



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño mecánico del disco parabólico de un
concentrador solar y la caracterización
térmica del receptor**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERA MECÁNICA

PRESENTA:

Rosa María González García

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Armando Rojas Morín

Ciudad Universitaria, México D.F, Octubre de 2014



Resumen ejecutivo	10
Introducción	11
Objetivo	12
Capítulo 1.....	13
1.1 Panorama energético mundial	13
1.2 Panorama energético en México.....	15
1.2.1 Alternativas energéticas	17
1.3 Captación de la energía solar	21
1.3.1 Energía fotovoltaica.....	21
1.3.2 Energía Termosolar.....	22
1.4 Desempeño en la industria.....	27
1.4.1 Calentamiento de agua.....	28
1.4.2 Cocina solar	29
1.4.3 Secado	29
1.4.4 Precalentamientos.....	30
1.4.5 Refrigeración y aire acondicionado	30
1.4.6 Procesos de alta temperatura	31
2 Capítulo 2.....	33
2.1 Principio de la concentración solar	34
2.2 Tecnologías de concentración solar	36
2.2.1 Concentrador cilíndrico parabólico (CCP).....	36
2.2.2 Elementos principales de un CCP.	37
2.2.3 SISTEMA DE TORRE CENTRAL (STC).....	40
2.2.4 Elementos principales de un STC.....	41
2.2.5 Sistema de disco parabólico (SD)	42
2.2.6 Componentes principales de un concentrador de disco parabólico.....	43
3 Capítulo 3.....	49
3.1 Fundamentos.....	49
3.2 Propiedades de radiación de los materiales:	51
3.2.1 Emisividad:.....	51

3.2.2	Absortividad:	51
3.2.3	Transmisividad.....	51
3.2.4	Reflectividad	52
3.3	Cuerpo negro y Ley de Stefan-Boltzmann	52
3.4	Radiación atmosférica y solar.....	54
3.4.1	Constante solar.....	54
3.4.2	Latitud y longitud.....	55
3.4.3	Características de la radiación solar	56
3.5	Instrumentos de medición	57
3.5.1	Piranómetro.....	57
3.5.2	Piroheliómetro.....	59
3.5.3	Medición vía satélite	60
4	Capítulo 4.....	61
4.1	Condiciones de operación y especificaciones	61
4.2	Diseño óptico.....	62
4.2.1	Parámetros de la parábola	62
4.2.2	Análisis geométrico de la parábola del concentrador	65
4.2.3	Método de trazado de rayos solares.....	66
4.3	Superficie reflejante	77
4.3.1	Posibles materiales.....	77
4.3.2	Selección.....	81
4.3.3	Aplicación de la superficie reflejante	86
4.3.4	Método de construcción de la laminadora	87
4.4	Diseño de la estructura.....	88
4.4.1	Selección del material.....	88
4.4.2	Diseño CAD de la estructura.....	88
4.5	Estructura final.	90
4.6	Diseño del receptor	91
4.6.1	Selección del material.....	91
4.6.2	Soporte	92
4.6.3	Modelo de transferencia de calor	93
5	Capítulo 5.....	95
6	Conclusiones.....	111
7	Bibliografía.....	112

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Emisiones mundiales de CO ₂ por combustible (carbón, petróleo y gas), en millones de toneladas hasta el 2008 (International Energy Agency, 2008).	11
Ilustración 2. Estructura del concentrador solar.	12
Ilustración 3. Esquema de la transformación de la energía solar (Pillatowsky, 2009).	13
Ilustración 4. Historial y prospectiva de los consumos energéticos en el mundo. (International Energy Agency, 2008).	14
Ilustración 5. Prospectiva más allá del 2050 del panorama energético. (Shell global, 2007).	14
Ilustración 6. Uso global de energías renovables (International Energy Agency, 2008).	15
Ilustración 7. Evolución del uso de los principales energéticos en México (SENER, 2008).	16
Ilustración 8. Evolución de la capacidad instalada para generación eléctrica en México (SENER, 2008).	16
Ilustración 9. Consumos energéticos de diversas industrias en México 1 (SENER, 2008).	16
Ilustración 10. Consumos energéticos de diversas industrias en México 2 (SENER, 2008).	17
Ilustración 11. Campos geotérmicos en México (CFE, 2007).	18
Ilustración 12. Potencial eólico en México (CFE, 2007).	18
Ilustración 13. Potencial de biomasa por desechos agrícolas. (Centro Mario Molina, 2008).	19
Ilustración 14. Vecindario con energía solar fotovoltaica en Mexicali (Pillatowsky, 2009).	20
Ilustración 15. Instituto de Ingeniería UNAM (Almaza, 1976).	20
Ilustración 16. Uso de calentadores solares de agua en el 2008 (SENER, 2008).	21
Ilustración 17. Sistema de almacenamiento de un sistema fotovoltaico en un banco de baterías (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).	22
Ilustración 18. Paneles fotovoltaicos en el CIE [el autor].	22
Ilustración 19. Esquema de un colector plano (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).	23
Ilustración 20. Concentrador plano de polipropileno para calentamiento de alberca (Pillatowsky, 2009).	24
Ilustración 21. Sistema de concentrador solar de tubos evacuados para calentamiento de agua (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).	24
Ilustración 22. Colector solar cilíndrico parabólico compuesto con un tubo al vacío (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).	25
Ilustración 23. Concentrador de canal parabólico. El fluido fluye a lo largo de un tubo, y su trayectoria se localiza en la línea de focos de todas las parábolas que forman el canal (Pillatowsky, 2009).	25
Ilustración 24. Concentrador tipo Fresnel (Pillatowsky, 2009).	26
Ilustración 25. Concentrador de disco parabólico. El receptor de la energía solar es puntual y se localiza en el foco de la parábola (Pillatowsky, 2009).	26
Ilustración 26 Campo de heliostatos en la plataforma solar de Almería (Pillatowsky, 2009).	27
Ilustración 27. Sistema de calentamiento de piscina y alberca (Florida Energy center, 2008).	29
Ilustración 28. Estufa solar (Pillatowsky, 2009).	29
Ilustración 29. Secador solar de arroz en el CIE UNAM [autor], el aire se puede calentar directamente al pasar los colectores solares o través de agua caliente calentada con colectores solares.	30
Ilustración 30. Precalentamiento del agua al calentador domestico (Florida Energy center, 2008).	30
Ilustración 31. Esquema de un refrigerador solar (Pillatowsky, 2009).	31
Ilustración 32. Esquema de un sistema de concentración solar con heliostatos para generación eléctrica. La producción de vapor se hace a partir de sodio como fluido receptor de la radiación solar (Pillatowsky, 2009).	31

Ilustración 33. Prototipo de recuperación de aluminio mediante alta radiación (German Aerospace Center, 2009).....	32
Ilustración 34. Estanque solar para desalación de agua (University of Nevada Reno).	32
Ilustración 35. Pintura que muestra la historia de la hazaña de Arquímedes al defender Siracusa, mediante espejos concentra la radiación solar en las velas de los barcos romanos enemigos (Arancibia, 2009).	33
Ilustración 36. Elementos básicos de un sistema de concentración solar.	34
Ilustración 37. Rayos incidentes sobre una parábola.....	34
Ilustración 38. Relación de concentración de 100.	35
Ilustración 39. Horno solar de Odeillo en Francia (Pillatowsky, 2009).....	36
Ilustración 40. Esquema de un CCP.	37
Ilustración 41. Corte de un tubo absorbedor (Pérez, 2005).....	39
Ilustración 42. Sistema de seguimiento solar (Pérez, 2005).	39
Ilustración 43. CPCs en la planta solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM (el autor).....	40
Ilustración 44. Diagrama de STC (Pérez, 2005).....	40
Ilustración 45. Dos tipos de distribuciones en un campo de heliostatos (Pérez, 2005).....	41
Ilustración 46. Diferentes tipos de receptores de un STC (Pérez, 2005).....	42
Ilustración 47. Planta termosolar en Sevilla España (Pillatowsky, 2009).	42
Ilustración 48. Esquema de un concentrador de disco parabólico (Pérez, 2005).....	43
Ilustración 49. Superficie receptora conformada de diversos espejos (Lovegrove, 2008).	44
Ilustración 50. Receptor de tubos EuroDish (SOLO kleinenmotoren).	45
Ilustración 51. Diagrama del Ciclo Stirling (Yunus, Termodinámica, 2006).....	45
Ilustración 52. Parámetros importantes en el diseño de un concentrador de disco parabólico.	46
Ilustración 53. Rendimientos típicos en un sistema generador con concentrador de disco. (Pérez, 2005).	46
Ilustración 54. Concentrador solar de disco parabólico, construido en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM.	47
Ilustración 55. Concentrador solar de disco parabólico, construido en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (Ramirez, 2007)	47
Ilustración 56. Concentrador de disco parabolico en la Australian National University (Lovegrove, 2008).....	48
Ilustración 57. Tecnología de SES en Peoria Arizona (Renewable Energy News, 2008).....	48
Ilustración 58. Flujos de radiación (Pérez, 2005).	50
Ilustración 59. Concepto de absortividad.....	51
Ilustración 60. Emisividad, absortividad y transmitancia (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).	52
Ilustración 61. Espectro electromagnético con componente térmica (UV, luz visible e IR) (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).....	54
Ilustración 62. Orbita de la tierra y variación de su distancia al Sol. (Ruíz, 2006).....	55
Ilustración 63. Espectros de la radiación aprovechables, 1.-UV, 2.-Luz visible, 3.-IR (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).....	56
Ilustración 64. Balance simplificado de la energía proveniente del Sol.	56
Ilustración 65. Radiación solar directa y difusa (Arancibia, 2009).	57
Ilustración 66. Foto de un piranómetro (Juan Hermosillo, 1995).	58
Ilustración 67. Piranómetro con sistema de sombra para radiación difusa. (Ruíz, 2006).....	58
Ilustración 68. Esquema de un piranómetro. (Ruíz, 2006).....	59
Ilustración 69. Piroheliómetro EPPLEY NIP (Ruíz, 2006).....	59
Ilustración 70. Geometría básica de un piroheliometro (Ruíz, 2006).	60

