5.1.2. Componentes Socioeconómicas y Culturales:

El otro aspecto en la demanda de servicios, y en consecuencia de recursos naturales, está determinado por la calidad de vida, que se traduce como el crecimiento económico. Para esto se analizó información sobre el crecimiento de los diferentes sectores económicos. Se observa que la población ocupada se ha mantenido constante a lo largo de las últimas tres décadas. Asimismo, a pesar de que la PEA ha aumentado, de 25.9% en 1970 a 45% en 1990, la tasa de desempleo aumentó de 0.75% en 1980 a un 2.5% en 1990. El sector terciario es el más dinámico en el estado ya que ocupa el 49%, mientras que el 23% se encuentra en el sector primario, con una baja de 1970 a 1990.

a) Actividades productivas en el Estado de Sonora:

Las actividades productivas (figura E.4) se analizaron basándose en los recursos naturales, especialmente la vegetación, ya que los recursos muestran la vocación del suelo. De esta forma es posible observar los impactos o las consecuencias de las actividades productivas sobre el ambiente.

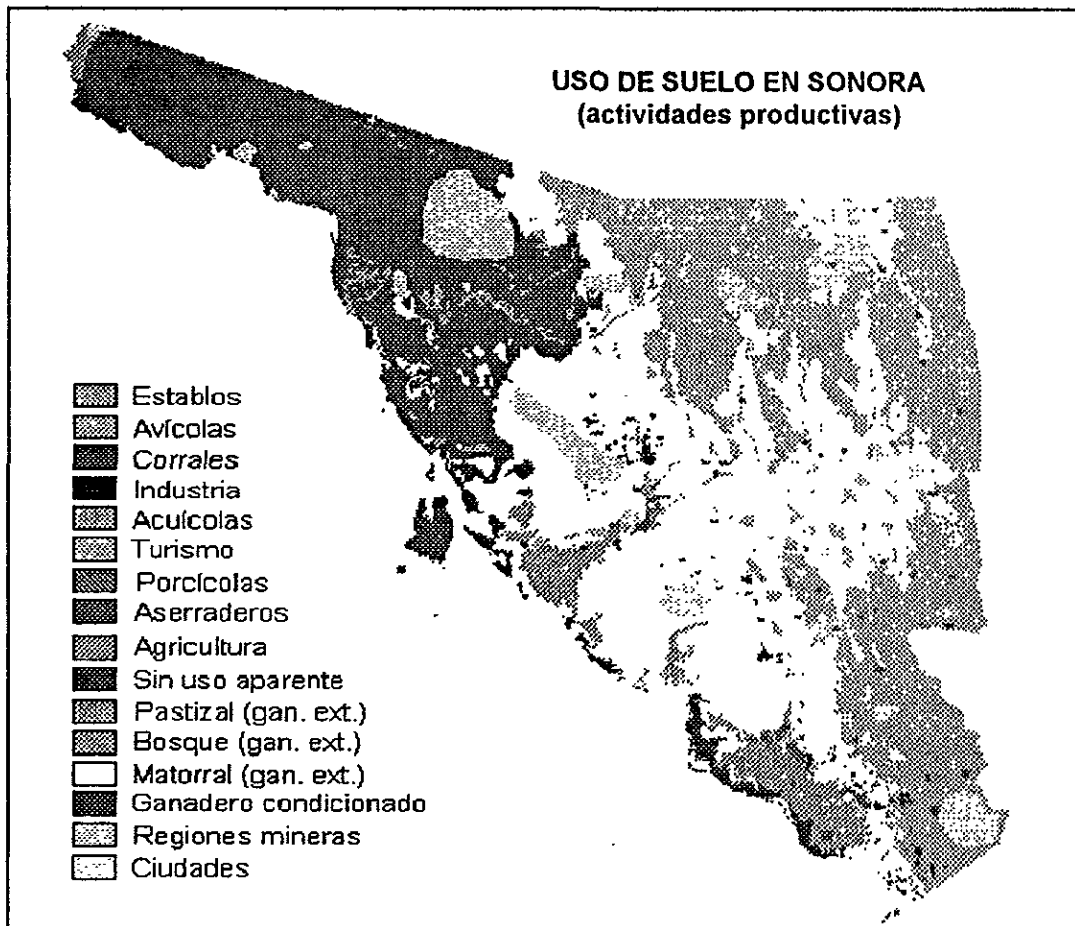


Figura E.4: Distribución del uso de suelo en el Estado de Sonora.

Como se mencionó previamente al plano de vegetación se incorporaron actividades como la acuicultura, obtenidos de imágenes de satélite recientes, los asentamientos humanos y las industrias fueron añadidos basándose en planos de INEGI corregidos para los 72 asentamientos más grandes del estado, y la ganadería intensiva, establos lecheros, corrales de engorda, y granjas avícolas y porcícolas, fueron añadidos al obtener las coordenadas de cada una de las registradas en la Secretaría de Fomento Ganadero, la Delegación Estatal de la Secretaría de Agricultura y Ganadería, o las asociaciones ganaderas. Los distritos mineros fueron mapeados sobre la base de los registros en la Dirección de Fomento Minero de la Secretaría de Desarrollo Económico y productividad.

Entre los principales grupos indígenas del estado tenemos a: Opatas, Yaquis, Pápagos, Pimas y Seris.

E.5.1.3 Componentes Tecnológicas y de manejo:

El estado de Sonora cuenta con una serie de caminos de terracería, caminos pavimentados, supercarreteras y vías de ferrocarril que unen a las principales ciudades del país y por ser un estado fronterizo, la supercarretera va directo a la frontera en Nogales. Existe un gasoducto que atraviesa una gran parte del centro del estado, el cual viene de Estados Unidos, entra por Naco, pasa por Cananea y llega hasta Hermosillo siguiendo el recorrido de la supercarretera; lo cual es una gran ventaja ya que esta es la zona que recibe la mayor cantidad de radiación solar del país. En la tabla E.1 se comparan los sistemas propuestos.

