



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y MANUFACTURA
DE UN ESPEJO PARABÓLICO DE BAJO COSTO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A :

VÍCTOR GONZÁLEZ MEDINA

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. ANTONIO ZEPEDA SÁNCHEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F. OCTUBRE 2012



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.

AGRADECIMIENTOS

Tu nombre
está aquí,
para verlo
hay que leer
con el
corazón abierto.

Gracias.

ÍNDICE

LISTADO DE FIGURAS, GRÁFICAS, TABLAS Y ECUACIONES	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
ANTECEDENTES	11
CAPÍTULO 1	18
1. Principales diseños de los colectores solares	18
1.1 Colectores de placa plana	19
1.1.1 Funcionamiento	21
1.2 Colectores de tubo evacuado	24
1.2.1 Flujo directo	25
1.2.2 Tubo de calor	27
1.3 Colectores concentradores	29
1.3.1 Tipos de concentradores más relevantes	29
1.3.2 Colectores concentradores de superficie reflejante (CCSR)	32
1.4 Situación actual de los CCSR	33
CAPÍTULO 2	36
2. Diseño conceptual y de configuración de la propuesta de espejo parabólico	36
2.1 Parámetros geométricos	36
2.2 El factor de concentración	37
2.3 Índice de reflexión	38
2.4 Índice de refracción	39
2.5 Geometrías	41
2.6 Superficies reflejantes	42
2.7 Parámetros de operación	44
2.8 Configuración	45
CAPÍTULO 3	46
3. Diseño del detalle y manufactura del espejo parabólico	46
3.1 Cálculo de la superficie interna	46
3.2 Antena A1	47
3.3 Antena B	49
3.4 Antena A2	51
CAPÍTULO 4	53
4. Experimentos y resultados	53
4.1 Materiales	53
4.2 Pruebas realizadas	54
4.3 Prueba 1	55
4.3.1 Procedimiento	55
4.4 Prueba II	55
4.4.1 Procedimiento	55
4.5 Resultados	58
4.5.1 Antena A1	58
4.5.2 Antena B	59

4.5.3 Antena A2	59
CONCLUSIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	65

LISTADO DE FIGURAS, GRÁFICAS, TABLAS Y ECUACIONES

FIGURA A - 1 IRRADIANCIA SOLAR DIRECTA Y DIFUSA _____	13
GRÁFICA A - 1 COMPARATIVO DE DIVERSAS FUENTES DE ENERGÍA Y EL CONSUMO GLOBAL _____	11
GRÁFICA A - 2 ESTRUCTURA DE LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE ENERGÍA PRIMARIA 2010 _____	14
FIGURA 1 - 1 COMPONENTES PRINCIPALES DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA _____	20
FIGURA 1 - 2 FUNCIONAMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA _____	21
FIGURA 1 - 3 FUNCIONAMIENTO DE UN TUBO EVACUADO DE FLUJO DIRECTO _____	26
FIGURA 1 - 4 TUBO EVACUADO TIPO HEAT-PIPE _____	27
FIGURA 1 - 5 PLANTA SOLAR CON SISTEMA DE SEGUIMIENTO (HELÍOSTATOS) _____	33
FIGURA 1 - 6 CONCENTRADOR PARABÓLICO Y MOTOR STIRLING CON GENERADOR ADJUNTO _____	34
GRÁFICA 1 - 1 SUPERFICIE INSTALADA DE CALENTADORES SOLARES POR APLICACIÓN EN 2010 _____	19
TABLA 1 - 1 TIPOS DE CONCENTRADORES SOLARES MÁS RELEVANTES _____	31
EQ. 2 - 1 _____	37
EQ. 2 - 2 _____	38
FIGURA 2 - 1 PARTES PRINCIPALES DE UNA ANTENA PARABÓLICA _____	37
FIGURA 2 - 2 RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN UNA SUPERFICIE REFLEJANTE _____	39
FIGURA 2 - 3 LA LEY DE SNELL _____	40
FIGURA 2 - 4 GEOMETRÍAS MÁS COMUNES DE LOS COLECTORES SOLARES _____	41
TABLA 2 - 1 MATERIALES APTOS PARA SUPERFICIES REFLEJANTES _____	43
TABLA 2 - 2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS COLECTORES MÁS EMPLEADOS _____	44
FIGURA 3 - 1 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE UN CASQUETE _____	47
FIGURA 3 - 2 SECUENCIA DE RECUBRIMIENTO DE LA ANTENA A1 CON MYLAR _____	48
FIGURA 3 - 3 ANTENA B RECUBIERTA CON ESPEJO DE 5MM _____	50
FIGURA 3 - 5 ANTENA A2 RECUBIERTA CON ESPEJO DE 3MM _____	52
TABLA 3 - 1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA ANTENA A1 _____	47
TABLA 3 - 2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA ANTENA B _____	49
TABLA 3 - 3 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA ANTENA A2 _____	51
GRÁFICA 4 - 1 RESULTADOS DE LA PRUEBA I _____	57
TABLA 4 - 1 VALORES OBTENIDOS DE LA PRUEBA II _____	58

RESUMEN

La ubicación geográfica de México permite que existan vastas zonas con los índices de insolación más altos a nivel mundial, esto es la cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a la tierra. Por tal motivo, se vuelve necesario desarrollar tecnología que permita el aprovechamiento de ésta fuente de energía.

La baja eficiencia y el costo elevado de las aplicaciones fotovoltaicas propicia que las aplicaciones más demandadas en el campo de la energía solar sean las aplicaciones térmicas. El desarrollo de los colectores concentradores ha beneficiado a ambas aplicaciones. En el caso de los paneles fotovoltaicos permite que su eficiencia aumente y que el tamaño de los paneles se reduzca, disminuyendo drásticamente el costo. Para las aplicaciones térmicas, éste tipo de concentradores pueden alcanzar temperaturas requeridas en múltiples procesos industriales, que suelen lograrse mediante el uso de fuentes no renovables de energía.

Los concentradores de superficies reflejante, con geometrías parabólicas, ya sea como canal o plato, son los más utilizados por varias ciencias, que van desde la óptica no generadora de imágenes hasta la astronomía. El costo de un espejo parabólico es elevado porque son importados, además de tener una demanda limitada. El presente trabajo presenta tres propuestas para diseñar y manufacturar un espejo parabólico de bajo costo utilizando antenas parabólicas de desecho. Con las 3 propuestas es posible obtener temperaturas superiores a los 100 °C y con una de ellas hasta 240 °C. Finalmente, se puede extrapolar la metodología empleada para convertir en reflejante una superficie, teniendo así la posibilidad de proponer otras geometrías sin incrementar considerablemente el costo.

ABSTRACT

Mexico's geographical location allows the existence of vast areas with the world's highest insolation rates, which is the amount of energy as solar radiation that reaches Earth. Therefore, it becomes necessary to develop technology that allows the use of such source of energy.

The low efficiency and high cost of photovoltaic applications causes thermal applications to be the most demanded in the solar energy field. The development of concentrating collectors has benefited both applications. In the case of photovoltaic panels, its efficiency increases and the size of the panels reduces, drastically decreasing the overall cost. For thermal applications, this type of concentrators can achieve temperatures required in many industrial processes, usually obtained by using non-renewable energy resources.

Collectors with reflective surfaces and parabolic geometry, either channel or dish, are most commonly used by various sciences, ranging from nonimaging optics to astronomy. The cost of a parabolic mirror is high because they are imported, in addition their demand is limited. This paper presents three proposals to design and manufacture a low cost parabolic mirror using waste satellite dishes. With the 3 proposals is possible to obtain temperatures higher than 100°C and with one of them up to 240°C . Finally, one can extrapolate the methodology used to produce reflective surfaces, thus having the possibility to propose other geometries without increasing the cost significantly.

INTRODUCCIÓN

Los problemas ocasionados por el uso de fuentes de energía no renovable han hecho que las llamadas energías *alternativas* no sean consideradas un enfoque más del problema energético y climático actual, si no que se conviertan en la única opción *sustentable*, entendiéndose por éste concepto que su uso no significa un deterioro irreversible del medio ambiente ni una devastación ambiental.

Un amplio sector del desarrollo tecnológico no ha tenido como eje de diseño a la eficiencia, aunque ésta tendencia ha ido disminuyendo con el paso del tiempo. Un ejemplo claro de éste principio se presenta en aquellos dispositivos que requieren quemar hidrocarburos para funcionar, puesto que desde su invención la prioridad fue que cumplieran con su función sin importar cuál sea su impacto ambiental o el desperdicio de energía que genera su funcionamiento. Es en el último cuarto del siglo pasado que comienzan a aparecer políticas globales para reducir el impacto ambiental de la actividad humana.

En ese sentido la energía solar ha estado presente en diversas agendas y políticas, globales y nacionales. La humanidad ha utilizado directa o indirectamente la energía solar en aplicaciones muy variadas, que van desde la deshidratación de alimentos, hasta la alimentación de paneles fotovoltaicos de vehículos de exploración interplanetaria. Éste último uso de la energía solar vuelve a dejar claro la versatilidad de dicha fuente de energía.

A pesar de lo simple que podría parecer su uso, se sigue realizando gran cantidad de investigación alrededor de la energía solar. Dentro de la inmensa gama de aplicaciones que utilizan la energía solar para obtener un beneficio, los colectores solares comienzan a tener un gran auge. El incremento en el costo de los

hidrocarburos, particularmente los utilizados para calentar agua, han sentado las bases para que prosperen éste tipo de dispositivos. Los colectores solares son dispositivos que la humanidad ha empleado durante muchos siglos con mayor o menor frecuencia. La eficiencia de los mismos, elaborados industrialmente, oscila típicamente entre el 50% y 90% (Laughton, 2010, p. 53).

Los hay de distintas configuraciones y con el uso de materiales más diversos. Una de las variantes de los colectores solares son los colectores solares con superficie reflejante. Mismos que tuvieron, en términos geométricos, pocos cambios e innovaciones hasta mediados de los años 60, cuando V. K. Baranov (URSS), Martin Ploke (Alemania) y Roland Winston (EUA) dan las bases para la Óptica no generadora de imágenes. El presente trabajo tiene como objetivo plantear tres propuestas para diseñar y manufacturar un espejo parabólico de bajo costo, así como presentar una evaluación de la factibilidad y funcionamiento de las mismas.

El Capítulo I tiene como objetivo describir: los tipos de colectores más utilizados, breves antecedentes históricos, partes principales, funcionamiento, ventajas, desventajas, aplicaciones y desarrollo.

El Capítulo II tiene como objetivo presentar la propuesta geométrica así como un análisis de los posibles: materiales a emplear, métodos de manufactura, comportamiento teórico y dimensiones.

El Capítulo III documenta el proceso de manufactura de las respectivas propuestas, así como presentar la memoria de cálculo del proceso y tablas respectivas.

El Capítulo IV presenta el procedimiento y resultados de las pruebas ejecutadas en cada propuesta, así como una descripción y justificación de los materiales

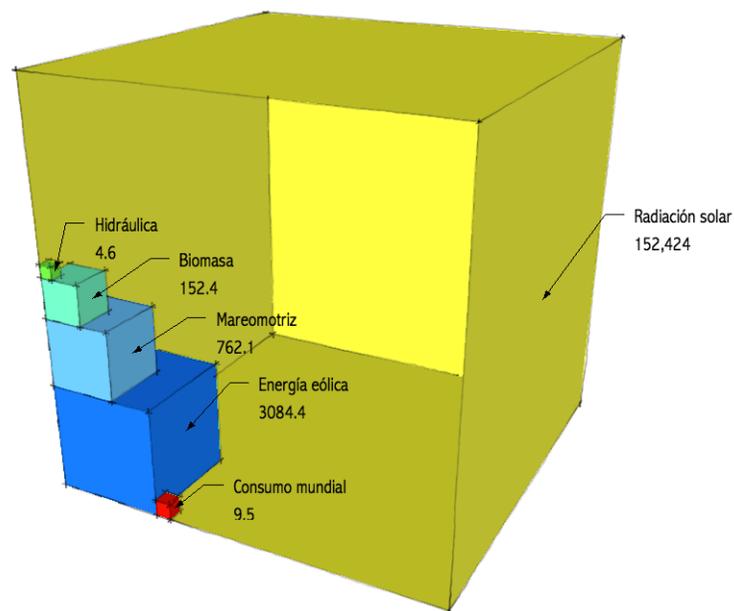
empleados. Incluye también una descripción breve de los resultados obtenidos de cada propuesta.

Las conclusiones retoman los resultados del capítulo previo y los conceptos desarrollados durante el presente trabajo. Incluye a su vez una reflexión sobre posibles mejoras y formas de extrapolar la metodología empleada a superficies con otra geometría.

ANTECEDENTES

Diversos autores consideran al Sol como la fuente principal de energía renovable con la que cuenta la humanidad. También la consideran, una fuente de energía inagotable ya que se estima que por lo menos en 4 billones de años el Sol se transformará en otro tipo de estrella (Bonanno, Schlattl, & Patern, 2002, p. 2). Es importante tomar en consideración que otras fuentes de energía, incluyendo los combustibles fósiles, tienen en mayor o menor grado, su origen vinculado al Sol; lo anterior da una perspectiva de su importancia en términos energéticos. La Gráfica A - 1 muestra un comparativo entre: la magnitud de la energía que cada tipo de fuente puede proveer y el consumo global de energía (desde hidrocarburos hasta electricidad).