Ilustración 71. Valores de irradiación global en México (Almaza, 1976).	60
Ilustración 72. Condiciones del sitio de la instalación en la Planta solar del Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México.	62
Ilustración 73. Definición de parábola (Juan Hermosillo, 1995).	63
Ilustración 74. Efecto de concentración (Juan Hermosillo, 1995).	63
Ilustración 75. Proceso para definir la parábola.	63
Ilustración 76. Diferentes geometrías para un diámetro de apertura de 2 m.	65
Ilustración 77. Geometrías correspondientes a diferentes ángulos de apertura con su foco.	66
Ilustración 78. Definición de las etapas en SolTrace. (Soltrace Documentation, 2008).	68
Ilustración 79. Software SolTRACE y sus pasos.	69
Ilustración 80. Definición del Sol.	69
Ilustración 81. Definición de geometrías.	70
Ilustración 82. Distancia focal.	70
Ilustración 83. Tamaño y forma del receptor.	71
Ilustración 84. Selección de materiales y definición de radiación.	71
Ilustración 85. Energía en el receptor.	72
Ilustración 86. Concentración de rayos solares en el receptor.	72
Ilustración 87. Reflexión de rayos solares en el paraboloide.	73
Ilustración 88. Distancia focal de 68.4 cm (-3 cm).	73
Ilustración 89. Distancia focal de 69.4 cm (-2 cm).	74
Ilustración 90. Distancia focal de 70.4 cm (-1 cm).	74
Ilustración 91. Distancia focal de 71.4 cm (mayor concentración).	74
Ilustración 92. Distancia focal de 72.4 cm (+1 cm).	75
Ilustración 93. Distancia focal de 73.4 cm (+2 cm).	75
Ilustración 94. Distancia focal de 73.4 cm (+3 cm).	75
Ilustración 95. Flujo pico vs distancia focal.	76
Ilustración 96. Flujo promedio vs distancia focal.	77
Ilustración 97. Acrílico acabado espejo.	78
Ilustración 98. Poliéster metalizado.	78
Ilustración 99. Papel Mylar.	79
Ilustración 100. Lamina de acero inoxidable.	79
Ilustración 101. ReflecTech.	80
Ilustración 102. Rollo de ReflecTech.	81
Ilustración 103. Poliéster sin adhesivo y Poliéster con adhesivo.	81
Ilustración 104. Película de polietileno y Lámina de acero inoxidable.	82
Ilustración 105. Medición de reflectancia y transmitancia (Pérez, 2005).	82
Ilustración 106. Reflectómetro de espectro solar en el Instituto de Ingeniería UNAM.	83
Ilustración 107. Factor masa de aire (University of Nevada Reno).	83
Ilustración 108. Aplicación del reflectech mirror film.	86
Ilustración 109. Laminadora diseñada para la aplicación de la película.	88
Ilustración 110. Imagen en CAD del arreglo propuesto.	89
Ilustración 111. Detalle de las uniones de los perfiles en el hueco.	90
Ilustración 112. Imagen en CAD de la antena final seleccionada.	91
Ilustración 113. Receptor del concentrador solar.	92

Ilustración 114. Soporte de la estructura.....	92
Ilustración 115. Modelo de transferencia de calor del receptor.....	93
Ilustración 116. Valores de radiación en el modelo de transferencia de calor.....	93
Ilustración 117. Estructura gajo a 45 grados.....	95
Ilustración 121. Estructura completa para ángulo de apertura de 45 grados.....	95
Ilustración 119. Rolado de ángulo de aluminio.....	96
Ilustración 120. Sujeción en esquinas.....	96
Ilustración 121. Muestra de esquinas en gajo terminado a 45 grados.....	97
Ilustración 122. Vista inferior de gajo terminado a 45 grados.....	97
Ilustración 123. Vista frontal de gajo terminado a 45 grados.....	97
Ilustración 124. Estructura inicial gajo a 70 grados.....	98
Ilustración 125. Gajo a 70 grados limpio y sin malla.....	99
Ilustración 126. Modelado de estructura a 70 grados en Unigraphics 5.....	99
Ilustración 127. Vista frontal del concentrador a 70 grados en Unigraphics 5.....	99
Ilustración 128. Cortes al sustrato de aluminio.....	100
Ilustración 129. Modelo en Unigraphics 5 de laminadora.....	101
Ilustración 130. Vista en explosivo laminadora en Unigraphics.....	101
Ilustración 131. Laminadora con rodillos de poliuretano.....	101
Ilustración 132. Reflec Tech pegado al sustrato de aluminio.....	102
Ilustración 133. Paraboloide final con material reflejante Reflec Tech.....	103
Ilustración 134. Despiece de paraboloide.....	103
Ilustración 135. Vista posterior de paraboloide.....	104
Ilustración 136. Brida de sujeción hacia el mecanismo de movimiento.....	105
Ilustración 137. Modelo final en Unigraphics 5.....	105
Ilustración 138. Soporte para el concentrador de rayos solares.....	106
Ilustración 139. Modelo soporte del receptor en Unigraphics.....	106
Ilustración 140. Modelo final. Paraboloide - soporte concentrador - mecanismo de movimiento.....	107
Ilustración 141. Pruebas de funcionamiento.....	108
Ilustración 142. Concentración de rayos solares.....	108
Ilustración 143. Alcance de temperatura para quemar madera.....	109
Ilustración 144. Aumento del área de concentración.....	109
Ilustración 145. Prototipo final.....	110
Ilustración 146. Medición de la temperatura alcanzada (402 °C).....	110

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Relación de concentración.....	34
Ecuación 2. Concentración máxima sistema tridimensional.....	35
Ecuación 3. Concentración máxima sistema bidimensional.....	35
Ecuación 4. Índice de refracción.....	51
Ecuación 5. Formula de Fresnel (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).....	52
Ecuación 6. Radiación de cuerpo negro (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).	53
Ecuación 7. Potencia térmica de la superficie considerando un factor de emisividad (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).....	53
Ecuación 8 Potencia térmica de la superficie de un cuerpo gris.....	53
Ecuación 9. Constante solar (Ruíz, 2006).	54
Ecuación 10. Flujo de radiación de una superficie hipotética (Ruíz, 2006).....	55
Ecuación 11. Ecuación de la parábola.	64
Ecuación 12. Distancia focal.	64
Ecuación 13. Masa de aire.....	83
Ecuación 14. Balance de energía en el receptor.	94

Índice de tablas

Tabla 1. Comparativa de sistemas solares (Pillatowsky, 2009).	27
Tabla 2. Necesidades de calor en diferentes industrias (Pillatowsky, 2009).....	28
Tabla 3. Cuadro comparativo entre las relaciones de concentración y las temperaturas posibles alcanzadas en el absorbedor.	36
Tabla 4. Diversos tipos de aceite térmico (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).....	38
Tabla 5. Espectro visible (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).	50
Tabla 6. Valores de excentricidad de acuerdo con el mes del año.	55
Tabla 7. Constantes de SolTrace para diferentes ángulos de apertura.....	66
Tabla 8. Flujo de energía variando el ángulo de apertura.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9 Flujo de energía variando la distancia focal.....	76
Tabla 10. Propiedades de los diferentes materiales reflejantes.	80
Tabla 11. Pruebas de reflectancia.	84
Tabla 12. Resumen de las propiedades de los materiales.	85
Tabla 13. Relacion reflectividad y costo.	86

Resumen ejecutivo

El problema del calentamiento global presenta varios retos para nuestra y las generaciones futuras. Entre ellos esta cambiar el actual sistema energético basado en combustibles fósiles hacia otras fuentes de energía, limpias y renovables. México tiene un enorme potencial en el desarrollo de energía solar, sobre todo en la parte del noroeste de México.

La energía solar se puede aprovechar de muchas formas, de entre ellas, la concentración solar de alta temperatura ofrece soluciones técnica y económicamente factibles tanto electricidad como para calor industrial. Entre las tecnologías de concentración, el concentrador de disco parabólico permite obtener temperaturas por encima de los 400°C, y pueden ser utilizadas para activar un motor Stirling o un proceso de recuperación de aluminio.

