

63
2ij



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**



**"CONDICIONES DE TRANSPORTE DE LA
ENERGIA SOLAR MEDIANTE EL USO
DE FIBRAS OPTICAS"**

PROYECTO DE INVESTIGACION

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A I
OSCAR ALFREDO JARAMILLO SALGADO**

ASESOR: ING. JUAN MANUEL TORRES MERINO

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. MEX.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



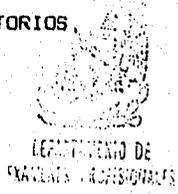
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR

DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .



AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el trabajo el proyecto de Investigación: "Condiciones de Transporte de la Energía Solar mediante el uso de Fibras Ópticas".

que presenta el pasante: Oscar Alfredo Jaramillo Salgado
con número de cuenta: 9057196-5 para obtener el TÍTULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 16 de Mayo de 1996

PRESIDENTE	<u>M. en C. Enrique Curiel Reyna</u>	
VOCAL	<u>M. en C. Ana Ma. Paniagua Mercado</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Juan Manuel Torres Merino</u>	
1er. SUPLENTE	<u>Ing. Felipe Díaz del Castillo</u>	
2do. SUPLENTE	<u>Ing. Socorro Carmona Estrada</u>	

DEDICATORIAS:

A mis padres: Lázaro Jaramillo Ramírez y María Saigado de Jaramillo, que con su apoyo y cariño me han ayudado a terminar mis estudios de licenciatura y lo continúan haciendo en mis estudios de maestría. También con gran cariño a mi hermano Carlos, por su comprensión. Muy en especial y con todo el amor del mundo a mi novia Paty, la mujer a quien amo y espero estar junto a ella toda mi vida.

AGRADECIMIENTOS:

Quiero agradecer al Ing. Juan Manuel Torres Merino por la ayuda tan importante para la realización de este trabajo, al Ing. Juan Contreras Jefe de la División Físico Matemáticas por todo el apoyo brindado durante mi estancia en la FES-Cuautitlan.

Así también a cada uno de mis profesores por tener la paciencia de impulsarme a ser un buen estudiante.

Deseo igualmente agradecer a los integrantes del Laboratorio de Energía Solar IIM UNAM y muy en especial al Dr. Roberto Best Brown Jefe del Posgrado en Energía Solar.

ÍNDICE

OBJETIVO	IX
JUSTIFICACIÓN	X

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

1.1 FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA.	1
1.2 IMPORTANCIA DE LA ENERGÍA SOLAR.	2
REFERENCIAS (I)	7

CAPITULO II RADIACIÓN SOLAR

2.1 RADIACIÓN.	8
2.1.1 Propiedades de radiación Básicas	9
2.1.2 Cuerpo Negro	11
2.2 RADIACIÓN SOLAR.	
CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE	
Y GEOMETRÍA TIERRA-SOL.	12
2.3 INTERACCIÓN GLOBAL CON LA ATMÓSFERA	
RADIACIÓN GLOBAL, DIRECTA Y DIFUSA.	16
2.4 ÁNGULOS SOLARES	16
2.5 FACTORES QUE AFECTAN LA INTENSIDAD	
DE LA RADIACIÓN SOLAR	20
2.6 ALGUNOS FACTORES ASTRONÓMICOS	21
REFERENCIAS (II)	23

CAPITULO III CONCENTRADORES

INTRODUCCIÓN	24
3.1 CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR	27
3.1.1 Aprovechamiento de la Concentración	27
3.1.2 Radio Geométrico de Concentración	27
3.1.3 Radio Óptico de Concentración	27
3.2 CONCENTRADOR DE PLATO PARABÓLICO	28
3.2.1 Concentrador Parabólico	28
3.2.2 Errores Ópticos	29
3.3 MATERIALES REFLECTIVOS	30
3.3.1 Características de las Propiedades Ópticas de los Metales	31
3.3.2 Constantes Ópticas de los Metales y su Determinación	33
3.3.3 Espejos de Segunda Superficie	38
3.3.4 Películas Plásticas Reflectoras	38
3.3.5 Metal Plateado o Pulido	39
3.4 DESEMPEÑO DEL CONCENTRADOR	39
3.4.1 Fracción de Captura	40
REFERENCIA (III)	41

CAPITULO IV FIBRAS ÓPTICAS

4.1 GUÍAS DE ONDA	42
4.2 DISCUSIÓN DE LA S ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN UNA GUÍA DE ONDA DE PLANOS PARALELOS	45
4.3 QUE ES LA FIBRA ÓPTICA?	49
4.4 PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA	51
4.5 CLASIFICACIÓN DE LAS PERDIDAS EN LA FIBRA ÓPTICA	51
4.5.1 Pérdidas intrínsecas	53
4.5.2 Pérdidas inducidas	56
REFERENCIAS (III)	57

CAPÍTULO V

USO DE FIBRAS ÓPTICAS PARA EL TRANSPORTE DE ENERGÍA SOLAR

INTRODUCCIÓN	58
5.1 RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN	59
5.2. APROXIMACIÓN FÍSICA DEL PROBLEMA	60
5.2.1 Análisis de las restricciones físicas cuando usamos fibras ópticas para conducir energía.	60
5.3 IMAGEN DEL SOL Y ENERGÍA CAPTURADA	66
5.4 ENERGÍA DISPONIBLE A LA SALIDA Y LA EFICIENCIA DEL SISTEMA	71
5.5 ESTUDIO EXPERIMENTAL	74
5.5.1 Pruebas al sistema	74
5.5.2 Resultados Experimentales	76
5.6 CONCLUSIONES	
5.6.1 Como obtener una gran cantidad de energía concentrada	83
5.6.2 Aplicaciones potenciales	83
REFERENCIAS (V)	85

FIGURAS

2-1	Distribución en la longitud de onda del espectro de radiación electromagnética	9
2-1	Energía radiante que choca sobre una superficie	10
2-3	Potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro a distintas temperaturas.	13
2-4	Distribución espectral de la radiación solar.	14
2-5	Distribución de la radiación solar sobre la superficie terrestre	15
2-6	Movimiento aparente del Sol.	17
2-7	Ángulos de posición del Sol	17
2-8	Variación de la declinación solar a través del año.	18
2-9	Posición del sol en el caso de latitudes de 24° N y 28° N.	19
2-10	Posición del sol en el caso de latitudes de 32° N y 36° N.	20
3-1	Representación de un sistema colector de varios paneles	26
3-2	Plato concentrador de paneles con su soporte	26
3-3	Plato concentrador de membrana tensada	26
3-4	El parabolóide es generado por la rotación de una parábola sobre el eje Z.	28
4-1	Rayo propagándose entre dos planos reflectores paralelos	43
4-2	Tres primeros modos de propagación de una onda entre dos planos reflectores paralelos	45
4-3	El espacio comprendido entre la ionosfera y la Tierra actúa como una guía de onda	46
4-4	Líneas de fuerza de los campos eléctricos y magnéticos	47
4-5	Modo TE y Modo TM	48
4-6	Reflexión y difracción de un medio denso a uno menos denso	49
4-7	Cono que limita la incidencia de luz en la fibra óptica	50

4-8	Espectro electromagnético	51
4-9	Perdidas en función de la longitud de onda	52
4-10	Mínimos teóricos de pérdidas al infrarrojo	52
4-11	Espectro típico de la fibra óptica GeO ₂ -doped	55
5-1	Curva típica de transmisión de una fibra comercial a) compara con la radiación solar b)	62
5-2	Trayectoria de la luz en una fibra índice de paso	62
5-3	Variación teórica de la apertura vs diferentes índices	63
5-4	Pérdidas relativas en un arreglo close-pack	65
5-5	Asociación Fibra-Espejo.	65
5-6	Fracción de energía colectada vs radio relativo	67
5-7	Concentración promedio vs radio relativo	67
5-8	Concentración promedio vs apertura del espejo	67
5-9	Concentración promedio vs radio de la fibra para dos aperturas de espejo	69
5-10	Variación de β vs radio de la fibra	69
5-11	Pérdidas relativas de concentración con el error angular puntual	70
5-12	Pérdidas de concentración relativas δ en el extremo de la fibra	71
5-13	Pérdidas calculadas de Concentración	
	a) Distribución cuadrática.	
	b) Distribución Gaussiana.	72
5-14	Diagrama esquemático del sistema probado	75
5-15	Flujo transmitido vs área iluminada para dos diferentes longitudes de fibra	76
5-16	Atenuación promedio vs apertura del rayo incidente	77
5-17	Flujo transmitido vs área iluminada para dos diferentes diámetros de fibra	78
5-18	Flujo relativo de salida vs localización	
	a) Para una fibra de 1mm	
	b) Para una fibra de 0.6mm	80
5-19	Eficiencias media vs la apertura del rayo incidente	
	a) Espejo con cubierta de plata	
	b) Espejo con cubierta de aluminio	81
5-20	Medida de la concentración de salida vs la apertura del rayo incidente usando un espejo con cubierta de plata y un fibra de 5.5m de largo	82

TABLAS

3-1	Factores de reflexión de la plata (en tanto por ciento)	33
3-2	Constantes ópticas de algunos materiales para $\lambda=589.3$ nm	37
4-1	Iones metálicos	56
5-1	Concentraciones finales calculadas	74
5-2	Fracción de la energía colectada usando fibra óptica de 0.6 mm de diámetro	79
5-3	Relacionado al espejo	81

OBJETIVO

En el presente trabajo de investigación se desarrolla el estudio de las condiciones de transporte de energía solar por medio de la asociación entre la fibra óptica y el concentrador parabólico en condiciones particulares.

El análisis se basa en un estudio teórico que compara los resultados obtenidos con un prototipo montado para determinar la interacción de la energía solar concentrada transportada en la fibra óptica.

JUSTIFICACIÓN

Los problemas técnicos presentados en unidades concentradoras de punto focal de energía solar, son por lo general las grandes pérdidas por radiación y convección, así como también los dispositivos captadores son situados a la interacción directa con el medio ambiente reduciendo su vida media útil, por lo que se propone la utilización de guías de onda y en específico fibras ópticas para el transporte de energía a unas cuantas decenas de metros para reducir dichos factores sin menos cabo de su eficiencia.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA.

En el siglo XIX, la leña fue sustituida por el carbón, como combustible para accionar las máquinas de vapor. A principios del actual, tomó el relevo el petróleo, y más tarde, en la década de los cincuentas, empezaron a construirse las primeras centrales nucleoeléctricas. Hoy, en los umbrales del tercer milenio, la humanidad vuelve a encontrarse en la encrucijada: las energías alternativas, limpias e inagotables, piden paso.

Los energéticos no renovables (petróleo, gas natural, y en general energéticos de origen fósil) presentan la desventaja de la contaminación que se genera al transformarla en energía terminal. Su calidad de " no renovables " hace que sus reservas se agoten y que, por lo tanto, sus costos se incrementen.

De aquí el interés por el estudio de fuentes de energía no convencionales (solar, eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica, maremotriz, heterodoxas).

Para lograr un mejor aprovechamiento de estas fuentes de energía no convencionales, es importante desarrollar nuevas y mejores tecnologías (algunas veces complejas), de tal forma que el estudio multidisciplinario sea esencial.

En las tres últimas décadas, dada la gran demanda de energía mundial y la dificultad para abastecerla empleando tan solo las fuentes convencionales (no renovables), los investigadores de todo el mundo han buscado afanosamente alternativas seguras, eficaces, económicas y no contaminantes para resolver el problema. La energía proveniente del Sol se presentó como una buena alternativa.

1.2 IMPORTANCIA DE LA ENERGIA SOLAR.

¿Puede la energía solar satisfacer todas las necesidades del hombre? La historia así lo afirma, pues en caso contrario el género humano no hubiera podido sobrevivir hasta hoy. El hombre a dependido directa o indirectamente durante la mayor parte de su existencia de fuentes de energía renovables proporcionadas por el Sol.

La potencia del Sol rebasa los límites de la imaginación. En solo un segundo esta estrella nuestra (pues el Sol es una entre 100 mil millones de estrellas que se calcula existen en la Vía Láctea) irradia una gran cantidad de energía, y en unos cuantos días la energía calorífica y luminosa que se produciría quemando todas las reservas de petróleo y carbón de la Tierra, y toda la madera de los bosques terrestres. Y eso que la Tierra no recibe más que la mitad de una milmillonésima parte de la energía irradiada por el Sol.

El Sol brilla tanto por la energía atómica de fusión; los núcleos de los átomos de hidrógeno chocan y se unen, formando así núcleos de helio, así cuando se consuma la unión, se producen explosiones de energía.

En realidad esta fusión nuclear tiene efecto a un ritmo lento, si se considera desde el punto de vista atómico. El Sol se puede concebir como una bomba de hidrógeno que va estallando muy despacio. Si produce una enorme cantidad de energía es porque sus dimensiones son extraordinariamente grandes, pero comparados kilo por kilo el Sol produce menos energía que el cuerpo humano: cuatro calorías y media por kilo diariamente, mientras que el organismo humano engendra, por término medio, casi veinte.

Hace tiempo el estudio del Sol tropezaba con el serio obstáculo de la oscuridad y la refracción de la atmósfera terrestre, que produce distorsión en los rayos luminosos, y desvanece los rayos X del Sol y gran parte de las radiaciones ultravioleta e infrarroja. Pero desde 1946, gracias a los cohetes, se pueden situar telescopios y espectrógrafos por encima de la atmósfera, y hoy los satélites dirigen sus instrumentos hacia el Sol.

Grandes transmisores de radar lanzan sus haces contra la turgente atmósfera exterior del Sol y exploran su estructura y sus movimientos. Entre tanto, con el espectroscopio óptico analizamos la luz que llega desde 150 millones de kilómetros de distancia, para explicar la constitución del

Sol con la misma exactitud que si dispusiéramos en el laboratorio de una muestra de materia solar.

Haciendo triangulaciones con referencias en otros cuerpos celestes, los astrónomos han determinado con gran exactitud el tamaño del Sol. Su diámetro es de 1.390.000 kilómetros, mientras que el de la Tierra es de 12.800. En el Sol, por tanto, cabrían 1.300.000 planetas como el nuestro.

El espectro nos muestra que el Sol se compone principalmente de hidrógeno. Los átomos de hidrógeno abundan allí en proporción diez veces mayor que la del helio, (segundo elemento del Sol por su abundancia) y mil veces más abundante que el carbono, el nitrógeno y el oxígeno, tan comunes en la Tierra. Si exceptuamos la superabundancia de hidrógeno y de helio, la composición química de la atmósfera solar es muy semejante a la de la corteza terrestre.

Aunque la densidad del Sol en el centro debe ser unas 11.4 veces más grande que la del plomo, el astro no deja de ser gaseoso en todas sus partes. Esto es, los átomos gozan de libertad de movimiento, a diferencia de lo que sucede con los de un cuerpo sólido, que se ordenan según cierta regla uniforme. Las manchas solares nos indican que el Sol gira de este a oeste, y de una forma muy peculiar: partes diferentes giran a velocidades diversas; una mancha próxima al ecuador, por ejemplo, completa un giro en 25 días; la zona polar puede tardar 34 días. La mayoría de las mutaciones observadas sobre la superficie del Sol han de relacionarse, de uno u otro modo, con esta especie de contorsión en su giro. Los astrónomos que examinan el Sol con un telescopio solar ven el borde del astro claramente delineado, como si fuera una superficie bien definida.

Esa superficie es en realidad una capa trasparente, aunque sumamente luminosa, constituida por gas y de un espesor aproximado de 300 kilómetros, llamada fotosfera. De ella proviene la mayor parte de la luz que recibimos. Fuera de la fotosfera hay otras dos zonas: la conocida por el nombre de cromosfera, en la que se producen enormes llamaradas, y una atmósfera exterior, casi ilimitada, que se llama corona. Del interior del Sol sabemos únicamente lo que se deduce de la observación de estas tres capas exteriores.

Hay bastantes razones para pensar que en el centro del Sol, a unos 700.000 kilómetros de profundidad, la presión alcanza cien mil millones de

atmósferas. Sabemos que, para producir tal presión, el gas debe calentarse a unos dieciséis millones de grados centígrados.

En este homo nuclear es invisible la mayor parte del gas, densísimo y fantásticamente caliente, puesto que casi toda su radiación está constituida por rayos X producidos por las reacciones nucleares y por la colisión de núcleos y electrones en veloz movimiento. La trayectoria del rayo X que escapa de su núcleo se asemeja a un curso zigzagueante.

Aun cuando los rayos se desplazan a la velocidad de la luz, o sea a casi 300.000 kilómetros por segundo, necesitan 15.000 años aproximadamente para recorrer el tortuoso camino que siguen hasta la superficie del Sol. Los rayos X se trasforman gradualmente durante ese lapso. En cada desviación que sufren se reduce ligeramente la frecuencia de sus vibraciones y aumenta su longitud de onda. Con el tiempo, los rayos X se convierten en radiación ultravioleta y en luz visible.

Casi todo lo que sabemos de la atmósfera exterior del Sol se ha podido averiguar estudiando los eclipses solares. En el del año 1842 los astrónomos advirtieron que la atmósfera exterior del Sol era muy tenue. A medida que la Luna oscurecía el disco brillante, se ponía de manifiesto la existencia de una corona de color blanco perlino con finos trazos de corrientes y de arcos. Cerca del negro borde de la Luna se notaba un anillo que circundaba al Sol y al que, por su color rojizo, se dio el nombre de "cromosfera".

El espectro de la cromosfera y el de la corona presentan una interesante paradoja. La temperatura del núcleo, que es de 40.000.000 de grados centígrados, disminuye regularmente hasta llegar a unos 5700 grados en la superficie del Sol. Pero en la atmósfera solar la temperatura comienza a subir de nuevo y llega a varios millones de grados.

Las fotografías del borde solar indican la existencia de miles de lenguas de gas, llamadas espículas, que brotan como manantiales por encima de la superficie del Sol y vuelven a caer al cabo de 5 a 10 minutos, después de elevarse, a veces, hasta 9500 kilómetros de altura. En cualquier momento dado pueden estar brotando 100.000 espículas. Hay también otros surtidores enormes de gas incandescente llamados protuberancias, que ascienden hasta una altura de 150.000 kilómetros, y caen después a la

fotosfera, a distancias que llegan a los 800.000 kilómetros del lugar de origen.

Pero estas violentas acciones de un Sol "tranquilo" resultan apacibles comparadas con los fenómenos de erupción solar que se pueden presentar en el término de una hora con la fuerza de mil millones de bombas de hidrógeno; así la propagación de energía de las erupciones de esta índole llega a causar interrupciones en las comunicaciones terrestres.

No obstante, el Sol es una estrella mediocre; es como un enano amarillo situado a mitad de la escala, entre la mayor y la más pequeña, y entre las estrellas azules, más incandescentes, y las rojas, más frías. Para el observador terrestre es más brillante que cualquier otra Estrella, aunque Rigel, por ejemplo, es 15.000 veces más luminosa, y en Antares, supergigante de color rojo, cabrían 36 millones de Soles.

Con el tiempo se agotará el hidrógeno del núcleo del Sol. Algunos cálculos teóricos indican que la proporción de este gas ha disminuido desde dos tercios a un tercio en los últimos cinco mil millones de años. Una vez agotado el núcleo las reacciones termonucleares se irán propagando hacia afuera, donde haya todavía hidrógeno. Conforme se aproxime a la superficie la zona de reacción del Sol, el tremendo calor nuclear de su núcleo se desplazará también hacia afuera, forzando al Sol a expandirse. El astro se convertirá entonces en una estrella gigante y roja, como Antares, que hará explosión trocándose en una monstruosa bola de gas incandescente y enrarecido, de tal dimensión que abarcará a los cuatro planetas más próximos: Mercurio, Venus, Tierra y Marte.

¿Cuándo llegará el Sol a esa etapa? No nos preocupemos por ello pues quizá hayan de transcurrir otros cinco mil millones de años. Finalmente, cuando todo su hidrógeno se haya convertido en helio, el Sol se enfriará y se contraerá, y por último quedará convertido en un enano blanco no más grande que lo que es hoy la Tierra, aunque con un peso de varios miles de kilogramos por centímetro cúbico.

La intensidad de radiación solar que llega a la atmósfera exterior es del orden 28 000 veces mayor que todas las formas comerciales de energía consumidas por el hombre. Aproximadamente el 35 por ciento de los 1500 cuatrillones de megawatts hora del calor solar que llega a nuestra atmósfera se refleja; el 18 por ciento se absorbe por la misma, generando

vientos y cambios atmosférico, y el 47 por ciento restante penetra hasta la superficie de la Tierra.

Existe, evidentemente una abundancia de energía solar, pero está tan repartida que su aprovechamiento constituye un proceso caro y difícil.

Sus ventajas son evidentes: La energía solar es limpia, abundante e inagotable.

La energía solar que recibe la superficie de la Tierra puede convertirse en energía útil (térmica, mecánica o eléctrica) mediante muy diversas tecnologías. Para fines de aplicación práctica se pueden distinguir básicamente dos tecnologías, según el proceso de conversión de la energía solar en energía útil:

- **Sistemas fototérmicos:** esta tecnología tiene como propósito capturar la radiación solar y convertirla primero en calor útil; el que posteriormente puede ser transformado en energía mecánica o eléctrica. Puede constituir la fuente de calor en un proceso de refrigeración por absorción, y para la obtención de energía mecánica a través de un ciclo termodinámico utilizando un fluido adecuado.
- **Sistemas Fotovoltaicos:** convierten directamente la radiación solar captada en electricidad, mediante dispositivos de estado sólido, conocido como celdas fotovoltaicas . La electricidad producida puede dirigirse hacia una carga ya sea un motor, sistema de iluminación o una unidad de almacenamiento (batería).