GRÁFICA A - 1 COMPARATIVO DE DIVERSAS FUENTES DE ENERGÍA Y EL CONSUMO GLOBAL



Unidades en 10^{13} kWh. Fuente: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS), 2004, p. 11

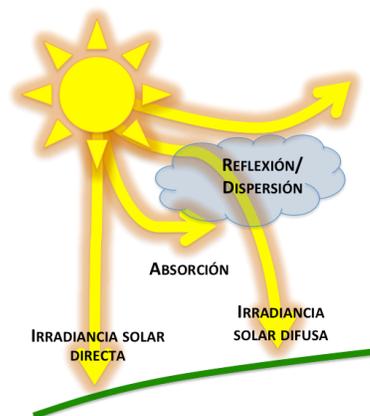
De la Gráfica A - 1 se desprende que la energía proveniente del Sol es suficiente para satisfacer al menos 16,000 veces las demandas energéticas de la humanidad, que en 1999 correspondía a 9.5×10^{13} kWh. Al respecto el investigador y asociado del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Derek Abbott, concluye en su trabajo que solamente con instalar plantas de generación eléctrica solar (fotovoltaica o térmica) con un mínimo del 1% de eficiencia en aproximadamente el 1% de la superficie terrestre, las demandas de energía actuales serían cubiertas, que en 2010 ascienden a 15 TW (Abbott, 2010, pp. 1–2).

Sin embargo la disponibilidad del recurso solar es intermitente y puede depender de factores geográficos y/o climáticos. La iluminación es el primer beneficio directo del Sol y una parte de la actividad humana requiere de dicha iluminación aún en ausencia de éste. Es entonces que el uso de fuentes de energía, distintas a la solar, comienzan a ser utilizadas para tal fin, siendo la leña y posteriormente las velas los ejemplos más antiguos y sencillos.

Por definición, la energía del Sol que viaja a través del espacio exterior es llamada radiación solar (Laughton, 2010, p. 15). Por otro lado se define como irradiancia a la radiación solar que llega a la atmósfera, pasa a través de ella y alcanza una área receptiva en la superficie terrestre, sus unidades son W/m^2 y se le asigna el símbolo E . Así mismo, se denomina como irradiación a la irradiancia captada por unidad de tiempo y por lo tanto las unidades utilizadas para medirla serán Wh/m^2 y H es el símbolo asignado. Así pues, el primer término se refiere a la potencia instantánea de la energía solar captada por unidad de área (irradiancia) y el segundo término (irradiación) se refiere a la cantidad de energía captada por unidad de área a través del tiempo (Quaschnig, 2003, pp. 90–93). Finalmente, la irradiación directa sobre una superficie horizontal (paralela a superficie terrestre) será definida como insolación.

La Figura A - 1 muestra como está compuesta la irradiación solar. La radiación solar que es dispersada o reflejada por las partículas suspendidas en la atmósfera se denomina irradiancia solar difusa y no tiene dirección. Se considera irradiancia solar directa a aquella radiación solar que no presenta desviación desde su origen hasta alcanzar la superficie de interés. Casi todos los colectores solares concentradores, con superficie reflejante, solo pueden aprovechar la irradiancia solar directa. En el caso particular de los colectores compuestos, que también tienen una superficie reflejante, se puede aprovechar la irradiancia solar difusa y directa. Mientras que en los colectores solares de placa plana ambas irradiancias son aprovechadas y no es común que cuenten con una superficie reflejante. Tomando en cuenta ambos tipos, se ha calculado que la insolación por unidad de área es 1 kW/m^2 (Winston, Minano, Benitez, & Bortz, 2005, p. 1).

FIGURA A - 1 IRRADIANCIA SOLAR DIRECTA Y DIFUSA

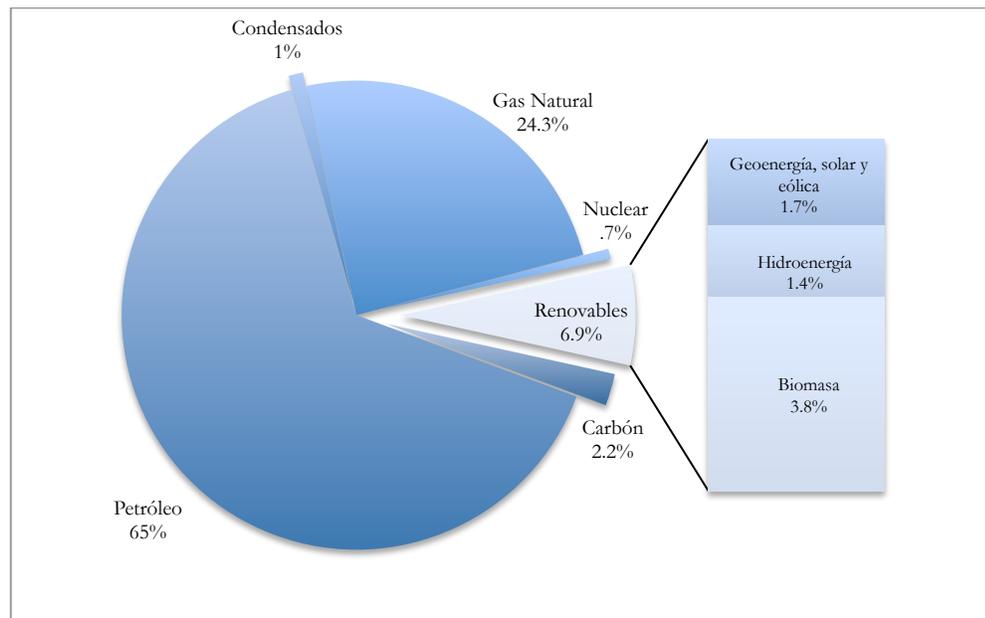


Fuente: (Laughton, 2010, p. 14)

La Gráfica A - 2 muestra la estructura de la producción nacional de energía primaria en 2010. En México se cuenta con las siguientes fuentes renovables de energía: la geoenergía, la energía solar, la energía eólica, la hidroenergía y la biomasa. En conjunto constituyen el 6.9% de la producción de energía primaria

en el país, del cual .05% es producido con la radiación solar como fuente de energía (Secretaría de Energía, 2011, p. 25). Dado que en México existen regiones con el promedio de insolación anual más alto a nivel mundial, la explotación de dicha fuente es viable (Tonda, 2000, p. 33).

GRÁFICA A - 2 ESTRUCTURA DE LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE ENERGÍA PRIMARIA 2010



Fuente: (Secretaría de Energía, 2011, p. 25)

La medición de la radiación solar en el país comenzó en 1957 por parte del Instituto de Ciencia Aplicada en colaboración con el Instituto de Geofísica de la UNAM. Aunque dicha actividad ha sido interrumpida en múltiples ocasiones por diversos motivos, el trazado de un mapa preciso de la distribución de la radiación solar en el territorio nacional ha permanecido vigente. La relevancia de ésta medición radica en que se estima que la energía solar puede ser utilizada en un 80% del territorio nacional. Por otro lado, se estima que si el 1% de la radiación

solar que incide en México en un día, fuese transformada en energía eléctrica, se obtendría la electricidad consumida en 1999 en el país (Mejía, 1999, p. 16).

El uso de la radiación solar como fuente de energía tiene, principalmente, dos fines: la transformación en energía eléctrica o calentar agua; aunque aplicaciones como el secado de ladrillos de adobe o la deshidratación de alimentos están empezando a tener más auge. Una manera de producir energía eléctrica con la insolación es mediante la instalación de paneles fotovoltaicos. Por lo general los paneles fotovoltaicos, aunque eficientes, tienen un costo elevado de fabricación, mantenimiento e instalación. Por otro lado, los colectores solares no necesitan equipamiento oneroso o de mantenimiento especializado para funcionar. Particularmente, los colectores de placa plana son los más utilizados y su uso es primordialmente para elevar la temperatura del agua, sin llegar a producir vapor. La literatura consultada refiere que en general para los colectores solares las temperaturas inferiores a 100 °C se consideran *bajas temperaturas*.

Otro tipo de colectores solares, con superficie reflejante, permiten la concentración de la radiación solar en una superficie comparativamente más pequeña a la de la superficie reflejante. De ésta manera, es posible obtener vapor con tales dispositivos. Hay procesos industriales que requieren *altas temperaturas* (superiores a los 100 °C) y que evidentemente pueden obtenerse con este tipo de colectores.

Así mismo, para hacer referencia a los sistemas de generación eléctrica que utilizan las propiedades térmicas de la radiación solar se utilizan las siglas CSP (Concentrated Solar Power). El CSP es un término que agrupa diversas arquitecturas y sistemas de generación. Puede tener foco central o en línea, ser de torre central y en algunos casos pueden ser platos parabólicos con un motor Stirling en el foco. Sin embargo el principio de operación es el mismo: concentrar

la insolación en un área específica y elevar la temperatura de un fluido de trabajo, comúnmente aceite o una solución con alta concentración salina, para hacer funcionar una turbina acoplada a un generador eléctrico.

Actualmente, parte de la investigación en éste campo va orientada al desarrollo de tecnología que permita almacenar el calor obtenido durante el día y utilizarlo para cubrir las demandas durante las horas pico o intermedias. Muchos de los componentes utilizados para ésta tecnología son los mismos que en el resto de los sectores energéticos (tuberías, juntas, generadores, sistemas de enfriamiento, etc.). Siendo, prácticamente, los sistemas de seguimiento, cuando el sistema de generación así lo requiere, el único equipamiento específicamente diseñado para esta forma de generación.

Otra particularidad del CSP es que los sistemas pueden ser escalables, ya sea por unidad como en el caso de los generadores de plato parabólico o por medio de la instalación de otro generador como en el caso de la torre solar. Así mismo, la generación con CSP tiene en sus sistemas de enfriamiento la opción de utilizar agua o aire, lo cual repercute en el costo final y en los recursos que la instalación requiera.

En el caso particular de los espejos parabólicos con motor Stirling acoplado, su temperatura de operación es 450 °C y usan helio como fluido de trabajo. Aún no cuentan con sistema de almacenamiento pero hay investigación tecnológica que busca implementarlo. De los sistemas comerciales, el de espejo parabólico es el que tiene mayor eficiencia anual, siendo ésta igual a 22% (*The Status of Concentrating Solar Power Development*, 2011).

Existen empresas que comercializan espejos parabólicos con motor Stirling acoplado que garantizan: una eficiencia de 24%, generación de AC directamente

(sin uso de inversores) y por lo mismo acoplamiento directo a la red, mayor generación por m² de instalación, (comparado con otros CSP), instalación en terrenos irregulares, sistemas escalables, generación de 3kW por unidad, recarga del sistema de refrigeración cada 13 años y una vida útil mínima de 25 años (*PowerDishTM by Infinia*, 2010). Así pues, aunque han existido grandes avances en general en todo el campo de la energía solar y en el CSP en particular, la geometría parabólica sigue siendo utilizada como una opción para las superficies reflejantes ya sea para calentar, cocinar o generar electricidad.

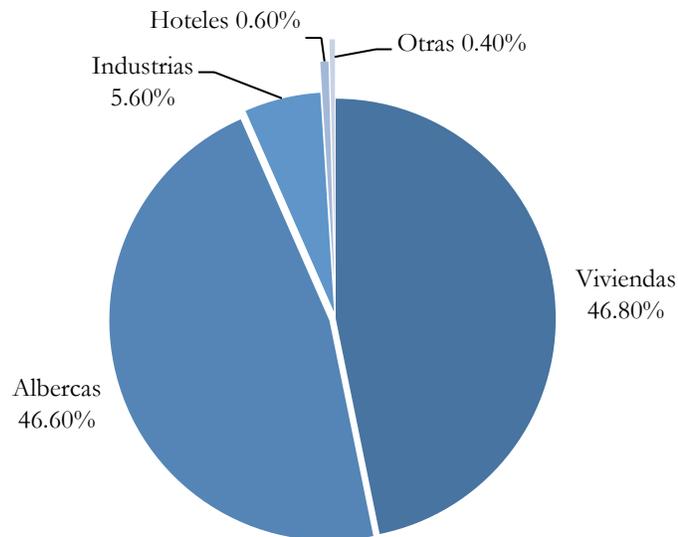
Capítulo 1

1. PRINCIPALES DISEÑOS DE LOS COLECTORES SOLARES

Los colectores solares se definen como aquellos dispositivos que transfieren la energía proporcionada por la radiación solar a un fluido de trabajo u objeto, para una aplicación determinada (Duffie & Beckman, 1980, p. 238). Por lo general, el objetivo de la transferencia es el aumento de la temperatura de dicho fluido. Existen casos muy particulares en los cuales el fluido de trabajo es aire, anticongelante con agua o aceite, aunque el 90% de las ocasiones es agua. El tipo de fluido de trabajo depende de la aplicación, las condiciones geográficas o climatológicas. Hay aplicaciones que podrían requerir que en lugar de una transferencia de calor, ocurriera una transferencia de la radiación solar en sí misma, ya sea para iluminar un espacio o hacer funcionar un panel fotovoltaico. Con éstas y otras sutiles diferencias, los principios de operación de los colectores son los mismos.