Este proyecto tiene como objetivos principales el diseño y la construcción de un disco parabólico para concentración solar y la caracterización de un receptor para diversas posibles aplicaciones futuras.

La geometría empleada para reflejar los rayos solares hacia el receptor, es decir la geometría del plato parabólico, es una parte medular de este trabajo. De esto depende la relación de concentración del sistema y el máximo aprovechamiento de la energía solar. Esto se realizó mediante la ayuda del software de análisis de trazado de rayos SolTrace.

Con la geometría optima de la superficie Concentradora de este sistema, se diseñó el disco parabólico, esto se realizó con la ayuda del software de diseño mecánico NX6. En paralelo se eligió la superficie reflejante del disco parabólico

Con el diseño y los planos de fabricación se procedió a la construcción del disco parabólico de 2m de diámetro. Se eligió aluminio como base de la estructura por su buena relación resistencia–peso, y una película reflejante REFLECTECH, con 95% de reflectividad. Debido a que la manufactura del ángulo de apertura exacto (45°) implicó un proceso complejo y caro, se decidió utilizar una estructura de disco parabólico ya construida (una antena de telecomunicaciones) con un ángulo de apertura de 70°. Para la construcción del disco parabólico se requirió del diseño y construcción de una laminadora para colocar el material reflejante en la lámina de aluminio.

Con la geometría elegida y los datos meteorológicos medidos previamente, se calculó la relación de concentración y se estimó mediante un modelo de transferencia de calor, la temperatura que podría alcanzar el dispositivo receptor, que es un cilindro de hierro montado en el disco parabólico a una altura de acuerdo con el análisis óptico previo.

Finalmente, se realizaron pruebas de campo del concentrador en la planta de energía solar del instituto de Ingeniería, donde se fue posible medir la temperatura del receptor que alcanzó los 400°C.

Introducción

El calentamiento global de nuestro planeta, inducido en gran medida por las emisiones de CO₂ de la combustión de los hidrocarburos, y el incremento de los precios de estos últimos, lleva a la humanidad a voltear hacia otras fuentes de energía, limpias y renovables, para satisfacer las necesidades energéticas en el mundo. Las emisiones de CO₂ se han incrementado de manera progresiva a lo largo de los años desde el inicio de la revolución industrial como se muestra en la ilustración 1. Emisiones mundiales de CO₂ por combustible.

México tiene un enorme potencial en el desarrollo de energías renovables en diferentes zonas del país; por mencionar algunas, en las costas de Oaxaca y del Golfo se tiene un alto potencial eólico; el país con sus dos litorales y sus numerosos ríos, es propicio para el desarrollo de energía hidráulica para generar electricidad; también debido a su sistema volcánico, México tiene un amplio potencial geotérmico.

Particularmente gran parte del país está sujeto a una gran radiación solar, sobre todo en la parte del noroeste de México; esta condición geográfica del país abre numerosas oportunidades para satisfacer un gran porcentaje de las necesidades energéticas, tanto de electricidad como de calor.

De entre todas las formas en la que se puede aprovechar la energía solar en el mundo, se tiene que la concentración solar ofrece soluciones técnica y económicamente factibles para generar electricidad, pero mayoritariamente para aplicaciones donde se requieren fuentes de calor a alta, media y baja temperatura.

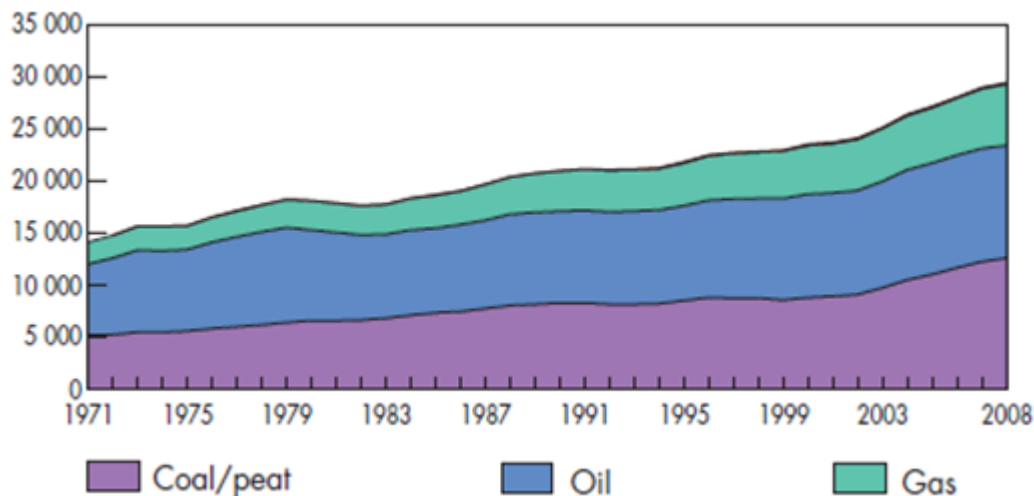


Ilustración 1. Emisiones mundiales de CO₂ por combustible (carbón, petróleo y gas), en millones de toneladas hasta el 2008 (International Energy Agency, 2008).

Objetivo

“Diseño mecánico del disco parabólico de un concentrador solar y la caracterización térmica del receptor”

1. *Diseñar y construir un disco parabólico para implementarlo en un sistema de concentración solar, partiendo de un análisis de trazado de rayos solares y de la selección del material reflejante.*
2. *Diseñar y construir un dispositivo de recepción de los rayos solares concentrados para caracterizar térmicamente el área de concentración.*

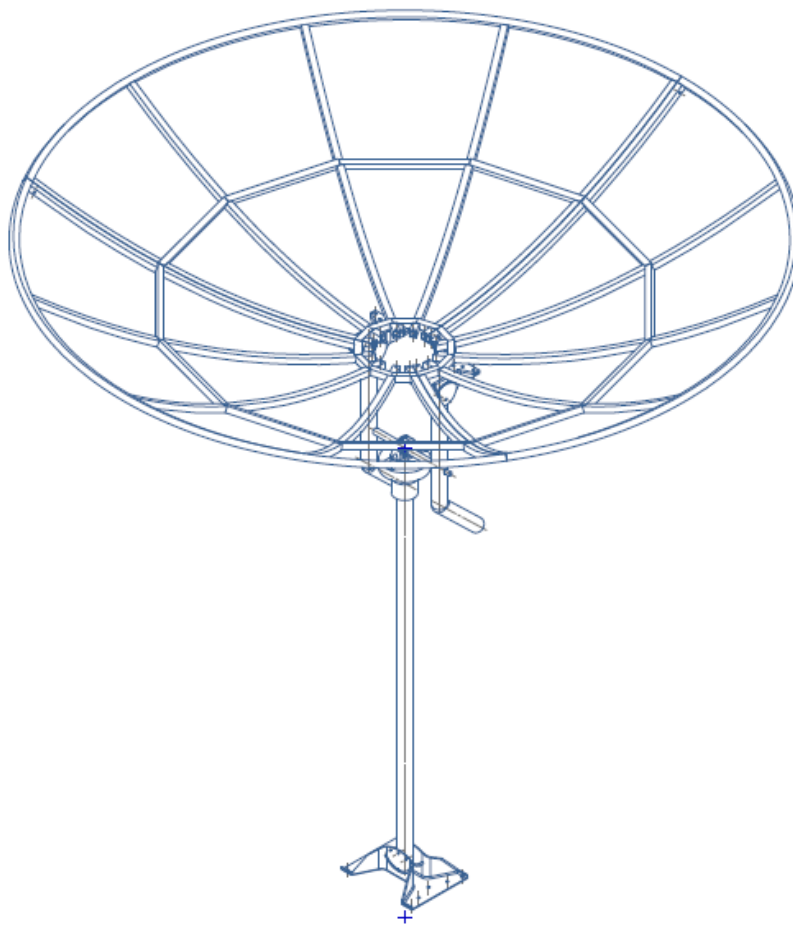


Ilustración 2. Estructura del concentrador solar.

Capítulo 1

Energía Solar

El Sol es un enorme reactor nuclear, en donde se convierte el hidrógeno en helio a una velocidad de 4 millones de toneladas por segundo, radiando energía y partículas a una temperatura superficial de cerca de 6000 °C. La tierra recibe del Sol anualmente alrededor de 5.4×10^{24} J, lo que representa unas 4500 veces el consumo mundial de energía.

La energía solar se utiliza directamente mediante energía fotovoltaica y energía térmica, pero también, la energía del Sol es la base de muchas otras formas de energía, gracias a la energía se tienen cambios en la temperatura y densidad de los fluidos en la tierra (agua y aire) y se provoca un flujo de estos que es posible convertir en energía mecánica. Gracias a la energía solar las plantas se desarrollan, y estas son la base de la energía por biomasa.