REFERENCIAS (I)

- 1 J. A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar Energy Thermal Processes*, Wiley, New York (1974).
- 2 J. A. Manrique, *Energía Solar, Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas*. Harla, México (1984).

CAPÍTULO II

RADIACIÓN SOLAR

2.1 RADIACIÓN

En contraste con los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección, en donde el transporte de energía térmica requiere de un medio material para ser llevado a cabo, el calor puede propagarse por radiación sin necesidad de un medio físico, e inclusive en el vacío. La radiación viaja en el vacío a la velocidad de la luz.

La radiación se define como una emisión o transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas [1]. Puede considerarse como un tren de ondas electromagnéticas que se propagan en línea recta, con una velocidad en el vacío cercana a los 300 000 km/s. Cuando la radiación atraviesa algún medio material, la velocidad de propagación se reduce según el índice de refracción del medio.

La velocidad de propagación de cualquier tipo de onda es igual al producto de su longitud (λ) por su frecuencia (f):

$$C = \lambda f \quad \dots(2.1)$$

La frecuencia no cambia con la naturaleza del medio a través del cual se propaga la radiación, pero cualquier cambio de velocidad va acompañado de un cambio de longitud de onda, por lo tanto, la relación c/λ se mantiene constante.

Todos los estudios de los espectros de radiación se hacen en función de la longitud de onda, ya que ésta se mide con gran precisión.

El rasgo característico de la radiación térmica es que tiene una longitud de onda entre 0.1 y 100 μm . En la Figura 2.1 se muestra la distribución de longitud de onda del espectro de radiación completa.

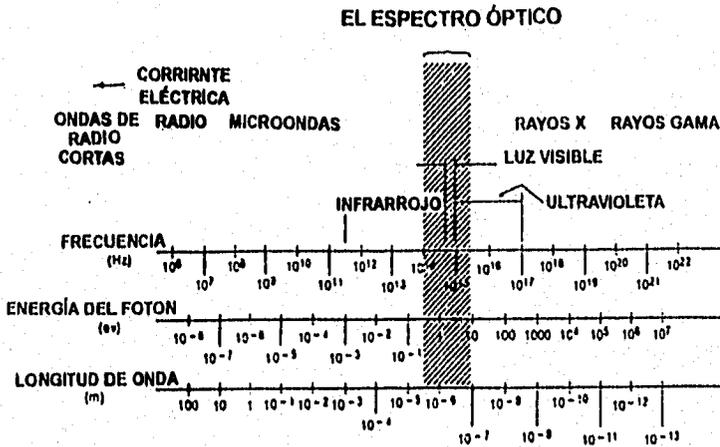


Fig. 2-1 Distribución en longitud de onda del espectro de radiación electromagnética.

Según la teoría corpuscular de la radiación, la energía se emite en forma de cuantos discretos de energía o fotones. La magnitud de cada cuanto es $h f$, donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia.

2.1.1 Propiedades de Radiación Básica.

Considere energía radiante, G , impactando sobre una superficie, se ilustra en Figura 2.2

Se define α , la absorptividad, como la fracción de radiación incidente que absorbe el material; ρ , la reflectividad, como la fracción de la radiación incidente que refleja el material; τ , la transmitividad, como la fracción de radiación incidente que se transmite a través del material.

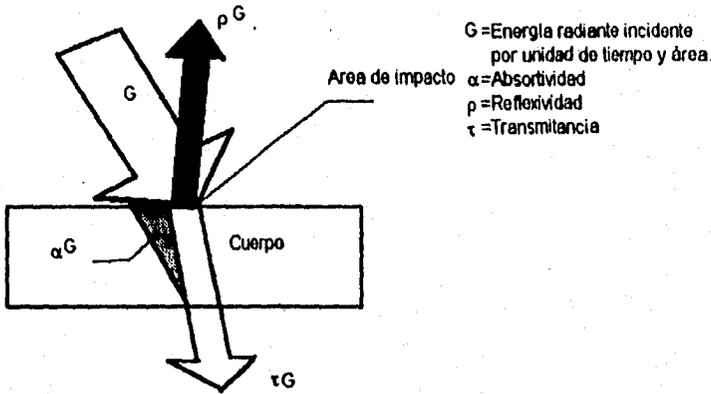


Fig. 2.2 Energía radiante que choca sobre una superficie.

La radiación reflejada puede ser difusa, especular, o una combinación de las dos. Si es difusa estará distribuida uniformemente sobre un hemisferio sobre el área de incidencia o choque. Si dicha radiación reflejada es especular, el ángulo que forma el haz reflejado con la normal a la superficie será igual al ángulo que forma el haz incidente con la normal. Un espejo de casa común y corriente refleja el haz de luz incidente en una forma muy aproximada a la especular, mientras que una superficie metálica áspera lo reflejará en una forma difusa. Un reflector difuso perfecto aparecerá igualmente brillante independientemente de la dirección en que se vea. En realidad la mayor parte de las superficies exhiben una mezcla de reflexión especular y difusa. Auxiliándose de un balance de energía (Figura 2.2), se deduce una relación entre las propiedades de la radiación básica:

Energía que entra = Energía que sale + Energía que se absorbe

$$G = (\rho G + \tau G) + \alpha G$$

o bien

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Para materiales opacos, $\tau=0$, y $\alpha+\rho=1$; mientras que para la mayoría de los gases (diferentes del vapor, dióxido de sulfuro, amoníaco, e hidrocarburos), $\alpha=0$, $\rho=0$ y $\tau=1$. Para un cuerpo negro, $\tau=0$, $\rho=0$, y $\alpha=1$.

En general, la absorptividad, la reflectividad, y la transmitividad de un cuerpo dependen de las temperaturas de la fuente de radiación y de la naturaleza de la superficie

2.1.2. Cuerpo Negro.

Todo cuerpo que se encuentra a una temperatura diferente del cero absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) emite radiación en forma de ondas electromagnéticas y pierde por este solo hecho energía. Cualquier proceso ondulatorio electromagnético está relacionado con la localización y transporte de energía en el espacio, es decir, el campo electromagnético se caracteriza por poseer cierta cantidad de energía por unidad de volumen (densidad de energía) y por transportarla de un punto a otro [2].

Se sabe que un cuerpo será tanto mejor emisor de radiaciones cuanto más absorba previamente; en general, entre más oscuro es un cuerpo, mayor es su poder de absorción. Los cuerpos conocidos como negros absorben totalmente todas las radiaciones.

Si se considera un cuerpo que absorba toda la energía radiante que recibe, en cualquier longitud de onda, este cuerpo será el mejor emisor posible. Si un cuerpo tuviera estas características se le llamará cuerpo negro. En la naturaleza no existe ningún cuerpo absolutamente negro, el que más se aproxima es el negro de humo, que absorbe aproximadamente el 99 por ciento de la energía radiante que recibe.

Un cuerpo negro es el que emite y absorbe a cualquier temperatura y en cualquier longitud de onda la máxima cantidad posible de radiación. El cuerpo negro es una referencia estándar con el que pueden compararse las características de radiación de otros cuerpos. Puesto que un cuerpo negro es un absorbedor perfecto por definición, toda la radiación que incida sobre éste es absorbida sin importar la longitud de onda. En consecuencia, ninguna fracción de esta radiación es reflejada o transmitida a través del cuerpo negro.

Es precisamente esta ausencia de reflexión la que da origen a su denominación de " cuerpo negro ", pues aún cuando es un estándar teórico, el ojo humano lo percibirá como tal. Sin embargo, debe destacarse que el ojo humano no es de ninguna manera un indicador confiable en cuanto a la capacidad de absorción de radiación que tiene un medio; por

ejemplo, la pintura blanca es un buen reflector a la radiación en la escala visible, pero también un buen absorbedor de radiación en el infrarrojo, y el ojo humano, dadas sus limitaciones, es incapaz de identificar este fenómeno.

Puede demostrarse a partir de la segunda ley de la Termodinámica que existe un máximo de energía radiante capaz de ser emitida a una temperatura y a una longitud de onda dadas. Así, la potencia emisiva espectral o monocromática que emite un cuerpo negro puede evaluarse mediante la ley de Planck. Para el vacío, en el que el índice de refracción es igual a 1, la ley de Planck toma la forma:

$$e_{b\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad \dots(2.2)$$

donde:

$e_{b\lambda}(T)$: potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro a una temperatura y una longitud de ondas dadas, [W/m²-μm]

λ : longitud de onda, [μm]

T : temperatura absoluta del cuerpo negro [K]

C_1 : 3.7405 x 10⁻¹⁶ [W/m²]

C_2 : 0.0143879 [Km]

La Figura 2.3 muestra la variación de la potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro a distintas temperaturas.

La potencia emisiva total de un cuerpo negro a lo largo de todo el espectro de longitudes de onda puede calcularse integrando la ley de Planck:

$$e_b(T) = \int_0^{\infty} e_{b\lambda}(T) d\lambda = \sigma T^4 \quad \dots(2.3)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzman y es numéricamente igual a 5.6697 x10⁻⁸ W/m² K. La ecuación 2.3 se conoce como la ley de Stefan-Boltzman. La potencia emisiva total mostrada en un cuerpo negro representa el área bajo la curva mostrada en la Figura 2.2

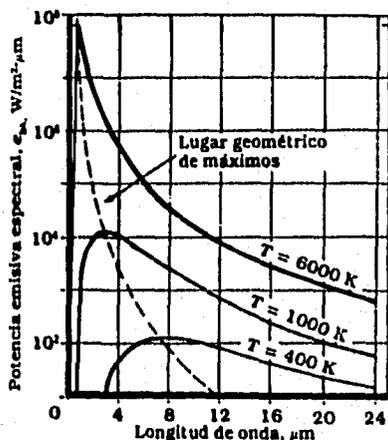


Fig. 2-3 Potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro a distintas temperaturas.

2.2 RADIACIÓN SOLAR.

CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE Y GEOMETRÍA TIERRA-SOL

El Sol es una estrella de segunda o tercera generación; es una estrella más entre millones de la galaxia conocida como vía láctea, puede considerarse por su temperatura, brillo y dimensiones, una estrella media. Para nuestro planeta, sin embargo separada de él un promedio de 150 millones de Km, es la fuente fundamental de energía. Su diámetro es de 1.39×10^7 Km. El Sol es un reactor nuclear que por fusión convierte hidrógeno en helio. En su núcleo la temperatura alcanza 4×10^7 K. La temperatura en su superficie es muy inferior, estando en torno a los 6000 K. Se puede decir que la energía que nos llega del Sol equivale a la emitida por un cuerpo negro que estuviese a una temperatura de 5762 K. La radiación emitida por el Sol no tiene la misma intensidad a cualquier longitud de onda, sino que tiene una distribución espectral como la indicada en la Figura 2.4. En esta Figura, además, se muestra la distribución espectral de un cuerpo negro a 5762 K y la distribución espectral de la radiación Solar que llega a nivel del mar.

La zona espectral con longitudes de onda menores que $0.40 \mu\text{m}$ corresponde a la radiación ultravioleta, aquella entre 0.40 y $2.5 \mu\text{m}$ es la

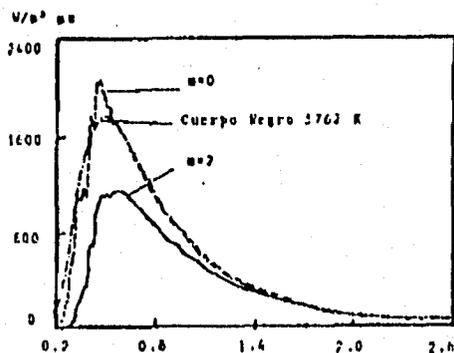


Fig. 2-4 Distribución espectral de la radiación solar.

radiación visible, y con longitudes entre los 2.5 y 20 μm es la radiación infrarroja. El máximo de intensidad de la radiación ocurre a aproximadamente 0.50 μm , lo que corresponde al color verde; por lo cual no es coincidencia que el reino vegetal tiene este color como predominante; también nuestros ojos se especializaron como detectores de una franja estrecha de la radiación Solar, lo cual es óptimo para un detector de calidad que aprovecha la radiación más importante desde el punto de vista energético [3].

Es posible calcular la cantidad de energía que está asociada a cada una de las bandas espectrales, resultando así que un 7 por ciento corresponde a UV, 47 por ciento al visible y 46 por ciento al infrarrojo.

La radiación que sale del Sol no es idéntica a la que llega a la superficie de la Tierra puesto que debe atravesar la atmósfera. En esta se difunde por las moléculas que constituyen el aire, por el polvo y el vapor de agua. Se absorbe, en forma selectiva, por el ozono (UV corto), vapor de agua (IR largo) y el O_2 y CO_2 , cuyas concentraciones varían con el tiempo.

La cantidad de radiación absorbida o difundida depende de la trayectoria óptica de la radiación a través de la atmósfera. Cuando el Sol está en su punto de máxima altura (mediodía Solar) llega mucho más radiación, y con distinta calidad espectral, que cuando está cerca del horizonte.

En la Figura 2.4 vemos también la distribución espectral que resulta de un recorrido a través de la atmósfera con un recorrido óptico equivalente a una masa atmosférica de dos, y para una atmósfera muy transparente: más de 23 km de visibilidad horizontal, 20 mm de columna de agua precipitable, 3.4 mm de ozono.

La intensidad (integrada para toda longitud de onda) de la radiación fuera de la atmósfera terrestre se ha ido determinando con exactitud cada vez mayor. Se le conoce como constante Solar y se define como la cantidad de energía por unidad de tiempo que recibe del Sol una superficie de área unitaria perpendicular a la radiación, en el espacio, y a la distancia media del Sol a la Tierra. Hoy se acepta el valor de 1367.0 W/m^2 como valor medio estándar.

La Tierra tiene un movimiento de rotación en torno a su eje polar. Esta rotación origina el día y la noche. Este eje está inclinado en un ángulo de 23.5° con respecto al plano de la órbita de la Tierra en torno al Sol (la eclíptica). El eje terrestre apunta en una dirección fija con respecto a la eclíptica, originando así las estaciones del año.

Explícitamente como se observa en la Figura 2.5 la inclinación del plano ecuatorial terrestre con respecto al plano de la eclíptica (plano de la órbita) es la causa de que, para diferentes épocas del año, el Sol alumbró perpendicularmente sobre diferentes paralelos. Así, durante el verano (del hemisferio Norte) el Sol alumbró perpendicularmente, alrededor del 21 de junio, lo hace sobre el paralelo de los 23.5° N , conocido como trópico de Cáncer, mientras que 21 de diciembre lo hace sobre el trópico de Capricornio 23.5° S . Entre las dos posiciones extremas el Sol alumbró perpendicularmente sobre el ecuador en dos ocasiones: el 21 de marzo (equinoccio de primavera) y el 21 de septiembre (equinoccio de otoño).

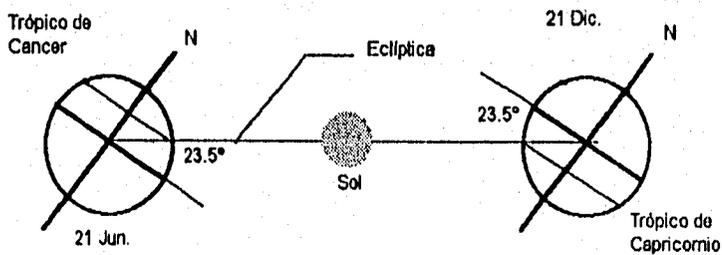


Fig. 2-5 Distribución de radiación solar sobre la superficie terrestre.

Existe una diferencia convencional entre el tiempo marcado por nuestros relojes (hora legal) y el tiempo Solar (u hora Solar). En general, cuando hablemos de hora o tiempo nos referiremos al tiempo Solar. Por convención el tiempo Solar tiene valor cero al mediodía Solar, es decir cuando el Sol corta el meridiano del lugar.

2.3 INTERACCIÓN CON LA ATMOSFERA. RADIACION GLOBAL, DIRECTA Y DIFUSA.

La radiación Solar, en su trayectoria hacia la superficie terrestre, es parcialmente absorbida, reflejada y difundida por los distintos constituyentes de la atmósfera. Aún al mediodía de un día claro con cielo limpio (en circunstancias que es el momento en que el recorrido de la radiación es el más corto a través de la atmósfera), la atenuación de la radiación directa está entre el 30 y 35 por ciento.

Para los efectos prácticos que nos interesan, estos fenómenos de absorción, reflexión y difusión, dando origen a una descomposición de la radiación en la superficie terrestre en dos componentes: la directa y la difusa. La primera es la que proviene directamente del disco Solar (es aquella capaz de proyectar sombras); y la segunda es la que llega difundida de todas direcciones de la bóveda celeste. La suma de estas dos componentes se llama radiación global, o hemisférica.

2.4 ÁNGULOS SOLARES.

Cada día, el Sol, para un observador situado en la tierra, sigue una trayectoria circular a través del firmamento, alcanzando su punto más alto al mediodía. Por otra parte, esta trayectoria circular aparente se mueve hacia puntos más altos en el firmamento a medida que el invierno transcurre y llega el verano como se observa en el esquema de la Figura 2.6. En el diagrama también se observa que el amanecer acontece más temprano, y el atardecer, más tarde, durante el verano.

Obviamente la posición del Sol en la bóveda celeste depende del lugar en que se encuentra el observador. Así al mediodía de marzo 21 y septiembre 21 -los equinoccios de primavera y otoño- el Sol se encuentra directamente sobre el ecuador.

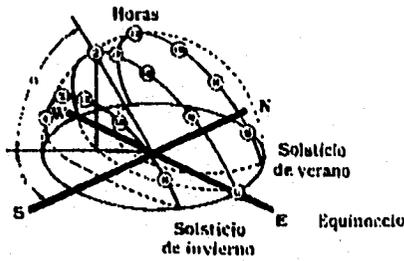


Fig 2.6 Movimiento aparente del Sol.

Dado que los movimientos de la Tierra y el Sol son relativos entre sí, en el análisis que sigue se supondrá que la Tierra está fija en el espacio, que el Sol describe un movimiento virtual alrededor de ésta, y que el origen del sistema de coordenadas se localiza en el lugar de interés situado en la Tierra. Desde este punto de vista tolemaico, el Sol está restringido a moverse con dos grados de libertad en la esfera celeste. En consecuencia, su posición en el firmamento queda descrita mediante dos variables angulares: la altura Solar α y el azimut Solar γ . Como se desprende de la Figura 2.7, la primera de estas variables define el ángulo que la visual al Sol forma con el horizonte, en tanto que la segunda define la desviación que tienen los rayos del Sol con respecto al Sur verdadero (en este caso se considera que el azimut se mide con respecto al Sur, no con relación al Norte como es usual). El cálculo preciso de estas variables depende fundamentalmente de los tres parámetros: la latitud del lugar ϕ la declinación δ y el ángulo horario ω . La latitud queda definida mediante el ángulo que determina el lugar de interés sobre la Tierra, con respecto al plano del ecuador. Este ángulo es positivo cuando se mide hacia el Norte del ecuador, y negativo cuando lo es hacia el Sur de éste [4].

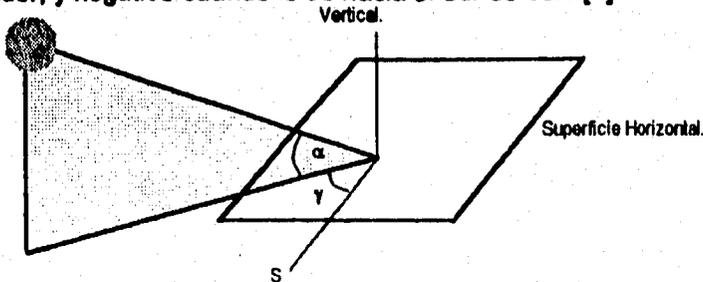


Fig. 2.7 Ángulos de posición del Sol

La declinación define la posición angular del Sol al mediodía Solar, es decir, en el momento en que el Sol está más alto en el firmamento con respecto al plano del ecuador. En otras palabras, la declinación es un índice del alejamiento que experimenta el Sol hacia el Norte o hacia el Sur del ecuador. Este parámetro, que depende del día del año, puede calcularse con la expresión

$$\delta = 23.45 \text{sen}\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad \dots(2.4)$$

donde n es el día del año. La Figura 2.8 muestra el cambio de la declinación a través de los distintos meses del año.

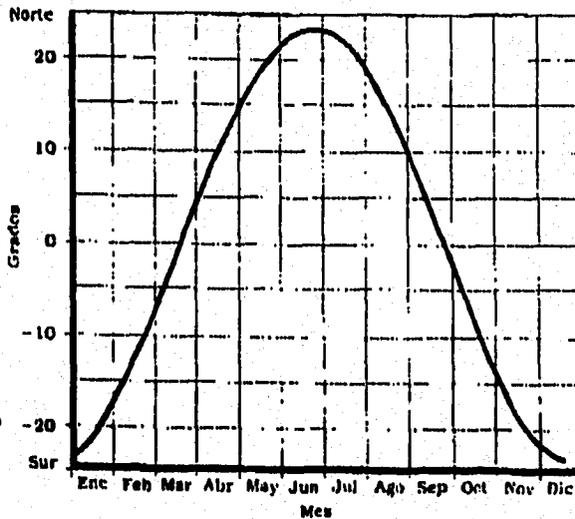


Fig. 2.8 Variación de la declinación solar a través del año.

Por otra parte, el ángulo horario es igual a cero al mediodía Solar y adquiere un valor de 15 de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo por las tardes. Así, $\omega = +30$ a las 10:00, y $\omega = -15$ a las 13:00.