La Gráfica 1 - 1 muestra la distribución que existe en México del uso de éste tipo de colectores por aplicación. La fuente consultada no especifica el tipo de colector empleado, englobando todas las categorías como calentadores de agua. En México estos dispositivos proveen 4.8 Peta Joules (PJ) anuales (Secretaría de Energía, 2011, p. 114). Ello se debe a que su función principal es calentar agua de uso doméstico, con fines de consumo o para albercas, y para el acondicionamiento de edificios. A continuación se describen brevemente los tipos de colectores más utilizados y desarrollados actualmente.

GRÁFICA 1 - 1 SUPERFICIE INSTALADA DE CALENTADORES SOLARES POR APLICACIÓN EN 2010



Fuente: (Secretaría de Energía, 2011, p. 115)

1.1 Colectores de placa plana

Se les considera como dispositivos térmicos de baja temperatura (inferiores a 75 °C), sin embargo, son los colectores más utilizados históricamente (Concheiro & Viqueira, 1985, p. 80). Las partes principales de un colector de placa plana se ilustran en la Figura 1 - 1.

Los colectores solares de placa plana son dispositivos compuestos de cinco partes: absorbedor, aislante térmico, aislante traslúcido, contenedor y serpentín. Independientemente del tipo de fluido de trabajo utilizado, el nombre y número de los componentes no varía significativamente.

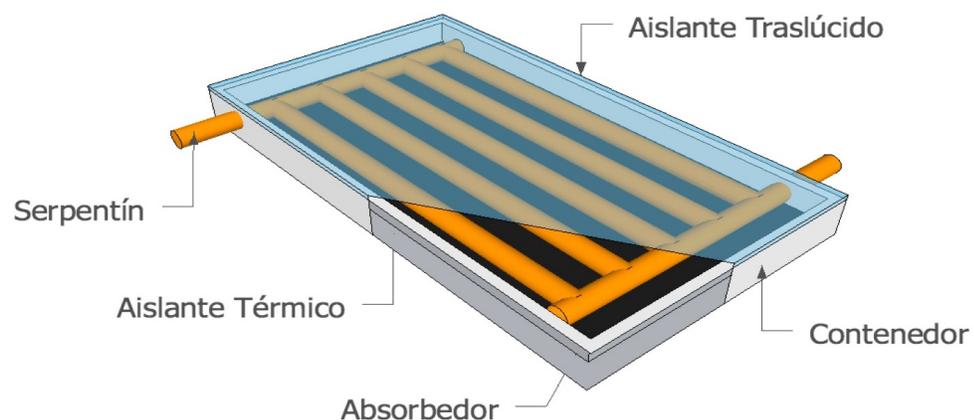
Para aquellos casos en que el fluido de trabajo es aire, el serpentín está compuesto por tubos de ventilación en lugar de tuberías. Cuando el fluido de trabajo es agua,

es muy común que estos sistemas tengan un tanque de almacenamiento. Éste depósito está cubierto por un aislante térmico para minimizar las pérdidas. Dicho tanque no forma propiamente parte del colector solar, puesto que diversas aplicaciones, siendo la más común el acondicionamiento de albercas, no lo requieren.

Cuando se requiere elevar la temperatura del agua para uso doméstico, no es necesario utilizar una bomba para hacer circular el fluido ya que el arreglo se diseña para que el fluido circule por convección natural, del colector al tanque de almacenamiento.

En el caso particular del acondicionamiento de albercas se prescinde de la cubierta, el aislante térmico y del tanque de almacenamiento. Puesto que para acondicionarla, es más eficiente incrementar, 10 °C en promedio, la temperatura de toda el agua. Una bomba es utilizada para que toda el agua circule a través del colector. Luego entonces, la superficie del absorbedor será comparativamente más grande que la del colector de uso doméstico.

FIGURA 1 - 1 COMPONENTES PRINCIPALES DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA



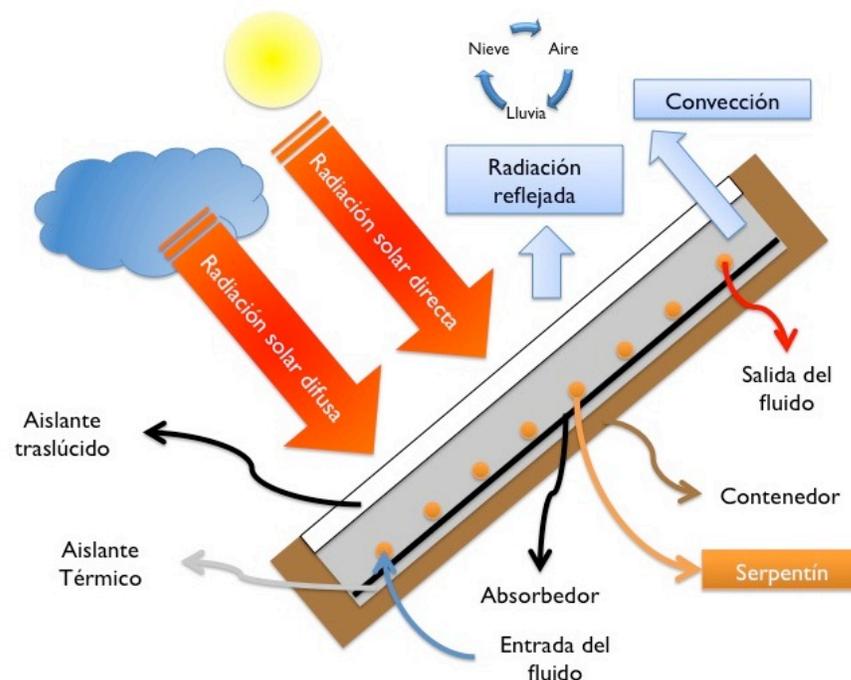
Fuente: (Concheiro & Viqueira, 1985, p. 82)

La versatilidad de los colectores de placa plana se muestra en la variedad de formas en las que se puede instalar: sobre el techo, ser el techo mismo o una estructura independiente. Por lo tanto pueden incorporarse a la vivienda en cualquier momento, ya que no es necesario realizar cambios estructurales complicados y suntuosos. Los colectores más simples de éste tipo son mangueras negras expuestas al sol, arreglo muy común en zonas rurales. En general son dispositivos económicos y de fácil manufactura y mantenimiento.

1.1.1 Funcionamiento

El funcionamiento de los colectores solares está representado en la Figura 1 - 2 . En principio el colector recibe radiación solar directa y difusa, ambas pasan a través del aislante traslucido y llegan al absorbedor.

FIGURA 1 - 2 FUNCIONAMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA



Fuente: (Duffie & Beckman, 1980, p. 483)

El aislante traslúcido más utilizado durante muchos años ha sido el vidrio, sin embargo en la última década los paneles de policarbonato han tenido mayor demanda para este tipo de aplicaciones debido a su menor costo, mayor resistencia y menor peso.

Al igual que con todos los componentes, las dimensiones de los mismos deben variar lo menos posible como consecuencia de la exposición prolongada a la radiación solar. El objetivo principal del aislante traslúcido es minimizar las pérdidas. Una cara del aislante impide que el absorbedor entre en contacto con las corrientes de aire, puesto que tienen menor temperatura y por ende producen una pérdida de la energía térmica. La otra cara hará que se reduzca la cantidad de calor que se pierde por radiación y convección, el cuál se encuentra acumulado en el absorbedor.

Posteriormente el absorbedor transferirá el calor acumulado al serpentín. Existen arreglos en los cuales el absorbedor y el serpentín son un mismo objeto, al soldar un par de placas metálicas con separación suficiente para que el fluido de trabajo circule. En ocasiones se agregan unas aletas al serpentín para sustituir al absorbedor. Los serpentines hechos de plásticos, principalmente PVC, son muy utilizados para calentar el agua de las piscinas porque resisten el deterioro provocado por el agua con Cloro.

Por lo general el serpentín transporta agua, sin embargo en zonas donde hay temperaturas ambientales inferiores al punto de congelación, se emplea otro fluido de trabajo, comúnmente anticongelante y aceite ocasionalmente, aumentando con ello el costo de producción y mantenimiento. El fluido más denso (el de menor volumen y temperatura) ingresa por la parte de inferior del serpentín y disminuirá su densidad a media que entre en contacto con el absorbedor. Al ser ingresado por gravedad, se produce una diferencia de

densidades que genera el efecto de termosifón, entonces el agua caliente se desplazará hacia la parte superior y de ahí al depósito o directamente a la aplicación de interés, permitiendo la circulación de manera natural.

La Figura 1 - 2, muestra que dentro de la parte posterior del absorbedor es necesario agregar un aislante térmico que impida que el calor obtenido se disipe. Éste tipo de aislantes tienen como característica que sus propiedades físicas y químicas no se alteran significativamente cuando la temperatura se incrementa por períodos prolongados. En ocasiones se coloca entre el absorbedor y el aislante, una capa de material reflejante para disminuir considerablemente éste aumento de temperatura, ello permite que el aislante reciba menos radiación solar, al ser ésta, previamente reflejada.

Los materiales más utilizados como aislante térmico son: fibra de vidrio, el poli estireno expandido y la espuma rígida de poliuretano. Hay colectores caseros que emplean materiales reciclados tales como los envases de tetrapak y trastos de unice como un aislante eficiente y de bajo costo.

El contenedor servirá para sostener al resto de las partes y proporcionar puntos de apoyo para ser fijado a una estructura independiente o un edificio. El aluminio suele ser una opción muy utilizada por su bajo costo y peso, y alta resistencia a la intemperie (corrosión). En aquellos casos que lo requieran, la geometría del contenedor debe evitar que se acumule agua o hielo en exterior del colector. Si bien éste tipo de colectores requiere de poco mantenimiento, es recomendable que el diseño contemple un acceso fácil al interior del colector. Los materiales de los cuales está hecho deben ser resistentes a la corrosión y la inestabilidad química que las inclemencias del tiempo generen; esto también incluye a los elementos utilizados para fijar el colector.

Finalmente, el desarrollo en México de ésta tecnología ha permitido que empresas, dedicadas a la fabricación de éste tipo de colectores, proliferen. Algunas de ellas garantizan un ahorro de hasta del 70% en el consumo de gas para calentar agua (Módulo Solar, S. A. de C. V, 2011).

1.2 Colectores de tubo evacuado

Ésta tecnología fue desarrollada por la Universidad de Qing Hua en Beijing durante la primera mitad de los años 80 y con producción piloto en 1985. En una primera etapa la manufactura de estos tubos solo satisfacía la demanda local, posteriormente se empezó a extender la venta a otros mercados particularmente el Europeo y el Japonés; sin embargo la calidad de los tanques de almacenamiento así como su tamaño para la transportación impidieron que las ventas fueran superiores a las que se tenían en el mercado interno (procurAsia, 2012).

Los colectores de tubo evacuado pueden tener grandes variaciones en su construcción y operación entre un modelo y otro. Sin embargo todos tienen en común un par de tubos concéntricos de vidrio con boro silicato para que soporte las altas temperaturas y esfuerzos térmicos. Todos los modelos también coinciden en requerir un cabezal, que funciona como intercambiador de calor, en donde se conectan todos los tubos. A partir de éste punto hay dos modelos principales, siendo uno el de flujo directo, cada vez más escaso y el de tubo de calor (heat pipe), con mayor auge. En ambos casos durante la fabricación de los tubos se genera un vacío dentro de cada par de tubos de vidrio, que sirve como aislante térmico, de ahí el nombre de estos colectores. Así mismo, para los dos casos suele agregarse una superficie reflejante a la parte posterior para recuperar parte de la radiación solar que pasa a través de los huecos que hay entre cada tubo.

Ambos colectores de tubo evacuado tienen un mejor desempeño en climas fríos, respecto de los de placa plana, debido a su aislante. Sin embargo, mientras el

clima sea más cálido, la diferencia en el desempeño va siendo menor. Las temperaturas que estos colectores alcanzan pueden requerir equipo especial como: válvulas de seguridad, aislantes térmicos o tubería aislada, lo cual repercutirá en el costo final del dispositivo.

Un factor a tomar en consideración cuando se elige este sistema es que la calidad de los tubos así como su costo es variable. Los tubos de gran calidad, aunque costosos, pueden absorber radiación solar difusa, presente principalmente en días nublados. El viento no afecta su funcionamiento y prácticamente mantienen el mismo desempeño, bajo las mismas condiciones de luz, en invierno y verano. El costo elevado sigue siendo la principal causa por la cual ésta tecnología no es tan común como la de los colectores de placa plana.

Por último, el uso de este tipo de colector debe ser cotidiano ya que si el fluido no circula, el calor se almacenará y puede sobrecalentarse, excediendo la presión de las válvulas de seguridad o del tanque contenedor y provocar daños a la tubería, al depósito de almacenamiento o al usuario.

1.2.1 Flujo directo

Los colectores de flujo directo tiene dentro de los tubos concéntricos un tubo central por el cual circula generalmente agua. Dicho tubo está en contacto con una placa que funciona como absorbedor o puede tener adjunta una aleta con el mismo fin. Para éste modelo, es en ese lugar donde ocurre la transferencia de calor. Aunque todo el arreglo recibe el nombre de colector, cada tubo evacuado es en si mismo un colector y el fluido se mezcla en el cabezal, como lo muestra la Figura 1 - 3.