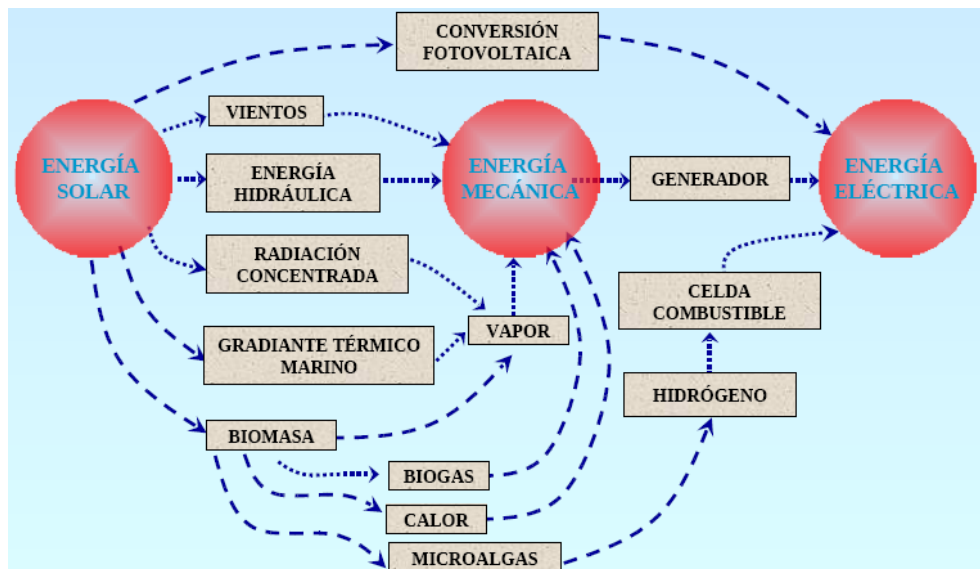


Ilustración 3. Esquema de la transformación de la energía solar (Pillatowsky, 2009).

En otro capítulo se darán detalles técnicos acerca del aprovechamiento de la energía solar, mientras se dará un vistazo de cerca a la situación actual en México y en el mundo de los recursos energéticos, también se describirán las diversas formas de aprovechamiento de la energía solar para después enfocarnos a la concentración.

1.1 Panorama energético mundial

El incremento de la población lleva a una modificación en el escenario de las necesidades y los consumos energéticos en el mundo.

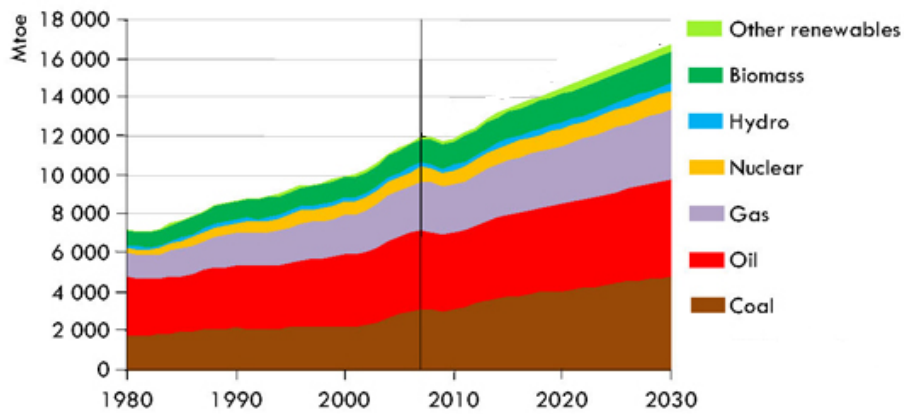


Ilustración 4. Historial y prospectiva de los consumos energéticos en el mundo. (International Energy Agency, 2008).

Y de este se observa que los principales combustibles que se espera utilizar en el futuro serán el gas natural, debido a que es un combustible más limpio, y el carbón con las nuevas tecnologías de recuperación de cenizas (International Energy Agency, 2008). Sin embargo, aunque las energías renovables como la solar no figuran de manera dominante dentro del panorama energético en el futuro, si se tienen incrementos significativos.

De cualquier forma, para asegurar la sustentabilidad del planeta en el futuro cercano y lejano es imprescindible que se siga invirtiendo y apostando en las energías renovables, ya que muy pronto jugarán un papel crucial en el panorama energético mundial.

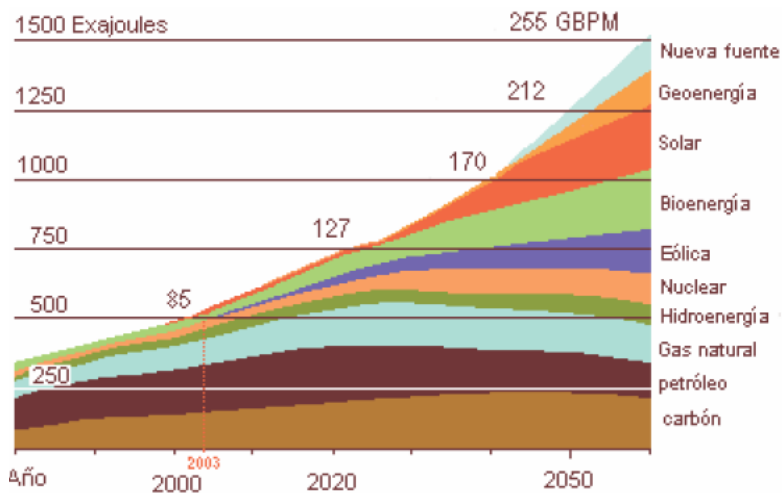


Ilustración 5. Prospectiva más allá del 2050 del panorama energético. (Shell global, 2007).

Dentro de las energías renovables, la que más que ha sido utilizada es la energía hidráulica, aunque por razones que no se discutirán en este trabajo no es considerada como una fuente renovable real. Después de ésta la más utilizada es la biomasa como combustible para satisfacer necesidades de calor principalmente. Pero la que presenta actualmente la mayor tasa de crecimiento es la energía solar fotovoltaica; aunque en términos de eficiencia energética es inferior a la energía solar térmica. Esta última se ha restringido al calentamiento de espacios y otras aplicaciones de baja temperatura, y su uso para generar electricidad es pionero, apareciendo las primeras plantas termo-solares hace apenas pocos años en España.

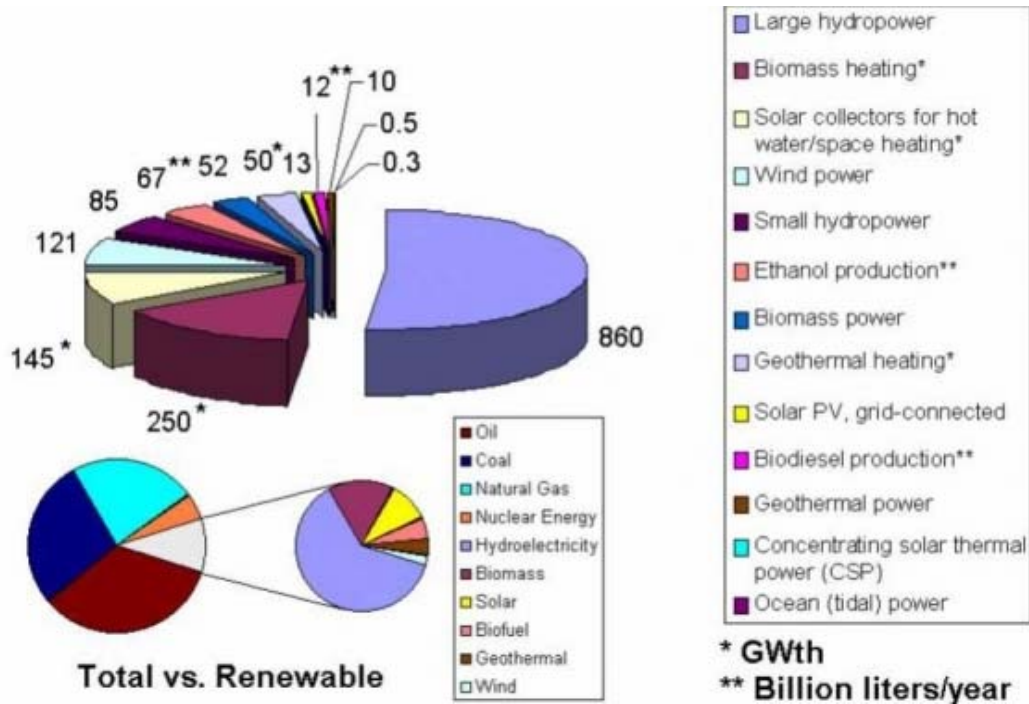


Ilustración 6. Uso global de energías renovables (International Energy Agency, 2008).

1.2 Panorama energético en México

En México al igual que todo el mundo tiene la afrenta de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y propiciar una matriz energética más limpia eficiente y competitiva.

En el país se están adoptando medidas para una transición energética progresiva, ecológica y que incluye a las energías renovables dentro de la matriz energética. Algunos de los puntos más importantes son:

- Establecer estándares de desempeño en cuestión de eficiencia energética
- Incentivos fiscales a proyectos energéticos sustentables y de eficiencia energética
- Disminución de los subsidios al uso de combustibles fósiles
- Disminuir el combustóleo como combustible principal en la generación de electricidad
- La ley de aprovechamiento de energías y recursos renovables plantea una meta del 8% en la participación de energías alternas en la matriz energética del país

Aun así, de acuerdo con el balance energético del 2008 de la SENER, se mantienen los combustibles fósiles como el energético preponderante, y sigue la tendencia mundial de la reducción del combustóleo y el incremento del gas natural y el carbón como combustibles.