Tabla E.1: Comparación de las características de cada sistema

Determinantes del Sistema	Sistema Tradicional	Sistema Innovativo
Capacidad de generación	316 MW con ciclo combinado	80 MW con termosolar (canal p.) 236 MW con ciclo combinado
Energía primaria empleada	Gas natural (importado)	Energía solar y gas natural (importado)
Eficiencia bruta de c.c.	46.79 %	46.79 %
Eficiencia neta de c.c.	45.38 %	45.38 %
Eficiencia del concentrador de canal parabólico	----	≈ 13 %
Tiempo de generación con gas natural	5694 h/año (f.p.= 0.65)	5694 h/año (f.p.= 0.65 para c.c.) 13.2 h/día (85.3%)
Tiempo de generación con energía solar	----	2445 h/año* 6.7 h/día (14.7%)
Radiación de diseño	----	2772 kWh/m ²

Radiación máxima	-----	3122 kWh/m ²
Poder Calorífico del gas	9200.14 kcal/m ³	9200.14 kcal/m ³
Area de concentradores	-----	470 265 m ²
Area total requerida m ²	846 476 m ²	1 316 741 m ²
Vida útil	30 años	30 años
Insumos nacionales**	37.4 %	53.7 %
Insumos importados**	62.6 %	46.3 %
Financiamiento	CFE, Inversión Privada	CFE, Banco Mundial, Inversión Privada, GEF

*El ciclo combinado trabaja siempre y sólo durante 6.7 horas al día la planta está a toda su capacidad

** Para construcción

Donde: c.c. --- ciclo combinado
 f.p. --- factor de planta (tomado del COPAR)
 c.p. --- canal parabólico

La planta se localizaría en alguna zona muy cercana al oeste de la supercarretera que une a Hermosillo con la ciudad de Santa Ana al sur de Nogales, ya que por ahí pasa el gasoducto proveniente de Estados Unidos, además pasa un río y la cantidad de radiación solar es de las mejores de país. Por otro lado, el terreno es plano y semiárido, con lo cual los requerimientos de labores de limpieza se minimizan.

E.5.2. Identificación de los puntos críticos del sistema.

Para identificar los puntos críticos del sistema se puede plantear la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los factores o procesos ambientales, técnicos, sociales y económicos que de forma individual o combinada pueden tener efecto crucial en la supervivencia del sistema de manejo?

E.5.2.1. Aspectos ambientales.

Desde este punto de vista algunos factores que pueden influir para la sustentabilidad del sistema de manejo pueden ser: contaminación de aire por fugas de gas natural; afectación del terreno por la gran área que se requiere para la instalación de los concentradores de canal parabólico; grandes pérdidas de agua de enfriamiento por el tipo de clima en cierta época del

año; bajos rendimientos cuando se presente nubosidad; emisiones de gases de combustión por la quema de gas natural; cambio de uso de suelo, erosión; etc.

E.5.2.2. Aspectos socioeconómicos.

En cuanto a este tipo de aspectos se tiene una alta dependencia al precio de la electricidad ya que si es inestable o cae se afectará todo el futuro de la planta; se usa gas natural importado por la ausencia de un gasoducto que surta gas natural nacional, de tal forma que es muy sensible al aumento del precio de este insumo; se requiere de un endeudamiento con organizaciones internacionales para poder financiar la construcción de cualquier sistema; se podría presentar una alta migración de población para la construcción de la planta, lo cual provocaría un desequilibrio en las comunidades de los alrededores; la tecnología de ciclo combinado requiere de mucho equipo importado, por lo que se estará sujeto a precios cotizados en dólares; costo de mano de obra, que por ser una región cercana a la frontera ésta debe ser un poco cara con respecto al resto del país; uso de una fuente alterna de energía, la cual puede crear cierto recelo entre los inversionistas; etc.

E.5.3. Selección de los indicadores.

Para poder definir los indicadores a usar en esta evaluación debemos seleccionar a aquellos que sean integradores, es decir, que describan a otros procesos además del que analizamos; que sean fáciles de medir, obtenidos de información fácilmente medible; que sean adecuados al nivel de agregación del sistema bajo análisis; que sean aplicables en un intervalo de ecosistemas, condiciones socioeconómicas y culturales definidas; que tengan un alto nivel de confiabilidad; que sean sencillos de entender por la mayoría de los lectores; deben permitir medir cambios de características del sistema a través del tiempo; deben involucrar aspectos prácticos y ser claros; finalmente, las mediciones deben poder repetirse a través del tiempo.

Por lo que para este trabajo se tomarán en cuenta tres áreas de evaluación: social, económica, y técnico-ambiental; ubicando a los atributos generales de sustentabilidad en cada una de las áreas propuestas con sus propios criterios de diagnóstico.

E.5.3.1. Indicadores Económicos.

Para la selección de estos indicadores primero se deben enunciar los criterios de diagnóstico a seguir y después el indicador a usar con el cual se definirá el atributo general de sustentabilidad.

a) Productividad:

Se puede evaluar con la rentabilidad y la eficiencia usando como indicadores al Valor Presente Neto, a la Tasa Interna de Retorno y a la Relación Beneficio/Costo. Otros indicadores puede ser el costo de inversión, el tiempo de retorno, etc.

b) Estabilidad, Resiliencia y Confiabilidad:

Se pueden evaluar con la diversificación de uso de combustibles y con los mecanismos de medición de riesgos, usando para ello los indicadores de créditos, seguros, apalancamiento, porcentaje de ingreso derivado del uso de las diferentes energías primarias, precio del gas natural, etc.

c) Adaptabilidad:

Se puede evaluar con las opciones de uso de energías primarias y opciones tecnológicas mediante los indicadores de número y tipo de opciones de energías primarias y tecnologías disponibles; costo a bajas cargas; costo de generación en días nublados; bajas demandas; etc.

d) Equidad:

El criterio de diagnóstico será la adaptabilidad de tecnologías y la evolución del empleo con indicadores como costo de inversión/ingreso por producción, número de empleos creados (temporales y permanentes), acceso a seguros contra incendios, etc.

e) Autodependencia:

Los indicadores a usar serán el nivel de autofinanciamiento, el grado de endeudamiento, el ahorro interno, porcentaje de usos propios de energía cubiertos con producción propia, etc.