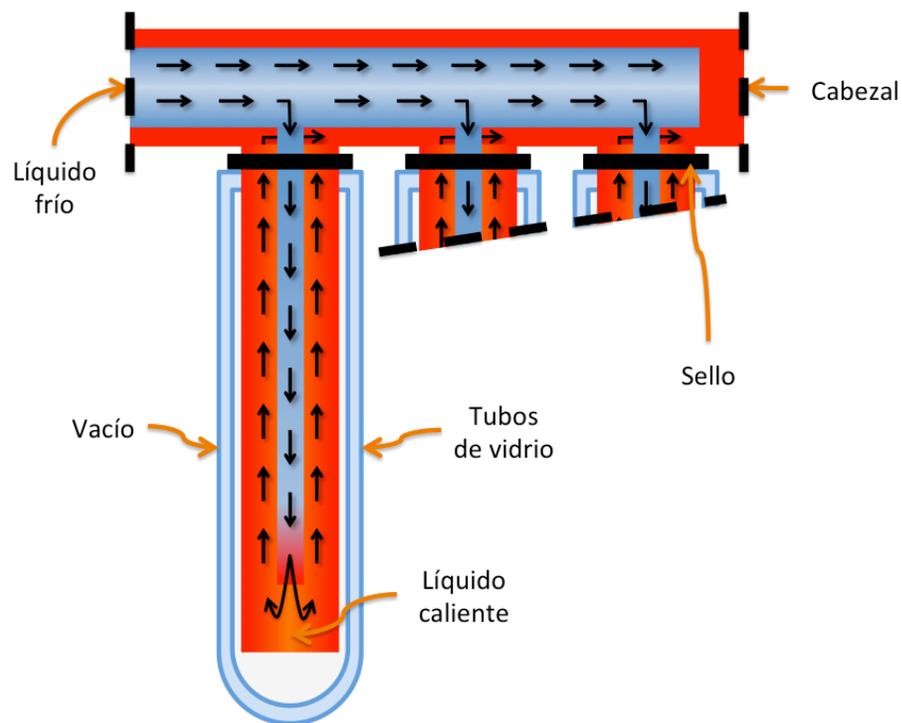
El fluido circula por el tubo central, por gravedad y muy pocas veces por bombeo, aumentando su temperatura a medida que entra en contacto con el

absorbedor. Al igual que en el colector de placa plana se produce el efecto de termosifón, por lo que el flujo permanece constante.

Un componente crítico de los tubos evacuados es el sello. La expansión térmica del metal y el vidrio hace que el sello entre ambos se desgaste al estar expuesto a esfuerzos térmicos y eventualmente falle. Para ello como parte de su mantenimiento se debe contemplar la revisión del estado de los sellos.

No se recomienda la instalación de sistemas con flujo directo en climas en los cuales la temperatura llegue al punto de congelación del agua, puesto que al congelarse ésta, su expansión romperá los tubos.

FIGURA 1 - 3 FUNCIONAMIENTO DE UN TUBO EVACUADO DE FLUJO DIRECTO



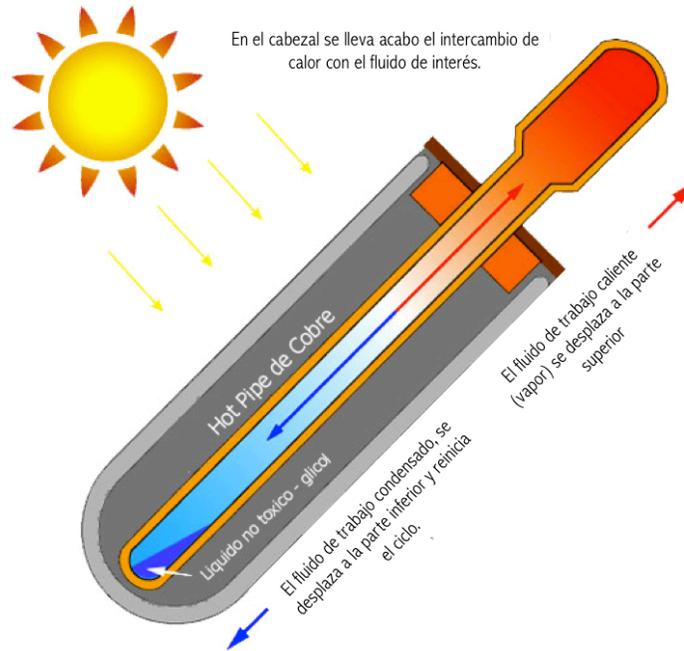
Elaboración propia, basado en (SUNDA, 2011)

1.2.2 Tubo de calor

La primera gran diferencia respecto del sistema de flujo directo es que el fluido de trabajo ya no es agua. Se utilizan líquidos con un coeficiente de calor específico bajo: el anticongelante, glicol o acetona. El fluido está contenido en un tubo de cobre dentro de dos tubos de vidrio concéntricos, lo cuales como en el modelo de flujo directo están separados por un vacío.

El fluido de trabajo empleado, alcanza su punto de ebullición a bajas temperaturas y por lo tanto cambia de fase, pasando de líquido a gas. Al expandirse éste gas, se desplaza hacia el cabezal, donde la transferencia de calor ocurre. Posteriormente el gas se condensa y desciende a la parte inferior, y el proceso se repite nuevamente. La Figura 1 - 4 muestra las partes principales de un Heat Pipe.

FIGURA 1 - 4 TUBO EVACUADO TIPO HEAT-PIPE



Fuente: (Webmastersiesol, 2009)

Puesto que la transferencia de calor en el cabezal es por contacto; es posible remover cada tubo individualmente. Es decir que en caso de que uno de los tubos se rompa o requiera mantenimiento, el resto del colector puede seguir funcionando. Lo anterior no ocurre con el sistema de flujo directo.

Aquellos tubos que tienen la superficie del absorbedor en forma cilíndrica garantizan que el sol siempre esté perpendicular a ellos, lo cual incrementa su eficiencia ya que el flujo de energía absorbida permanece constante durante su operación. Al trabajar cada tubo como un colector independiente, es posible darles distinta orientación a cada uno y obtener resultados aceptables; aún en situaciones desfavorables para un colector de placa plana. Sin embargo sin el vacío como aislante, un colector de tubo evacuado puede tener un desempeño igual o inferior al de un colector de placa plana.

Comparado con el arreglo de flujo directo, la configuración de Heat Pipe tiene la ventaja de que la conexión entre el tubo y el cabezal no requiere de sellos especiales y que en caso de requerir un cambio de tubos no sea necesario vaciar todo el dispositivo, ello reduce el tiempo de reparación.

El arreglo de Heat Pipe tiene además, la particularidad de funcionar como un *diodo térmico*. Solo funcionará mientras la temperatura de los tubos de calor sea superior a la temperatura ambiente, con lo cual se evita que durante la noche haya pérdidas. El proceso solo funciona en una dirección, de ahí su similitud con la forma de funcionar de un diodo.

Por lo general existe un espacio entre los tubos, que se convierte en dos desventajas: un hueco por el cual pasa radiación solar sin aprovecharse y que en climas nevados suele formarse nieve entre dichos huecos. A diferencia de los de

placa plana, los colectores de tubo evacuado no se calientan, y por tal motivo no derriten la nieve que se acumule sobre ellos.

1.3 Colectores concentradores

Cuando se requieren altas temperaturas, los colectores con concentración son los más utilizados. Su característica principal es que tienen la capacidad de incrementar el flujo de radiación solar cientos de veces, ya que como su nombre lo indica concentran el flujo de radiación solar que reciben en una pequeña porción de área.

El principio de operación es simple: desviar la mayor cantidad de radiación solar a una zona varias veces menor que funciona como absorbedor. Para lograrlo se emplea un dispositivo óptico, ya sea un lente de Fresnel o una superficie reflejante. La consecuencia de concentrar la radiación solar, es tener una densidad de energía mayor, ya que el área en la que se distribuye es más pequeña que el área de captación. Debido a que el área de absorción/intercambio es menor, las pérdidas también serán menores. A nivel comercial no existen concentradores solares que empleen lentes de Fresnel.

Con los colectores concentradores, es posible alcanzar temperaturas de entre 100 y 500 °C, si se usan superficies con mejor acabado, las temperaturas pueden oscilar entre 500 y 1,500 °C. Cuando se aplican materiales de última generación y tecnología de seguimiento es posible obtener temperaturas entre los 1,500 y por lo menos 2600 °C (Kaplan, 1985).

1.3.1 Tipos de concentradores más relevantes

La Tabla 1 muestra la clasificación actual de los colectores solares de acuerdo con sus principios ópticos. Aunque la fuente consultada solo toma en cuenta el uso de los concentradores como dispositivos complementarios de los paneles

fotovoltaicos, los principios geométricos y ópticos son los mismos que se requieren para las aplicaciones térmicas.

Los colectores reflectores, respecto de los refractores, son más utilizados debido a la simpleza de su operación. Además su poder de concentración es tan elevado que son utilizados para la generación de energía eléctrica a gran escala. Los arreglos empleados son diversos; en ésta categoría se ubican los colectores compuestos que fueron desarrollados por Roland Winston utilizando los principios de la óptica no generadora de imágenes.

Las dimensiones de los primeros lentes, hicieron impráctica la aplicación de los mismos en el campo de la energía solar, sin embargo los avances en los métodos de manufactura y materiales han permitido que se sigan desarrollando colectores refractores, sin dispositivos comerciales por el momento.

Los colectores híbridos tienen como característica combinar los dos tipos anteriores. La parte refractiva del dispositivo no es un lente de Fresnel, ya que no se busca llevar la radiación a un punto específico, si no desviarla hacia unas superficies altamente reflectivas y con una geometría tal que la radiación recibida es reflejada hacia el absorbedor, ésta combinación permite que el área de apertura sea menor. Estos arreglos tienen la característica de que al igual que los sistemas CPC no requieren sistemas de seguimiento para tener gran rendimiento.

TABLA 1 - 1 TIPOS DE CONCENTRADORES SOLARES MÁS RELEVANTES

Tipos de concentradores	Descripción	Ejemplo
Reflectores	La radiación solar es reflejada por la superficie expuesta del colector y dirigida a un área particular.	Canal parabólico, Espejo parabólico, Concentrador Parabólico Compuesto (CPC), Concentrador Hiperbólico Compuesto
Refractores	La radiación solar es desviada hacia área particular al pasar a través del colector.	Colectores con lentes de Fresnel
Híbridos	La radiación solar puede experimentar reflexión y refracción al incidir sobre el colector.	DTIRC y Dispositivos planos de alta concentración
Luminiscentes	Se lleva acabo una reflexión térmica total de la radiación solar.	QDC

Fuente: (Firdaus Muhammad-Sukki, n.d., p. 4)

1.3.2 Colectores concentradores de superficie reflejante (CCSR)

Las referencias históricas de las aplicaciones de una superficie reflejante son muy antiguas y diversas. Sin embargo las fuentes consultadas coinciden en señalar que la primera aplicación de una superficie reflejante fue el espejo. Posteriormente hay coincidencia nuevamente respecto de un episodio histórico relacionado con el sitio de la ciudad de Siracusa en 212 AC. Historiadores griegos y romanos registraron que Arquímedes diseñó un arma conocida como “El rayo de la muerte”, cuyo fin era incendiar los barcos romanos que estuvieran dentro del rango de alcance de arco y flecha (MIT, 2012). Aunque hay muchas referencias, no existe un prototipo o algún vestigio de tal dispositivo, esto propició que se especulara como estaría compuesta.

Durante muchos años la existencia de un gran espejo parabólico se consideró factible. Sin embargo se demostró que producir en aquella época un espejo con esas dimensiones, sería imposible. Un espejo parabólico en si mismo puede tener tal desempeño, pero solo hasta el día de hoy su manufactura es posible. La veracidad del arma propuesta por Arquímedes estaba en duda hasta que recientemente alumnos del Massachusetts Institute of Technology (MIT) dieron otro enfoque al mismo problema y demostraron que es posible incendiar madera a una distancia de 30 m si se tienen 127 espejos de bronce de $.0929 \text{ m}^2$, los cuales si existían en aquella época. El experimento requirió que la radiación solar reflejada por cada espejo coincidiera en un área. La acumulación de energía radiante incrementó la temperatura hasta que la madera se encendió. La temperatura estimada para éste arreglo fue de por lo menos $400 \text{ }^\circ\text{C}$ (MIT, 2012).

Por otro lado, varios siglos después de Arquímedes, las propiedades de la cáustica de la parábola fueron utilizadas por Sir Isaac Newton para determinar, que en circunstancias ideales, un espejo parabólico dirigiría todos los rayos paralelos al

eje parabólico hacia un punto. Siendo ésta la primera geometría propuesta para desviar la luz captada por una superficie reflejante hacia una zona específica y teniendo como aplicación ser utilizado como objetivo en los telescopios en lugar de los lentes de baja calidad de aquella época .