Una vez determinados la latitud, la declinación y el ángulo horario, la altura y el azimut solares pueden calcularse fácilmente por medio de las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\text{sen } \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \phi \text{ sen } \delta \dots(2.5)$$

$$\text{sen } \gamma = \cos \delta \text{ sen } \omega / \cos \alpha \dots(2.6)$$

Las Figuras 2.9 y 2.10 presentan las gráficas para latitudes Norte de 24°, 28°, 32° y 36°. El horizonte aparece en estas Figuras como un círculo con el observador en el centro. Los círculos concéntricos igualmente espaciados representan la altitud Solar alfa a intervalos de 10°, mientras que las líneas radiales representan el azimut γ en los mismos intervalos. Las curvas elípticas horizontales representan la trayectoria del Sol el día 21 de cada mes, estando representado este por un numero romano. Las curvas verticales, por otra parte, indican las horas del día (tiempo Solar) con números arábigos.

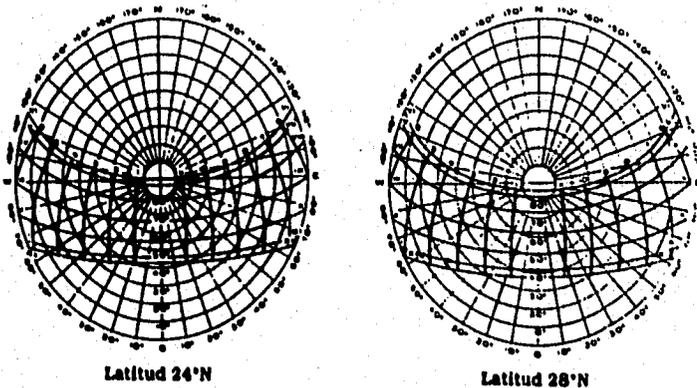
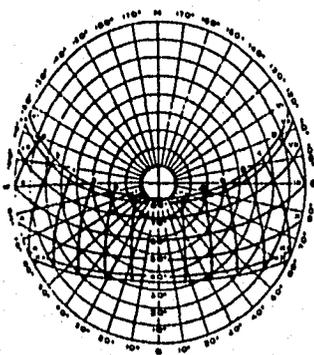
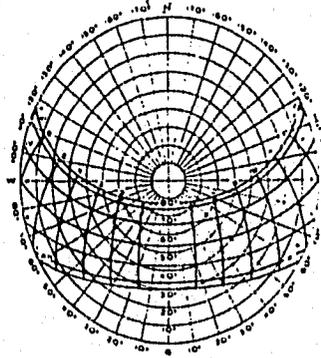


Fig 2.9 Posición del Sol en el caso de latitudes de 24° N y 28° N.



Latitud 32°N



Latitud 36°N

Fig 2.10 Posición del Sol en el caso de latitudes de 32° N y 36° N.

2.5 FACTORES QUE AFECTAN LA INTENSIDAD DE LA RADIACIÓN SOLAR.

La intensidad de la radiación Solar que se recibe en la superficie terrestre está en relación a una serie de factores que se pueden clarificar de la siguiente forma:

i) Astronómicos

- Variación de la distancia entre la Tierra y el Sol
- Declinación Solar.
- Espectro Solar entre 0.3 y 4.0 μm
- Magnitud de la constante Solar.
- Variación con el ángulo horario.

ii) Geográficos

- Latitud.
- Longitud.
- Altura sobre el nivel del mar
- Geografía de la localidad (costa, montaña, desierto, etc.).

iii) Geométricos

- Altura Solar.
- Azimut del Sol.
- Orientación del plano receptor
- Inclinación del plano receptor

iv) Atmosféricos

- Masa óptica relativa.
- Contenido de agua en la atmósfera.
- Contenido de ozono en la atmósfera
- Turbiedad de la atmósfera.
- Nubosidad del cielo.
- Reflexiones múltiples entre la atmósfera y el suelo

2.6 ALGUNOS FACTORES ASTRONÓMICOS.

a) Distancia Tierra-Sol,

Debido a la trayectoria elíptica de la Tierra alrededor del Sol, la intensidad de la radiación Solar que llega a la superficie terrestre tiene una variación anual que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al Sol.

b) Declinación Solar.

La trayectoria imaginaria del Sol alrededor de la Tierra constituye la llamada eclíptica y el ángulo entre el plano de la eclíptica y el plano ecuatorial constituye la declinación Solar (δ). Este ángulo tiene un valor de cero en los equinoccios de primavera y otoño, y unos valores aproximados de $+23.45^\circ$ en solsticio de verano y de -23.5° en el solsticio de invierno. Aunque de hecho este ángulo varía instantáneamente (en 24 horas 0.5° de variación máxima), es una práctica común considerarlo constante en el transcurso del día.

c) Constante Solar.

A la cantidad de radiación Solar total recibida en una superficie fuera de la atmósfera terrestre y perpendicular a la dirección de propagación de la radiación por unidad de tiempo y a la distancia media entre la Tierra y el Sol se le conoce como constante Solar.

El conocimiento del valor de la constante Solar es de fundamental importancia para la determinación de los fenómenos de atenuación de la radiación Solar en la atmósfera. Dado un valor de la constante Solar, es posible encontrar intensidades de la radiación Solar a nivel de la superficie terrestre.

Aunque por el momento no se puede hablar de un valor absolutamente confiable para la constante Solar, ya que las mediciones y el estudio de su variabilidad continuará por muchos años, es posible adoptar un valor aproximado. El último que se ha recomendado y que está basado en la nueva escala radiométrica mundial es [5]:

$$I_{CS} = 1367.0 \text{ W/m}^2$$

REFERENCIAS (II)

1. F. Kreith, *Principles of Heat Transfer*, Intex Educational Publishers, New York.(1993).
2. R. Loudon, *The Quantum Theory of Light*, Clarendon Press, Oxford, Great Britain, (1986).
3. G. Granquist, *Materials Science for Solar Energy Conversion System*, Pergamon Press, U.S.A (1991).
4. Biggs and C. N. Vittitoe, *The Helios Model for Optical Behavior of Reflecting Solar Concentrators*, SAND 76-0347, Sandia Labs., Albuquerque, New Mexico.(1976).
5. Kreith and J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, Mc. Graw Hill, New York, (1978).

CAPÍTULO III

CONCENTRADORES

INTRODUCCIÓN

Los concentradores solares usados son generalmente platos parabólicos de punto focal. Una superficie reflectiva - vidrio metalizado o plástico - hace incidir la luz solar en una pequeña región solar llamada foco. Son concentradores de energía solar en dos dimensiones, y estos colectores siguen al sol a lo largo de dos ejes.

El tamaño del colector solar (por ejemplo, concentrador) para el sistema es determinado por el poder de salida deseado a niveles máximos de insolación (nominalmente, $1,000 \text{ W/m}^2$) y la eficiencia de conversión de energía.

Los concentradores usan superficie reflectivas de aluminio o plata depositada en el anverso o reverso del vidrio o plástico. Los espejos de vidrio delgado con el reverso recubierto en plata eran usados en el pasado, los diseños actuales usan películas delgadas de polímero con aluminio o plata depositado en el anverso o reverso de la superficie [1].

La forma ideal de una superficie reflectora para un concentrador solar es un paraboloide. Esta forma es ideal por que concentra la radiación solar que viene directamente del sol en una región pequeña que es el punto focal.

Superficies con formas esféricas también concentran la energía solar con una cierta aberración llamada aberración esférica; teniendo formas esféricas que se asemejan a la forma de paraboloide cuando el diámetro de la región de concentración es mucho mayor que el diámetro de la superficie reflectiva (por ejemplo, cuando el espejo tiene una ligera curva).

Algunos sistemas utilizan un soporte de múltiples paneles con espejos de forma esférica armados en una estructura que lo soporta (Figura 3-1), cada una de las partes individualmente asemejan al paraboloide. Esta aproximación para el diseño del concentrador hace que el foco tenga una buena precisión tanto como es posible.

Una reciente innovación en el diseño de colectores solares es el uso de membranas tensadas; aquí una delgada membrana reflectiva es tensada a lo largo de un borde o argolla, con una segunda membrana cubriendo el espacio por detrás, un vacío generado en este espacio, lleva a la membrana reflectiva aproximarse a una forma esférica. Muchos de estos paneles son usados (Figura 3-2), su región focal será el número de diámetro de paneles y la forma esférica de los paneles proveen una adecuada concentración solar para el sistema.

Si solo una o varias membranas tensadas son usadas (Figura 3-3), la forma de la superficie deberá aproximarse a un paraboloide, esta aproximación puede ser alcanzada inicialmente formando una membrana dentro o cerca del paraboloide y usando diferencia de presiones entre la parte frontal y posterior para soportar la superficie y mantener esta forma.

Además de tener una adecuada forma, materiales reflectivos y un foco efectivo del concentrador es necesario un máximo seguimiento de la luz solar disponible, el concentrador debe captar la luz solar moviéndose sobre dos ejes. Existen dos maneras de implementar esto:

- La primera es la elevación-acimut con el cual el plato rota en un plano paralelo a la tierra (acimut) y en otro plano perpendicular a éste (elevación), esto dará al colector una rotación arriba/abajo y derecha/izquierda es decir dos grados de libertad, la velocidad de rotación de estos ejes varía durante el día pero esta es predecible. En la Fig.3-1 el concentrador de paneles usa un mecanismo elevación-acimut.
- En el método de vía polar, el colector rota a un eje paralelo al eje de rotación de la tierra. El colector rota a una velocidad constante de 15 grados por hora, la misma velocidad de rotación de la tierra. El otro eje de rotación el eje de declive, es perpendicular al eje polar, el movimiento de este eje ocurre con variaciones pequeñas de ± 23.5 grados por año (una máxima velocidad de 0.016 grados por hora), Figura 3-3.

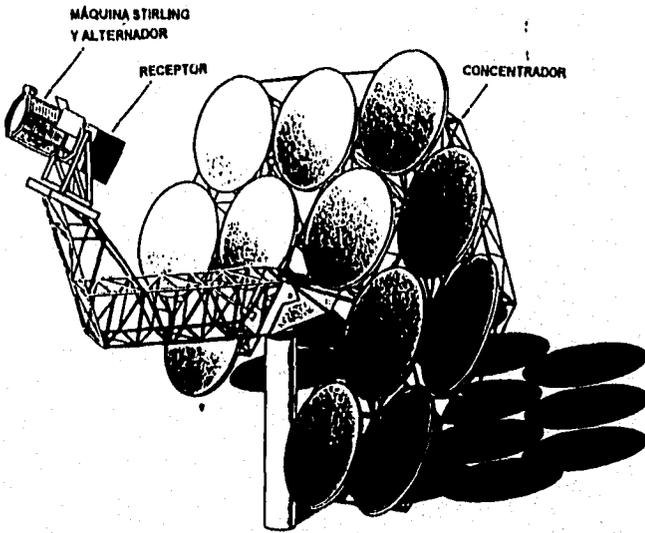


Fig 3-1 Concentrador de multiples paneles.

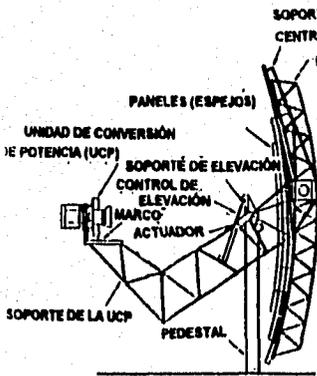


fig 3-2 Sistema elevación-azimut

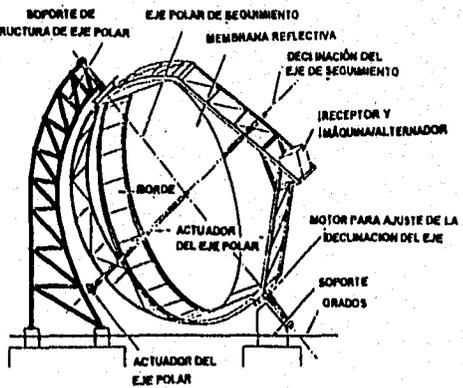


fig 3-3 Sistema via polar

3.1 CAPTACION DE ENERGIA SOLAR

El concentrador solar parabólico de un sistema intercepta radiación del sol sobre una área grande y la concentra en una área pequeña; el aumento de la radiación solar depende directamente del aumento disponible determinado por la radiación solar o insolación ($I_{b,n}$) y el ángulo de incidencia (θ); de lo efectivo del tamaño del concentrador determinado por el área de apertura del concentrador (A_{app}), la fracción del área de apertura del concentrador no sombrada (E), y la reflectancia de la superficie concentradora (ρ).

3.1.1 Aprovechamiento de la Concentración.

Los sistemas de plato parabólico colectan la energía solar en una gran área y la reflejan en una pequeña área del receptor para ser absorbida y convertida en calor. El aprovechamiento de la concentración es evidente que el área de apertura del concentrador (A_{app}) deberá ser grande y el área de apertura de recepción A_{rec} tan pequeña como sea posible. El aumento de la concentración puede ser descrito en términos del radio geométrico de concentración y el radio óptico de concentración, los cuales se definen a continuación.

3.1.2. Radio Geométrico de Concentración.

La dimensión para la cual el área de apertura de concentración se reduce relativo al del concentrador, es llamado radio geométrico de concentración, el cual puede expresarse como:

$$CR_g = A_{app}/A_{rec} \quad \dots(3.1)$$

3.1.3 Radio Óptico de Concentración.

El radio geométrico de concentración arriba definido es una medida del promedio ideal de concentración de flujo solar si éste se distribuye uniformemente sobre el área de apertura del receptor. Concentradores reales no producen este flujo uniforme; ellos en cambio producen una serie compleja de niveles altos y bajos de flujo distribuido alrededor del área de apertura del receptor. Generalmente al centro, se obtienen perfiles de picos de flujo concentrado que decrecen hacia los bordes de la apertura del receptor.

La concentración del flujo a un punto es definido en términos de radio óptico de concentración, CR.

$$CR = III_{b,n} \quad \dots(3.2)$$

3.2 CONCENTRADOR DE PLATO PARABÓLICO

La función del concentrador es interceptar la luz solar con una gran apertura y reflejarla a una pequeña área [2].

Los parámetro asociados con el diseño del concentrador son:

- Area de apertura del concentrador A_{app}
- Area de apertura del receptor A_{rec}
- Fracción del área de apertura del concentrador no sombreada.
- Angulo de incidencia θ_i (cero para platos parabólicos)
- Reflectancia de la superficie ρ
- Fracción de captura ϕ , (este es el parámetro entre el diseño del concentrador y el diseño del receptor).

3.2.1 Concentrador Parabólico

El paraboloides se dice superficie de revolución, ya que es generado por la rotación de una parábola sobre su eje como se muestra en la Figura 3-4 dando por resultado que la forma de la superficie hace que todos los rayos de luz paralelos al eje de reflexión pasen a través de un solo punto llamado punto focal. El plato paraboloides es una porción truncada del paraboloides y es descrito en un sistema de coordenadas x , y y z por:

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad \dots(3.3)$$

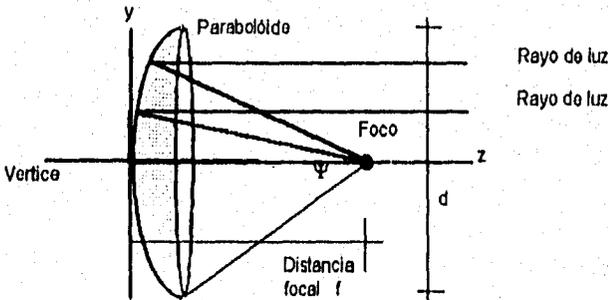


Fig 3-4 El Paraboloides es generada por la rotación de una parábola sobre el eje Z.

Donde las coordenadas x y y describen el plano de apertura, z es la distancia del vértice paralelo al eje de simetría del paraboloide y f es la distancia focal.

La distancia focal vs. diámetro f/d define la forma del paraboloide y la localización relativa de su foco; su forma también puede ser descrita por el ángulo de borde Ψ_{rim} el cual se mide desde el eje del foco hasta el borde del paraboloide truncado; en general los paraboloides para aplicaciones solares tienen un ángulo de borde de menos de 10 grados a más de 90 grados; para ángulos de bordes pequeños un paraboloide difiere poco de una esfera; en el diseño de paneles se usa típicamente espejos esféricos. La relación que existe entre f/d y el ángulo de borde es:

$$f/d = \frac{1}{4 \tan(\Psi_{rim}/2)} \quad \dots(3.4)$$

Por ejemplo para un paraboloide con un ángulo de borde de 45 grados tiene un f/d de 0.6; el radio f/d se incrementa en tanto el ángulo de borde Ψ_{rim} decrece. Un paraboloide con ángulo de borde muy pequeño tiene poca curvatura, su punto focal se encuentra situado lejos de la superficie concentradora y por lo que también lo está el receptor. Paraboloides con ángulos de borde menores de 50 grados son usados cuando la radiación reflejada pasa por cavidad receptora, por lo tanto paraboloides con ángulos de borde grandes son mejores para colectores situados externamente; ya que los sistemas Colector/Stirling no utilizan receptores externos, sus ángulos de borde son menores de 50 grados.

3.2.2 Errores Ópticos

Típicamente la operación de los concentradores tienen varios errores ópticos que son causados por las divergencias que existen entre un paraboloide teórico. Algunos errores son fortuitos y causan que la imagen óptica del sol sea difusa en el foco. La reducción de los errores usualmente incrementan el costo del concentrador creando que el diseño del plato parabólico se encarezca.

Aún los mejores concentradores divergen de la curva ideal cuando éstos son manufacturados; esta desviación es llamada error de pendiente (slope error) que es una medida del ángulo entre la pendiente de la superficie real

que diverge de la ideal. Así los errores de pendiente varían sobre la superficie, esto es estadísticamente especificado como la desviación estándar de la media y es expresado en miliradianes. El reducir los errores ópticos en la superficie aumenta el costo de del colector. Una buena manufacturación de una superficie concentradora de plato parabólico no deberá exceder un error de pendiente de 2.5 miliradianes (alrededor de 0.15 grados). El uso de múltiples paneles resulta como la aproximación de un paraboloide y en sí mismo reduce la cantidad de concentración obtenible; además, cuando un paraboloide se aproxima por múltiples paneles, un error similar al error de pendiente llamado error de alineación de panel (facet alignment error) es producido por cada panel individual que no puede ser perfectamente alineado o dirigido.

Una segunda causa de errores ópticos es la superficie reflectiva en sí misma. Cuando un haz de rayos paralelos toca la superficie óptica el haz reflejado puede ser difuso, también denominado reflectancia no especular (nonspecular reflectance). Por ejemplo, metal pulido o una cubierta de polímero reflectiva difunde más la luz incidente que un espejo de vidrio.

Existen dos errores de alineación que colocan el foco real fuera de donde debería estar; uno de estos errores es el alineamiento del receptor y el concentrador; el otro llamado error de seguimiento (tracking error) ocurre cuando el eje del concentrador no apunta directamente al sol; aunque no completamente son errores fortuitos algunos veces son tratados como tales por simplicidad.

Un factor final, desde luego que no puede ser corregido por manufacturación, es el que aparece en los rayos solares ya que el sol no es un fuente puntual, sus rayos no son paralelos y por lo tanto la imagen reflejada se difunde en un cono de aproximadamente 9.31 miliradianes (0.533 grados) de ancho, llamado forma solar (sunshape), el cual se incrementa cuando el borde pierde definición debido al incremento de humedad y/o partículas en la atmósfera. El efecto sunshape es similar a los otros errores ópticos y se difunde la radiación reflejada hacia el foco.

3.3 MATERIALES REFLECTIVOS

Los concentradores depende de la superficie reflectiva para concentrar los rayos solares en una pequeña área. Las superficies son de aluminio pulido

o plata con la anverso o reverso de la superficie de vidrio o plástico. Cuando plata o aluminio es depositado en el reverso de una superficie protectora de material transparente se le denomina espejo de segunda superficie (second surface mirror), la calidad de la reflectividad de la superficie, es una medida de su reflectancia y su especularidad, donde la reflectancia es la relación en porcentaje del rayo incidente contra el rayo reflejado y la especularidad es la medida de la propiedad de una superficie reflejante de no dispersar el ángulo en comparación al ángulo de incidencia; una superficie ideal refleja todos los rayos en un ángulo igual y opuesto al ángulo de incidencia.

La mayoría de la superficie reflejantes son metales, bajo condiciones normales de laboratorio, las superficies de plata pulida tiene la mas alta reflectancia que cualquier otro metal para el espectro de energía solar; el aluminio refleja también gran parte del espectro de energía pero no tanto como la plata [3].

3.3.1 Características de las Propiedades Ópticas de los Metales.

Las peculiaridades de reflexión de la luz de la superficie de los metales, se deben a la presencia en éstos de un gran número de electrones enlazados tan débilmente con sus propios átomos, que para muchos fenómenos, tales electrones se pueden considerar *libres*. Las ondas secundarias, provocadas por las oscilaciones forzadas de los electrones libres, dan origen a una onda reflejada fuerte, cuya intensidad puede alcanzar el 95% (e incluso más) de la intensidad de la onda incidente, y una onda relativamente débil que pasa hacia adentro del metal. Puesto que la densidad de los electrones libres es muy considerable (del orden de 10^{22} en un cm^3), incluso las capas muy finas del metal reflejan la mayor parte de la luz incidente y son, por regla general, prácticamente opacas. La parte de energía luminosa que penetra en el metal, sufre en él absorción. Los electrones libres que bajo la influencia de la onda luminosa comienzan a oscilar, interaccionan con los iones de los metales, como resultado de esto, la energía tomada de la onda electromagnética se transforma en calor [4].