E.5.3.2. Indicadores Técnico-Ambientales.

Estos indicadores nos proporcionan información sobre la capacidad de los sistemas propuestos de ser ambientalmente "productivos" y sustentables, algunas veces se deberán

incluir indicadores que describan el estado del medio ambiente o procesos de prevención y protección de la degradación ambiental.

a) Estabilidad, Resiliencia y Confiabilidad:

Se puede usar como indicador el patrón del uso de suelo, número de especies de la zona, la calidad del suelo y del agua, la degradación del suelo, siniestros, cambio climático, propiedades químicas del suelo, propiedades físicas del suelo, distribución del capital natural de cada región, etc.

b) Autodependencia:

Para ello se puede utilizar un indicador de subsidio energético, eficiencia energética y grado de dependencia externa.

E.5.3.3. Indicadores Sociales.

Este tipo de indicadores es muy difícil de cuantificar, sobre todo por el tipo de sistema con el que se está trabajando, ya que al ser una planta de producción de energía eléctrica que servirá para el abastecimiento de las comunidades y ciudades de los alrededores en Sonora, se tendría que hacer un estudio mucho más amplio para determinar con exactitud el número de beneficiarios y el esquema de inversión que se utilizaría para su construcción y operación. Algunos de los indicadores sugeridos en la literatura (Masera, 1996) son:

a) Equidad:

En la distribución de beneficios se puede usar como indicador el número y tipo de beneficios por género, sector social, edad, etnia, etc.; en la influencia de factores sobre la toma de decisiones de productores, se puede usar las políticas en contra, grupos en contra, etc.

b) Estabilidad, Resiliencia y Confiabilidad:

En la capacidad de superar eventos graves se puede usar la supervivencia del proyecto después de conflictos, problemas o ausencia de financiamiento; en los procesos de aprendizaje y capacitación, se podría usar el tipo y frecuencia de la capacitación, mecanismos de distribución del conocimiento entre miembros, etc.

c) Adaptabilidad:

Formación de recursos humanos que se puede evaluar con indicadores como conceptos, metodología y la apropiación de éstos por la comunidad; en la capacidad de cambio, se puede evaluar los cambios de objetivos, proyectos, personal, adaptación de los cambios en los diferentes aspectos de producción, etc.

d) Autodependencia:

En la participación se evalúa con el número y frecuencia de las diferentes fases del proyecto; en el control se puede medir el poder de decisión sobre aspectos críticos de la organización; y con respecto a dicha organización se define el tipo, la estructura y la permanencia.

E.5.4. Medición y Monitoreo de los Indicadores.

Los indicadores antes mencionados serán evaluados de forma cuantitativa o de forma cualitativa, dependiendo de lo que se trate, ya que algunos de ellos serán justificados con argumentos o razones teóricas, en parte porque son indicadores que es muy difícil asignarles algún número para una evaluación de tipo numérico. Primero se harán los indicadores económicos, después los técnico-ambientales y por último los sociales.

E.5.4.1. Indicadores Económicos.

Independientemente del atributo general de sustentabilidad que el indicador evalúe, se calcularán uno por uno para que en la parte siguiente se llegue a una conclusión. El resultado de dichos cálculos se expone en la tabla E.2.

El análisis económico y financiero necesario para llegar a estos resultados, se hizo en una hoja de cálculo, donde para cada año de construcción, prueba y operación se establece el desarrollo de las variables económicas consideradas. Tales tablas se exponen al final de este anexo, numeradas como E.4 y E.5.

Tabla E.2: Variables económicas de cada modelo.

Indicador	Sistema Convencional	Sistema Innovativo
Costo de inversión	\$ 2 946 312 363.00	\$ 222 906 400.00
Costo de combustible	\$ 2.9603x10 ¹¹ /año	\$ 2.3789x10 ¹¹ /año

Costo de Operación y Mantenimiento	\$ 8.0113x10 ¹⁰ /año	\$ 6.438x10 ¹⁰ /año
Costo Unitario de Generación	\$ 2.3913x10 ¹¹ /año	\$ 1.9217x10 ¹¹ /año
Costo Unitario de Inversión	\$ 1.7874x10 ⁹	\$ 2.9463x10 ⁹
Tasa Interna de Recuperación	26.9 %	19.6 %
Valor Presente Neto	\$6.6709x10 ⁹	\$ 5.6794x10 ⁹
Anualidad Equivalente	\$1.3398x10 ⁹	\$1.1407x10 ⁹
Relación Beneficio/Costo	4.11	2.61
Período de Recuperación	4.8 años	3.1 años

Para los indicadores económicos se usaron datos del COPAR, 1994 en el caso de las unidades de Ciclo Combinado, mientras que para la parte termosolar se tomaron datos de Hertlein, Klais y Nitsch, "Cost Analysis of Solar Power Plants", American Solar Energy Society, 1990; y en Trieb y Franz "Solar Electricity Generation", Institut für Technische Thermodynamik, 1995.

E.5.4.2. Indicadores Técnico-Ambientales.

La localización de la planta se da en un intervalo de aproximadamente 111 km, entre las poblaciones de Santa Ana y Hermosillo, de preferencia entre las poblaciones de Carbó y Querobabi a 59 km al norte de Hermosillo, cuya vegetación está compuesta principalmente por matorrales y pastizales como especies no endémicas, la fauna es de roedores, reptiles e insectos. No se lleva a cabo ningún tipo de cultivo en la zona.