1.4 Situación actual de los CCSR

Los avances en la ciencia de materiales han permitido que existan diversas alternativas al uso del espejo común como superficie reflejante. Los beneficios son diversos, desde una disminución del peso, una mayor resistencia a la corrosión o en casos muy particulares un mayor índice de reflexión.

FIGURA 1 - 5 PLANTA SOLAR CON SISTEMA DE SEGUIMIENTO (HELIÓSTATOS)



Fuente: (ME NewsWire, 2011)

Los procesos de manufactura de colectores con superficie reflejante han variado poco, siendo uno de los avance más grandes que paulatinamente se comienzan a producir en masa, disminuyendo así el costo.

En la actualidad los colectores parabólicos compuestos son los más estudiados. Lo anterior se debe a que al no requerir sistema de seguimiento, el costo de producción al igual que el mantenimiento, se reduce considerablemente.

Por otro lado, los colectores que requieren sistema de seguimiento presentarán un incremento en el costo de producción, ver Figura 1 - 5. Al estar expuestos a la intemperie, en general, los materiales empleados para los componentes mecánicos de dicho sistema requieren ser muy resistentes a la corrosión y esfuerzos térmicos. Por tal motivo, los plásticos resistentes a los rayos UV siguen siendo la mejor opción. Aunque los componentes electrónicos utilizados para fabricar un sistema de seguimiento han disminuido su costo y aumentado su precisión, no se producen en el país, volviéndolo un insumo que depende de otras economías.

FIGURA 1 - 6 CONCENTRADOR PARABÓLICO Y MOTOR STIRLING CON GENERADOR ADJUNTO



Fuente: (Sandia National Laboratories, 2009)

Por último, los colectores con superficie reflejante presentan estructuras disímiles en función de su aplicación. Las plantas generadoras de energía eléctrica cuyo arreglo se basa en helióstatos, ocupan superficies considerables, además de requerir un sistema individual de seguimiento y una estructura que lo soporte. Un ejemplo serían aquellos arreglos en los que la acumulación de la radiación solar se utiliza para hacer funcionar un motor Stirling y éste a su vez hace funcionar un generador eléctrico, ver Figura 1 - 6. Dicha configuración requiere de una estructura robusta que soporte el peso del colector, el del motor y el generador; cabe mencionar que en éste tipo de dispositivos el fluido de trabajo por lo general es un gas noble.

Capítulo 2

2. DISEÑO CONCEPTUAL Y DE CONFIGURACIÓN DE LA PROPUESTA DE ESPEJO PARABÓLICO

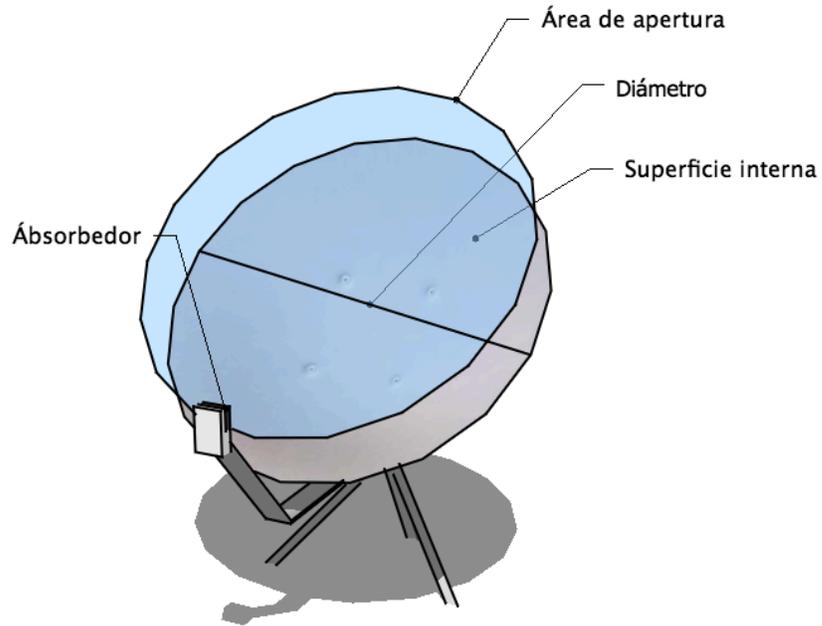
Un espejo parabólico es un dispositivo óptico cuya superficie reflejante tiene la geometría de un paraboloides de revolución y por consecuencia reflejará toda la radiación solar incidente en una zona. En el presente capítulo se exponen los conceptos asociados y la configuración tanto de materiales disponibles así como la manera en la que serán ubicados. En primera instancia es necesario presentar los conceptos básicos relacionados con éste tipo de colectores. Posteriormente la presentación de los posibles materiales a utilizar y concluir con la justificación de la elección de los mismos mediante una matriz de decisión.

2.1 Parámetros geométricos

La Figura 2 - 1 muestra el arreglo general de las antenas, así como el nombre de sus partes principales. Es importante hacer notar que la superficie interna (área gris), será la superficie reflejante para las 3 propuestas realizadas. De la Figura 2 - 1 se desprende que el área de apertura es menor que la superficie reflejante.

Lo anterior puede comprenderse mejor si se considera al área de apertura como aquella parte de la antena que es “vista” por el sol, es decir que es la proyección del área interna sobre el plano transversal al eje parabólico. La relevancia de dicho parámetro está en que es el diámetro de ésta área el que se utiliza para calcular el factor de concentración.

FIGURA 2 - 1 PARTES PRINCIPALES DE UNA ANTENA PARABÓLICA



Elaboración propia mediante el uso de Sketchup 8

2.2 El factor de concentración¹

Puesto que los concentradores solares se definen como dispositivos que colectan la radiación solar incidente de un área (A_1) y la transfiere a una zona más pequeña (A_2), el factor de concentración (C_{geom}) por definición será:

$$C_{geom} = \frac{A_1}{A_2}$$

EQ. 2 - 1

Por lo general los resultados de las pruebas de desempeño están expresadas en términos de éste factor, motivo por el cual resulta indispensable su utilización. Un

¹ (O'Gallagher, 2008, p. 2)

ejemplo de ello es que las pérdidas asociadas al área del absorbedor son inversamente proporcionales al factor de concentración.

2.3 Índice de reflexión

Cuando la radiación solar incide en una superficie, ocurren 3 fenómenos: una parte es absorbida por la superficie, otra es reflejada por la superficie y la restante es transmitida a través de la superficie. La cantidad de radiación que se esparce en dirección contraria a su propagación, se define como reflexión. Idealmente una superficie reflejante no absorberá ni transmitirá radiación. La Figura 2 - 2 muestra lo que ocurre con la radiación solar que incide en un material. Donde N representa a una recta normal a la superficie en el punto de incidencia, R representa el rayo reflejado, I al rayo incidente y T al rayo transmitido. Si bien es cierto que una fracción de la radiación será absorbida por la superficie, en la Figura 2 - 2 se contempla como parte de T puesto que eventualmente será irradiada al exterior. De la Figura 2 - 2 se infiere pues, que:

$$I = R + T.$$

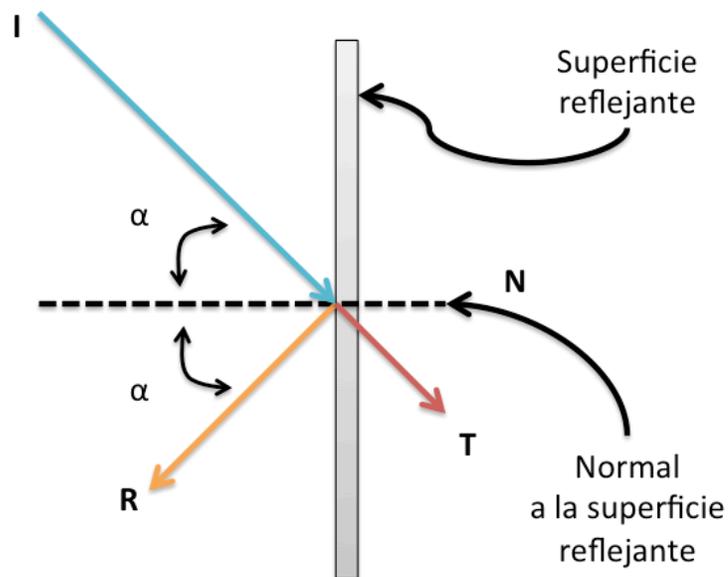
EQ. 2 - 2

Para las superficies reflejantes de los colectores solares T se considera una pérdida, es por ello que se utilizan materiales con bajo índice de transmisibilidad, alto índice de reflexión y bajo índice de absorción. La Figura 2 - 2 ilustra que para la óptica clásica, la reflexión tiene los siguientes postulados:

1. La normal, el rayo incidente (I) y el rayo reflejado (R), están contenidos en el mismo plano.
2. El ángulo (α) entre el rayo incidente (I) y la normal es igual al ángulo que se forma entre la normal y el rayo reflejado.

3. El rayo incidente (I) y el rayo reflejado (R) se encuentran en lados opuestos de la normal.

FIGURA 2 - 2 RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN UNA SUPERFICIE REFLEJANTE



Fuente: (Almanza et al., 2009, p. 284)

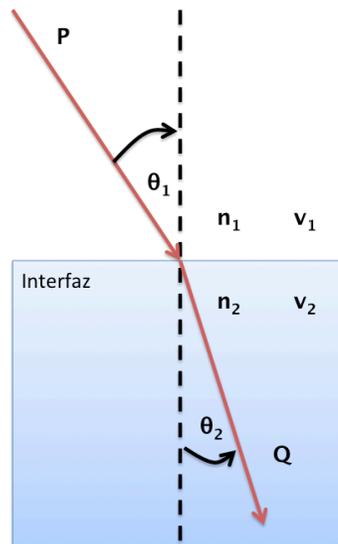
2.4 Índice de refracción

Aquella parte del espectro que pase de un medio a otro tendrá como consecuencia una disminución en su velocidad y su dirección. Ésta alteración en la trayectoria resulta fundamental para la fabricación de lentes. Respecto a las superficies reflejantes, es muy común que éstas se encuentren ubicadas detrás de un medio transparente, ya sea por fines de manufactura o para protegerla de algún factor externo; los espejos actuales serían el ejemplo más simple. Éste tipo de superficies reflejantes se les llama espejo de segunda superficie.

Un factor más a considerar para los materiales que de éste tipo es que el flujo luminoso tendrá que pasar a través del medio transparente en dos ocasiones, antes y después de incidir en la superficie reflejante. El factor anterior puede alterar significativamente la cantidad de radiación concentrada en el área del absorbedor, ya que puede existir una desviación significativa.

La Figura 2 - 3 ilustra un principio de la óptica enunciado en 1621, conocido como la ley de Snell, el cual establece la relación entre los ángulo de incidencia (θ_1) y el de refracción (θ_2), cuando la luz o algún otro fenómeno ondulatorio pasa a través de la frontera entre dos medios distintos. Aún los materiales más transparentes presentan ésta propiedad.

FIGURA 2 - 3 LA LEY DE SNELL



Elaboración propia, basado en (Winston et al., 2005)

Para la Figura 2 - 3 se tiene que:

P es el rayo incidente

Q es el rayo refractado

n_i es el índice de refracción para cada medio, carece de dimensiones

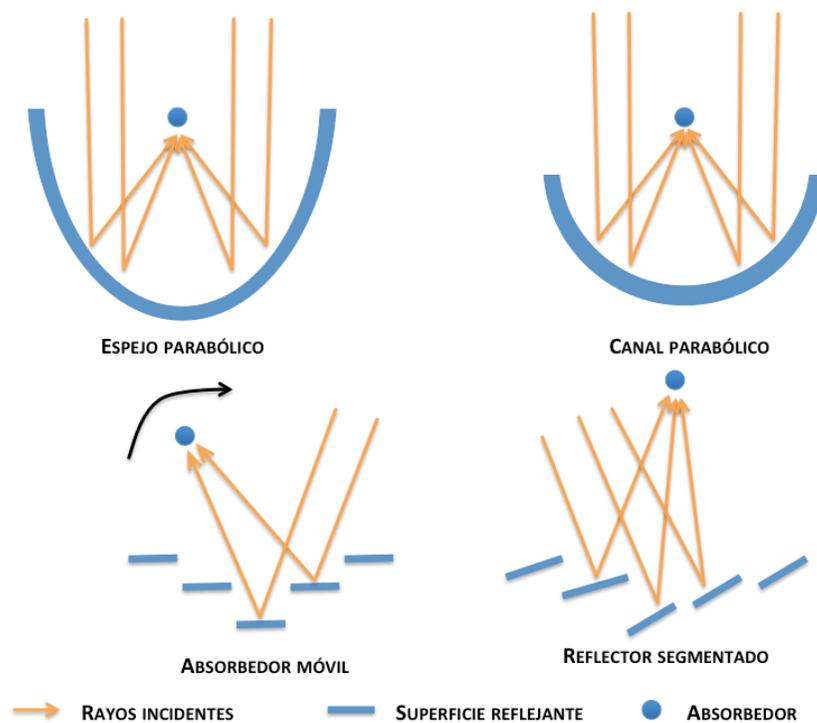
v_i es la velocidad de la luz en cada medio

θ_i es el ángulo de los rayos respecto de la normal

2.5 Geometrías

Las geometrías más recurridas para los colectores de concentración se muestran en la Figura 2 - 4. No todos los colectores con concentración requieren sistema de seguimiento; sin embargo la manufactura de concentradores compuestos requiere en algunos casos manufactura especializada, aumentando con ello su costo.