De este modo, la onda electromagnética se amortigua con rapidez dentro del metal y, por lo general, sólo sus capas finísimas juegan algún papel en todo el proceso descrito.

En dependencia de la conducción del metal se resuelve el problema de qué parte de la luz no se transmite por éste como resultado de la reflexión y qué parte se retiene a causa de la absorción. En un conductor ideal, donde las pérdidas en el calor de Joule en general no existen, la absorción es igual a cero, de modo que la luz incidente se refleja totalmente. Las películas de plata muy puras, que se emplean en los interferómetros de Fabry-Pérot, se aproximan a este ideal. Se ha logrado confeccionar películas en las que la reflexión alcanza el 98 - 99%, y la absorción constituía aproximadamente el 0.5%. Una capacidad reflectora sobre todo alta (de hasta un 99.8%) la posee el sodio, metal de excelente conducción, cuya absorción es respectivamente insignificante. En los metales peores conductores, por ejemplo en el hierro, la reflexión puede ser sólo de 30-40%, de modo que la película opaca de hierro, cuyo grosor constituye partes de micrón, absorbe cerca del 90% de la luz que incide sobre ella.

Así, pues, la peculiaridad característica de los metales, que consiste en su elevada capacidad reflectora y la cual se manifiesta en la presencia de un brillo «metálico» singular de su superficie limpia (no oxidada), está relacionada con la conductividad eléctrica de los mismos. Hablando en general, cuanto mayor es el coeficiente de conductibilidad, tanto más alta es la capacidad reflectora de los metales.

Con frecuencias relativamente pequeñas (rayos infrarrojos), las propiedades ópticas del metal dependen principalmente de la conducta de los electrones libres. Pero al pasar a la luz visible y ultravioleta, comienzan a desempeñar un papel importante los electrones ligados que se caracterizan por su propia frecuencia ubicada en la zona de longitudes de ondas más cortas. La participación de estos electrones determina las llamadas propiedades ópticas no metálicas. Así, por ejemplo, la plata, que en la zona visible se caracteriza por un factor de reflexión muy elevado (superior al 95%) y una absorción evidente, o sea, peculiaridades ópticas típicas de los metales, en la zona de luz ultravioleta posee un intervalo bruscamente manifiesto, de mala reflexión y gran transparencia; en las proximidades de $\lambda = 316 \text{ nm}$, la capacidad reflectora de la plata se reduce hasta el 4.2%, es decir, corresponde a la reflexión del vidrio. A continuación se citan los factores de reflexión de la plata (en tanto por ciento) para distintas longitudes de ondas de incidencia normal:

Tabla 3-1. Factores de reflexión de la plata (en tanto por ciento).

λ (nm)	251.0	288.0	305.0	316.0	326.0	338.0	357.0	385.0
r^2 (%)	34.0	21.2	9.1	4.2	14.6	55.5	74.4	81.4
λ (nm)	420.0	450.0	500.0	700.0	1000			
r^2 (%)	86.6	90.5	91.3	96.0	97.5			

Conforme a estos datos, la plata en forma de capas finas, observada a la luz se presenta de color violeta. De modo análogo, las capas finas de los metales alcalinos, opacos por completo en la luz visible, son transparentes en la luz ultravioleta (la transparencia evidente del cesio comienza cuando $\lambda = 315$ nm; del rubidio, cuando $\lambda = 360$ nm; del potasio, cuando $\lambda = 315$ nm; del sodio, cuando $\lambda = 210$ nm; y del litio, cuando $\lambda = 205$ nm). Wood logró incluso revelar en estos metales, en la zona ultravioleta, el ángulo de Brewster y provocar la polarización de la luz natural durante la reflexión del metal.

La teoría completa de paso de la luz a través de los metales, y la reflexión de éstos debe tener en cuenta las peculiaridades indicadas. Esto es sobre todo difícil porque la teoría electrónica de los metales requiere la aplicación de la mecánica cuántica.

3.3.2 Constantes Ópticas de los Metales y su Determinación

En la Interpretación breve de la cuestión basada en la teoría electromagnética de Maxwell, el problema se reduce a la consideración de la conducción del metal, es decir, formalmente a la introducción de las ecuaciones de Maxwell, de términos que dependen del coeficiente de conductibilidad σ . Para la onda luminosa propagada dentro del metal, obtenemos en este caso una expresión la cual significa que su amplitud se reduce a medida que la misma penetra en la profundidad de éste. Con otras palabras, de acuerdo con los datos del experimento de nuestras fórmulas se desprende que en el metal tiene lugar la absorción de la luz. En una capa de pequeño grosor (dz) se absorbe parte determinada de la luz incidente proporcional al grosor de dicha capa, o sea, $dl = -\alpha dz$.

Conforme a esto la intensidad de la luz disminuye a medida que ésta penetra en la profundidad del metal según la ley $I = I_0 \exp(-\alpha z)$, donde α es el factor de absorción, el cual muestra que a la profundidad de $z = 1/\alpha$ la intensidad de la luz se reduce e veces. Las fórmulas teóricas adquieren una forma más simple si en lugar del factor de absorción alfa introducimos la magnitud χ ligada a α mediante la relación $\chi = \lambda\alpha/4\pi$ donde λ es la longitud de la onda de luz en la sustancia. Si el índice de refracción de nuestra sustancia es n , la longitud de la onda en el vacío será: $\lambda_0 = n\lambda$ de manera que [5]:

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} n\chi \text{ o sea, } I = I_0 \exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda_0} n\chi z\right) \dots(3.5)$$

Si $n\chi$ es igual a la unidad, en una capa cuyo grosor equivale a la longitud de onda ($z = \lambda_0$), la intensidad de la luz se reduce $\exp(4\pi)$ veces, es decir, aproximadamente 10^5 veces. Planck propuso considerar la absorción metálica si $n\chi > 1$. En efecto, al realizar mediciones en la zona visible del espectro, para la mayoría de los metales, el valor de $n\chi$ se halla entre 1.5 y 5. Al pasar a la zona de mayores longitudes de onda, los valores de $n\chi$ aumentan aún más. Así, pues, para la plata, siendo $\lambda = 6 \mu\text{m}$, $n\chi$ alcanza el valor de 40 y, al aumentar λ , crece aún más. Como la intensidad de la luz es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda luminosa, por efecto de absorción, la amplitud varía según la ley:

$$\begin{aligned} A &= A_0 \exp(1/2 \alpha z) \\ &= A_0 \exp\left[-(2\pi/\lambda_0) n\chi z\right] \dots(3.6) \end{aligned}$$

y, por consiguiente, la onda luminosa en el metal adquiere el aspecto:

$$\begin{aligned} s &= A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z\right) \\ &= A_0 \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_0} n\chi z\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n z\right) \dots(3.7) \end{aligned}$$

La introducción de la escritura compleja de la oscilación, depuesto de una transformación simple nos da:

$$\begin{aligned}
 s &= A_0 \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_0} n \chi z\right) \operatorname{Re}\left\{ \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n z\right)\right] \right\} = \\
 &= A_0 \operatorname{Re} \exp\left\{ i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n(1 - i\chi)z\right] \right\} \quad \dots(3.8)
 \end{aligned}$$

Por consiguiente, al emplear la forma compleja, el aspecto de la onda en el metal se puede escribir de manera corriente, pero en lugar del índice de refracción ordinario n , en la fórmula entra el índice de refracción complejo $n' = n(1 - i\chi)$, además, su parte imaginaria ($n\chi$) determina la absorción de la onda.

Ambos parámetros n y χ son las constantes que caracterizan las propiedades ópticas del metal. Al deducir la ecuación ondulatoria de las ecuaciones de Maxwell para el metal, obtenemos las relaciones entre las constantes ópticas del metal y sus características eléctricas ϵ y σ :

$$n^2(1 - \chi^2) = \epsilon, \quad n^2\chi = \sigma/\nu \quad \dots(3.9)$$

donde ν es la frecuencia de la luz; ϵ , la constante dieléctrica; y σ la conductividad. Para los metales, la medición de la conductividad σ se hace simplemente sólo para un campo continuo o para campos de frecuencia pequeña. Las mediciones directas de ϵ en general son imposibles. Por esta razón, a base de estas fórmulas no se puede efectuar el cálculo de las constantes ópticas n y χ de la luz corriente o ultravioleta (alta frecuencia). Sin embargo, resulta posible la determinación experimental de n y χ , además, por medio de dos procedimientos. El primero le pertenece a Kundt (1888), quien midió directamente estas constantes para ciertos metales, confeccionando de ellos pequeños prismas muy finos con pequeño ángulo de refracción que permitían determinar n y χ . El segundo método, más perfecto y general, fue señalado por Drude (1889). Este se basa en el estudio de las propiedades de la luz reflejada de los metales. Como ya se ha señalado antes, las peculiaridades ópticas de los metales, en comparación con el dieléctrico, se consideran por el hecho de que en lugar de del índice corriente de refracción n se introduce el índice de refracción complejo $n' = n(1 - i\chi)$.

Conforme a esto las formulas de Fresnel para el metal, las amplitudes de la onda reflejada y refractada se hacen complejas, es decir surge la diferencia

de fas entre las componentes de las ondas reflejada y refractada y la onda incidente. Esta diferencia de fase no es igual para las componentes del vector del campo eléctrico que permanecen en el plano de incidencia y perpendicularmente a él. Por eso entre dos componentes mutuamente perpendiculares en la luz reflejada (y refractada) $E_{r\parallel}$ y $E_{r\perp}$ surge una diferencia de fase como resultado, si sobre la superficie del metal incide la luz de polarización plana, entonces, la luz reflejada será de polarización elíptica. El carácter de polarización (excentricidad y posición de la elipse) depende de las propiedades ópticas del metal (de n y χ). La teoría de Drude relaciona estas magnitudes con los datos de la polarización elíptica hallados experimentalmente, y de este modo permite determinar las constantes ópticas del metal. En los casos cuando los resultados obtenidos por el método de Drude podían compararse con los datos de Kundt, se observaba una concordancia satisfactoria.

Para el caso simple de incidencia normal sobre el metal, no es difícil calcular tanto la diferencia de fase entre E_r y E_i , como el factor de reflexión. Para eso, en la expresión $r_{\perp} - r_{\parallel} = -(n-1)/(n+1)$ hay que sustituir $n' = n(1-i\chi)$ o sea:

$$-r_{\perp} = -r_{\parallel} = \frac{n(1-i\chi)-1}{n(1-i\chi)+1} = \frac{(n-1)-i\chi n}{(n+1)-i\chi n} = r \exp(i\delta_r) \quad \dots(3.10)$$

de donde:

$$\operatorname{tg} \delta_r = \frac{2(n\chi)}{1-n^2-(n\chi)^2} \quad \dots(3.11)$$

Para hallar el factor de reflexión mediante la intensidad $|r|^2$ es necesario multiplicar la expresión anterior por la magnitud adjunta a ésta $|r| \exp(-i\delta_r)$, en resumidas cuentas obtenemos:

$$r^2 = \frac{(n-1)^2 + \chi^2 n^2}{(n+1)^2 + \chi^2 n^2} \quad \dots(3.12)$$

De acuerdo con la ecuación anterior, la medición del factor de reflexión mediante la intensidad del metal puede utilizarse también para determinar las constantes ópticas del metal.

La tabla citada, que ofrece los valores de $n\chi$ y $|r|^2$ para algunos metales siendo $\lambda = 589,3 \text{ nm}$, permite verificar en que medida se cumple la relación anterior.

La comparación directa de los datos de esta tabla con los valores ordinarios de la conductividad no da un resultado satisfactorio, lo que, por otra parte, no resulta inesperado. Las fórmulas parten de la noción acerca del metal como un sistema cuyos electrones pueden considerarse libres (electrones de conducción); mientras que los fenómenos ópticos, referentes a la zona de frecuencias relativamente altas (luz visible y ultravioleta), dependen mucho de la influencia de los electrones ligados (electrones de polarizabilidad), lo cual se debe a la dispersión. En efecto, por ejemplo, tomando para el cobre el valor estático de conductividad $\sigma = 5,14 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$, hallaremos para la luz amarilla, o sea, para $\nu = 5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, que $\sigma/\nu = 1000$, mientras que $n^2\chi = 1.67$.

Tabla 3-2. Constantes ópticas de algunos metales para $\lambda = 589.3 \text{ nm}$.

METAL	$n\chi$	n	$ r ^2$ en %
Sodio	2.61	0.05	99.8
Plata	3.64	0.18	95.0
Magnesio	4.42	0.37	92.9
Oro	2.68	0.37	85.1
Oro electrolítico	2.84	0.47	81.5
Mercurio	4.41	1.62	73.3
Cobre puro	2.62	0.64	70.1
Níquel puro	3.32	1.79	62.0
Níquel electrolítico	3.48	2.01	62.0
Níquel pulverulento	1.97	1.30	43.3
Hierro pulverulento	1.63	1.51	32.6

Así mismo el producto de $n^2\chi$ para el mercurio es mucho mayor que para el sodio, mientras que la conductividad corriente del sodio es incomparablemente mayor que la del mercurio. Sin embargo, la verificación de las relaciones indicadas es posible si se determinan los valores de n y χ para frecuencias más bajas (infrarrojas), donde para las propiedades

ópticas de los metales los electrones libres desempeñan el papel principal. Así, por ejemplo, siendo $\lambda = 12 \mu\text{m}$, la relación entre las constantes ópticas y el coeficiente de conductibilidad del metal, requerida por la teoría, se realiza bien en el experimento.

La teoría cuántica moderna de los fenómenos de la óptica de los metales conduce a las relaciones mas complicadas que concuerdan bien con los datos experimentales.

3.3.3 Espejos de Segunda Superficie

Los espejos plata/vidrio de doble superficie, están hechos con una aplicación de plata a hojas de vidrio adaptándoles posteriormente una protección de cobre y una capa de pintura protectora [7]. Esta técnica ha sido usada para numerosas aplicaciones domésticas, tales como espejos de baños durante muchos años. Comunmente los espejos, aunque son de vidrio delgado, son demasiado pesados y difíciles de colocar dentro de la forma del concentrador. Estos espejos tienen una transmitancia baja (por que el vidrio común contiene hierro). Una superficie de plata pulida tiene una reflectancia de casi el 98% lo que no ocurre en el espejo, ya que el rayo incidente debe pasar dos veces a través del vidrio aunque.

Al incrementarse las aplicaciones de espejos de vidrio de doble superficie películas de vidrio han tenido que ser desarrolladas; los vidrios usados usualmente se procuran libres de hierro para no absorber tanto el espectro solar. Mismos que pueden tener una reflectancia del 95%.

3.3.4 Películas Plásticas Reflectivas.

Películas plásticas aluminizadas son actualmente usadas en el diseño de los concentradores; una variedad de películas plásticas con una cubierta de aluminio vaporizado, depositado en el reverso de la superficie, se han utilizado en la aplicación para la concentración solar por varios años. Si bien las propiedades ópticas y mecánicas de casi todos los plásticos se degradan por larga exposición a rayos ultravioleta, agregando estabilizadores se reduce la degradación. Películas plásticas plateadas de bajo costo, flexibles, ligeras, con alta reflectancia (96%) y alta especularidad prometen ser la superficie reflectora a escoger para muchos nuevos diseños.

Una desventaja de las películas plásticas metalizadas es que no pueden ser lavadas como el vidrio; algunos cubiertas fuertes para películas plásticas están siendo investigadas.

3.4.5 Metal Plateado o Pulido

Las superficies reflectivas usadas en concentradores recientes son hojas de aluminio pulido; estas hojas están disponibles en grandes tamaños y son relativamente baratas sin embargo, su mayor desventajas es que éstas solo tienen una moderada reflectancia especular (85% cuando son nuevas); otra desventaja es su baja tolerancia al medio ambiente.

Un reciente concepto bajo desarrollo, es la aplicación de plata como cubierta reflectiva directamente a una superficie estructural de acero inoxidable o aluminio. Estas superficies deben ser protegidas de la corrosión atmosférica por alguna cubierta transparente; un ejemplo de esta cubierta es el *sol-gel*, pudiendo ser aplicada como pintura y cuando seca forma como una cubierta de vidrio delgado; éste y otros procesos están bajo desarrollo.

3.5 DESEMPEÑO DEL CONCENTRADOR

La medida primordial del desempeño del concentrador es saber cuanta insolación llega a la apertura del colector y pasa a través de un tamaño especificado de apertura localizado en el foco del concentrador [6, 8]. Esta medida es denominada eficiencia óptica; y se define por :

$$\eta_{conc} = E(\cos \theta_i) \rho \phi \quad \dots(3.13)$$

Sabemos que la fracción de área E no excede el 95% en la mayoría de los diseños y que el ángulo de incidencia θ_i es cero y por consiguiente $\cos \theta_i$ es igual a uno; por lo tanto los términos críticos son reflectancia y fracción de captura (ρ y ϕ)

El término reflectancia se ha discutido con anterioridad y toca el turno al término fracción de captura, que define el desempeño óptico del plato concentrador.

3.5.1 Fracción de Captura

El más importante factor en el aumento de la eficiencia óptica del concentrador es fracción de captura θ , que es la fracción de energía reflectada en el concentrador y la que entra al receptor. Este determina por una correcta apertura del receptor, A_{rec} , y es efectuado por los errores ópticos del concentrador, seguimiento, alineamiento focal de los elementos y el receptor y el aparente tamaño del sol.

Para asegurar una fracción alta de captura, los errores del concentrador discutidos anteriormente, deberán ser pequeños o el área del receptor grande para permitir la captura de casi toda la energía reflectada del concentrador. pero la energía concentrada es bloqueada en la entrada. Se observa que es importante maximizar la fracción de captura ya que ésta afecta de manera directa la producción de energía.

Existe una relación directa entre la fracción de captura y el área de apertura del receptor A_{rec} . Mientras se incrementa la fracción de captura por el incremento del área de apertura se incrementa también las pérdidas de calor, el beneficio de la captura adicional de energía frecuentemente compensa el incremento de las pérdidas de energía. Un balance importante en el diseño es el costo y reducción de estas pérdidas.

Si un concentrador tiene altos errores ópticos, el área del receptor deberá ser grande; el tamaño de la apertura del receptor puede ser reducido para una determinada fracción de captura usando un concentrador secundario.

Como se discutió arriba, este segundo concentrador refleja su radiación en una área cercana al foco del concentrador primario y el "embudo" lo concentra en una área pequeña.

REFERENCIAS (III)

1. R. Kubo & H. Kamikura; *Dynamical Processes in Solid State Optics*; Syokabo Tokyo & W. A. Benjamin, Inc. New York; Japan; (1967).
2. G. R. Fowls. *Introduction to Modern Optics*; Dover Publications, Inc., New York; U.S.A.; (1989).
3. C. G. Granqvist; *Materials Science for Solar Energy Conversion System*; Pergamon Press; U.S.A.; (1991).
4. G. S. Landdesberg; *Optics II*; Mir; Moscu; (1976).
5. R. Loudon. *The Quantum Theory of Light*; ; Clarendon Press, Oxford; G. B.; (1986).
6. C.D. West; *Principles and Applications of Stirling Engines*; Nostran Reinhold Co. New York; U.S.A.;(1986).
7. A. Kreith, and F.Kreider; *Principles of Solar Engineering*; McGraw-Hill; New York, (1978).
8. W. B. Stine. *Solar Dish/Stirling Techology*; Solar Thermal Deparment Sandia National Laboratories; Albuquerque; U.S.A.; (1994).

4.1 GUÍAS DE ONDA

Las cavidades resonantes permiten solo ondas estacionarias, pero hay también la posibilidad de producir ondas viajeras en ciertas regiones llamadas guías de onda, que son cavidades largas abiertas en ambos extremos. Las ondas que entran por uno de ellos se reciben en el otro. Discutiremos en detalle un tipo simple de guía de onda que consiste en dos planos paralelos separados una distancia a (Fig. 4.1). Si se establece una onda en el interior de la cavidad, formando un ángulo con los planos, determinado por las componentes k_1 y k_2 del vector k , paralela y perpendicular respectivamente a los planos, esta onda experimenta sucesivas reflexiones en las superficies de la cavidad, rebotando entre ellas. Como el espacio no está limitado en la dirección paralela a los planos (como sucede con las cavidades), la onda continuará progresando hacia la derecha. Tomemos el eje X paralelo a los planos y el eje Y perpendicular a los mismos de modo que el vector k quede en el plano XY. En la Figura 4-1 hemos indicado la trayectoria de un rayo particular. A lo largo de PQ el rayo está caracterizado por las componentes k_1 y k_2 ; desde Q hasta R, está caracterizado por las componentes k_1 y $-k_2$. Desde R en adelante de nuevo la caracterizan k_1 y k_2 . Concluimos entonces que en el espacio entre los planos reflectores tenemos dos grupos de ondas viajeras, correspondientes a k_1, k_2 y $k_1, -k_2$ respectivamente. Estas ondas interfieren dando lugar al movimiento ondulatorio resultante descrito por la expresión:

$$\xi = -2E_0 \text{sen } k_2 y \cos(\omega t - k_1 x) \quad \dots(4.1)$$

donde

$$k_2 = \frac{\eta\pi}{a} \quad \dots(4.2)$$

para satisfacer la ecuación de entorno $\xi=0$ para $y=a$.