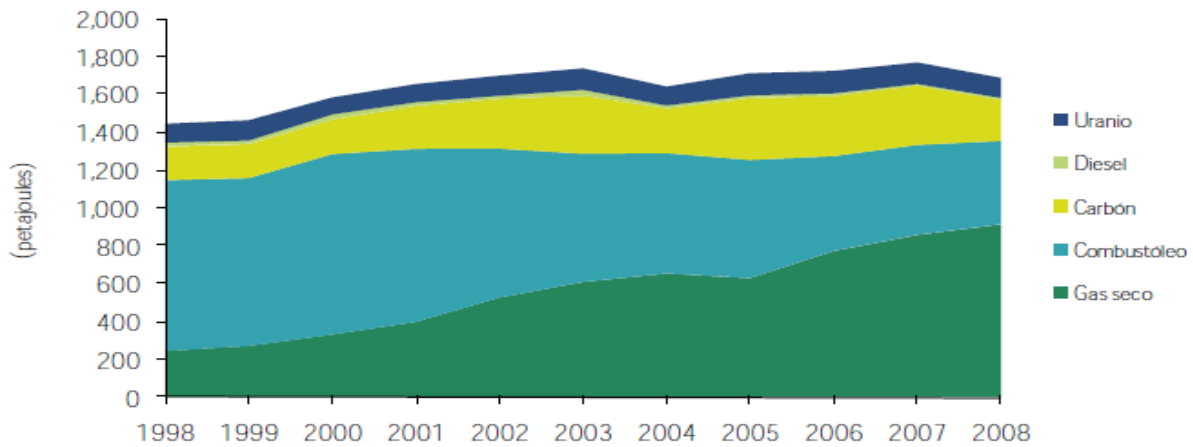


Ilustración 7. Evolución del uso de los principales energéticos en México (SENER, 2008).

No se prevé un incremento significativo de la participación de las energías renovables para la generación de energía eléctrica, pero el nicho de aplicación de estas es muy amplio y particularmente la energía solar térmica puede satisfacer las necesidades energéticas de muchas otras industrias.

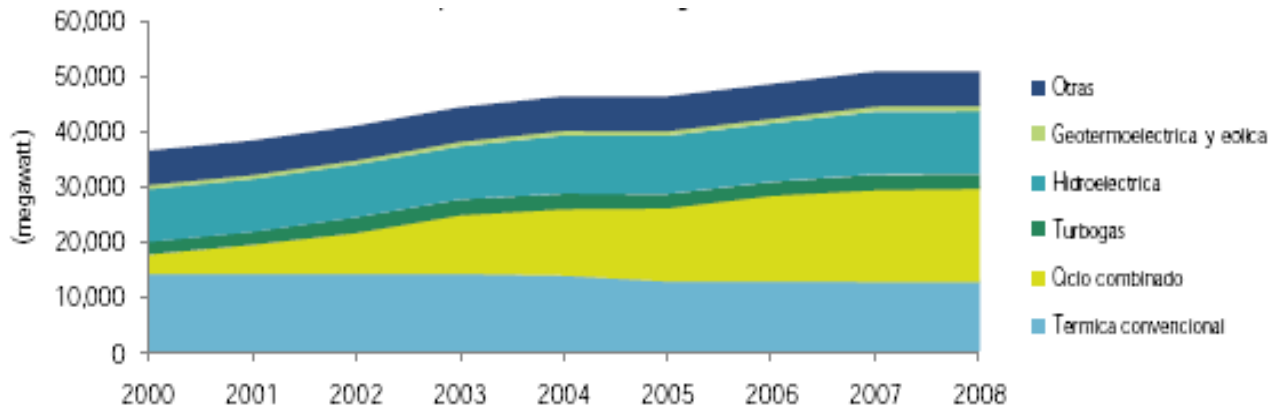


Ilustración 8. Evolución de la capacidad instalada para generación eléctrica en México (SENER, 2008).

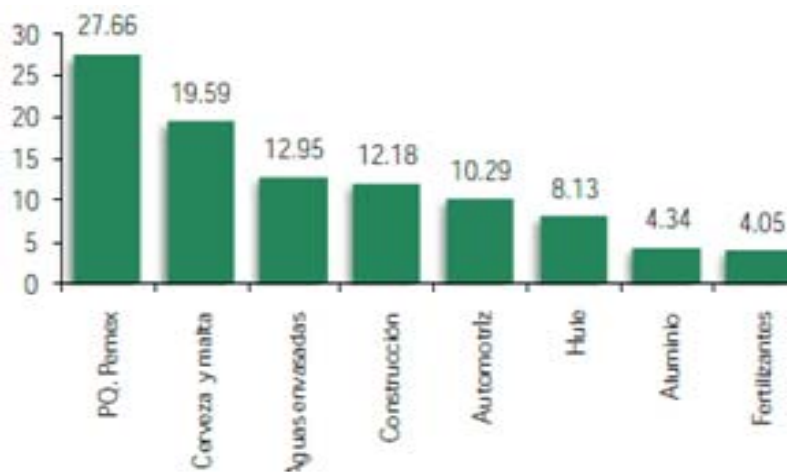


Ilustración 9. Consumos energéticos de diversas industrias en México 1 (SENER, 2008).



Ilustración 10. Consumos energéticos de diversas industrias en México 2 (SENER, 2008).

Como puede observarse industrias como la siderúrgica, la cementera y la minera requieren de grandes cantidades de energía térmica.

1.2.1 Alternativas energéticas

En México se tiene un enorme potencial para el desarrollo de muchos tipos de energías renovables, tanto para la generación de eléctrica como para diversos procesos industriales.

1.2.1.1 Energía geotérmica

Es la energía que se obtiene del calor proveniente del centro de la tierra, y se manifiesta en varias regiones del país donde se tienen fuentes de agua y/o vapor calientes subterráneas. Es de las más desarrolladas en México para generación de electricidad, pero no está desarrollada para otra aplicación, aun cuando su potencial es vasto (CFE, 2007).

Se tienen en México cuatro campos geo-termoeléctricos, y diversos proyectos de aplicación de este recurso térmico para diversos procesos como el secado o la calefacción.

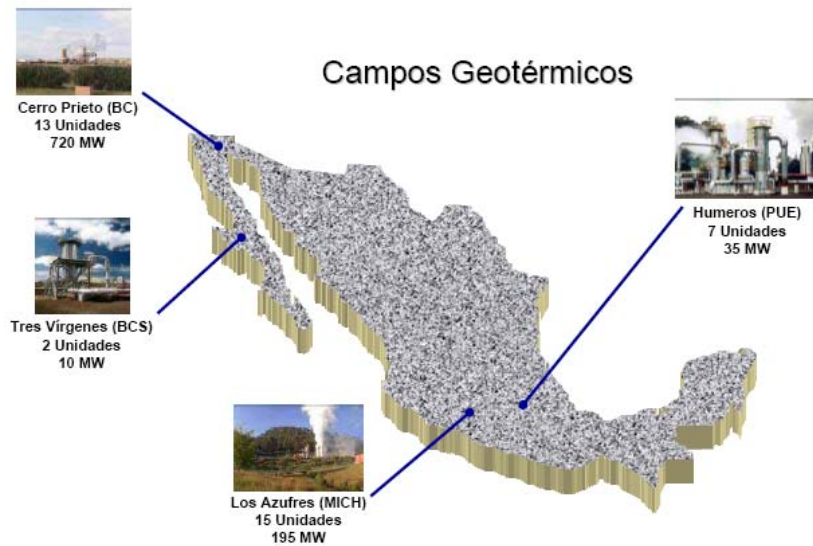


Ilustración 11. Campos geotérmicos en México (CFE, 2007).

1.2.1.2 Energía eólica

México tiene una gran diversidad geográfica lo cual le permite tener grandes extensiones planas tanto cerca de la costa como en tierra, con un gran potencial eólico.

En México se han instalado granjas eólicas, es decir, conjuntos de aerogeneradores eléctricos, en la zona del Istmo de Tehuantepec y en la Baja California, pero se tiene un amplio potencial en varias otras zonas del país. De acuerdo con la CFE el potencial eléctrico de generación eléctrica en el país puede ser mayor a los 7000 MW (CFE, 2007).



Ilustración 12. Potencial eólico en México (CFE, 2007).

1.2.1.3 Energía hidráulica

Es la energía mecánica que produce el movimiento del agua, y que antiguamente fue utilizada en molinos y para sistemas de riego, es utilizado ahora para generar electricidad. En México se tienen varios puntos con potencial hidráulico debido a sus numerosos ríos, y de hecho esta energía forma parte de la matriz de generación eléctrica en masa del 20% (CFE, 2007). Sin embargo, los grandes embalses sobre los cuales se basan las hidroeléctricas del país, tienen un impacto significativo en la ecología del medio, y por lo tanto solo la mini hidráulica, que no requiere embalses, es considerada como una energía limpia y renovable (Centro Mario Molina, 2008).