Los fenómenos de degradación estudiados fueron: erosión, salinidad y contaminación, en el caso del suelo, contaminación de los cuerpos de agua, y contaminación del aire. En la mayoría de los casos se hicieron estimaciones, a falta de información disponible, utilizando modelos matemáticos, con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica e imágenes de satélite para actualizar información². La erosión en la zona oscila entre 4 y 10 ton/ha; en cuanto a salinidad, la zona se encuentra dentro de suelos no afectados; en cuanto a tiraderos no existe ninguno a su alrededor.

La región escogida presenta poca nubosidad la mayor parte del año, sin embargo, cuando ésta se presente la generación de energía eléctrica se hará prácticamente a partir de gas natural, ya que la planta de ciclo combinado funcionará todo el tiempo y la capacidad total de la planta se dará cuando entre en funcionamiento la parte termosolar.

² Instituto del Medio Ambiente y el Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (IMADES). Hoja de electrónica en Internet.

En cuanto al subsidio energético se debe hacer completamente del exterior y no sólo de la zona, sino del país; ya que el gasoducto del cual se pretende alimentar la planta proviene de Estados Unidos. La eficiencia energética es de las más altas que se tienen en México, y en cuanto a los concentradores solares su eficiencia varía de un 13 a un 15% dependiendo del material del que esté hecha la película reflejante.

Las emisiones de CO₂ de cada uno de los sistemas propuestos están dadas en la siguiente tabla:

Tabla E.3: Emisiones de cada modelo a la atmósfera.

Indicador	Sistema Convencional	Sistema Innovativo
Cantidad de combustible	386 181 018 m ³ /año	337 125 816 m ³ /año
Cantidad de CO ₂ emitido	275 844 ton/año	240 804 ton/año

E.5.4.3. Indicadores Sociales.

Los grupos indígenas del estado de Sonora que viven alrededor de la zona propuesta para la construcción de la planta, tenemos a: Opatas, Yaquis, Pápagos y Pimas; cuyas actividades principales son la fabricación de artesanías, la ganadería y algo de agricultura de autosubsistencia. Para ellos la construcción de la planta significaría una fuente de trabajo temporal, lo cual traería beneficios en su economía y por tanto en su forma de vida.

La toma de decisiones principales la hace básicamente CFE, aunque es muy probable que tenga contratistas y por tanto ellos decidan aspectos menos importantes pero que pueden tener grandes repercusiones en la región.

En caso de que exista algún conflicto de tipo social en la zona, si es durante la etapa de construcción se tendrá que parar ésta por razones de seguridad, pero si es durante la producción y el gasoducto continúa alimentando gas natural, la planta podrá seguir produciendo aunque con mucha seguridad en la zona para que los grupos rebeldes no vuelen las torres de transmisión o el mismo gasoducto.

Si por alguna razón hay un bloqueo en el financiamiento del proyecto por parte de CFE, del Banco Mundial o de las instituciones privadas, se tendrá que parar la construcción por ser un proyecto demasiado caro que necesariamente debe tener financiamiento externo todo el tiempo.

El personal que en la planta labore, deberá ser gente de la zona que recibe la capacitación suficiente en todos los aspectos de la planta, por lo que en forma de cadena, éste

puede llegar a transmitir sus conocimientos (de manera muy general) a la comunidad que pertenece.

La organización de la planta la hará CFE, ya que es la institución que deberá controlar y manejar la producción de energía eléctrica, por lo que ya se tienen esquemas organizacionales definidos en la entrada a la producción de una planta nueva de electricidad.

Las comunidades beneficiadas serán todas las que estén alrededor de la planta híbrida, incluyendo a la ciudad de Hermosillo y a Santa Ana. Además, se pretende no afectar la estabilidad social de los alrededores en el momento de la construcción (3 años) y mucho menos afectar durante la operación.

E.6. Resultados de la evaluación.

El objetivo del sistema innovativo propuesto es la generación de electricidad para la zona en la que se instale usando tecnología de punta, es decir, que la tecnología usada tenga una eficiencia de conversión de la energía primaria lo más alta posible; que las emisiones a la atmósfera y los desechos sólidos y líquidos, sean mínimos; además de la utilización de una fuente de energía renovable. Por lo que se tiene, según los cálculos hechos con anterioridad la cantidad de CO₂ emitida es menor que la emitida con el sistema convencional, por lo que el riesgo para las generaciones futuras en cuanto a contaminación ambiental se refiere disminuye, además de que la planta se adapta a una zona con circunstancias socio-ecológicas pobres, las cuales mejorarían notablemente y las generaciones futuras disfrutarían de los beneficios.

Se generan estructuras productivas, de distribución y de consumo que brindan servicios de electrificación y por tanto un bien energético necesario para el progreso de la región, lo que propicia el empleo total y el trabajo con sentido con la finalidad de mejorar las capacidades humanas de los pobladores de la región.

Con la puesta en marcha de una planta híbrida se desarrollan tecnologías de bajo consumo de recursos, las cuales están adaptadas a las circunstancias socio-ecológicas locales, ya que se utilizan energías primarias poco contaminantes y renovables como son la energía solar y el gas natural; por lo que no significan riesgos importantes para las generaciones presentes y futuras. Por otro lado al consumir gas importado, efectivamente sale más caro que consumir gas nacional, pero se preserva este recurso para las generaciones futuras del país o se destina a otros usos. De esta manera se conservan los recursos base existentes en la zona y se utilizan recursos del exterior.

Se asegura la satisfacción de algunas de las necesidades humanas esenciales, como es el aprovisionamiento de energía de alta calidad. Al implementar un sistema innovativo de este tipo se promueve la diversidad cultural y el pluralismo, ya que se estaría utilizando tecnología comercial nueva y por tanto se pueden compartir experiencias con otras instituciones internacionales sobre la construcción del campo de concentradores de canal parabólico y sobre la puesta en marcha de la planta, así como de su operación.