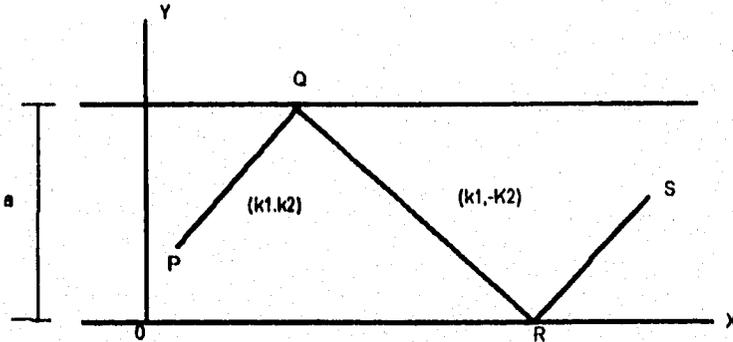


Fig 4.1 Rayo propagándose entre dos planos reflectores paralelos.

En la ecuación 4.1 el término $(\omega t - k_1 x)$ corresponde a una onda que viaja según el eje X con una velocidad de fase

$$v_p = \frac{\omega}{k_1} = \frac{k}{k_1} v \quad \dots(4.3)$$

Como k_1 es una componente de k , entonces $k_1 \leq k$ y la ecuación 4.3 indica que la velocidad de fase de la onda que viaja a lo largo de la cavidad es mayor que la velocidad de fase $v = \omega/k$ de la onda en el espacio libre. De modo que las ondas electromagnéticas, la velocidad de fase será mayor que c . Ahora, de $k^2 = k_1^2 + k_2^2$ y de la ecuación 4.2, tenemos:

$$k^2 = k_1^2 + \frac{\eta^2 \pi^2}{a^2}$$

o sea

$$k_1 = \sqrt{k^2 - \frac{\eta^2 \pi^2}{a^2}} = \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - \frac{\eta^2 \pi^2}{a^2}} \quad \dots(4.4)$$

ya que $k = \omega/v$. La velocidad de grupo asociada con la velocidad de fase por la ecuación 4.3

$$v = \frac{d\omega}{dk_1} = \frac{k_1}{\omega} v^2 = \frac{k_1}{k} v \quad \dots(4.5)$$

la cual es menor que v ya que $k_1 \leq k$. Multiplicandolas ecuaciones 4.3 y 4.5 obtenemos $v_p v_g = v^2$, o para las ondas electromagnéticas en el vacío $v = c$, $v_p v_g = c^2$. Vemos entonces que, aún en el vacío, una guía de onda electromagnética actúa como un medio dispersivo de índice de refracción menor que uno, y por lo tanto una velocidad de fase mayor que c , pero una velocidad de grupo menor que c .

La ecuación 4.4 también indica otra propiedad importante de las guías de onda. Como k_1 debe ser un número real, a fin de que una onda se propague a lo largo de la guía de onda, es necesario que $\omega^2/v^2 \geq \eta^2 \pi^2/a^2$, lo cual da

$$\omega = \eta \pi v/a \quad \text{ó} \quad v \geq \eta v/2a \quad \dots(4.6)$$

En otras palabras, sólo aquellas ondas cuyas frecuencias satisfacen la ecuación 4.6 se propagan a lo largo de la guía. Cada modo está determinado por el valor de η , y para cada modo hay una frecuencia de corte igual a $\eta \pi v/a$ por debajo de la cual la propagación es imposible. Las guías de onda actúan entonces como filtros de frecuencia.

Aunque la onda se propaga en el interior de la guía de onda según el eje X, la amplitud está modulada transversalmente en la dirección del eje Y por el factor $\sin k_2 y$ de la ecuación 4.1. La variación transversal de la amplitud se indica en la Figura 4-2 para $\eta = 1, 2$ y 3 . En la práctica las guías de onda tienen en general una sección transversal rectangular o circular. Las dos formas producen resultado similares con respecto a la velocidad de fase a lo largo del eje de la guía y con respecto a la frecuencia de corte.

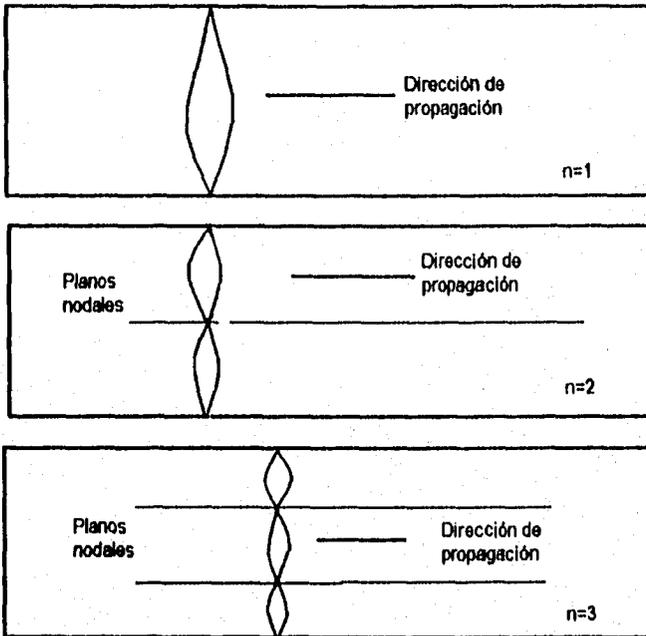


Fig 4-2 Tres primeros Modos de propagación de una onda entre dos planos reflectores.

Aunque nuestra discusión sobre la guía de onda es válida para cualquier clase de ondas, para las ondas electromagnéticas la situación tiene algunas peculiaridades [1]. Debido al carácter transversal de éstas, para cada k hay dos posibles modos, dependiendo de la orientación relativa del campo eléctrico con respecto a lo lados de la guía de onda. Las guías de onda para las ondas electromagnéticas se usa extensamente en la región de las microondas con la finalidad de transmitir señales. Es interesante observar que el espacio entre la superficie de la tierra y la ionosfera, que esta aproximadamente a 80 km de altura, forma una guía de onda que permite la propagación de ondas de radio alrededor de la tierra, como se ilustra en la Figura 4-3.

4.2 DISCUSIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN UNA GUÍA DE ONDA DE PLANOS PARALELOS.

Como quedó explicado las ondas electromagnéticas en guías tienen sus propias peculiaridades debido a su carácter transversal de las mismas y a

las condiciones de contorno en la superficie del conductor [2]. Estas condiciones de contorno son: el campo eléctrico es normal y el campo magnético es tangencial a la superficie del conductor. Una solución posible de las ecuaciones de Maxwell que satisfaga estas condiciones para una guía de ondas planas es $\epsilon_y = \epsilon_0 \text{sen}(\omega t - kx)$, $\beta_z = \beta_0 \text{sen}(\omega t - kx)$ con $\beta_0 = \epsilon_0/c$. Las líneas de fuerza del campo eléctrico se indican con líneas en la Figura 4-4 y las de campo magnético con puntos y cruces. En este caso la guía de onda no cambia la velocidad de fase de la onda la cual se propaga con la misma velocidad de fase $c = \omega/k$, correspondiente a la propagación del espacio libre; la guías de onda limita solamente el frente de onda.

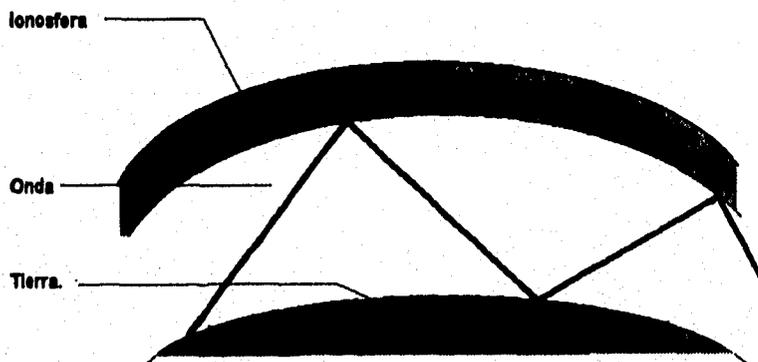


Fig. 4-3 El espacio comprendido entre la ionosfera y la tierra actúa como una guía de onda para las ondas de radio.

Pero las ecuaciones de Maxwell admiten otras soluciones que también satisfacen nuestras condiciones de contorno una solución posible es:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = 0, \quad \epsilon_z = \epsilon_0 \text{sen} k_2 y \cos(\omega t - k_1 x),$$

$$\beta_x = -\frac{k_2}{\omega} \beta \epsilon_0 \text{sen} k_2 y \text{sen}(\omega t - k_1 x),$$

$$\beta_y = -\frac{k_1}{\omega} \beta \epsilon_0 \text{sen} k_2 y \cos(\omega t - k_1 x), \quad \beta_z = 0$$

Esto se puede verificar por sustitución directa en las ecuaciones de Maxwell. Esta solución se llama TE (transversal eléctrica), debido a que el

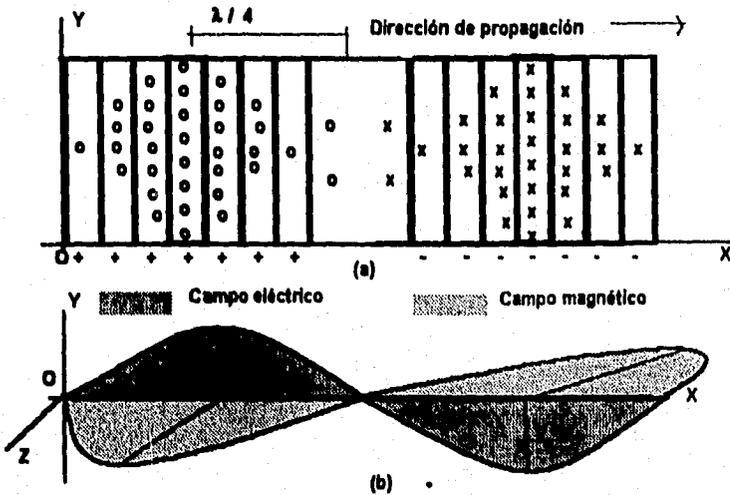


Fig 4-4 (a) Líneas de fuerza de los campos eléctrico (líneas paralelas) y magnético (puntos y cruces) en el plano XY para una onda electromagnética que se propaga paralelamente entre dos planos. (b) Campos eléctrico y magnético de la onda descrita en (a).

campo eléctrico es transversal mientras que el magnético tiene una componente según la dirección de propagación efectiva, o eje X los campos eléctrico y magnético son, sin embargo perpendiculares entre sí. Para satisfacer las condiciones de contorno en ambos planos conductores, debemos hacer $\epsilon_z=0$ y $\beta_y=0$ para $y=0$ e $y=a$. La primera se satisface automáticamente mientras que la segunda requiere que $\sin(k_2a)=0$ o sea $k_2a=\eta\pi$, de modo que se obtiene la condición dada por la ecuación 4.2.

La Figura 4-5 (a) muestra las líneas de fuerza para el modo mínimo, $\eta=1$. Las líneas de fuerza del campo eléctrico son rectas paralelas a los planos (perpendiculares a la página) por lo tanto se indican con puntos o cruces, mientras que las líneas de fuerza del campo magnético son las curvas cerradas. Cada diagrama ocupa la mitad de la longitud de onda efectiva $2\pi/k_1$, y los diagramas sucesivos tienen una diferencia de fase de π . Los diagramas viajan a lo largo de la guía con la velocidad de fase $v_p=\omega/k_1$.

Otra posible solución de las ecuaciones de Maxwell es

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= -\frac{k_2}{k_1} \epsilon_0 \text{sen} k_2 y \text{sen}(\omega t - k_1 x), \\ \epsilon_y &= \epsilon_0 \text{cos} k_2 y \text{cos}(\omega t - k_1 x), & \epsilon_z &= 0 \\ \beta_x &= \beta_y = 0, \\ \beta_z &= \frac{\omega}{k_1 c^2} \epsilon_0 \text{cos} k_2 y \text{cos}(\omega t - k_1 x). \end{aligned}$$

También se puede verificar esto por sustitución directa en las ecuaciones de Maxwell. Esta segunda solución se designa TM (Transversal Magnética) y se le da este nombre por que el campo magnético es transversal. El campo eléctrico, sin embargo, tiene una componente a lo largo de la dirección efectiva de propagación. Ambos campos permanecen perpendiculares entre sí. Para satisfacer las condiciones de contorno en los planos conductores, debemos hacer $\epsilon_x=0$ para $y=0$ y $y=a$. La primera se satisface automáticamente, y la segunda requiere una vez más $\text{sen}(k_2 a)=0$ o sea $k_2 a = \eta \pi$, de modo que se obtiene de nuevo la condición dada por la ecuación 4.2. Por consiguiente ambos modos tienen la misma frecuencia de corte.

La Figura 4-5 (b) muestra las líneas de fuerza para el modo más bajo, $\eta=1$. Las líneas de fuerza del campo magnético son ahora líneas rectas paralelas a los planos (perpendiculares a la página) y se indican por puntos o cruces, mientras que las líneas de fuerza del campo eléctrico corresponden a los diagramas que se muestran. Como en el caso TE cada diagrama ocupa la mitad de la longitud de onda efectiva $2\pi/k_1$, y los diagramas viajan a lo largo de la guía con la velocidad de fase $v_D = \omega/k_1$.

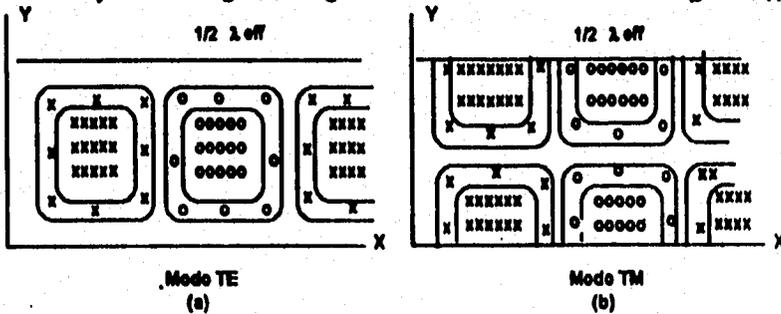


Fig 4-5 Guías de onda para ondas electromagnéticas. (a) Campo eléctrico perpendicular a la página, (modo TE); (b) Campo magnético perpendicular a la página, (modo TM).

La solución general de las ecuaciones de Maxwell que satisfacen las condiciones de contorno de este problema deberá ser entonces una combinación lineal de los modos TE y TM.

4.3 QUÉ ES LA FIBRA OPTICA?

En la Figura 4.6 se muestran rayos que viajan en un medio óptico denso (por ejemplo, vidrio) e inciden sobre una superficie plana al otro lado de la cual existe un medio óptico menos denso (digamos aire). A medida que el ángulo de incidencia aumenta, se llega a una situación para la cual el rayo refractado apunta a lo largo de la superficie; esto es, que el ángulo de refracción es de 90°. Cuando el ángulo de incidencia es mayor que este ángulo crítico θ_c , no existe rayo refractado y se habla entonces de un fenómeno llamado reflexión total [3].

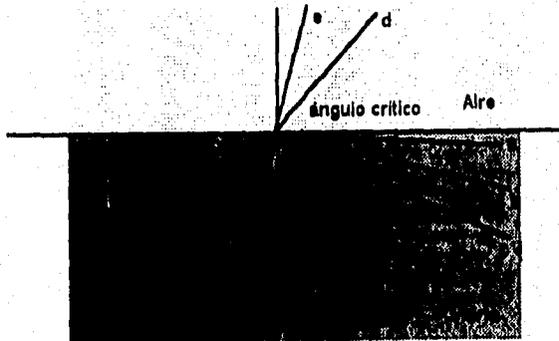


Fig 4-6 Reflexión y Difracción de rayos de un medio mas denso a uno menos denso.

El ángulo crítico se obtiene haciendo $\theta_2=90^\circ$ en la ley de refracción:

$$n_1 \text{sen} \theta_c = n_2 \text{sen} 90^\circ$$

$$\text{sen} \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \dots(4.7)$$

En el caso de vidrio y aire, $\text{sen} \theta_c = (1.00/1.50) = 0.667$, que resulta en un valor de $\theta_c = 41.8^\circ$. la reflexión interna total no puede ocurrir cuando la luz viaja inicialmente en un medio de menor índice de refracción.

La idea básica que permite transmitir la luz y por lo tanto energía a través de un medio conductor especial es aprovechar la reflexión total que ocurre en las condiciones del ángulo crítico y con esto llevar las trayectorias, las mas diversas, sin pérdidas.

Una fibra óptica consiste, entonces de un cilindro de material altamente transparente y flexible, con índice de refracción elevado en relación a la coraza que lo contiene. Así el ángulo crítico pasa a tener un valor mas estrecho, lo que exige que los rayos transmitidos incidan apenas sobre un determinado cono, como se muestra en la Figura 4-7, este cono define la ubicación de las fuentes receptoras y emisoras de la fibra óptica. El ángulo entre el eje de la fibra y la superficie que define el cono se le denomina "ángulo de admisión" de la fibra óptica. El seno de este ángulo es una medida de la capacidad de recoger radiación y se denomina "apertura numérica" (NA). Vea entonces que los rayos de luz captados según un ángulo mayor que el ángulo de admisión no podra ser transmitido por la fibra a través de una reflexión interna total.

$$NA = \text{sen}\theta = \frac{1}{n_3} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \dots(4.8)$$

De esta forma fibras que posean aberturas numéricas elevadas pueden recoger una cantidad de luz mayor. En síntesis los diámetros de las fibras individuales son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda luz.

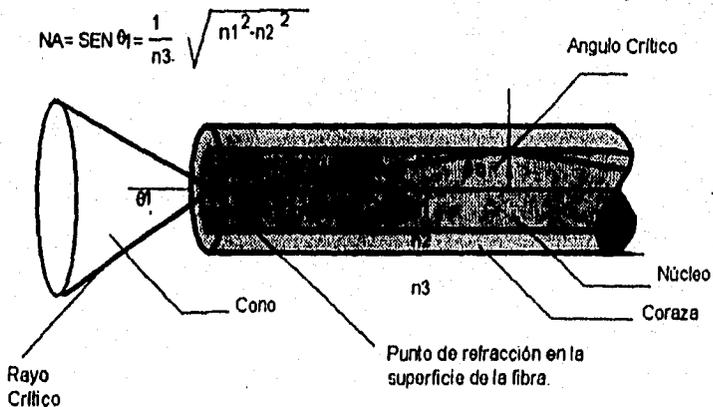


Fig. 4-7 Cono que limita la incidencia de luz en una fibra óptica.

4.4 PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA.

Un punto importante de la transmisión por fibra óptica, es que, solo son capaces de hacerlo en el espectro óptico que se muestra en la Figura 4-8 entre las longitudes de onda 5.5×10^{-5} y 10^{-7} metros, que incluye solo una parte del infrarrojo, todo el visible y una pequeña parte de ultravioleta. (Existen fibras denominadas fibras ópticas para infrarrojo que sufren menos pérdidas a esta longitud de onda, y fibras ópticas para ultravioleta que también reduce sus pérdidas en esta región) [4]. La medida de atenuación de la pérdida de la señal de entrada con respecto a la señal de salida esta dada por:

$$dB_{loss} = -10(\log \frac{power_{out}}{power_{in}}) \quad \dots(4.9)$$

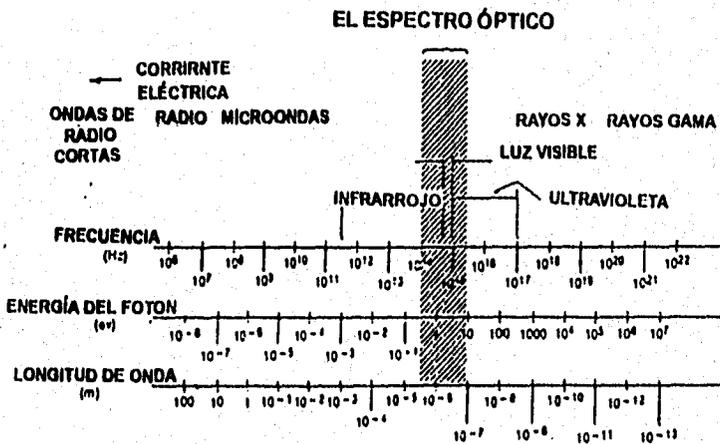


Fig 4-8 Espectro electromagnético.

4.5 CLASIFICACIÓN DE LAS PERDIDAS EN LA FIBRA ÓPTICA

Las pérdidas se pueden dividir en dos categorías, las pérdidas inherentes y las inducidas, las pérdidas inherentes incluyen la relación de Rayleigh, ultravioleta (UV) e infrarrojo (IR) Figura 4-9 y 4.10. Si lo que

nos interesara fuese transmitir una señal, usaríamos una fuente que emitiera en el rango de menor pérdida, sin embargo, como se trata de la transmisión de energía solar de alta energía esta se encuentra entre el espectro infrarrojo y el visible.

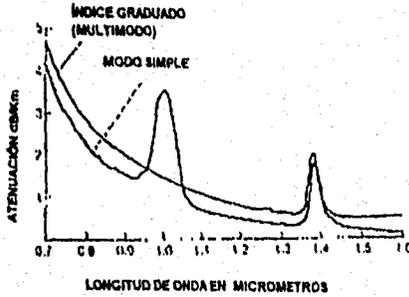


Fig. 4-9 Pérdidas en función de la longitud de onda,

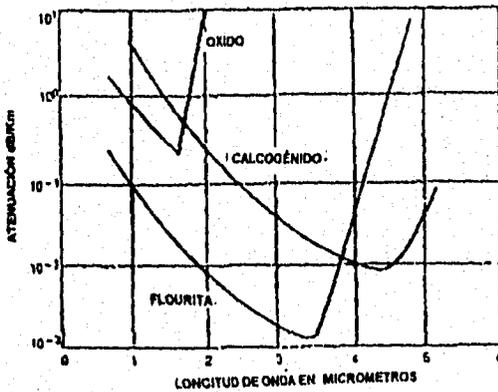


Fig. 4-10 Mínimos teóricos de pérdidas al Infrarrojo,

4.5.1 PÉRDIDAS INTRÍNSECAS

(a) *Dispersión*

A causa de aparición de gránulos de átomos o moléculas del vidrio de la fibra, el poder de transmisión de la fibra se ve disminuido sobre la superficie de la fibra, conocido este efecto como pérdidas Rayleigh.