1.2.1.4 Energía de biomasa

Los desechos en las grandes ciudades y en la industria de materia orgánica, requieren de un manejo cuidadoso de estos, ya que el gas metano es un gas contaminante y de efecto invernadero potente. Su utilización como combustible presenta una alternativa a este manejo y una fuente de energía renovable.

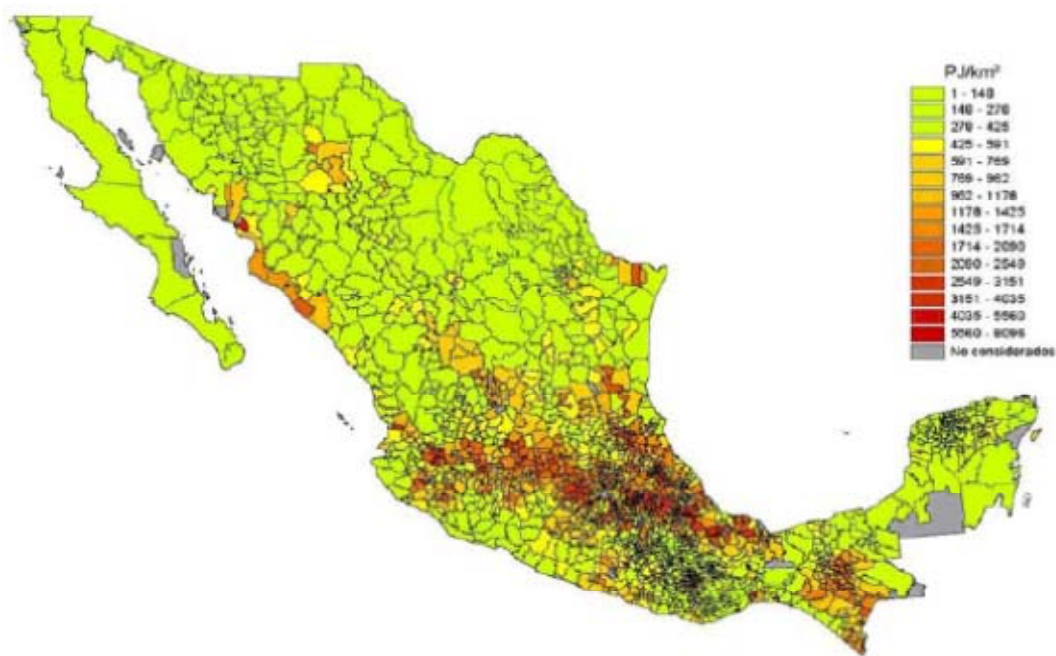


Ilustración 13. Potencial de biomasa por desechos agrícolas. (Centro Mario Molina, 2008).

1.2.1.5 Energía solar

Por último, la energía solar es la más abundante en México y se ha desarrollado principalmente mediante paneles fotovoltaicos en generación distribuida (CFE, 2007). En México no se utiliza actualmente la energía solar térmica para la generación de electricidad, esta es utilizada para calefacción de espacios, calentamiento de agua doméstica y albercas (Centro Mario Molina, 2008).

Aun así se tiene un proyecto importante para una planta de ciclo combinado que se apoye en energía solar térmica para Agua Prieta Sonora (CFE, 2007). Además se tienen diversos estudios del apoyo de la energía solar térmica para la generación de electricidad, como en el caso del campo geotérmico de Cerro Prieto donde se plantea un sistema de concentración solar para el sobrecalentamiento del vapor geotérmico (CFE, 2007).



Ilustración 14. Vecindario con energía solar fotovoltaica en Mexicali (Pillatowsky, 2009).

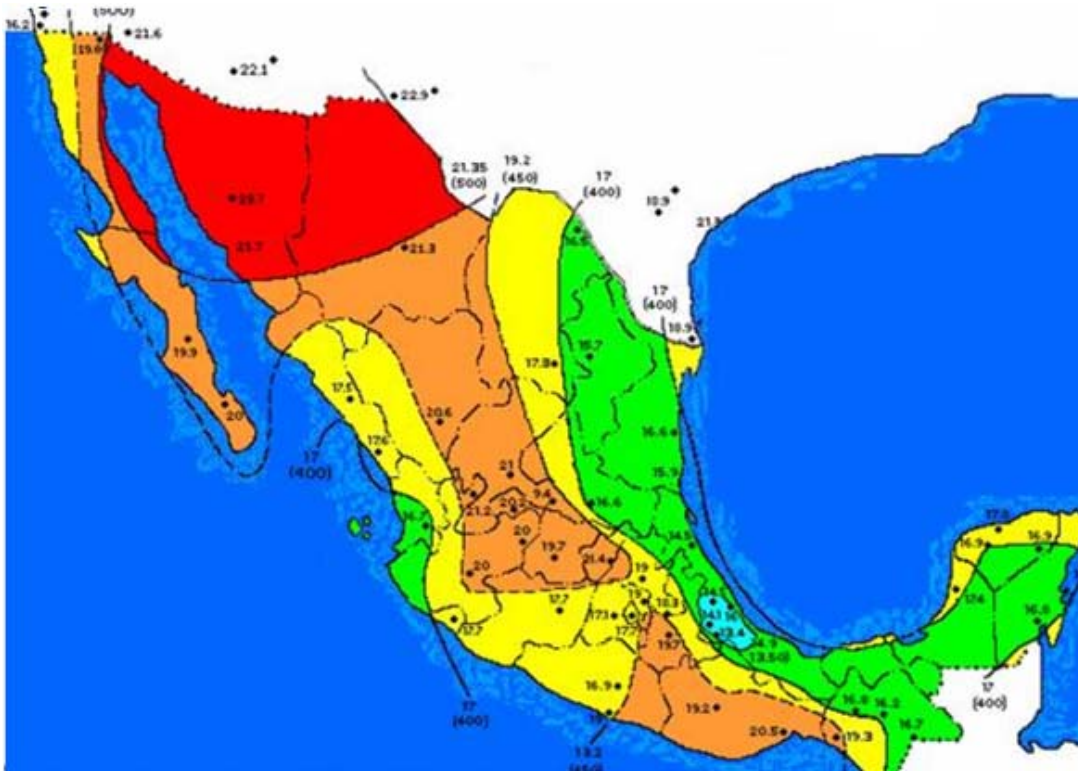


Ilustración 15. Instituto de Ingeniería UNAM (Almaza, 1976).

En la parte de procesos térmicos el potencial es enorme, y se han estudiado diversas técnicas para adaptar la energía solar a diversos procesos industriales.

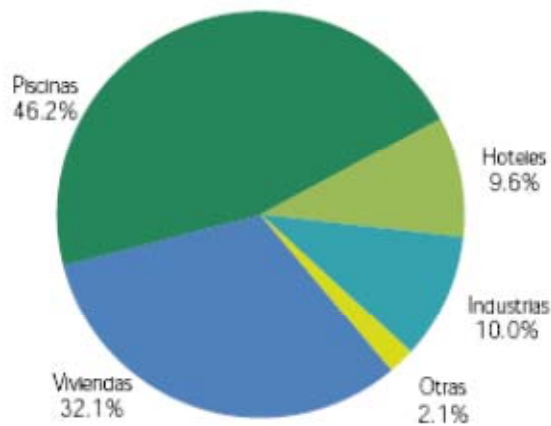


Ilustración 16. Uso de calentadores solares de agua en el 2008 (SENER, 2008).

Estas alternativas energéticas son algunas de las más importantes, pero en México se tiene un amplio potencial para otros desarrollos, como la energía de las mareas, energía del oleaje, energía de gradiente de temperatura en el océano (OTEC), y la producción de etanol como combustible en los diversos ingenios azucareros en el país.

1.3 Captación de la energía solar

La energía solar se puede aprovechar principalmente de dos diversas formas, a través de energía fotovoltaica o a través de energía térmica.

Originalmente, la energía solar era aprovechada a nivel doméstico para la obtención de agua caliente sanitaria y como apoyo a la calefacción. Sin embargo, esta tecnología tiene también otro enorme potencial de aprovechamiento en el sector industrial. La energía solar térmica es capaz de proveer de forma natural y económica de parte del calor que la industria necesita. Y además mediante concentración solar se pueden alcanzar temperaturas útiles para generación de electricidad. La producción de electricidad más común mediante la energía solar se realiza por medio de lo que se denomina efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico consiste en producir un voltaje en un material que tenga características de semiconductor mediante la absorción de una radiación electromagnética como la luz.

1.3.1 Energía fotovoltaica

La energía fotovoltaica es energía eléctrica en forma de corriente directa, y está en función de la radiación que le llegue a la celda fotovoltaica, es decir mientras mayor sea la radiación incidente mayor será la potencia eléctrica generada. Al ser corriente directa, para su uso en equipo que requiera corriente alterna, se debe incluir un inversor, que convierte la energía de corriente directa en energía de corriente alterna.