FIGURA 2 - 4 GEOMETRÍAS MÁS COMUNES DE LOS COLECTORES SOLARES



Elaboración propia, basado en (Tonda, 2000, p. 38)

Los casos particulares ilustrados en la Figura 2 - 4 de los espejos parabólicos y el canal parabólico son ampliamente utilizados en la generación CSP, puesto que son la geometría más simple. En ambos casos son el sistema de seguimiento y el fluido de trabajo lo que incrementa el costo de la instalación.

Puesto que el objetivo del presente trabajo establece un costo bajo como restricción, la geometría elegida debe contemplar que los materiales disponibles no requieran de modificaciones, procesos de manufactura o tratamientos costosos. Puesto que no se cuenta con una superficie reflejante de bajo costo ya curvada, se vuelve necesario contemplar que se requiere volver reflejante una superficie cuya geometría ya esté previamente manufacturada o en su defecto sea muy sencilla de manufacturar.

Si el material elegido es flexible y puede ser conseguido en láminas, el canal parabólico o un colector compuesto se convierten una opción viable. Para las propuestas presentadas en éste trabajo se utilizaran antenas satelitales de televisión que se consideran de desecho puesto que el proveedor del servicio ya no opera en el país. Es común que éstas antenas sean abandonadas al finalizar el contrato de operación o al existir un cambio de domicilio. En última instancia, es posible encontrar éstas antenas en depósitos de reciclaje, donde se comercializan de acuerdo al peso: su costo puede oscilar entre los \$50 y \$100, dependiendo del tamaño. Las antenas utilizadas en éste trabajo no tuvieron costo alguno.

2.6 Superficies reflejantes

La tabla Tabla 2 - 1 muestra los índices de reflexión, refracción y algunas otras características de algunos materiales que fueron contemplados para la manufactura del espejo. Aunque no son todos los existentes, estos son los materiales a los que se tuvo acceso

Tabla 2 - 1 Materiales aptos para superficies reflejantes

MATERIAL	OBSERVACIONES
ESPEJO	Los espejos están hechos de una delgada capa de aluminio o plata, que permiten una reflexión alta, depositada en la parte posterior de un vidrio de común. El vidrio tiene función de fijar la capa reflejante y protegerla, pero también tendrá el efecto de desviar la concentración de luz puesto que posee un índice de refracción alto (1.5, el aire tiene un índice de 1)
CD, DVD	Es un material de desecho, así que su obtención puede ser relativamente sencilla. En términos generales guarda mucha similitud con un espejo. La capa de material traslúcido es mucho más delgada (1 mm) y está hecha de policarbonato en lugar de vidrio (3mm), por lo mismo el peso es menor. La superficie reflejante tiene imperfecciones que pueden desviar la concentración, en ese sentido el espejo tiene mejor acabado.
MYLAR	Es un papel muy utilizado para envolver regalos. Tiene buen índice de reflexión pero es traslúcido a diferencia del espejo. Es muy económico y se vende por pliegos. La ficha técnica del material no indica la presencia de un medio traslúcido anterior a la superficie reflejante.
ACRÍLICO ESPEJO	De características muy similares al espejo convencional, pero de menor peso y durabilidad tanto a la intemperie como a los impactos. A diferencia del espejo, utiliza como material traslúcido acrílico, cuyo índice de refracción es sensiblemente menor al del vidrio (1.49).
SUPERFICIE CROMADA	Las superficies cromadas tienen un índice de reflexión igual o superior que el espejo convencional, pero requiere que la superficie donde se va a aplicar el cromado esté previamente pulida. Independientemente del proceso previo de preparación, el cromado de piezas está considerado como altamente tóxico. Si el acabado no es correcto puede deteriorarse con mucha facilidad por corrosión.

2.7 Parámetros de operación

Para poder determinar cual es el desempeño del concentrador parabólico propuesto, es necesario conocer cuales son los parámetros máximos de operación así como los propios de éste tipo de concentrador. Los concentradores que concentran la radiación en una línea, tendrán un límite máximo de concentración máximo de 215 °C y una temperatura máxima de 1600 °C. Por otro lado aquellos colectores que concentran la radiación solar en un punto tendrán un factor máximo de concentración igual a 4600 y una temperatura máxima de 5800 °C (Foster, Ghassemi, & Cota, 2010). Para ambos tipos de concentrador se toman en cuenta condiciones ideales como: el sol y el absorbedor son cuerpos negros, la temperatura entre la superficie reflejante y el absorbedor es 0 K y que la superficie reflejante es perfecta. El cálculo de los límites superiores de concentración y temperatura, aún para las condiciones ideales, resulta de gran utilidad puesto que permite tener una noción de la operación del dispositivo respecto al caso óptimo. La Tabla 2 - 2 muestra los parámetros operativos de los concentradores más comunes.

TABLA 2 - 2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS COLECTORES MÁS EMPLEADOS

TIPO DE COLECTOR	RANGO DE TEMPERATURAS °C	FACTOR DE CONCENTRACIÓN
PARABÓLICO COMPUESTO	60 - 240	1 – 5
CANAL PARABÓLICO	60 – 250	15 – 45
CANAL CILÍNDRICO	60 – 300	10 – 50
PARABÓLICO	100 – 500	100 – 1,000
CAMPO DE HELIOSTATOS	150 – 2,000	100 - 1500

Elaboración propia, basado en (Kaplan, 1985)

El radio de concentración de un espejo parabólico oscila entre 100 y 1000, además de alcanzar temperaturas entre los 100 y 500 °C. Por lo tanto se estima que el espejo propuesto debe operar dentro de dicho rango para ser considerado viable.

2.8 Configuración

Tomando en cuenta las consideraciones expuestas en los apartados anteriores, la geometría elegida será la de un plato parabólico, por la facilidad de su obtención. Si bien otras geometrías pueden tener mejor desempeño, la manufactura del dispositivo eleva el costo y tiempo de fabricación. También se contempla que para que ésta geometría tenga un desempeño óptimo, se requiere de un sistema de seguimiento, mismo que está fuera de los alcances de éste trabajo. El uso de una antena parabólica conlleva la ventaja de que ya cuenta con un sistema de soporte tanto para toda la estructura como para el foco (zona de concentración) del paraboloides.

Esto plantea una restricción más a la elección del material de la superficie reflejante. Puesto que se requiere volver reflejante una superficie de rugosidad media. En primera instancia se requiere que el material sea flexible y pueda ser agregado a la antena, por lo anterior y su bajo costo, el Mylar se convierte en la primera elección. El costo del acrílico espejo es de \$1,700 y solo se vende por hojas de 122 cm x 212 cm. El material para cd es una buena alternativa pero el tiempo requerido en el corte de cada pieza para aprovechar la superficie reflejante al máximo lo vuelve inviable.

Finalmente el espejo convencional presenta una opción intermedia ya que económicamente es accesible. La presente propuesta presenta una primera aproximación con el Mylar. Posteriormente se cubren dos antenas con espejos pequeños. En Capítulo 4 se presenta una comparación del desempeño de ambas.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DEL DETALLE Y MANUFACTURA DEL ESPEJO PARABÓLICO

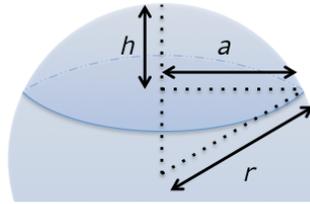
El presente capítulo describe las dimensiones de los espejos propuestos así como el procedimiento llevado a cabo para su construcción. Para la realización del presente trabajo se utilizaron 2 antenas parabólicas. La primera antena cuenta con un diámetro exterior de 78 cm. Para ésta antena se utilizó Mylar, a ésta propuesta se le asignó el nombre de Antena A1. Para la segunda antena se utilizó espejo de 5mm de espesor, cortado en cuadrados de 4.5 cm, esta propuesta recibe la denominación de Antena B. Finalmente la tercera propuesta utiliza espejo de 3mm de espesor cortado en forma de hexágonos de 6 cm y fueron puestos sobre la Antena A1, eventualmente se le asignó el nombre Antena A2.

3.1 Cálculo de la superficie interna

La superficie interna de la antena se calculó aproximando su geometría a la de un casquete, siendo medidos los valores de a y h ; ambos valores fueron sustituidos posteriormente en la EQ. 3-1. La Figura 3 - 1 muestra la ubicación de los correspondientes valores medidos.

Por otro lado el valor del área del absorbedor es estimado de manera indirecta. Aunque desde el punto de vista teórico la zona de concentración debería ser un punto. Puesto que el espejo no es perfecto, hay un nivel de dispersión que genera que el área de concentración sea mayor.

FIGURA 3 - 1 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE UN CASQUETE



Fuente: (Weisstein, n.d.)

El método empleado para medirla es colocando una tabla en la zona de mayor concentración e inmediatamente dibujar una silueta, para posteriormente calcular el área de la superficie de absorción.

$$A = \pi(a^2 + h^2)$$

EQ. 3 -1

3.2 Antena A1

La Tabla 3 - 1 muestra los parámetros geométricos más relevantes de la Antena A1.

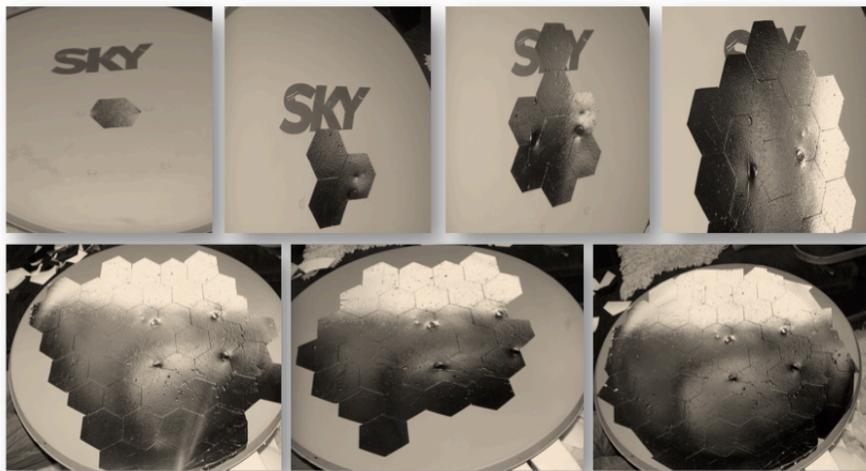
TABLA 3 - 1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA ANTENA A1

Masa (espejos incluidos)	10.45 kg
Diámetro	.7200 m
Área de apertura	.4071 m ²
Superficie interna	.4201 m ²
Superficie reflejante	.4201 m ²
Área estimada del absorbedor	.0064 m ²
Factor teórico de concentración	63.60 X

El material utilizado para cubrir la superficie interna fue Mylar auto adherible. El cual se vende en pliegos de .5 x .7 m y tiene un costo de \$ 22.12 por pieza. Se puede conseguir al menudeo sin grandes complicaciones en casas de especializadas de acrílico y materiales industriales. Existe una versión más económica, que no cuenta con su propio pegamento, que se utiliza para envolver regalos.

Las dimensiones y geometría del pliego no permitieron un pegado exitoso sobre la superficie previamente limpiada. Lo anterior se debe a la formación de múltiples bolsas de aire y que el papel no se plegaba a la forma curva de la antena. Puesto que los patrones hexagonales son la forma más eficiente de aprovechar un espacio (Weisstein, 1999), se utilizó éste patrón para cortar el Mylar y pegarlo. La Figura 3 - 2 muestra una breve secuencia del proceso empleado para el recubrimiento de la superficie interna.

FIGURA 3 - 2 SECUENCIA DE RECUBRIMIENTO DE LA ANTENA A1 CON MYLAR



Dado que la superficie interna de la antena es igual $.4201 \text{ m}^2$, se estimó que un área menor o igual al 5% (equivalente a $.0156 \text{ m}^2$) sería lo suficientemente pequeña para no presentar arrugas o bolsas de aire. Tomando en cuenta los factores anteriores, se eligió un hexágono regular de $.06 \text{ m}$ de lado, el cual posee un área de $.0094 \text{ m}^2$.

El proceso aplicado permitió la obtención de una superficie reflejante de condiciones aceptables, el acabado fue parecido al de una cuchara de metal convencional. El trabajo con éste material arrojó dos consideraciones importantes: el Mylar no es completamente opaco (permite el paso de una cantidad considerable de luz) y que se requiere de una superficie sumamente lisa, puesto que es tan delgado que cualquier defecto de la superficie genera protuberancias considerables.

3.3 Antena B

La Tabla 3 - 2 muestra los parámetros geométricos más relevantes de la Antena B.