En cuanto a los indicadores económicos, podemos darnos cuenta de que el sistema híbrido requiere de financiamiento internacional para ser competitivo, por lo que su autodependencia no es grande; sin embargo, el resto de las características y objetivos de sustentabilidad se cumplen, por lo que se dice que sí es un sistema sustentable con un futuro muy promisorio.

Se debe trabajar en disminuir los aspectos que lo hacen menos sustentables para que pueda utilizarse mayor cantidad de energía solar como energía primaria renovable.

El objetivo del sistema innovativo propuesto es la generación de electricidad para la zona en la que se instale usando tecnología de punta, es decir, que la tecnología usada tenga una eficiencia de conversión de la energía primaria lo más alta posible; que las emisiones a la atmósfera y los desechos sólidos y líquidos, sean mínimos; además de la utilización de una fuente de energía renovable. Por lo que se tiene, según los cálculos hechos con anterioridad la cantidad de CO₂ emitida es menor que la emitida con el sistema convencional, por lo que el riesgo para las generaciones futuras en cuanto a contaminación ambiental se refiere disminuye, además de que la planta se adapta a una zona con circunstancias socio-ecológicas pobres, las cuales mejorarían notablemente y las generaciones futuras disfrutarían de los beneficios.

Se generan estructuras productivas, de distribución y de consumo que brindan servicios de electrificación y por tanto un bien energético necesario para el progreso de la región, propiciando el empleo permanente a una parte de los pobladores y desarrolla las capacidades de los seres humanos de los alrededores.

Mediante la Puesta en marcha de la planta de generación eléctrica híbrida (solar-ciclo combinado) se conservan y aumentan los recursos base existentes, ya que aumenta la infraestructura eléctrica de la región y se utiliza una fuente alterna de energía primaria; además se utiliza gas importado, que aunque a primera vista resulte más caro, a mediano plazo servirá para la preservación de los recursos nacionales. Por lo que promueve diversidad cultural y el pluralismo al implementar una tecnología relativamente nueva a nivel macro, con lo que muchas instituciones internacionales pueden aprender de las experiencias obtenidas en la construcción y operación de la planta híbrida.

En cuanto a los indicadores económicos, resulta un poco más caro implementar una planta de este tipo, sin embargo, los costos serían absorbidos por organismos internacionales y por la CFE, cuyos recursos son gubernamentales y por tanto aportados por los pobladores de todo el país. A pesar de ello, las otras ventajas obtenidas son mayores y por tanto vale la pena implementar una planta termosolar para la generación de electricidad bajo las condiciones de estudio. De esta manera podemos decir que es un proyecto sustentable desde el punto de vista técnico-ecológico y social; sin embargo desde el punto de vista económico no es del todo sustentable ya que se requieren recursos del exterior, lo que no cumple con la característica de autosuficiencia.

Para complementar los resultados de este análisis, existe un informe interno del Instituto de Ingeniería (Almanza, et al, 1990) en el que se hace una evaluación más formal y técnica de las condiciones climáticas de la zona propuesta.

Tabla E.4: Estudio de factibilidad para una planta híbrida Ciclo Combinado - Temosolar de 316 MW

AÑO	PRECIO ENERGIA ELECTCTR. \$/MWh	CARCO DEMAN. ELECTCTR. \$/MWh	PRECIO GAS NATURAL \$/m ³	INGRESOS VENTA ELECTRICIDAD \$	INGRESOS DEMANDA POTENCIA \$	COSTO GAS NATURAL \$	COSTO OPERACION Y MANTENIM. \$	COSTO DEL SEBURO \$	INVERSION INICIAL \$	FLUJO DE EFECTIVO ANTES IMP. \$	DEPRECIACION \$	GASTOS FINANCIEROS \$
1996	-1	53.48	0.5312						(2,946,312.363)	(3,535,574.856)		
1997	0	0.7554	34.30	0.5392	13,847,249	(184,493,964)	(76,743,489)	(2,409,436)	1.00	1,024,562,270	(333,557,484)	(471,409,978)
1998	1	0.8620	49.82	0.5473	1,304,361,911	(187,261,373)	(76,743,489)	(90,788,964)		1,209,324,366	(333,557,484)	(509,122,776)
1999	2	0.9835	50.13	0.5555	1,488,276,940	(190,070,294)	(76,743,489)	(29,249,516)		1,420,183,082	(333,557,484)	(543,064,295)
2000	3	1.1222	57.35	0.5638	1,698,123,988	(192,921,348)	(76,743,489)	(27,787,040)		1,660,839,611	(333,557,484)	(570,217,309)
2001	4	1.2804	65.61	0.5723	1,937,559,471	(195,815,169)	(76,743,489)	(26,397,688)		1,935,516,439	(333,557,484)	(586,509,438)
2002	5	1.4609	75.06	0.5808	2,210,755,356	(198,752,396)	(76,743,489)	(25,077,804)		2,249,030,910	(333,557,484)	(586,509,438)
2003	6	1.6669	85.86	0.6074	2,522,471,861	(201,733,682)	(76,743,489)	(23,823,914)		2,606,879,161	(333,557,484)	(569,049,061)
2004	7	1.9020	98.23	0.6074	2,876,140,394	(204,759,687)	(76,743,489)	(22,632,718)		3,015,331,886	(333,557,484)	(506,744,155)
2005	8	2.1761	112.37	0.6165	3,283,936,189	(207,831,083)	(76,743,489)	(21,501,082)		3,481,543,612	(333,557,484)	(405,395,324)
2006	9	2.4761	128.55	0.6257	3,746,936,294	(210,948,548)	(76,743,489)	(20,426,078)		3,786,014,000	(333,557,484)	
2007	10	2.8787	138.07	0.6351	4,050,502,994	(214,112,777)	(76,743,489)			4,134,595,099		
2008	11	2.8935	148.28	0.6446	4,378,593,736	(217,324,469)	(76,743,489)			4,489,516,958		
2009	12	3.1279	159.26	0.6543	4,735,259,829	(220,584,336)	(76,743,489)			4,873,375,194		
2010	13	3.3812	171.04	0.6641	5,116,653,875	(223,893,101)	(76,743,489)			5,288,515,029		
2011	14	3.6551	183.70	0.6741	5,531,102,839	(227,251,497)	(76,743,489)			5,737,471,573		
2012	15	3.9512	197.29	0.6842	5,979,122,169	(230,660,270)	(76,743,489)			6,103,402,737		
2013	16	4.1922	211.89	0.6945	6,443,848,621	(234,120,174)	(76,743,489)			6,491,872,482		
2014	17	4.4479	227.57	0.6945	6,730,823,987	(237,631,976)	(76,743,489)			6,904,262,450		
2015	18	4.7193	244.41	0.7049	7,141,403,614	(241,196,456)	(76,743,489)			7,342,038,929		
2016	19	5.0071	262.90	0.7154	7,577,029,234	(244,814,403)	(76,743,489)			7,806,758,039		
2017	20	5.3126	281.92	0.7262	8,039,228,018	(248,486,619)	(76,743,489)			7,923,673,050		
2018	21	5.5923	281.92	0.7371	8,159,816,438	(252,213,918)	(76,743,489)			8,042,342,997		
2019	22	5.4731	281.92	0.7481	8,282,213,684	(255,997,127)	(76,743,489)			8,162,792,994		
2020	23	5.5552	281.92	0.7594	8,406,446,890	(259,837,084)	(76,743,489)			8,285,049,740		
2021	24	5.6386	281.92	0.7707	8,532,543,593	(263,734,640)	(76,743,489)			8,409,140,338		
2022	25	5.7231	281.92	0.7823	8,660,531,747	(267,690,660)	(76,743,489)			8,535,092,294		
2023	26	5.8090	281.92	0.7940	8,790,439,723	(271,706,020)	(76,743,489)			8,662,933,250		
2021	27	5.8961	281.92	0.8059	8,922,296,319	(275,781,610)	(76,743,489)			8,792,692,385		
2022	28	5.9846	281.92	0.8180	9,056,130,764	(279,918,354)	(76,743,489)			8,924,597,622		
2023	29	6.0743	281.92	0.8303	9,191,972,725	(284,117,109)	(76,743,489)			9,058,078,438		
2024	30	6.1655	281.92	0.8428	9,329,822,316							
2024	30	6.1655	281.92	0.8428	9,329,822,316							