Dada la naturaleza de la energía fotovoltaica se tienen tres condiciones para su uso, se puede consumir en el momento, ya sea como corriente alterna o corriente directa, o se puede enviar a la red eléctrica en forma de corriente alterna, o se puede almacenar en un banco de baterías.

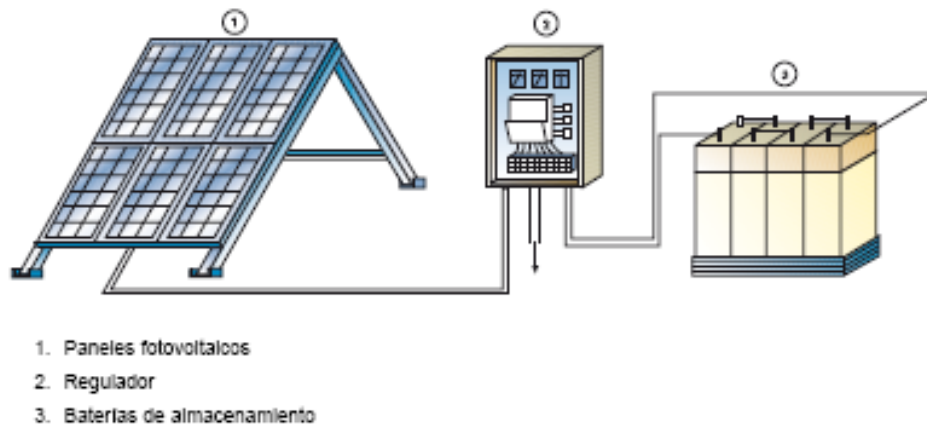


Ilustración 17. Sistema de almacenamiento de un sistema fotovoltaico en un banco de baterías (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).



Ilustración 18. Paneles fotovoltaicos en el CIE [el autor].

1.3.2 Energía Termosolar

La energía solar aprovecha el impacto en la temperatura de un cuerpo o superficie provocado por el contacto con la radiación solar. Es la forma más sencilla de uso de la energía solar y es también la más rentable. Dependiendo del tipo de sistema que aproveche la energía solar, se pueden alcanzar temperaturas en los cuerpos desde los 50°C hasta los 800°C (Pillatowsky, 2009).

Por su naturaleza este tipo de energía es más orientada al uso directo del calor para la calefacción o la industria, sin embargo las altas temperaturas que se pueden alcanzar con algunos sistemas permiten obtener temperaturas óptimas para la generación de electricidad y procesos industriales de alta temperatura.

Entre las premisas para mejorar la energía termosolar están (Pillatowsky, 2009):

- Aprovechar al máximo la radiación incidente.
- Conservar durante un mayor tiempo posible la energía térmica almacenada.

- Extraer el calor de la manera más eficiente.

La energía solar térmica es aprovechada mediante un concentrador o colector de esta, que es en esencia un intercambiador de calor, el cual transfiera la energía de la radiación solar a un cuerpo absorbedor, que puede ser un fluido simple, un fluido de trabajo como agua o aceite térmico, un metal a fundirse, etc.

Los Concentradores solares se clasifican en función de su movimiento al captar la energía del Sol (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005):

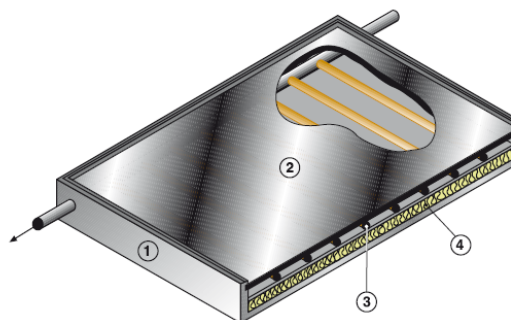
- Estacionarios.
- Móviles en uno o varios ejes.

Los Concentradores estacionarios no requieren seguir al Sol, simplemente se orientan hacia el ecuador. Estos pueden ser de tres tipos (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005):

- Concentradores planos.
- Concentradores con tubos evacuados.
- Concentradores solares.

1.3.2.1 Concentrador plano

Los Concentradores planos consisten en una caja hermética aislada en cuya parte superior se encuentra un vidrio de doble cristal, este permite atravesar la radiación directa dejándola hacia el interior donde fluye, por circulación natural o forzada, el líquido que absorbe la energía térmica, que es comúnmente agua. Para lograr un mayor aprovechamiento se utiliza una pintura negra que captura gran parte de las ondas solares.



1. Caja o cubeta soportadora del conjunto
2. Cristal
3. Tubos conductores del fluido transportador del calor captado
4. Aislante térmico

Ilustración 19. Esquema de un colector plano (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).



Ilustración 20. Concentrador plano de polipropileno para calentamiento de alberca (Pillatowsky, 2009).

1.3.2.2 *Concentradores con de tubos de vacío*

El líquido de trabajo circula por dentro de tubos que se encuentran al vacío, y la radiación penetra dentro de los tubos, el vacío les permite reducir las dispersiones de calor hacia el exterior. El calor captado por cada tubo de vacío es transferido a una placa generalmente de cobre o directamente al fluido, que está dentro del tubo por donde pasa este último.

En su interior la presión del aire es muy reducida, de forma que impide la cesión de calor por conducción y convección, asegurando que la única transferencia de calor sea de la placa de cobre al líquido o directamente al fluido.



Ilustración 21. Sistema de concentrador solar de tubos evacuados para calentamiento de agua (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).

1.3.2.3 *Concentradores solares.*

Se pueden lograr temperaturas más altas si la energía solar se concentra en una pequeña área. Esto se logra interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie absorbente.



1. Entrada agua fría
2. Salida agua caliente
3. Tubo conductor
4. Superficie receptora o captadora

Ilustración 22. Colector solar cilíndrico parabólico compuesto con un tubo al vacío (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).

Estos concentradores se pueden clasificar en (Pillatowsky, 2009):

- Concentrador solar de canal parabólico.
- Concentrador solar con reflector lineal tipo Fresnel.
- Concentrador solar con reflector de disco parabólico.
- Concentrador solar con campo de helióstatos.

1.3.2.4 Concentrador solar de canal parabólico

Este Concentrador refleja la radiación incidente hacia el tubo absorbedor, cuya superficie está recubierta con un depósito con una alta absorptividad de la radiación y una baja emisividad de radiación térmica. Por lo general, se rodea de un tubo de vidrio para reducir las pérdidas de calor convectivas, teniendo como inconvenientes en que refleja la luz del concentrador y reduce la transmitancia.



Ilustración 23. Concentrador de canal parabólico. El fluido fluye a lo largo de un tubo, y su trayectoria se localiza en la línea de focos de todas las parábolas que forman el canal (Pillatowsky, 2009).

1.3.2.5 Concentrador solar con reflector lineal tipo Fresnel

El reflector lineal Fresnel consiste en un arreglo de tiras lineales de espejos las cuales concentran la luz sobre un receptor montado en una torre lineal. Es como si se tratara de una canal parabólica cortada, pero a diferencia de un canal parabólico, no tiene forma de parábola (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005). La gran ventaja es que usa reflectores planos o curvados elásticamente los cuales son más económicos comparados con los reflectores parabólicos (Pillatowsky, 2009).



Ilustración 24. Concentrador tipo Fresnel (Pillatowsky, 2009).

1.3.2.6 Concentrador solar de disco parabólico

Este Concentrador concentra la energía solar en un punto, debido a las propiedades de la parábola, produce temperaturas mucho más altas que un concentrador de disco parabólico, pero el diseño del receptor o absorbedor es más complicado al igual que toda la manufactura en general (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).



Ilustración 25. Concentrador de disco parabólico. El receptor de la energía solar es puntual y se localiza en el foco de la parábola (Pillatowsky, 2009).

1.3.2.7 Concentrador solar en campo de heliostatos

Para una alta incidencia de energía radiante se usa una gran cantidad de espejos planos o heliostatos, los cuales pueden reflejarla a un punto particular, conocido como Concentrador de campo de heliostatos o Concentrador con receptor de torre central.



Ilustración 26 Campo de heliostatos en la plataforma solar de Almería (Pillatowsky, 2009).

1.3.2.8 Concentradores solares móviles

Si a los Concentradores presentados se les agrega un sistema de seguimiento solar, la efectividad en la captación solar por día será mucho mayor, el movimiento puede ser sobre uno o dos ejes (Pillatowsky, 2009). Se presenta un cuadro comparativo que incluye los Concentradores fijos y móviles.

Movimiento	Tipo de captador solar	Forma del absorbedor	Relación de concentración	Dominio de temperaturas (°C)
Estacionario	Captador plano (CP)	plano	1	30-80
	Captador de tubo evacuado (CTE)	plano	1	50-200
	Captador parabólico compuesto (CPC)	Tubular	1-5	60-200
5-15			80-300	
Un sólo eje de seguimiento	Captador con reflector lineal Fresnel (CRLF)	Tubular	10-40	80-250
	Captador con reflector de canal parabólico (CP)	Tubular	15-45	80-300
	Captador de canal cilíndrico (CCC)	Tubular	10-50	80-300
Dos ejes de seguimiento	Captador con disco parabólico (CDP)	Puntual	100-1000	100-500
	Captador con campo de heliostatos (CCH)	Puntual	100-1500	150-2000

Tabla 1. Comparativa de sistemas solares (Pillatowsky, 2009).