El coeficiente de pérdidas del vidrio SiO_2 puede ser expresado por [5]:

$$2\alpha = \frac{A}{\lambda^4} \quad \dots(4.10)$$

Donde: $1/\lambda^4$ es el factor que caracteriza la dependencia a la longitud de onda.

Para SiO_2 $A = (8\pi^3)n^8p^2\beta kT$

Donde n = índice de refracción

p = coeficiente fotoelástico

β = compresibilidad térmica

k = coeficiente de Boltzman

T = temperatura absoluta

Si tomamos las impurezas del vidrio de sílice, las pérdidas de Rayleigh se incrementan debido a que las inhomogeneidades son relevantes, así también han sido observadas incrementos lineales en pérdidas con diferentes índices para las fibras GeO_2 -doped (fibras contaminadas con GeO_2) [6,7].

(b) *Absorción*

El proceso de absorción es relativamente cercana a los mecanismos de resonancia. Siempre una aplicación de energía óptica causa una transición cuántica entre los dos niveles de energía de los electrones del material de la fibra o los diferentes estados vibracionales de las moléculas, se dice que el sistema está en resonancia con la fuente.

La energía es absorbida por el sistema y se pierde eventualmente como **calor** o en otras formas. La absorción ocurre cuando:

$$\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} \quad \dots(4.11)$$

se mantiene.

Donde h = constante de Planck

c = velocidad de la luz en el vacío

E_1 y E_2 = son respectivamente la energía inicial y final de los estados electrónicos o estados vibracionales del material de la fibra. Una fuerte absorción electrónica ocurre las longitudes de onda del UV y IR la absorción vibracional llega a ser dominante.

El ultravioleta se absorbe en el extremo del rango de su longitud de onda por debajo de 1 micrómetro, la cual decrece exponencialmente con la longitud de onda [8]. Los valores típicos son 1 dB/km a 0.62 micrómetros y 0.02 dB/km a 1.24 micrómetros.

La absorción infrarroja es algo diferente [9], el extremo del infrarrojo se absorbe al rededor de 9-13 micrómetros como el resultado de la resonancia fuerte del sílice tetraédrico. En fibras típicas los picos de absorción son del orden de 10^{10} dB/km, Armónicas y combinaciones de esta vibración fundamental conduce a varios picos de absorción para longitudes de ondas cortas. Los picos importantes son al rededor de los 3 micrómetros con una pérdida de 5×10^4 dB/km, y 3.8 micrómetros con 6×10^5 dB/km. Los extremos de estos picos de absorción en valores típicos son de 0.02 dB/km a 1.55 micrómetros, 0.1 dB/km a 1.63 micrómetros 1 dB/km a 1.77 micrómetros. En las Figura 4-11 se observa las pérdidas en dB/km (atenuación), para diferentes longitudes de onda.

Recordemos que la transmitancia para una longitud l de la fibra es:

$$10^{-0.1 \tau l} \quad \dots(4.12)$$

Donde τ = coeficiente de atenuación (dB por unidad de longitud)

l = longitud en km.

por ejemplo: En 10m de fibra óptica con 25dB/km se tiene 6% pérdidas de la radiación solar.

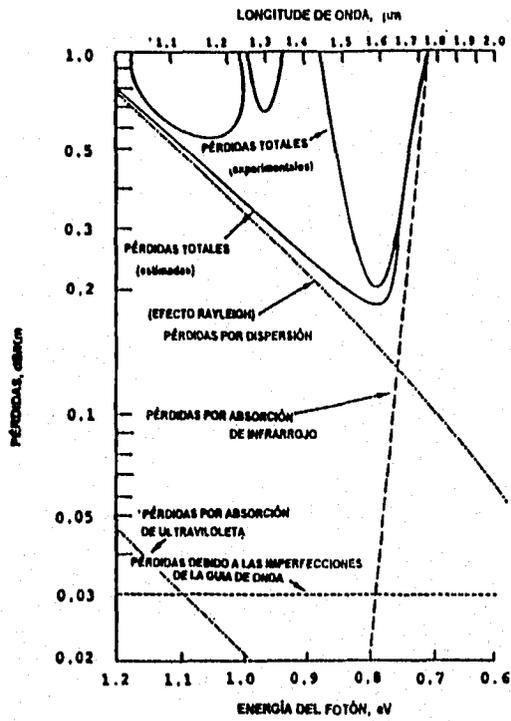


Fig 4-11 Espectro típico de la fibra óptica GeO₂-doped silica-glass.

(c) Contaminación del Material de la Fibra óptica.

La inclusión de contaminantes como iones metálicos y radicales (-OH) son causa de absorción por lo que reducen la eficiencia de la transmisión de energía solar por medio de la fibra óptica.

Iones Metálicos

Es muy difícil producir silica pura. Los metales de transición como cobre, hierro, níquel, vanadio, cromo y manganeso, son fácilmente hospedados en el material y los iones normalmente tienen absorción cerca o en el espectro visible. Los iones de metales de transición son formados durante la proceso de oxidación del vidrio y dejando incompleto la capa exterior electrónica [10]. Los picos de absorción provocados por estas impurezas son por debajo de 1dB/km. (Ion Fe, absorción en el rango de 1.1 micrómetros con impurezas de orden de 0.440 ppb).

Tabla 4.1 Iones Metálicos.

Ion *	Pico de absorción [μm]	Concentración [ppb]
Cu^{2+}	0.800	0.45
Fe^{2+}	1.100	0.40
Ni^{2+}	0.650	0.20
V^{3+}	0.475	0.90
Cr^{3+}	0.675	0.40
Mn^{3+}	0.500	0.90

*El estado de ionización del metal aplicado para cada uno de los datos esta indicado por el superíndice [10].

Radicales ($-\text{OH}$)

El agua es un indeseable contaminante de la fibra óptica, la presencia de esta contribuye a las pérdidas por la absorción vibracional en la fibra [11]. El OH radical del H_2O vibra a una frecuencia fundamental correspondiente a la longitud en el infrarrojo de 2.8 micrómetros, creando armónicas a 1.39, 0.95 y 0.725 micrómetros. Para una concentración de 1 ppm, la correspondiente atenuación por absorción es de 1dB/km a 0.95 micrómetros, 3dB/km a 1.24 micrómetros y 40 dB/km a 1.39 micrómetros.

4.5.2 PÉRDIDAS INDUCIDAS

Una simple gota de aceite (cuyo índice de refracción esta cercano al del vidrio) sobre una fibra puede modificar el comportamiento en el punto de reflexión ya que cambia el índice de refracción de un medio a otro y por lo tanto puede escaparse de una incidencia afuera del ángulo crítico.

Por otro lado también consideradas son las pérdidas debido a rayaduras, imperfecciones de la fibra, rangos de curvatura pequeño etc. ya que dan como resultado una distribución irregular que representa la respuesta espectral de una fibra óptica.

La buena alineación con la fuente luminica es un factor importante, ya que evita tener pérdidas por mala incidencia de los rayos así como la consideración del numero de apertura adecuado para una buena captación de la dispersión de la fuente [12].

REFERENCIAS (IV)

1. L. Eyges, P. Gianiou, and P. Wintersteiner, *Modes of dielectric waveguides of arbitrary cross sectional shape*. J. Opt. Soc. Am. (1979)
2. D. Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. Academic Press, New York, (1974)
3. S.E. Miller and A. G. Chynoweth, eds., *Optical Fiber Telecommunications*, G.B., (1980).
4. G. S. Landesberg; *Optics II*, Mir, Moscu, (1976).
5. I. L. Fabelisnkii. *Molecular Scattering of Lighth*. Plenum, New York, (1968).
6. P. Bachmann, P. Geitner, and H. Wilson, *The Deposition Efficiency for GeO₂-doped Single Mode and Step Index Fibers Prepared by Low Presures PCVD Process*. Eur. Conf. Opt. Comm. Proc. 8, 614-617, Cannes (1982).
7. D. A. Pinnow, T. C. Rich, F. W. Osterwager, and M. Dominico. *Fundamental Optical Attenuation Limits In The Liquid & Glassy State With Application to Fiber Optical Waveguide Material*. Appl. Phys. Lett. 22, 527 (1973).
8. D. B. Keck, R. D. Maurer, and P. C. Schultz. *On The Ultimate Lower Limit of Attenuation in Glass Optical Waveguides*. Appl. Phys. Lett. 22, 307-309 (1973).
9. T. Izawa, N. Shibata, and A. Takeda. *Optical Attenuation in Pure and Doped Fused Silica in IR Wavelength Regions*. Appl. Phys. Lett. 31, 33-35 (1977).
10. R. D. Maurer, *Glass Fibers for Optical Communication*, Proc. IEEE 61 452 (1973).
11. P. Kaiser, *Spectral Loses of Unclad Fibers Made From Hih-Grade Vitreous Silica*. Appl. Phys. Lett. 23, 45 (1973).
12. R. E. Iannini, *Built Your Own Working, Fiber Optic and laser Space-age Projelcs*. USA, TAB Books, 2724, (1987).

CAPÍTULO V

USO DE FIBRAS ÓPTICAS PARA EL TRANSPORTE DE ENERGÍA SOLAR.

INTRODUCCIÓN

Muchas restricciones existen en la construcción de sistemas usando el movimiento de las superficies reflectivas, con formas geométricas de variedad compleja; los problemas técnicos para la colección de energía después de su concentración de diez hasta cientos de estos no es nada fácil lograrla. Sin embargo, las dificultades llegan a ser formidablemente grandes cuando se requiere de muy altas concentraciones; existiendo la necesidad del uso de espejos parabólicos para obtener suficiente energía concentrada, los cuales deberán tener una gran apertura. Para aprovechar la máxima radiación es necesario mantener una exacta orientación del espejo y los rayos solares incidentes, para ello dos soluciones son posibles: seguir al sol directamente con el paraboloide (pero considerando su tamaño, su potencia entregada disminuye para poder realizar el seguimiento), o iluminar paraboloides fijos con uno o varios espejos planos rotatorios actuando como helióstatos (se permite el uso de receptores fijos para la reflexión en los helióstatos produce pérdida de energía).

En ambos casos la alta concentración requieren de receptores mas abiertos de lo que deberían ser, consecuentemente grandes pérdidas por radiación y convección ocurren, de esta manera es difícil obtener temperaturas homogéneas desde el punto focal del espejo.

Por estas razones las altas temperaturas en hornos solares se han logrado tan solo en dispositivos de laboratorio. Los conductores de luz ofertarian una interesante solución a estos problemas haciendo ellos posible la aplicación de alta energía solar concentrada para producir altas

temperaturas en condiciones bastante convenientes para permitir su generalización.

Robieux [1] fué el primero en sugerir el uso de grandes espejos parabólicos asociados con guías de luz rígidas; los conductores de luz especialmente las fibras ópticas han incrementado su desarrollo principalmente en telecomunicaciones [2-4] y han involucrado la producción especial de materiales transparentes puros; dichas fibras con pérdidas de tan sólo unos pocos dB/km y cuyos diámetros son pequeños, así como también muy largas, transparentes y conductoras de luz que pueden recibir y transmitir alrededor de 10 watts de energía radiativa sin calentamiento y consecuentemente sin daños en sus propiedades.

El objetivo de este proyecto es detallar la investigación en la realización del estudio de la Interacción de energía solar concentrada con fibras ópticas.

En la primera parte nosotros consideramos las condiciones teóricas y las restricciones impuestas por el sol y las propiedades de la fibra óptica en la construcción de un dispositivo para el transporte de energía solar. La segunda parte describe el resultado obtenido con un prototipo montado, nosotros concluimos con un investigación de varias aplicaciones, las cuales no están necesariamente limitadas a la producción de muy altas temperaturas.

5.1 RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN.

Para facilitar la utilización de la energía solar, se determinaron las condiciones de su transporte en fibras ópticas. En primer lugar se estudiaron la asociación entre la fibra y el concentrador, y también las propiedades de la fibra en condiciones particulares de utilización. Como lo demostramos, un módulo, que hemos realizado asociando una fibra y un pequeño espejo parabólico, permite alcanzar la potencia de 2 watts con un rendimiento superior a 70%. La concentración sobre la cara de salida de una fibra con una longitud de una decena de metros, supera el valor de 3000. Los resultados experimentales obtenidos en tales condiciones están en buen acuerdo con los primeros estudios. En esta investigación describimos las posibles aplicaciones y los desarrollos futuros de manera general.

5.2 APROXIMACIÓN FÍSICA DEL PROBLEMA.

5.2.1 Análisis de las restricciones físicas cuando usamos fibras ópticas para conducir energía solar.

Dos puntos esenciales han tenido que ser explorados: cómo los materiales de la fibra son capaces de transmitir la radiación solar a una cierta distancia y qué características de la fibra juegan una importante parte en la colección de la energía solar.

(a) Propiedades de transmisión de los materiales de la fibra. A causa de el uso de longitudes de onda particulares en los dispositivos de emisión de luz en telecomunicaciones, los materiales que constituyen las fibras — vidrio, sílice o plástico — se han desarrollado para proveer una mínima absorción alrededor de los $0.8 \mu\text{m}$ o cerca de la longitud de onda infrarroja. Así pues la manufacturación ha sido dirigida a purificar estos materiales tanto como sea posible, tomando particular cuidado para evitar la presencia hierro e iones (OH^-).

Usando sílice sintético fundido el cual alcanza atenuaciones de solo unos cuantos dB/km para el rango del espectro ya mencionado; el promedio de transmitancia de la radiación solar total de la longitud de la fibra (I) puede ser escrita como:

$$I = I_0 10^{-10 \tau l} \quad \dots(5.1)$$

aún usando un coeficiente promedio de atenuación τ en dB por unidad de longitud.

Kato y Nakamura [5] han estudiado la capacidad teórica de transmisión de radiación solar por medio de fibras ópticas; ellos encontraron que con la sílice fundida es posible obtener un promedio de atenuación correspondiente a 25 dB/km, por ejemplo pérdidas de 6 por ciento después de 10 metros de trayectoria recorrida.

La Figura 5-1, compara una curva típica de atenuación para una fibra comercial [6] contra el espectro solar. Se puede observar que solo

longitudes de ondas muy cortas son altamente atenuadas, como la longitud de onda infrarroja; también puede compararse las bandas de absorción de la fibra con las longitudes de onda que han sido absorbidas por la atmósfera.

Si nosotros nos proponemos conducir la energía solar desde el colector a una parte cercana por medio de la utilización de un dispositivo de fibras ópticas, solo será necesario unos cuantos metros de longitud y solo se perderá una pequeña parte de la energía.

(b) Condiciones de admitancia de los rayos solares dentro de las fibras. Una fibra índice de paso (step index) está constituida de un material muy transparente tan delgado como un hilo, llamado "núcleo" (core) y envuelto por otro material transparente llamado cubierta (cladding), con índice refractivo n_2 ligeramente más pequeño que el índice n_1 , del anterior. Generalmente para asegurar la protección de la fibra se agrega una cubierta plástica envolvente.

Si ciertas condiciones de incidencia son cumplidas, un rayo viajará dentro del núcleo de la fibra sometido a una total reflexión en la superficie que separa el núcleo y su cubierta, ya que éste es propagado a largo de la fibra sin adicionar pérdidas junto aquellas ya previstas. En ambos extremos existe un ángulo crítico de incidencia necesario para que ocurra las reflexiones totales dentro del núcleo.

En la Figura 5-2 se muestra la trayectoria que sigue un rayo en el núcleo; es fácil mostrar que este rayo sólo es reflectado si su ángulo de incidencia es menor que:

$$\theta_m = \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \dots(5.2)$$

Para introducir tanta energía como sea posible de la concentración en la fibra, es necesario considerar la apertura de los rayos concentrados y la apertura de incidencia de la fibra; ya que una limita a la otra, por lo tanto es importante escoger fibras con una apertura tan grande como sea posible para asegurar una mayor colección de energía solar; por ejemplo, los índices refractivos deberán ser tan diferentes como sea posible.

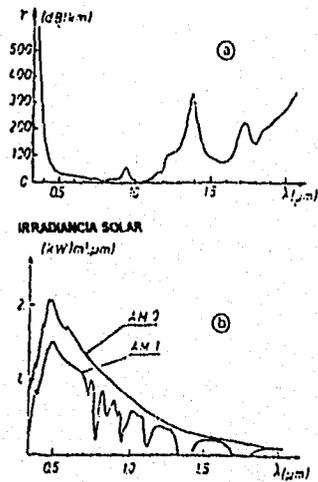


Fig. 5-1 a) Curva típica de transmisión de una fibra comercial
b) comparada con la radiación solar.

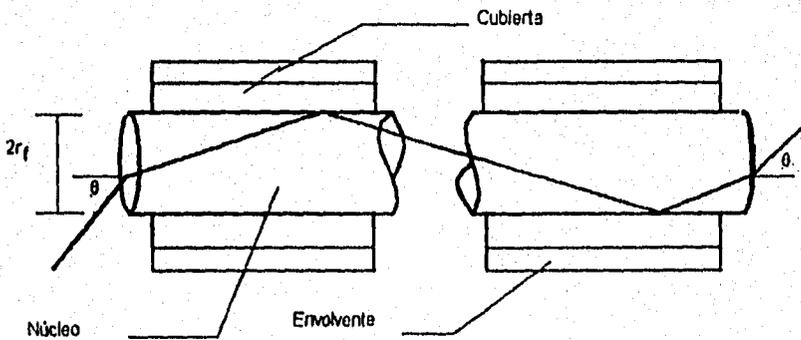


Fig 5-2 Trayectoria de la luz en una fibra indice de paso (step index).

La Figura 5-3 representa la apertura angular θ_M teórica como una función de $\Delta n = n_1 - n_2$ que es la diferencia de ambos materiales, para los tres valores el índice de refracción media es: $n = (n_1 + n_2)/2$.

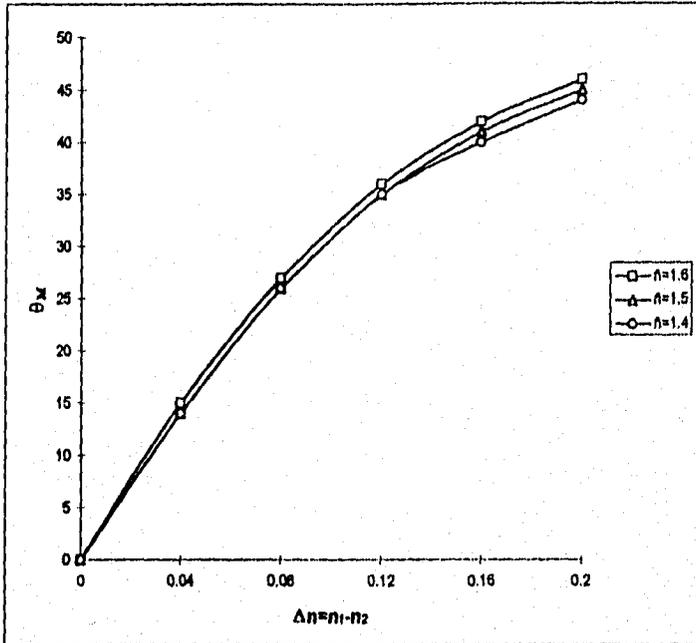


Fig. 5-3 Variación teórica de la apertura angular de la fibra vs. la diferencia de los índices para varios valores de $n = (n_1 + n_2)/2$

Si se removiera la cubierta y la envoltura del núcleo de la fibra esta sería capaz de aceptar todos los rayos que llegan a su entrada y cualquiera de estos podrá incidir; la superficie desnuda del vidrio sin embargo sería muy difícil de mantener perfectamente limpia, y muchas microscópicas ralladuras aparecerían y el total de las reflexiones a lo largo de la fibra serían fuertemente afectadas.

La cubierta y envoltura son necesarios para conformar la fibra óptica; y como es difícil encontrar materiales transparentes para el núcleo y la cubierta, con índices muy diferentes, la apertura angular de la fibra es normalmente pequeña, aproximadamente de 20° para sílica fundida, y de 35° para cubiertas de silicón, así también es posible encontrar fibras vidrio-

vidrio con ángulos de apertura grande pero su transmitancia es casi siempre mala.

(c) Asociación Concentrador-Fibra Óptica. Examinemos ahora como el concentrador puede ser asociado con las fibras; el problema consiste en colocar un extremo de la fibra en el foco del concentrador de acuerdo a la idea de introducir tanta energía como sea posible.

La dimensión de la apertura estará limitada, para un espejo parabólico el punto focal estará relacionado al radio:

$$r_g = fe_0 \quad \dots(5.3)$$

donde f es la distancia focal del espejo y $e_0=16'$ que es el radio angular del sol.

Los espejos parabólicos normalmente tienen una distancia focal grande y consecuentemente los valores de r_g son mucho mas grandes que el radio interior de las fibras comunes. Para capturar la mayor parte de la energía es conveniente usar un grande y bien apropiado diámetro de la fibra; como el dispositivo no tiene flexibilidad no puede permitir el movimiento del concentrador hacia el sol mientras mantenga un receptor fijado al otro extremo.