Tam	14.1%	14.4%	14.5%	1.1%	20.0%
Crec. anual				Prima seguro	Interés Real
Concepcio	1,513,246,893	337,125,816	316,000		
Cantidad	kWh/año	m ³ /año	kW		
Unidad					
INVERSION INICIAL					
Antes de impuestos					
Tam Rendimiento Mínima Atractiva					
Valor Presente Neto (VPN)					
Amortidad Equivalente					
Relación Beneficio/Costo					
Tam Interno de Recuperación					
Periodo de Recuperación (años)					
					VPN sin incluir inversión
					Final
					\$8,546,909,128.70
					\$1,717,215,976.33
					3.42
					23.3%
					2.06

AMORTIZACIONES CON CAPITALIZACION DE INTERESES

% FINANCIAMIENTO = 80% PLAZO (años) = 10

PERIODO	SALDO INICIAL	MONTO INTERESES	SALDO ACUMULADO	PAGO	AMORTIZACION	SALDO FINAL
1	(2,357,049,890)	(471,409,978)	(2,828,459,868)	282,845,987	(188,563,991)	(2,545,613,882)
2	(2,545,613,882)	(509,122,776)	(3,054,736,658)	339,415,184	(169,707,592)	(2,715,321,474)
3	(2,715,321,474)	(543,064,295)	(3,258,385,768)	407,298,221	(135,766,074)	(2,851,087,547)
4	(2,851,087,547)	(570,217,509)	(3,421,305,057)	488,757,865	(81,459,644)	(2,932,547,192)
5	(2,932,547,192)	(586,509,438)	(3,519,056,630)	586,509,438	(0)	(2,932,547,192)
6	(2,932,547,192)	(586,509,438)	(3,519,056,630)	703,811,326	117,301,888	(2,815,245,304)
7	(2,815,245,304)	(563,049,061)	(3,378,294,365)	844,573,591	281,524,530	(2,593,720,774)
8	(2,533,720,774)	(506,744,155)	(3,040,464,928)	1,013,488,309	506,744,155	(2,026,976,619)
9	(2,026,976,619)	(405,395,324)	(2,432,371,943)	1,216,185,971	810,790,648	(1,216,185,971)
10	(1,216,185,971)	(243,237,194)	(1,459,423,166)	1,459,423,166	1,216,185,971	(0)

34.0%
Ingreso Gravable

Después de Impuestos	
Tasa Rendimiento Mínima Atractiva	20.0%
Valor Presente Neto (VPN)	\$5,679,433,622.71
Anualidad Equivalente	\$1,140,692,141.40
Relación Beneficio/Costo	2.61
Tasa Interna de Recuperación	19.6%
Periodo de Recuperación (años)	3.10