TABLA 3 - 2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA ANTENA B

Masa (espejos incluidos)	9.32 kg
Diámetro	.6200 m
Área de apertura	.3019 m^2
Superficie interna	.3122 m^2
Superficie reflejante	.2989 m^2
Área estimada del absorbedor	.0100 m^2
Factor teórico de concentración	30.2 X

El material utilizado para cubrir la superficie interna fue espejo de 5 mm de espesor. El cual tiene un costo de \$192/m². Puesto que no se contaba con los medios necesarios para deformar el vidrio y hacer que adquiriera la geometría de la antena, se consideró utilizar fragmentos del mismo. Se utilizó el espejo más común, sin ningún tratamiento especial o acabado; esto a la larga repercutiría en el deterioro de los fragmentos de espejo.

Al igual que con la antena A, la superficie interna de la antena B fue previamente limpiada y después se fue pegando cada fragmento con silicón. Para ésta ocasión la geometría elegida para cada fragmento fueron cuadrados de .045 m de lado, teniendo estos una superficie de .002025 m². En total se emplearon 120 cuadrados, cubriendo una superficie de .243 m², siendo el costo total \$192 con el corte incluido. Las razones para elegir el cuadrado como geometría fueron: la simpleza del corte, el bajo costo del mismo y el desperdicio mínimo de material. La Figura 3 - 3 muestra la antena B terminada.

FIGURA 3 - 3 ANTENA B RECUBIERTA CON ESPEJO DE 5MM



El proceso aplicado permitió la obtención de una superficie reflejante de buenas condiciones. A diferencia del proceso empleado de la antena anterior, el acabado de superficial de la superficie interna no produce un gran impacto en el resultado final. Sin embargo, es notorio como se presenta una dispersión de la radiación, puesto que a diferencia del Mylar el espejo de 5 mm es un espejo de segunda superficie. Finalmente, la ventaja del espejo es que no se comporta como un material traslúcido y ello, teóricamente debe permitir una mayor concentración de radiación.

3.4 Antena A2

La Tabla 3 - 3 muestra los parámetros geométricos más relevantes de la Antena A2.

TABLA 3 - 3 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA ANTENA A2

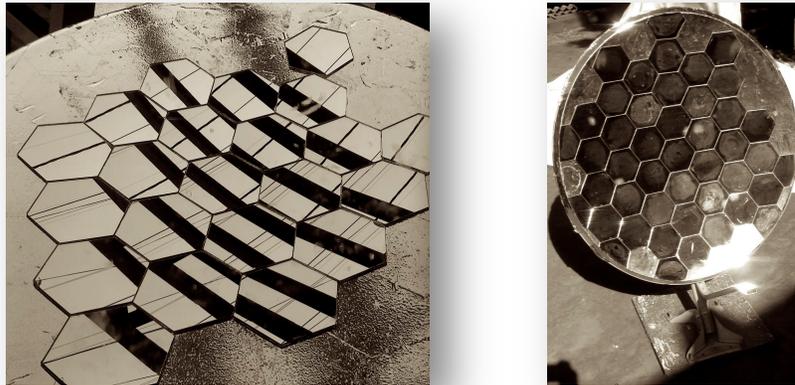
Masa (espejos incluidos)	10.45 kg
Diámetro	.7200 m
Área de apertura	.4071 m ²
Superficie interna	.4201 m ²
Superficie reflejante	.3702 m ²
Área estimada del absorbedor	.0150 m ²
Factor teórico de concentración	27.5 X

El material utilizado para cubrir la superficie interna fue espejo de 3 mm de espesor. El cual tiene un costo de \$11/m². Puesto que no se contaba con los medios necesarios para deformar el vidrio y hacer que adquiriera la geometría de la antena, se consideró utilizar fragmentos del mismo. Se utilizó el espejo más

común, sin ningún tratamiento especial o acabado; esto a la larga repercutiría en el deterioro de los fragmentos de espejo.

Puesto que no se contaba con una tercera antena, se utilizó la Antena A1 después de haber realizado las pruebas pertinentes. En ésta propuesta se utilizaron hexágonos de espejo de 6 cm de lado, teniendo estos una superficie de $.0094 \text{ m}^2$. En total se emplearon 42 hexágonos, cubriendo una superficie de $.3928$, siendo el costo total **\$272** con el corte incluido. El cambio de geometría con respecto a la Antena B tuvo como objetivo tener un menor dispersión de la radiación solar reflejada. La Figura 3 - 3 muestra la antena A2 terminada.

FIGURA 3 - 4 ANTENA A2 RECUBIERTA CON ESPEJO DE 3MM



Los espejos de los telescopios, emplean éste mismo patrón de diseño y ello les permite tener aperturas grandes. Aunque es una superficie reflejante más grande (10% mayor) que la Antena B, el área del absorbedor es más pequeña en la Antena B.

CAPÍTULO 4

4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

El diseño de las pruebas realizadas a las distintas propuestas tuvo como fundamentos: caracterizar el funcionamiento de cada propuesta en términos de la temperatura obtenida en el área del absorbedor después de 5 minutos y por otro lado calcular la energía obtenida en el absorbedor para comparas éste resultado con la constante solar, misma que se mencionó en los antecedentes de éste trabajo y cuyo valor es igual aproximadamente igual a 1 W/m^2 .

4.1 Materiales

Para la elaboración de ambas pruebas se utilizó un multímetro digital marca KNOVA con resolución de $.1 \text{ }^\circ\text{C}$ y rango de $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Éste dispositivo funciona registrando los impulsos eléctricos que el termopar genera con los cambios de temperatura.

Se requirió de una cámara de video digital, marca OLYMPUS, para registrar el aumento de temperatura a través del tiempo. La cámara tiene capacidad de 12 MP y el modo de video empleado fue VGA a 32 cuadros por segundo. Lo anterior permite que se puedan realizar gráficas utilizando software especializado.

El software libre multiplataforma utilizado es Tracker V 4.72 (Brown, 2012) y tiene como característica fundamental analizar el video cuadro por cuadro y asignar valores para cada uno. Por lo general éste programa educativo resulta muy útil para rastrear el movimiento de uno o más objetos, para obtener graficas de velocidad vs tiempo, aceleración vs tiempo, energía cinética vs potencial, entre muchas otras aplicaciones.

Finalmente, se usaron diversos materiales y herramientas, particularmente en el ámbito de seguridad tales como: lentes de sol, guantes, pinzas y frascos de vidrio tratado.

4.2 Pruebas realizadas

Se elaboraron dos tipos de pruebas las cuales tuvieron objetivos relacionados pero distintos. Ambas pruebas se aplicaron a las 3 propuestas, con una diferencia temporal de 30 días en el caso de la antena A2. Ya que en el Capítulo 2 se expuso que un concentrador de éstas características debe operar entre los 100 y 500 °C; el objetivo de la primera prueba fue determinar cual es la temperatura máxima que alcanza el espejo en un período de tiempo determinado. Mientras que el objetivo de la Prueba 2 fue estimar la energía térmica obtenida en el absorbedor, mediante el incremento de temperatura de 20 g de agua. En el caso de la Prueba II se realiza un cálculo previo sustituyendo en la eq. 4 -1.

$$Q = mC_p(T_f - T_i)$$

eq. 4 - 1

Donde:

Q = Energía térmica (kJ)

m = masa del agua (0.010 kg)

C_p = Calor específico del agua (4.18 kJ kg⁻¹ °C⁻¹)

T_f = Temperatura final del agua

T_i = Temperatura inicial del agua

4.3 Prueba 1

Objetivo: determinar la temperatura más alta obtenida en el absorbedor en un período de 3 minutos.

4.3.1 Procedimiento

- Orientar apropiadamente la antena en cuestión y cubrirla del sol.
- Dejar fijo el termopar en la zona de concentración.
- Poner a punto los equipos (cámara y multímetro).
- Descubrir la antena y tomar el video de la variación de la temperatura respecto al tiempo durante 3 minutos
- Procesar digitalmente el video y obtener las lecturas de temperatura cada 3 s.
- Graficar las lecturas obtenidas (temperatura vs tiempo)

4.4 Prueba II

Objetivo: calcular la energía térmica obtenida en el absorbedor después de 3 minutos de exposición a la radiación solar

4.4.1 Procedimiento

- Orientar apropiadamente la antena en cuestión y cubrirla del sol.
- Dejar fijo un pequeño depósito de vidrio con 20 g de agua, dentro del cual se coloca el termopar.
- Poner a punto el multímetro.

- Tomar el valor de la temperatura inicial.
- Descubrir la antena y dejar que esté expuesta durante 3 minutos.
- Tomar el valor de la temperatura final.
- Realizar los cálculos pertinentes para determinar cual fue la energía térmica obtenida.

GRÁFICA 4 - 1 RESULTADOS DE LA PRUEBA I

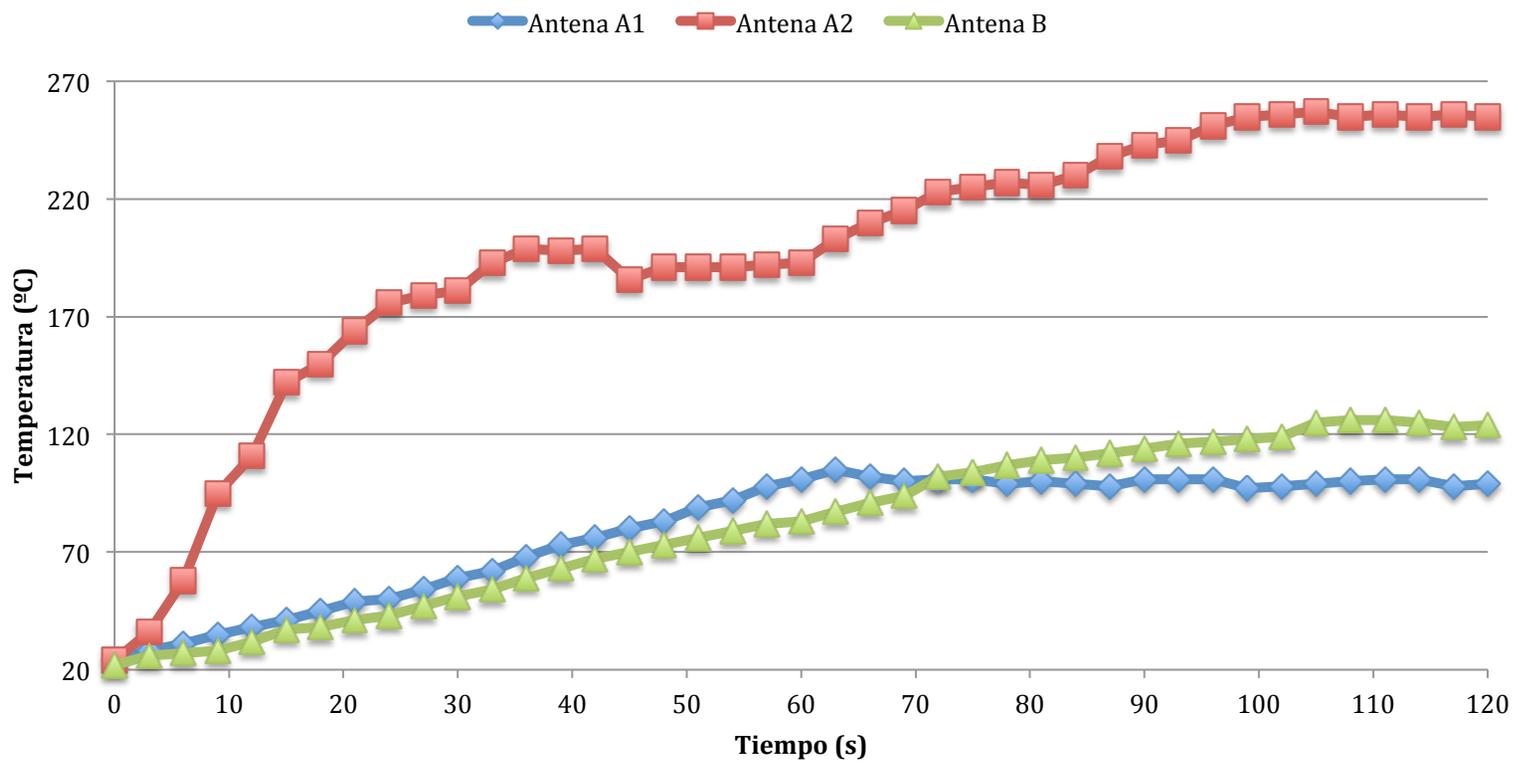


TABLA 4 - 1 VALORES OBTENIDOS DE LA PRUEBA II

	Temperatura Final °C	Temperatura Inicial °C	Q kJ
Antena A1	40.8	21.3	0.8151
Antena A2	65.3	22.1	2.8800
Antena B	80.7	21.9	2.4578

4.5 Resultados

A continuación se detallan los resultados de la pruebas realizadas.

4.5.1 Antena A1

Basado en la Gráfica 4 – 1 se puede determinar que la temperatura máxima para ésta propuesta fueron 101 °C. Lo cual lo sitúa dentro del rango esperado. No es la que mayor temperatura alcanza, esto se debe a que como se mencionó en el Capítulo III el Mylar es traslúcido, lo que conlleva a una pérdida de radiación solar considerable.