Otra posibilidad podría ser juntar varios extremos de fibra en el punto focal y así el paquete coleccionará toda la energía concentrada, Sin embargo la sección transversal de una fibra incluye no sólo el núcleo sino también la cubierta y la envoltura, si la envoltura es removida y la fibra es convenientemente colocada en un orden compacto, la cubierta y el espacio entre las fibras dejan una parte no usada en la sección del paquete.

Los rayos concentrados los cuales caen en el espacio entre el núcleo de la fibra son perdidos y queman la cubierta la cual es frecuentemente hecha de plástico. La Figura 5-4 muestra la fracción de energía $\Delta E/E$ la cual deberá perderse en tal arreglo contra la razón del radio de la cubierta dividido por el radio del núcleo e/r_f .

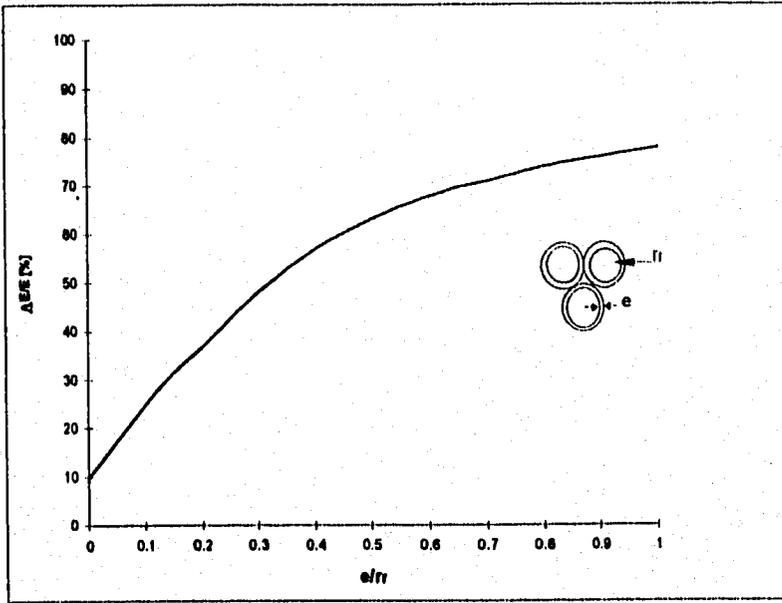


Fig. 5-4 Pérdidas relativas de energía en un arreglo close-packed de fibras.

Para coleccionar la energía solar las mejores condiciones parece ser necesario asociar solo una fibra con un concentrador dimensionado por la imagen del sol, la cual deberá cubrir el tamaño del núcleo de la fibra (Fig. 5-5). Sin embargo, puesto que las dimensiones características de la fibra son pequeñas las del concentrador también serán pequeñas.

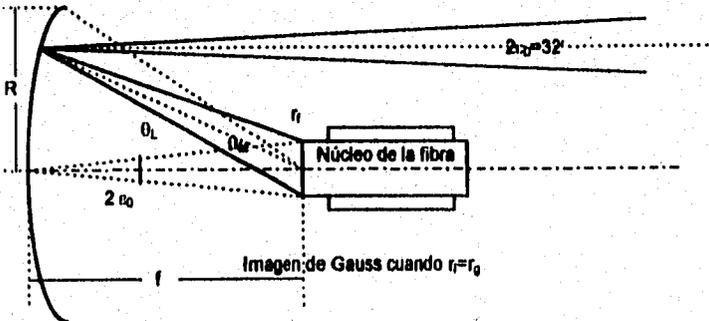


Fig. 5-5 Asociación fibra-espejo.

5.3 IMAGEN DEL SOL Y ENERGÍA CAPTURADA.

(a) Condiciones ideales para la focalización. La imagen del sol proyectado por un espejo parabólico tiene irradianza la cual varía desde el centro a la orilla, esta distribución radial depende de la apertura del espejo.

Para determinar la energía recuperable por la fibra, es necesario determinar exactamente la irradianza en cada punto alrededor del foco, usando la misma luz solar tan cercana como sea posible a la realidad.

De las mediciones de Abbot [7] para diferentes longitudes de onda, algunos modelos analíticos de iluminancia (Del latín lumen, luminis llamada también brillo o esplendor; que es la intensidad luminosa que presenta la unidad de superficie en dirección normal de un manantial extenso.) han sido propuestos y con la ayuda de un disco uniforme el cual permite una rápida pero no detallada evaluación. Jose [8] y Kamada [9] han usado su propio modelo; utilizando los datos experimentales basándose también en el modelo anterior y el método de trazado de rayos descrito por Daly [10].

Para nuestro problema es necesario conocer que parte de ϕ_r del total de energía ϕ_T que pasa a través del punto focal que nosotros podríamos capturar en la fibra, el radio r_f (radio de la fibra) es un parámetro que determina dicha captura. La Figura 5-6 muestra la razón $\phi_r/\phi_T = \alpha$ contra r_f/r_g para varios colectores y varios ángulos de apertura de las fibras; como puede observarse para r_f/r_g se llega a coleccionar poco más del 95% de la energía reflejada por el espejo.

Otro importante parámetro es la variación del promedio de concentración C de la energía solar en el extremo de entrada de la fibra contra su radio. Este está representado en la Figura 5-7 para una apertura de 20° y algunos valores cercanos a éste.

La figura permite hacer dos observaciones importantes: la primera es para un diámetro de fibra dado, la concentración de la energía transportada se incrementa cuando la apertura se incrementa. Esto se puede observar más fácilmente en la Figura 5-8, la cual muestra que al pasar de 20 a 30° de apertura se incrementa esta concentración con un factor más grande que 2. Esta simple observación promovería la investigación en fibras con apertura más grande.

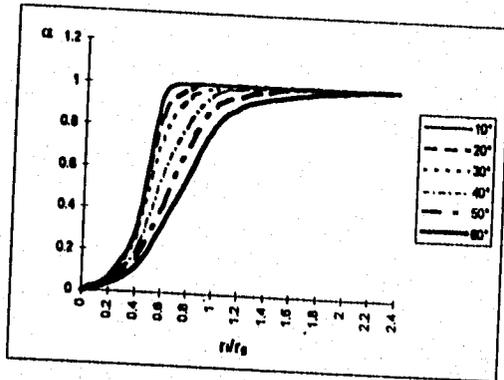


Fig. 5-6 Fracción de la energía colectada por el extremo de la fibra vs su radio relativo.

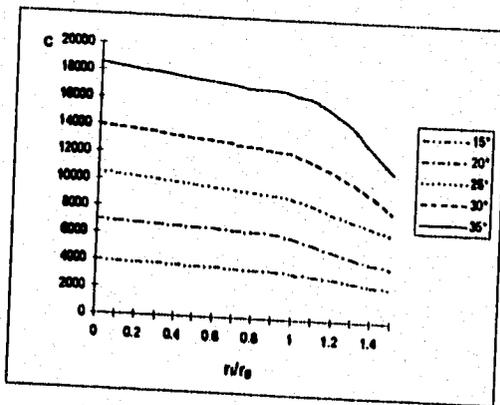


Fig 5-7 Concentración promedio en el extremo de entrada de a fibra vs su radio relativo.

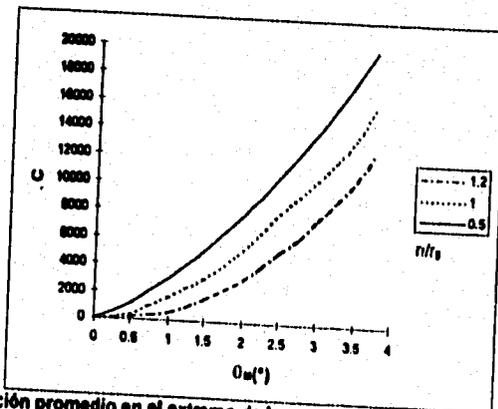


Fig 5-8 Concentración promedio en el extremo de la entrada de la fibra vs la apertura del espejo.

La segunda observación trata el relativo aumento en el promedio de concentración cuando la fibra es más pequeña que el punto focal, resultado de la alta irradianza del centro del punto focal. La pregunta a resolver es entonces: ¿Qué tan grande podrá ser la densidad de flujo en la fibra sin pérdidas considerables de energía y que también es tolerada a la entrada?

El aumento del promedio de la concentración es casi independiente de la apertura alrededor de los 20°. Este resultado está mostrado en la Figura 5-9 en la que se reporta $(C-C_g)/C_g$, donde C_g es la concentración media cuando el diámetro de la fibra coincide exactamente con el radio de la imagen del sol.

Otra interpretación a este resultado es que el promedio de la concentración C en disco de radio r_f puede ser escrito como:

$$C = C_0 \beta \quad \dots(5.4)$$

Donde $C_0 = \sin^2 \theta_M / \epsilon_0^2$ es la concentración en la imagen Gaussiana del sol de manera uniforme.

$$\beta = \frac{1}{\cos^4 \theta_M / 2} \frac{\alpha}{(r_f / r_g)^2} \quad \dots(5.5)$$

En la Figura 5-10, se esquematizan los valores previamente calculados de α y la variación de β .

Este coeficiente se incrementa cuando r_f/r_g decrece y no depende de la apertura del espejo, tan larga como r_f y que es menor que r_g . En este rango es éste siempre mas grande que 1 y alcanza el valor de 1.255, el cual corresponde a la razón de B_0/B de la iluminancia real en el centro de la imagen del sol de su iluminancia promedio.

(b) Efectos de los errores de Alineamiento del Sistema. Por ahora nosotros consideramos que el eje del espejo está perfectamente apuntado en la dirección del sol y que la fibra también está situada en el foco del espejo; si bien el ajustar la fibra en su posición se puede ejecutar mecánicamente tan bien como sea posible y después ser fijada, el alineamiento preciso del espejo dependerá del sistema de seguimiento

solar (track system). Esta falta de precisión promedio de la imagen del sol no es tan grande a lo largo del eje focal del espejo.

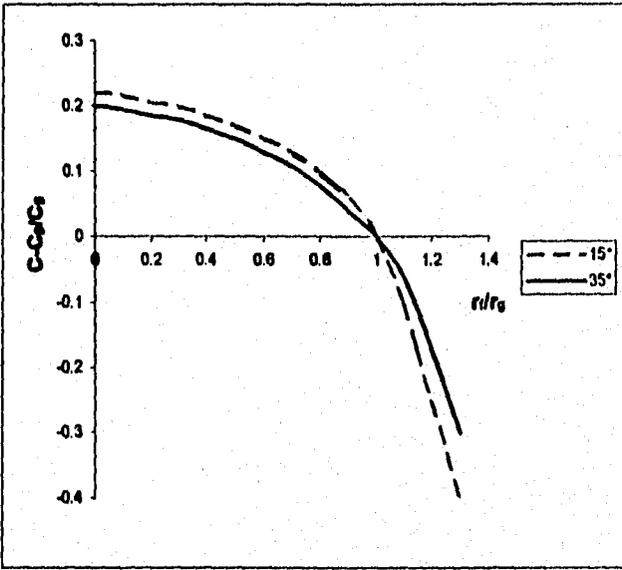


Figura 5-9 Concentración relativa vs radio de la fibra para dos diferentes aperturas del espejo.

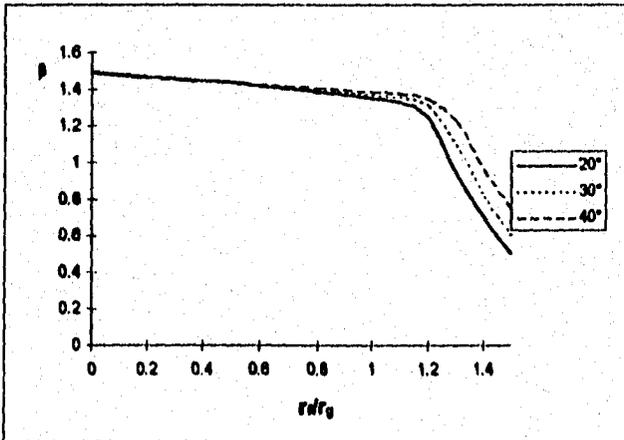


Fig 5-10 Variación de β vs radio de la fibra.

La Figura 5-11 muestra los efectos de los errores de alineamiento en la concentración media para un espejo de 20° de apertura.

El caso menos favorable aparece cuando el extremo de la fibra coincide exactamente con la imagen Gaussiana, mientras un mejor margen es establecido si el diámetro de la fibra es más grande o más pequeño. Disminuir el tamaño de la fibra parece ser más interesante ya que requerirá menor precisión en su alineamiento en el dispositivo.

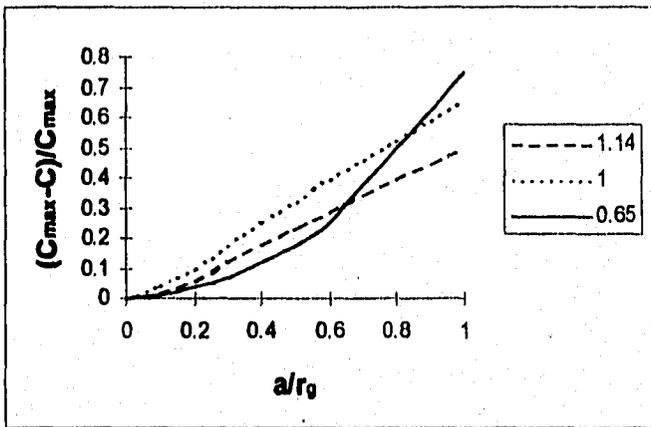


Figura 5-11 Pérdidas relativas de concentración con el error puntual a/r_0 o el error angular puntual.

(c) **Efectos de mala focalización.** El rayo reflejado desde el espejo tiene una mínima sección de área en el plano focal y la dispersión aumenta tanto como uno se aparte de la posición ideal; es importante determinar los efectos de una mala colocación del extremo de la fibra con el plano focal en la concentración promedio. La Figura 5-12 muestra los resultados calculados para una fibra de 20° de apertura. (Nótese que una vez más es interesante el uso de fibras con dimensiones más pequeñas).

(d) **Pérdidas de Concentración asociada a efectos en el espejo.** Por último la causa de pérdidas se deberán a la calidad y geometría del espejo. Es difícil determinar y tomar en cuenta matemáticamente las imperfecciones del espejo. Una vía es modificar la orientación de la perpendicular en cada punto del espejo por una cantidad aleatoria,

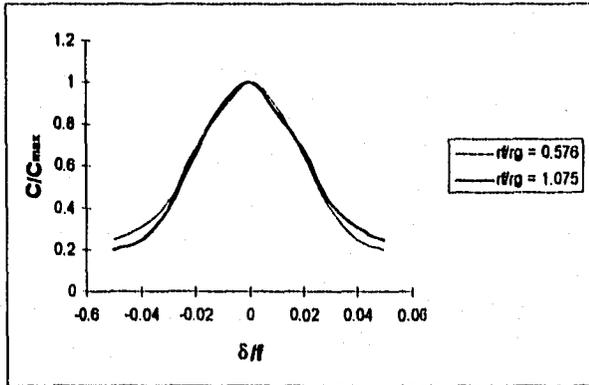


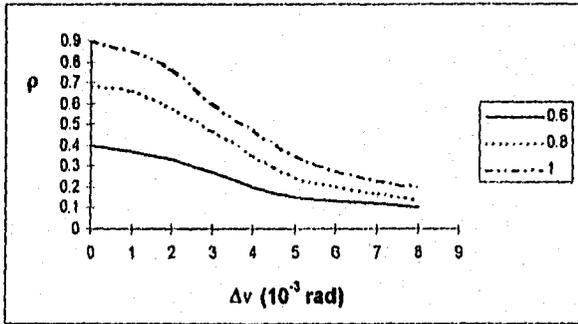
Fig. 5-12 Pérdidas de concentración relativa δ en el extremo final de la fibra.

escogiendo en un rango limitado, el cual corresponde a la amplitud de las imperfecciones del espejo. Estudiamos los efectos de cada desviación, determinados por el método Monte Carlo entre los rangos de repartición Gaussiana para ajustarse mejor a la realidad. La Figura 5-13 representa la fracción $\phi_{rf}/\phi_i = \phi$ de la energía colectada que pasa a través de un disco de radio r_f contra la desviación Δv (en amplitud) para varias razones de r_f/r_g ; calculadas para espejos de apertura de 20° . Así, los defectos de espejos reales están siguiendo más bien una distribución Gaussiana, con tan sólo una amplitud de desviación menor que 10^{-3} radianes como tolerancia.

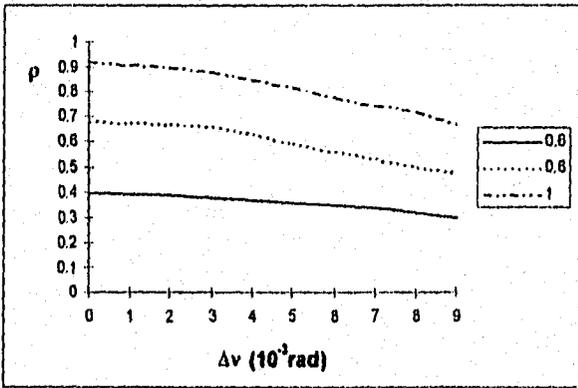
5.4 ENERGÍA DISPONIBLE A LA SALIDA Y LA EFICIENCIA DEL SISTEMA.

Los efectos de pérdidas de transmisión a lo largo de la fibra y la energía que es posible capturar en el foco del espejo parabólico, han sido hasta ahora considerados separadamente. La región de admisión de rayos en el extremo de la fibra es un cono cuyo ángulo es θ_M ; a la salida la luz aparece en un cono divergente con el mismo ángulo. Para determinar la energía disponible podemos utilizar este haz lumínico, además de tomar en cuenta las pérdidas por reflexión en el espejo y las pérdidas de reflexión tipo Fresnel en cada extremo de la fibra.

Lo anterior depende al mismo tiempo de las cualidades de la superficie del espejo y la naturaleza de su metalización.



(a)



(b)

Fig. 6-13 Pérdidas calculadas de concentración relativas debido a desviaciones aleatorias de la normal en cada punto del espejo.
 (a). Distribución cuadrática.
 (b). Distribución Gaussiana.

Las pérdidas de tipo Fresnel son inherentes en el paso de la luz a través de la separación entre las dos superficies transparentes. Si uno de estos medios es el aire y otro es vidrio, sólo un pequeño porcentaje de la energía incidente es reflectada tanto como el ángulo de incidencia quede por debajo de 50° [11].

Ahora podemos evaluar la eficiencia, la cual puede ser obtenida por la transferencia de energía solar. Denominamos a R la reflectancia del espejo, F las pérdidas de reflexión tipo Fresnel en cada extremo de la fibra. Definamos ahora r la fracción de energía focalizada, la cual topa en el

extremo de la fibra. Este factor r al mismo tiempo considera el tamaño de la fibra relacionado al parámetro α y los efectos de eventuales defectos en su entrada, pero este nuevo factor depende de factores anteriormente vistos y no es posible tratarlo por separado como si se tratara de dos parámetros independientes.

Así, la eficiencia en el transporte está dado por:

$$\rho = R\gamma(1-f)^2 10^{-0.1\tau l} \quad \dots(5.6)$$

y la concentración en la salida de la fibra

$$C_s = CR(1-f)^2 10^{-0.1\tau l} \quad \dots(5.7)$$

Si hacemos $\gamma = \alpha$, omitiendo las otras pérdidas.

En la expresión C solo depende del ángulo de apertura de la fibra y de su diámetro; el efecto de su longitud está tomado en cuenta en el último factor mientras que $R(1-f)^2$ representa las pérdidas por reflexión inherentes al sistema. La concentración en una sección del cono de luz alejado de la salida se deduce de C_s .

Para obtener una evaluación numérica de la eficiencia y la concentración final podemos tomar valores aproximados: R igual a 0.9 para la reflectividad de una espejo relativamente bueno, f igual a 0.05 para las pérdidas reflectivas tipo Fresnel, τ igual a 30 dB/km y una longitud de la fibra de 10 m.

Utilizando lo anterior $\phi/a = 75.8$ por ciento, pero esto significa que la eficiencia es $\rho = 75.8$ por ciento si $\alpha = 1$, por ejemplo si el diámetro de la fibra es suficiente para coleccionar toda la energía concentrada. Sin embargo en tal caso, la concentración C es necesariamente menor que la concentración C_0 en la imagen Gaussiana del sol. Para una apertura de 20° es necesariamente un mínimo de $r_f = 1.1r_g$ y entonces

$$C = 0.9 \frac{\text{sen}^2 20^\circ}{\epsilon_0^2} = 4860 \quad \dots(5.8)$$

La Tabla 5.1 compara la concentración final C_s la cual puede ser esperada a 10 m de longitud, la atenuación media es τ 30, 50 y 100 dB/km.

Dos casos han sido previstos con una buena fibra de dimensiones pequeñas y muestran la importante ganancia en concentración.

Hemos puesto lado a lado los valores obtenidos para ambas aperturas angulares $\theta=20$ y 30° para ilustrar el interés en el uso de fibras con aperturas tan grandes como sea posible o bien la calidad de la transmisión.

Este estudio preliminar nos guía a concluir que es posible transportar energía solar a unos cuantos metros de distancia en condiciones suficientemente buenas, con una eficiencia la cual puede anticipar un nuevo desarrollo de sistemas de alta concentración de energía solar.

Tabla 5-1 Concentraciones finales calculadas.