AÑO	INGRESO GRAVABLE	I.S.R. + P.T.U.	FLUJO DE EFECTIVO DESP. IMP.
1996			
1997			(3,535,974,836)
1998	199,594,809	(67,862,235)	956,700,035
1999	346,644,106	(117,858,996)	1,091,465,370
2000	523,561,304	(178,010,843)	1,242,172,239
2001	737,064,618	(250,601,970)	1,410,237,641
2002	995,449,517	(338,452,836)	1,597,063,603
2003	1,308,963,988	(445,047,756)	1,803,983,154
2004	1,690,272,617	(574,692,690)	2,032,186,471
2005	2,155,030,248	(732,710,284)	2,282,621,602
2006	2,722,590,805	(923,680,874)	2,555,862,739
2007	3,189,219,322	(1,084,334,569)	2,701,679,430
2008	4,134,595,093	(1,405,762,332)	2,728,832,762
2009	4,489,516,958	(1,526,435,766)	2,963,081,192
2010	4,873,375,194	(1,656,947,566)	3,216,427,628
2011	5,288,515,029	(1,798,095,110)	3,490,419,919
2012	5,737,471,573	(1,950,740,335)	3,786,731,238
2013	6,103,402,737	(2,075,156,981)	4,028,245,807
2014	6,491,872,482	(2,207,236,644)	4,284,635,838
2015	6,904,262,450	(2,347,449,233)	4,556,813,217
2016	7,342,038,929	(2,498,293,236)	4,845,745,693
2017	7,806,758,039	(2,654,297,733)	5,152,460,306
2018	8,292,673,050	(2,819,048,837)	5,229,624,213
2019	8,804,342,997	(2,994,396,619)	5,307,946,378
2020	9,342,792,994	(3,177,349,618)	5,387,443,376
2021	9,912,049,740	(3,369,916,912)	5,468,132,829
2022	10,512,140,338	(3,570,107,715)	5,550,032,623
2023	11,142,092,294	(3,779,931,380)	5,633,160,914
2024	11,802,933,530	(3,995,397,400)	5,717,536,130
2025	12,494,692,385	(4,226,515,411)	5,803,176,974
2026	13,218,397,622	(4,472,295,192)	5,890,102,431
2027	13,974,078,438	(4,732,746,669)	5,978,331,769

Tabla E.6: Estudio de factibilidad para una planta Ciclo Combinado de 316 MW

AÑO	PRECIO ENERGIA ELECTR. \$/kWh	CARGO DEMAN. ELECTR. \$/kW	PRECIO GAS NATURAL \$/m ³	INGRESOS VENTA ELECTRICIDAD \$	INGRESOS DEMANDA POTENCIA \$	COSTO GAS NATURAL \$	COSTO OPERACION Y MANTENIM. \$	COSTO DEL SEGURO \$	INVERSION INICIAL \$	FLUJO DE EFECTIVO ANTES IMP. \$	DEPRECIACION \$	GASTOS FINANCIEROS \$
1996	0.6621	33.48	0.5312						(1,787,409,688)	(2,144,891,626)		
1997	0.7554	38.30	0.5392	1,326,834,317	13,847,249	(211,339,694)	(76,743,489)	(19,661,507)	1,00	1,032,936,877	(214,489,163)	(285,985,550)
1998	0.8620	43.82	0.5473	1,513,917,956	15,841,253	(214,509,789)	(76,743,489)	(18,678,431)		1,219,827,499	(214,489,163)	(308,864,394)
1999	0.9835	50.13	0.5555	1,727,380,388	18,122,393	(217,727,436)	(76,743,489)	(17,744,510)		1,433,287,346	(214,489,163)	(329,455,554)
2000	1.1222	57.35	0.5638	1,970,941,023	20,732,018	(220,993,348)	(76,743,489)	(16,857,284)		1,677,078,919	(214,489,163)	(345,928,121)
2001	1.2804	65.61	0.5723	2,248,843,707	23,177,428	(224,308,248)	(76,743,489)	(16,014,420)		1,955,494,978	(214,489,163)	(355,811,782)
2002	1.4609	75.06	0.5808	2,565,930,669	27,132,718	(227,672,872)	(76,743,489)	(15,213,699)		2,275,433,347	(214,489,163)	(355,811,782)
2003	1.6689	85.86	0.5895	2,927,726,894	31,039,852	(231,087,965)	(76,743,489)	(14,453,014)		2,636,482,278	(214,489,163)	(341,579,311)
2004	1.9020	98.23	0.5984	3,340,536,386	35,509,591	(234,554,284)	(76,743,489)	(13,730,365)		3,031,017,840	(214,489,163)	(307,421,380)
2005	2.1701	112.37	0.6074	3,811,552,016	40,622,972	(238,072,599)	(76,743,489)	(13,043,845)		3,524,315,055	(214,489,163)	(245,937,104)
2006	2.4761	128.55	0.6165	4,120,287,730	43,629,072	(241,643,688)	(76,743,489)	(12,391,653)		3,833,137,972	(214,489,163)	(147,582,262)
2007	2.6767	138.07	0.6257	4,454,031,036	46,857,623	(245,268,343)	(76,743,489)			4,178,876,827		
2008	2.8935	148.28	0.6351	4,814,807,549	50,325,087	(248,947,368)	(76,743,489)			4,539,441,779		
2009	3.1279	159.26	0.6446	5,204,806,961	54,049,143	(252,681,579)	(76,743,489)			4,929,431,037		
2010	3.3812	171.04	0.6543	5,626,396,325	58,048,780	(256,471,802)	(76,743,489)			5,351,229,814		
2011	3.6551	183.70	0.6641	6,082,134,427	62,344,390	(260,318,879)	(76,743,489)			5,807,416,449		
2012	3.9512	197.29	0.6741	6,453,144,627	66,957,675	(264,223,662)	(76,743,489)			6,179,135,350		
2013	4.1922	211.89	0.6842	6,846,786,449	71,912,757	(268,187,017)	(76,743,489)			6,573,768,700		
2014	4.4479	227.57	0.6945	7,264,440,423	77,234,301	(272,209,970)	(76,743,489)			6,992,721,413		
2015	4.7193	244.41	0.7049	7,707,571,289	82,949,640	(276,292,970)	(76,743,489)			7,437,484,469		
2016	5.0071	262.50	0.7154	8,177,733,137	89,087,913	(280,437,364)	(76,743,489)			7,909,640,197		
2017	5.3126	281.92	0.7262	8,300,399,134	89,086,720	(284,643,925)	(76,743,489)			8,028,098,440		
2018	5.5923	281.92	0.7371	8,424,905,121	89,086,720	(288,913,584)	(76,743,489)			8,148,334,769		
2019	5.4751	281.92	0.7481	8,551,278,698	89,086,720	(293,247,288)	(76,743,489)			8,270,374,642		
2020	5.5552	281.92	0.7594	8,679,547,879	89,086,720	(297,643,997)	(76,743,489)			8,394,245,113		
2021	5.6386	281.92	0.7707	8,809,741,097	89,086,720	(302,110,687)	(76,743,489)			8,519,973,641		
2022	5.7231	281.92	0.7823	8,941,887,213	89,086,720	(306,642,347)	(76,743,489)			8,647,588,097		
2020	5.8090	281.92	0.7940	9,076,015,522	89,086,720	(311,241,982)	(76,743,489)			8,777,116,770		
2021	5.8961	281.92	0.8059	9,212,155,754	89,086,720	(315,910,671)	(76,743,489)			8,908,588,373		
2022	5.9846	281.92	0.8180	9,350,338,091	89,086,720	(320,649,271)	(76,743,489)			9,042,032,050		
2023	6.0743	281.92	0.8303	9,490,593,162	89,086,720	(325,459,010)	(76,743,489)			9,171,477,383		
2024	6.1655	281.92	0.8428									