Por otro lado para la Prueba II, el valor de energía concentrada indicaría una eficiencia del 15%. Esto es tomando en cuenta que el valor estimado para la constante solar es 1 W/m². Tomando en cuenta el bajo costo del material, el poco tiempo que requiere supuesta a punto y las posible mejoras (poner más capas del material, lijar la superficie previamente, entre otros) ésta es por mucho la mejor opción. A lo anterior se puede añadir el bajo peso del espejo en su totalidad y facilidad de transportación, puesto que no hay posibilidad de que se rompa la superficie. Es posible que el Mylar presente deterioro por factores ambientales pero a diferencia del espejo, el remplazo de las partes es rápido y económico. Finalmente, una última ventaja de ésta propuesta es que tuvo la menor área de absorción .0064 m².

4.5.2 Antena B

Basado en la Gráfica 4 – 1 se puede determinar que la temperatura máxima para ésta propuesta fueron 125 °C. El ensamblado de la misma no tuvo mayores complicaciones y lo convierte en una alternativa viable. Por otro lado el corte de las piezas requiere: de herramienta particular para tal fin o contratar a un tercero. En cualquiera de los 2 casos esto se traduce a un incremento en el costo y tiempo de elaboración, que no necesariamente justifican ésta alternativa, ya que como se mencionó en el apartado anterior la propuesta con Mylar es susceptible de mejora.

Por otro lado para la Prueba II, el valor de energía concentrada indicaría una eficiencia del 18%. Esto es tomando en cuenta que el valor estimado para la constante solar es 1 W/m². Puesto que el área de apertura es 10% menor comparada con las otras alternativas, el valor de la eficiencia para ésta propuesta resulta un factor a considerar. En términos proporcionales el peso del dispositivo aumenta significativamente, ya que aún siendo una antena más pequeña su peso no difiere mucho del de la Antena A2.

En términos de transporte no es una opción ya que los espejos pueden despegarse o romperse. La dispersión que presenta éste tipo de espejo (5 mm de espesor) es muy grande, sin embargo el alto coeficiente de reflexión que tiene lo compensa. El área de concentración fue un poco más complicada de calcular, ya que presentaba una forma irregular. Una desventaja considerable de emplear espejo es que se deteriora muy fácilmente al estar expuesto a la intemperie.

4.5.3 Antena A2

Basado en la Gráfica 4 – 1 se puede determinar que la temperatura máxima para ésta propuesta fueron 257 °C. Lo cual lo sitúa dentro del rango esperado. Es la propuesta con la temperatura más alta. El ensamblado de la misma no tuvo

mayores complicaciones, sin embargo el corte de las piezas generó un desperdicio de material que no se contempló en un inicio. Por otro lado el tiempo invertido en el corte del mismo no justifica la ganancia respecto al Mylar. Desde luego que ésta propuesta presenta sus beneficios si se utiliza un área reflejante más grande y no se utilizan antenas para montarlos, el hecho de que esta configuración se emplea en los espejos de los telescopios lo demuestra.

Por otro lado para la Prueba II, el valor de energía concentrada indicaría una eficiencia del 16%. Esto es tomando en cuenta que el valor estimado para la constante solar es 1 W/m^2 . La obtención de una eficiencia más elevada se debe a que el coeficiente de reflexión del espejo es muy superior al del Mylar. Sin embargo la dispersión que presentan hexágonos tan grandes interfiere con el desempeño. Podrían utilizarse hexágonos más pequeños, intentarse otras geometrías tales como triángulos equiláteros o simples cuadrados y el desempeño del espejo tendría que ser superior. Lo anterior se debe a que el espejo de 3 mm presenta una dispersión mucho menor respecto al de 5 mm. Además un espejo más delgado presenta la ventaja de reducir el peso total.

CONCLUSIONES

La finalidad del presente trabajo es presentar el diseño y manufactura de un espejo parabólico de bajo costo. Para lo cual se elaboraron 3 propuestas cuyo costo es inferior a \$300. Además se llevaron a cabo dos pruebas para determinar mostrar el desempeño de dichas propuestas.

La propuesta con Mylar no fue la que mayor temperatura obtuvo, sin embargo puede ocurrir que una aplicación particular solo requiera de alcanzar esa temperatura: 101°C. Aunado a lo anterior, el bajo costo del material permite considerarlo como la mejor opción en términos de costo-beneficio. Es posible que el desempeño de ésta propuesta pueda ser mejorado considerablemente si se superponen varias capas del material, puesto que el Mylar no es opaco, así pues aquella fracción de la radiación que pase a través de él puede ser reflejada por la siguiente capa sucesivamente.

Otra mejora para una propuesta con Mylar es darle un acabado previo a la superficie, preferentemente pulirla hasta quedar en acabado espejo, ya que como se indicó en Capítulo III el espesor del Mylar permite que éste se adapte a los defectos que la superficie pueda tener: contribuyendo así a que la superficie tenga defectos que impiden su óptimo desempeño.

El objetivo del presente trabajo no es diseñar aplicaciones para los espejos parabólicos propuestos, sin embargo la literatura consultada refiere que los deshidratadores solares son un área en la cual se están desarrollando múltiples dispositivos particularmente para las zonas rurales. Con la finalidad de conservar alimentos de manera natural. Luego entonces el uso de un material económico y

de fácil manipulación, como el Mylar, puede ser viable en aquellas propuestas de deshidratadores que requieran de una superficie reflejante.

Finalmente en el campo de los colectores de placa plana, el Mylar puede ser colocado, sin necesidad de recortarlo, entre la placa absorbedora y el aislante térmico, ello con la finalidad de reflejar parte de la radiación infrarroja que es emitida por la placa absorbedora. Además de proporcionar un mejor aislamiento térmico, el peso del colector no se verá incrementado significativamente.

Para el caso del uso de espejos, se recomienda el uso de espejo de 3mm. La primera ventaja cuantificable será que el costo es menor respecto al de 5mm. La dispersión inherente a los espejos de segunda superficie, es proporcional al espesor de la capa protectora. En éste sentido un espejo de primera superficie puede tener un desempeño superior como ocurre en el caso del acrílico, pero cuyo costo no lo vuelve viable. Retomando el uso de espejo de 3mm, otras ventajas que presenta es que su peso es menor y su facilidad para cortarlo.

Un factor que no se consideró durante el diseño, es que independientemente del espesor del espejo que se utilice, es necesario aplicar un recubrimiento en la parte posterior del espejo. La exposición del espejo al medio ambiente sin un recubrimiento permite la corrosión de la superficie reflejante, disminuyendo así su desempeño.

El recubrimiento utilizado puede ser una capa de pintura de aceite, antes y después del corte. Así mismo se sugiere aplicar éste recubrimiento en las orillas de las piezas utilizadas para evitar la exposición de la unión entre vidrio y espejo. También debe considerarse recubrir la unión entre las piezas, para evitar el mismo problema. En éste caso en particular el uso de un barniz transparente es preferible para no mermar el desempeño de la superficie reflejante. Aunque

pueden aplicarse otros métodos para prevenir el deterioro por corrosión, la aplicación de un recubrimiento económico no impactará en el costo final del dispositivo.

Otra mejora para la propuesta de utilizar espejos, preferentemente de 3mm, es un cambio en la geometría. Por un lado el corte de hexágonos, aunque eficientes en términos geométricos, generan una cantidad de desperdicio considerable, el cual difícilmente se puede utilizar ya que consta de fragmentos irregulares.

En el caso particular de los hexágonos, el criterio para decidir el tamaño de los fragmentos debe ser replanteado si la prioridad no es mantener un costo bajo. En el presente trabajo se buscó minimizar el costo, pero es posible que si se emplean hexágonos mas pequeños el desempeño de espejo mejore considerablemente, ya que presentará menor dispersión y por lo mismo un área de concentración menor.

El corte de cuadrados tiene la ventaja de ser sencillo y rápido, pero la cantidad que se necesita para recubrir una superficie puede tornar la propuesta inviable. Aunque aparentemente el desperdicio de material es menor, el tamaño de los cuadrados hace que se requiera de mayor precisión en el corte y en el caso de espejos de 3mm estos cortes puede generar mucho desperdicio. Una alternativa para la geometría de los espejos es el corte de triángulos equiláteros, puesto que con 6 de ellos puede formarse un hexágono, se estaría utilizando nuevamente el patrón mas eficiente, pero el corte sería mas sencillo propiciando menor desperdicio de material.

Una mejora general hacia el presente trabajo, sería la aplicación de un banco de pruebas mas diversos y con mayor periodicidad. La caracterización del desempeño de las propuestas en distintas épocas del año puede ser de gran

utilidad para determinar una cota mínima y máxima de funcionamiento. Así mismo la caracterización a distintas horas en el mismo día puede resultar de utilidad. Así mismo el diseño y manufactura de un sistema de seguimiento permitirá un mayor aprovechamiento del espejo.

El desarrollo de aplicaciones para éste tipo de espejos es ya en sí mismo un trabajo de diseño mas elaborado. Los valores obtenidos permiten considerar que es posible realizar alguna de las siguientes actividades:

- Cocinar alimentos
- Hervir agua
- Esterilizar equipo
- Utilizar un motor Stirling de baja temperatura

Puesto que el incremento de temperatura es proporcional al tamaño de la superficie reflejante, entonces es posible escalar el espejo hasta poder utilizar motores Stirling de alta temperatura y ser utilizado como parte de un arreglo de CSP.

BIBLIOGRAFÍA

- (DGS), G. S. E. S. (2004). *Planning and Installing Solar Thermal Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers*. Routledge.
- Abbott, D. (2010). Keeping the Energy Debate Clean: How Do We Supply the World's Energy Needs? *Proceedings of the IEEE*, 98(1), 42–66.
doi:10.1109/JPROC.2009.2035162
- Almanza, R., Héctor Cruz Manjarrez, Chávez-Galán, J., Hernández, P., Hernández Gómez, V. H., Martínez, I., Mesa, A., et al. (2009). *Ingeniería de la energía solar III. Investigación y desarrollo (azul)*. Retrieved from <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/DetallePublicacion.aspx?id=2936>
- Bonanno, A., Schlattl, H., & Patern, L. (2002). The age of the Sun and the relativistic corrections in the EOS. *Astronomy and Astrophysics*, 390(3), 1115–1118. doi:10.1051/0004-6361:20020749
- Concheiro, A. A., & Viqueira, L. R. (1985). *Alternativas energéticas*. Fondo de Cultura Económica.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes* (3rd ed.). Wiley.

- Firdaus Muhammad-Sukki, R. R.-I. (n.d.). Solar Concentrators. Clive International Journal of Applied Sciences International Journal of Applied Sciences, 1.
- Kaplan, G. M. (1985). Understanding Solar Concentrators.
- Laughton, C. (2010). Solar Domestic Water Heating: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation. Routledge.
- ME NewsWire. (2011). ME NewsWire | Middle East News Wire - BrightSource Energy Delivers World's Largest Solar-to-Steam Facility for Enhanced Oil Recovery to Chevron. Retrieved October 29, 2012, from <http://www.me-newswire.net/news/4232/en>
- Mejía, E. R. (1999). Estado del arte de la investigación en energía solar en México. Fundación ICA.
- MIT. (2012). 2.009 Product Engineering Processes: Archimedes. Retrieved October 29, 2012, from http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10_ArchimedesResult.html
- Módulo Solar, S. A. de C. V. (2011). LINEA DE CALENTADORES SOLARES DOMESTICOS. Retrieved from <http://www.modulosolar.com.mx/AXOL/>
- O’Gallagher, J. J. (2008). Nonimaging Optics in Solar Energy (1st ed.). Morgan and Claypool Publishers.

PowerDish™ by Infinia. (2010). Retrieved from

http://www.youtube.com/watch?v=rPc0GIQ8dJI&feature=youtube_gdata_player

procurAsia. (2012). China is the world leader of Solar water heating systems!

Retrieved October 26, 2012, from <http://www.procurasia.com/china-world-leader-solar-water-heating/>

Sandia National Laboratories. (2009, July 7). Sandia National Laboratories: News

Releases : New SunCatcher™ power system unveiled at National Solar Thermal Test Facility. Retrieved October 29, 2012, from

https://share.sandia.gov/news/resources/news_releases/new-suncatcher-power-system-unveiled-at-national-solar-thermal-test-facility-july-7-2009/

Secretaría de Energía. (2011). Balance Nacional de Energía 2010 (Primera.).

México, DF: Secretaría de Energía. Retrieved from www.energia.gob.mx

SUNDA. (2011). SUNDA SEIDO2 series direct flow vacuum tube solar

collector. Retrieved October 26, 2012, from

http://www.sundasolar.com/product_seido2%20series%20collector.html

The Status of Concentrating Solar Power Development. (2011). Retrieved from

http://www.youtube.com/watch?v=VJ-YpM8bjlw&feature=youtube_gdata_player

Tonda, J. (2000). El oro solar y otras fuentes de energia. Fondo De Cultura Economica USA.

Webmastersiesol. (2009, September 26). File:Como Funcionan El Heat Pipe.jpg. wikimedia.org. Retrieved October 27, 2012, from http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Como_Funcionan_EL_Heat_Pipe.jpg

Weisstein, E. W. (n.d.). Zone -- from Wolfram MathWorld. Text. Retrieved November 15, 2012, from <http://mathworld.wolfram.com/Zone.html>

Winston, R., Minano, J. C., Benitez, P. G., & Bortz, W. contributions by N. S. and J. C. (2005). Nonimaging Optics (1st ed.). Academic Press.