τ (dB/km)	ρ/α (%) $l=10m$	C_s			
		Flujo sin pérdidas $\alpha=1$		Flujo con pérdidas $\alpha=0.4$	
		$\theta_M=20^\circ$ $r_f=r_a$	$\theta_M=30^\circ$ $r_f=r_a$	$\theta_M=20^\circ$ $r_f=r_a$	$\theta_M=30^\circ$ $r_f=r_a$
30	75.8	3680	7000	4910	10,500
50	72.4	3510	6685	4690	10,030
100	64.5	3130	5260	4180	8930

5.5 ESTUDIO EXPERIMENTAL.

5.5.1 Pruebas al Sistema.

Para el método de verificación de los resultados teóricos establecidos, fué necesario la construcción de un dispositivo constituido esencialmente por un espejo y un soporte sujetador de la fibra. El esquema se muestra en la Figura 5-14.

El espejo es de vidrio con forma geométrica de un paraboloide y cubierta de plata o aluminio con 6.7 cm de diámetro y 10 cm de distancia focal, el sujetador de la fibra está constituido por tres barras delgadas las cuales

están soldadas a una chumacera con tornillo ajustable para asegurar el mejor ajuste del extremo de la fibra en el plano focal del espejo y para

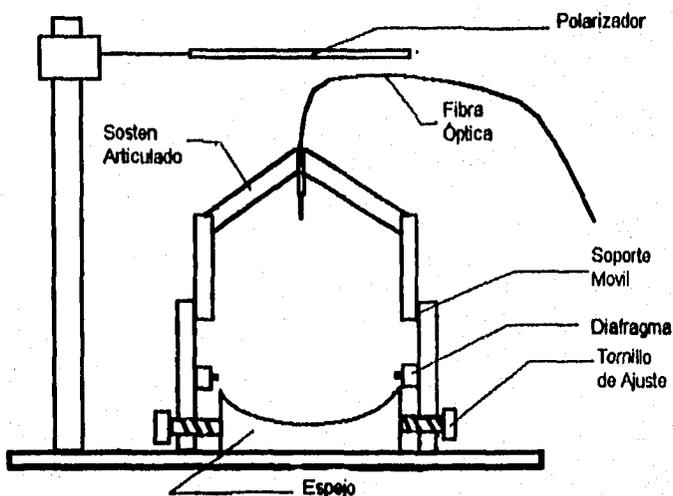


Fig. 6-14 Diagrama esquemático del sistema probado.

medir los efectos de determinados parámetros. Un diafragma es colocado frente al espejo para cambiar la apertura angular del rayo incidente. Finalmente, dos membranas polarizadoras rotatorias (polarizador) son colocadas por encima de todo el sistema para reducir la intensidad de la incidencia solar y hacer posible mirar el sistema para su ajuste sin sufrir daño a la retina o quedar simplemente deslumbrado.

Es importante recordar que la alta concentración de rayos ocurre en el punto focal y puede ser riesgoso para el ojo humano concentraciones de UV o IR, que degenerarían las células fotosensibles del mismo.

El sistema está soportado por un sistema mecánico de seguimiento solar semejante a un reloj que permite seguir el sol en su recorrido por la bóveda celeste.

Se probaron fibras con un núcleo de sílice de 1 mm y 0.6 mm de diámetro manufacturadas por Quartz and Silice Co.; su cubierta es de resina de

silicone con índice refractivo de $n_2=1.405$ para la recina de silicone y $n_1=1.4585$ para el núcleo de sílica. Su ángulo teórico de apertura es 23° pero solo está garantizado para 20° . Su curva de transmisión se dió en la Figura 5.1.

Antes de ser colocados en el sistema ambos extremos fueron pulidos cuidadosamente. Para medir la energía que está disponible, su extremo de salida se introdujo en un radiómetro piroeléctrico (pyroelectric radiometer; Laser Precision Corp Rk 5100), el cual emplea dos anillos concéntricos que sirven como juntas caliente y fría para una termopila de 50 elementos. Los anillos se revisten de blanco y negro con objeto de producir una diferencia de temperatura cuando se exponen a la radiación solar. Se usa sulfato de bario como agente blanqueador, y el ensamble se recubre con una cubierta hemisférica de vidrio que transmite la radiación desde 280 a 2800 nm. La sensibilidad típica del aparato es $7.5\text{mVcm}^2 \text{ min/cal}$ o $107.5 \text{mVcm}^2/\text{W}$ y presenta una amplia respuesta al rango total del espectro solar.

5.5.2 Resultados Experimentales

(a) *Efectos de la Apertura Angular y la Atenuación de la fibra.* La Figura 5-15 muestra el flujo ϕ_S transmitido contra el área iluminada del espejo. Esta área fué tomada sin el sombreado provocado por la fibra y su soporte.

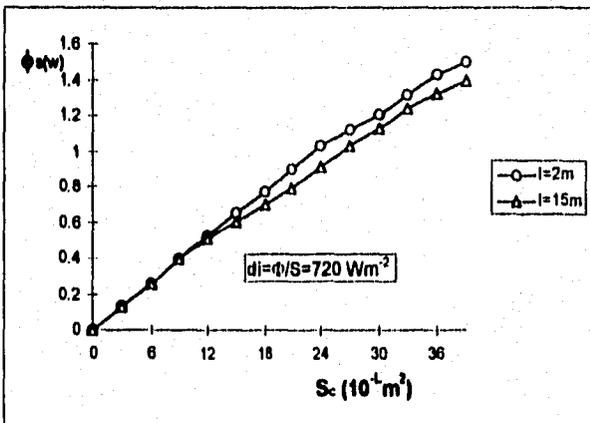


Fig 5-15 Flujo transmitido vs área iluminada del espejo para dos diferentes longitudes de fibra.

Al parecer la transmitancia de la fibra depende de la apertura del rayo; este resultado puede ser interpretado con las pérdidas de reflexión, las cuales inevitablemente existen en la reflexión total a lo largo de la fibra y la cual aumenta cuando el rayo incidente está muy abierto.

La atenuación puede ser dividida en dos partes: la primera debido a las cualidades del material del núcleo, solo depende de la longitud y que es la que nosotros consideramos en nuestra investigación teórica, la segunda depende de la apertura del rayo incidente sobre el número de reflexiones dentro de la fibra y consecuentemente en la longitud de la fibra. El coeficiente de atenuación media τ no es una característica intrínseca de la fibra pero tiene que ser tomada como una función $\tau = \tau(\phi, l)$.

Valores aproximados de τ para una distancia corta de tan sólo 10 metros son fácilmente obtenidos, la Figura 5-16 presenta este coeficiente; obsérvese que la atenuación en el núcleo, la cual es obtenida para aperturas pequeñas, es menor a 20 dB/km de acuerdo con las evaluaciones previas. Sin embargo, cuando la apertura angular se incrementa y llega más grande que 15° , la atenuación se incrementa rápidamente y excede a los 50 dB/km.

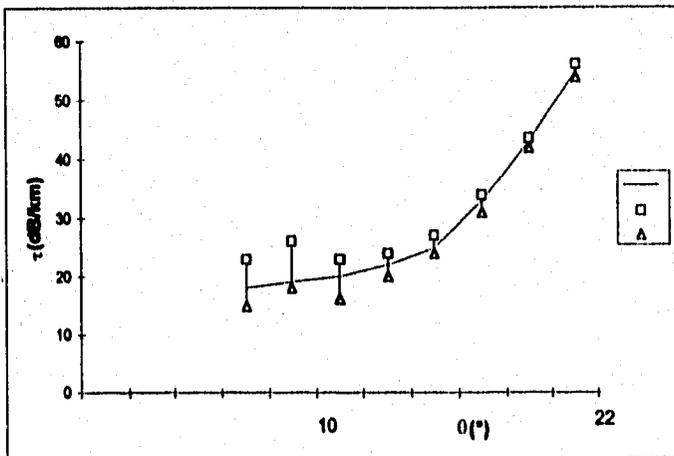


Fig 5-16 Atenuación promedio del coeficiente de variación de la fibra vs apertura del rayo incidente.

(b) **Efectos en el Diámetro de la fibra.** La Figura 5-17 muestra los resultados obtenidos con dos fibras de aproximadamente 5.5 m de longitud; la curva superior corresponde a una fibra de diámetro de 1 mm y la inferior a uno de 0.6 mm también de diámetro.

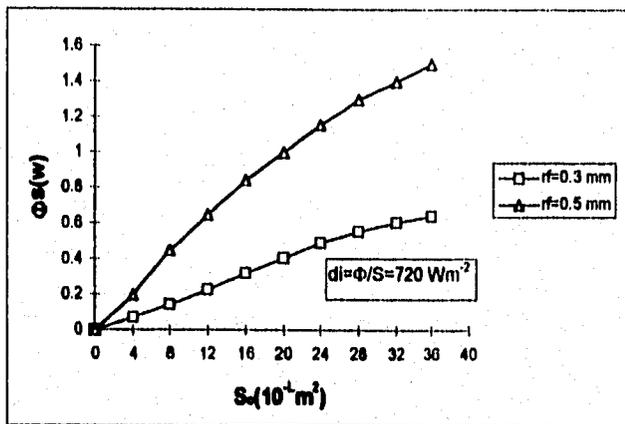


Fig 5-17 Flujo Transmitido vs Área Iluminada del espejo para dos diferentes diámetros de fibra.

Teóricamente como se puede ver en la Figura 5-6, la sección anterior permite la interpretación de la energía total colectada que corresponde a $r_f/r_g = 1.075$ mientras una cantidad importante de energía se pierde con la fibra de 0.3 mm de radio r_f , la razón r_f/r_g siendo tan sólo de 0.645.

En la Tabla 5.2 se capturan los valores de la medición de α con la segunda fibra para varias aperturas, suponiendo que α cumple con las condiciones teóricas. La excelente concordancia la cual es observada que confirma esta hipótesis, esto también confirma que el punto focal dado por el espejo tiene una distribución de irradianza la cual concuerda muy bien con la calculada.

Además, esto muestra que las fibras pequeñas tienen una ligeramente menor transmitancia que las más gruesas de apertura grande. Esto es debido al gran número de reflexiones dentro de una fibra pequeña.

Tabla 5.2 Fracción de la energía total colectada usando fibra de 0.6mm de diámetro ($\alpha = \phi_r / \phi_T$).

α	0M	10°	15°	17°	20°
Teórico		0.480	0.475	0.472	0.465
Medido		0.50	0.48	0.47	0.44

(c) **Reflectividad del espejo.** la mayor parte de los resultados han sido obtenidos del uso de un espejo de cubierta aluminizada. Este valor medio de su reflectividad a lo largo de la cantidad solar recibida pudo ser evaluado en 0.80.

Sin embargo, para observar y verificar la colocación y el cálculo de la eficiencia usamos inicialmente un espejo de cubierta de plata cuya reflectividad es 0.95. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos para varias aperturas y una fibra de 1 mm de diámetro y 2 mm de longitud.

El valor medio de la porción de energía de la misma fibra después de la concentración con ambos espejos y un mismo flujo incidente es 0.866, la cual cumple con la razón de su respectiva reflectividad 0.842.

(d) **Efectos por mala focalización.** Las mediciones del resultado de variación de flujo en la entrada de la fibra fueron deliberadas al poner fuera de foco a la fibra con respecto al eje del espejo. El resultado está graficado en la Figura 5-18 (a,b), para fibras de diámetro de 1 mm y 0.6 mm. Es sorprendente observar que ambos casos casi todos los resultados experimentales se apegan bien a los ya calculados; esto significa que el espejo da una mayor concentración de rayos mas cercano a su eje.

(e) **Potencia transportada y medición de la eficiencia.** Como puede ser visto en la Tabla 5.3 el máximo valor de flujo a la salida de la fibra es 2 W cuando el flujo incidente es 830 W/m² y utilizando un espejo con recubrimiento de plata. Esto significa que un flujo solar de 1 kW/m² es disponible, 2.41 W puede ser obtenido en el punto final de la fibra, mientras que llegaría a ser 3.26 W fuera de la atmósfera terrestre.

Estos valores respectivamente obtenidos con distintos flujos a la salida de la fibra son 255, 307 y 415 W/cm².

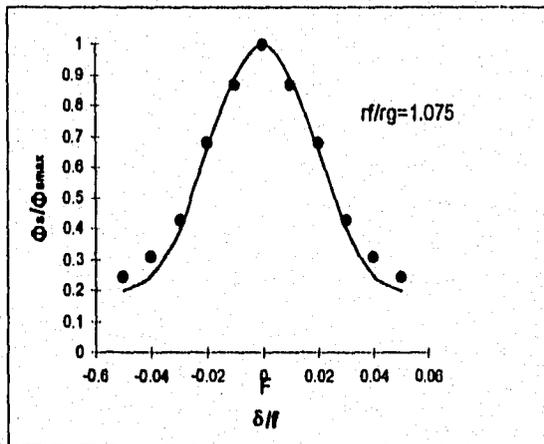
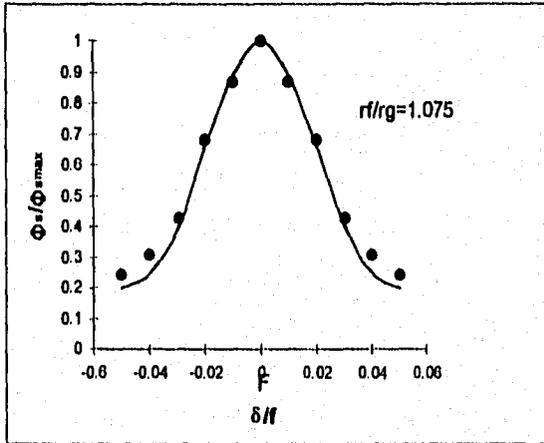


Fig 5-18 Flujo relativo de salida vs la focalización del extremo de la fibra (línea lina: curva calculada; puntos: resultados experimentales).
 (a) para una fibra de diametro de 1 mm.
 (b) para una fibra de diametro de 0.6 mm.

Estos valores, si bien ellos son los más largos no corresponden a la mejor eficiencia del sistema ya que la transmitividad de la fibra es mala por las grandes aperturas de los rayos de entrada. Nosotros reportamos en la

Figura 5-19 las diferentes mediciones de la eficiencia ρ para distintas aperturas angulares (para fibras de un 1 mm de lámetro, y considerando $\alpha=1$). Para una apertura de 18.5° la eficiencia obtenida con un espejo de plata y 5.5 m de longitud de fibra fué 81 por ciento y 73 por ciento para 15 m de fibra. Estos valores concuerdan para una reflectividad del espejo de 0.94, pérdidas de tipo Fresnel 0.04 y $\tau=50$ dB/km.

Tabla 5.3

Espejo	diámetro	4.0cm	4.5cm	5.0cm	5.5cm	6.0cm	6.5cm	7.0cm
Tipo								
Recubierto de Aluminio *		0.674	0.385	1.032	1.228	1.440	1.672	1.746
Recubierto de Plata *		0.759	0.975	1.190	1.420	1.685	1.925	2.049
Proporción		0.848	0.857	0.867	0.864	0.855	0.869	0.865

*Para 830 W/m^2 de flujo incidente.

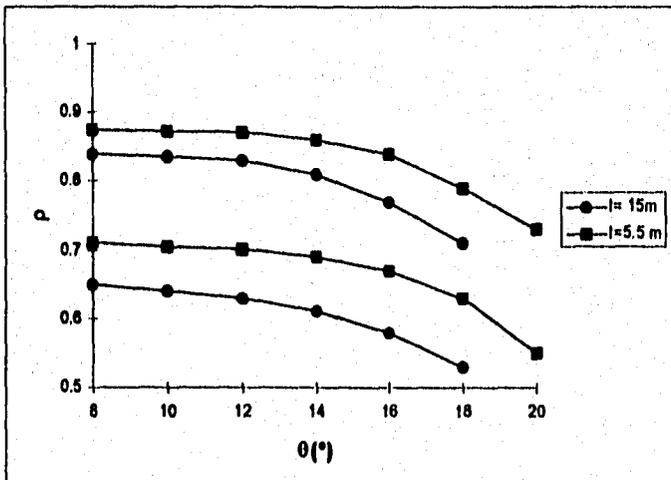


Fig 5-19 Eficiencias medidas vs la apertura del rayo incidente para dos diferentes longitudes de fibra y dos diferentes tipo de espejo.
 (a) Espejo con cubierta de plata
 (b) Espejo con cubierta de aluminio

En el caso de espejo con cubierto aluminizada, la correspondiente medida de la eficiencia es sólo de 61 y 56 por ciento; de acuerdo con las características precedentes como la reflectividad del espejo de solo 0.74.

Este resultado muestra una vez la importancia de la reflectividad en la eficiencia del sistema; con un mejor espejo la eficiencia puede alcanzar un 84 por ciento si la apertura es menor que 15° pero su energía transportada es menor.

La Figura 5-20 representa cómo la medida de la concentración de salida C_s se aumenta con la apertura del espejo. Fácilmente se puede exceder el valor de 3000 con un buen espejo pero la eficiencia decae con aperturas grandes.

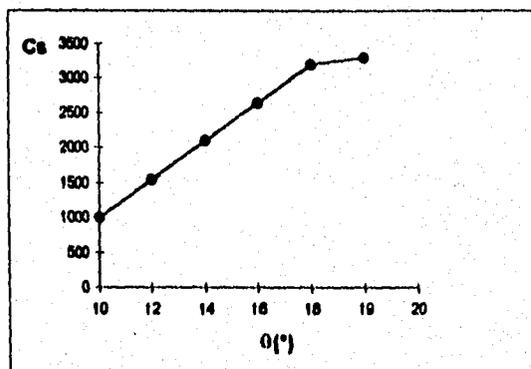


Figura 5-20 Medida de la concentración de salida vs la apertura de el rayo incidente usando un espejo con cubierta de plata y una fibra de 6.6 m de largo.

5.6 CONCLUSIONES.

5.6.1 Cómo obtener una gran cantidad de energía concentrada.

Como hemos visto hasta ahora cada fibra puede solo recibir y transportar unos cuantos watts de energía solar. Para tener una cantidad de energía suficiente para ser convenientemente utilizada en un experimento o algún proceso, es necesario multiplicar cada módulo constitutivo por el pequeño parabólico asociado a la fibra. por ejemplo, montar los sujetadores en cada uno de los elementos de un concentrador de paneles mencionado en la parte introductoria de este trabajo.

Un ejemplo de esta instancia es el uso de fibras de 20° de apertura con mínimas pérdidas, con diámetro de 1 mm, bajas pérdidas de energía y espejos parabólicos de 7 cm de diámetro. Es posible poner 200 de estos sistemas en un metro cuadrado y por que no 2000 espejos en un sistema seguidor solar de 10 m²; el cual podría coleccionar 8 kw de los cuales 6 kw que pueden disponerse de 6 kw a la salida de la fibra con un diámetro global de la unión de las fibras de alrededor de 5 cm de diámetro. Esta energía, se distribuye casi uniforme y puede ser usada directamente o distribuida convenientemente en un buen receptor aislado siguiendo sus requerimientos.

5.6.2 Aplicaciones potenciales.

La posibilidad de transferir energía solar concentrada de un colector a un receptor separado por una distancia relativamente grande (10 m aprox.) ofrece una amplia gama de usos que probablemente aún no estén previstos.

El primer uso obvio es en fundiciones solares usando tantos módulos como sean necesarios. Cada fundición es completamente independiente del colector solar. Otra aplicación es el uso de la generación eléctrica en sistemas Colector/Stirling, donde la máquina Stirling puede ser removida de la estructura del colector y colocada a unos cuantos metros de éste, disminuyendo pérdidas por sombreado y obtener un mejor receptor ya que puede ser completamente cerrado y térmicamente aislado para evitar pérdidas de calor de tipo convectivo. Se pueden tener usos específicos como la producción de hidrógeno causada por disociación del agua por calentamiento de ésta, obtenida en cámaras herméticamente selladas.

Probablemente la aplicación inmediata sea en el Centro de Investigaciones del Noroeste, en Baja California Sur en el uso de reactores fotoquímicos y crecimiento de microorganismos, los cuales requieren ciertas condiciones de iluminación para su desarrollo.

La factibilidad del uso de fibras ópticas para el transporte de energía solar permite concluir que son necesarias fibras y concentradores con ciertas características para una buena utilización de la energía solar.

REFERENCIAS (V).

1. J. Robieux, Patent No. 75-14582 (I.N.P.I.) Intern. Class. F03G7/702; H02KX/G02B5/10.
2. J. A. Arnaud, *Beam and Fiber Optics*. Academic Press, London (1976).
3. G. R. Elion and H. A. Elion, *Fiber Optics in Communications System*. Marcel Dekker (Editor), New York (1978).
4. A. Cozannet, J. Fleuret, H. Maitre and Russeau, *Optique et Télécommunications*. Eyrolles (Editor), Paris (1991).
5. D Kato and Nakamura, *J. of Appl. Phys.* 47(10), 4528, Tokio Japan (1976).
6. G.Boiside and J. J.Perez, *Proc. Photon 80 Conf.*.p. 249., Paris (1990).
7. C. G. Abbot, F. E. Fowled and L. B. Aldrich. *Ann. Astrophys. Obs. Smithson Inst.* 4. 217 (1922).
8. P. D. Jose. *Solar Energy.* 2, 19 (1967).
9. O. Kamada. *Solar Energy.* 9, 39 (1965).
10. J. C. Daly. *Appl. Opt.* 18 2696(1979).
11. M. Bom and E. Wolf. *Principles of Optics*. Pergamon Press. Oxford (1959).
- 12 J.M. Cariu. L Martin and Dugas. *Solar World Forum*. Pergamon Press. Oxford (1981).