Crec. anual	14.1%	14.4%	1.5%	1.1%	20.0%
Tasa				Prima seguro	Interés Real
Concepto	1,539,318,108	306,181,018	316,000		
Cantidad	kWh/año	m ³ /año	kW		
Unidad					

INVERSION INICIAL		VPN sin Incluir
Antes de impuestos	\$1,787,409,688	Investación
Tasa Rendimiento Mínima Atractiva		Inicial
Valor Presente Neto (VPN)	\$10,073,910,363.47	\$12,318,801,990
Anualidad Equivalente	\$2,023,305,693.53	
Relación Beneficio/Costo	5.70	
Tasa Interna de Recuperación	32.4%	
Periodo de Recuperación (años)	3.18	

AÑO	INGRESO ORAVABLE	I.S.R. + P.T.U.	FLUJO DE EFECTIVO DESP. IMP.	AMORTIZACIONES CON CAPITALIZACION DE INTERESES								
				PERIODO	SALDO INICIAL	MONTO INTERESES	SALDO ACUMULADO	PAGO	AMORTIZACION	SALDO FINAL		
1996	-1											
1997	0		(2,144,891,626)									
1998	1	(181,037,136)	851,899,741		(1,429,927,751)	(285,985,550)	(1,715,913,301)	171,891,330	(114,394,220)	(1,544,321,971)		
1999	2	(236,801,140)	983,026,339		(1,544,321,971)	(308,864,394)	(1,853,186,365)	205,909,596	(102,954,799)	(1,647,276,769)		
2000	3	(89,342,830)	1,130,910,784		(1,647,276,769)	(329,455,554)	(1,976,732,123)	247,091,515	(82,363,838)	(1,729,640,607)		
2001	4	(1,116,661,635)	(379,664,956)		(1,729,640,607)	(345,928,121)	(2,075,568,729)	296,509,818	(49,418,303)	(1,779,058,910)		
2002	5	1,385,194,033	(470,965,971)		(1,779,058,910)	(355,811,782)	(2,134,870,692)	355,811,782	(0)	(1,779,058,910)		
2003	6	1,703,132,403	1,694,368,330		(1,779,058,910)	(355,811,782)	(2,134,870,692)	426,974,138	71,162,356	(1,707,896,554)		
2004	7	2,080,413,804	(707,340,694)		(1,707,896,554)	(307,421,380)	(2,049,475,865)	512,368,966	170,789,655	(1,537,106,899)		
2005	8	2,529,107,298	(859,896,481)		(1,537,106,899)	(307,421,380)	(1,844,528,278)	614,842,759	307,421,380	(1,229,685,519)		
2006	9	3,471,086,547	(1,180,169,426)		(1,229,685,519)	(245,937,104)	(1,475,622,623)	737,811,311	491,874,208	(737,811,311)		
2007	10	4,178,876,827	(1,420,818,121)		(737,811,311)	(147,582,262)	(885,373,574)	885,373,574	737,811,311	(0)		
2009	12	4,539,441,779	(1,543,410,205)									
2010	13	4,929,431,037	(1,676,006,553)									
2011	14	5,351,229,814	(1,819,418,137)									
2012	15	5,807,416,449	(1,974,521,593)									
2013	16	6,179,135,350	(2,100,906,019)									
2014	17	6,573,768,700	(2,235,081,358)									
2015	18	6,992,721,415	(2,377,525,280)									
2016	19	7,437,484,469	(2,228,744,720)									
2017	20	7,909,640,197	(2,689,277,667)									
2018	21	8,028,098,440	(2,729,553,470)									
2019	22	8,148,334,769	(2,770,433,821)									
2020	23	8,270,374,642	(2,811,927,378)									
2021	24	8,394,245,113	(2,854,043,338)									
2022	25	8,519,973,641	(2,896,179,038)									
2020	26	8,647,588,097	(2,940,179,953)									
2021	27	8,777,116,770	(2,984,219,702)									
2022	28	8,908,388,373	(3,028,920,047)									
2023	29	9,042,032,050	(3,074,290,897)									
2024	30	9,177,477,383	(3,120,342,310)									

Después de impuestos	
Tasa Rendimiento Mínima Atractiva	20.0%
Valor Presente Neto (VPN)	\$6,670,920,043.80
Amenidad Equivalente	\$1,339,829,330.68
Relación Beneficio/Costo	4.11
Tasa Interna de Recuperación	26.9%
Periodo de Recuperación (años)	4.80

34.0%	
Ingreso Gravable	