1.4 Desempeño en la industria

La energía solar puede cubrir total o parcialmente las necesidades de calor en la industria y las aplicaciones actuales y potenciales son vastas, y van desde aplicaciones de baja temperatura hasta aplicaciones para generación eléctrica. Se presentan a continuación algunas aplicaciones que se están desarrollando en México y el mundo (Pillatowsky, 2009).

- Calentamiento de agua.

- Cocina.
- Secado.
- Precalentamientos.
- Refrigeración y aire acondicionado.
- Aplicaciones de alta temperatura mediante concentración solar.

Las necesidades de calor en la industria son variadas, y se requieren de varias temperaturas de trabajo. Se presenta a continuación un cuadro comparativo con algunas de las necesidades de calor en diferentes industrias:

Tabla 2. Necesidades de calor en diferentes industrias (Pillatowsky, 2009).

<i>Proceso de pescados</i>	<i>Agua caliente (80-90°C)</i>
<i>Producción de cerveza</i>	<i>Vapor (100-110°C)</i>
<i>Fabricación de lana</i>	<i>Agua caliente (40-80°C)</i>
<i>Lavado industrial</i>	<i>Agua caliente (60-90°C)</i>
<i>Agua caliente sanitaria</i>	<i>(50-70°C)</i>
<i>Papel</i>	<i>Vapor (150-180°C)</i>
<i>Pasteurización</i>	<i>(75-100°C)</i>
<i>Secado</i>	<i>(40-120°C)</i>
<i>Refrigeración</i>	<i>(180-200°C)</i>

Como se observa en la tabla existen diversas industrias que requieren energía a una temperatura moderada, y por lo cual la energía termosolar puede sustituir fácilmente a los procesos de combustión que producen temperaturas innecesariamente muy altas.

1.4.1 Calentamiento de agua

Es la aplicación más común y más difundida de la energía solar, el agua es calentada mediante colectores solares de tubos evacuados regularmente, el agua se almacena en un tanque aislado para su almacenamiento.

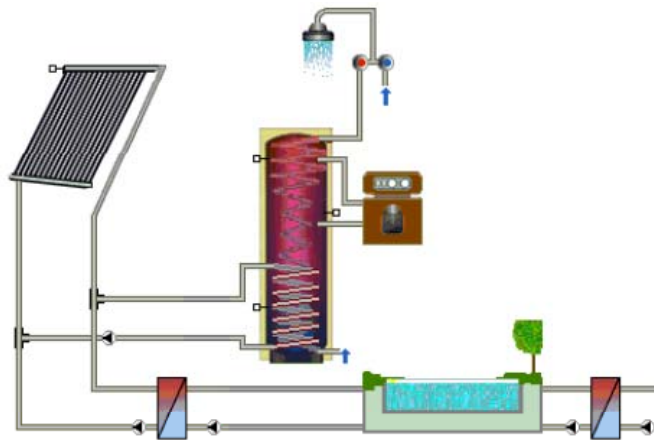


Ilustración 27. Sistema de calentamiento de piscina y alberca (Florida Energy center, 2008).

1.4.2 Cocina solar

En muchos lugares con poco acceso a combustibles se han implementado prototipos de cocinas solares, los concentradores solares permiten alcanzar altas temperaturas en ciertas áreas, colocar sus alimentos para su cocción en esa área constituye una cocina solar.



Ilustración 28. Estufa solar (Pillatowsky, 2009).

1.4.3 Secado

El secado es una actividad industrial que requiere de una cantidad continua de calor a baja temperatura, los gases calientes de la combustión calientan una corriente de agua o vapor, que a su vez calienta una corriente de aire que se usa para secar el material, usualmente la temperatura es mucho más baja que la de la combustión y podría ser fácil reemplazable por energía solar.



Ilustración 29. Secador solar de arroz en el CIE UNAM [autor], el aire se puede calentar directamente al pasar los colectores solares o través de agua caliente calentada con colectores solares.

1.4.4 Precalentamientos

Los precalentamientos permiten ahorros significativos en el consumo de combustible, precalentar el agua de alimentación de una caldera, o cualquier otro proceso que llevara a fundir, evaporar, o un calentamiento mayor. La energía solar térmica puede suministrar precalentar el material o fluido hasta una temperatura definida y ahorrar esta energía que hubiera sido suministrada por el combustible.

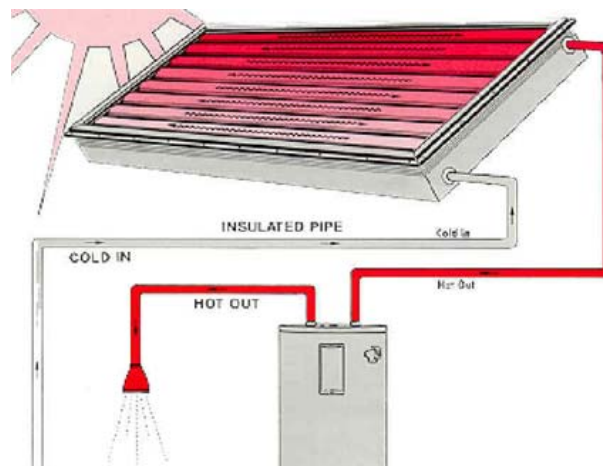


Ilustración 30. Precalentamiento del agua al calentador domestico (Florida Energy center, 2008).

1.4.5 Refrigeración y aire acondicionado

Mediante un ciclo de refrigeración por absorción es posible producir en un serpentín temperaturas bajo cero. El ciclo de refrigeración por absorción es mucho más económico que un ciclo de refrigeración convencional, ya que este último utiliza energía eléctrica o mecánica para accionar un compresor, mientras que un ciclo de absorción la energía requerida es térmica de alta temperatura, que puede ser producida mediante un concentrador solar de canal parabólico (Pillatowsky, 2009).

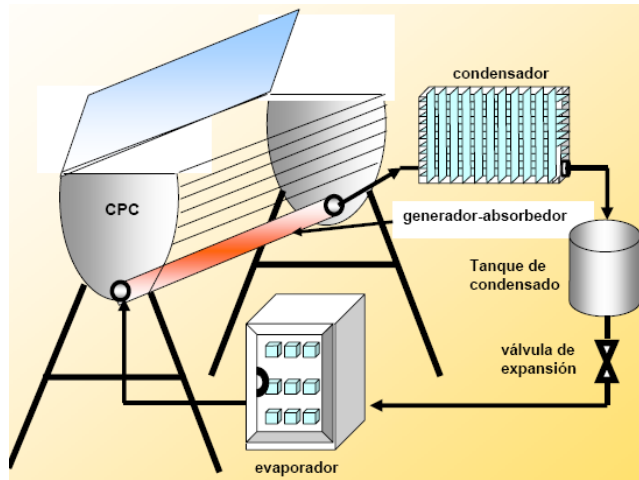


Ilustración 31. Esquema de un refrigerador solar (Pillatowsky, 2009).

1.4.6 Procesos de alta temperatura

1.4.6.1 Generación eléctrica

La generación eléctrica es una de las aplicaciones industriales más importantes y que requieren de mayor energía, la concentración solar con heliostatos permite concentrar una gran cantidad de energía a una temperatura que permite la producción de vapor para la producción de potencia.

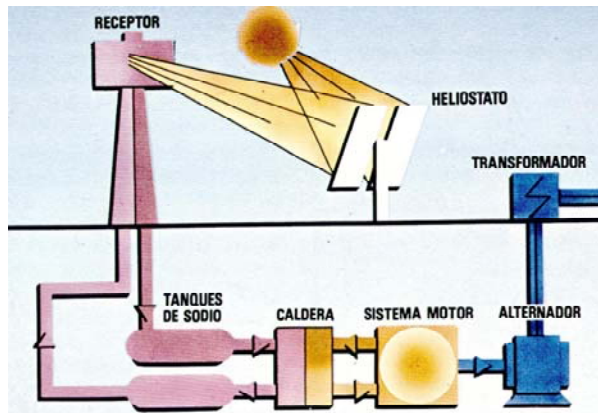


Ilustración 32. Esquema de un sistema de concentración solar con heliostatos para generación eléctrica. La producción de vapor se hace a partir de sodio como fluido receptor de la radiación solar (Pillatowsky, 2009).

1.4.6.2 Fundición de metales

Algunos metales son recuperables de la chatarra para reciclado, por ejemplo el aluminio tiene un punto de fusión más bajo que el acero, por lo tanto este se puede recuperar por fundición. Las temperaturas que alcanzan algunos concentradores llegan más allá de los 800 °C (Pillatowsky, 2009), por lo tanto pueden utilizarse para fundir metales como el aluminio, así como para tratamientos térmicos en la industria siderúrgica (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).



Ilustración 33. Prototipo de recuperación de aluminio mediante alta radiación (German Aerospace Center, 2009).

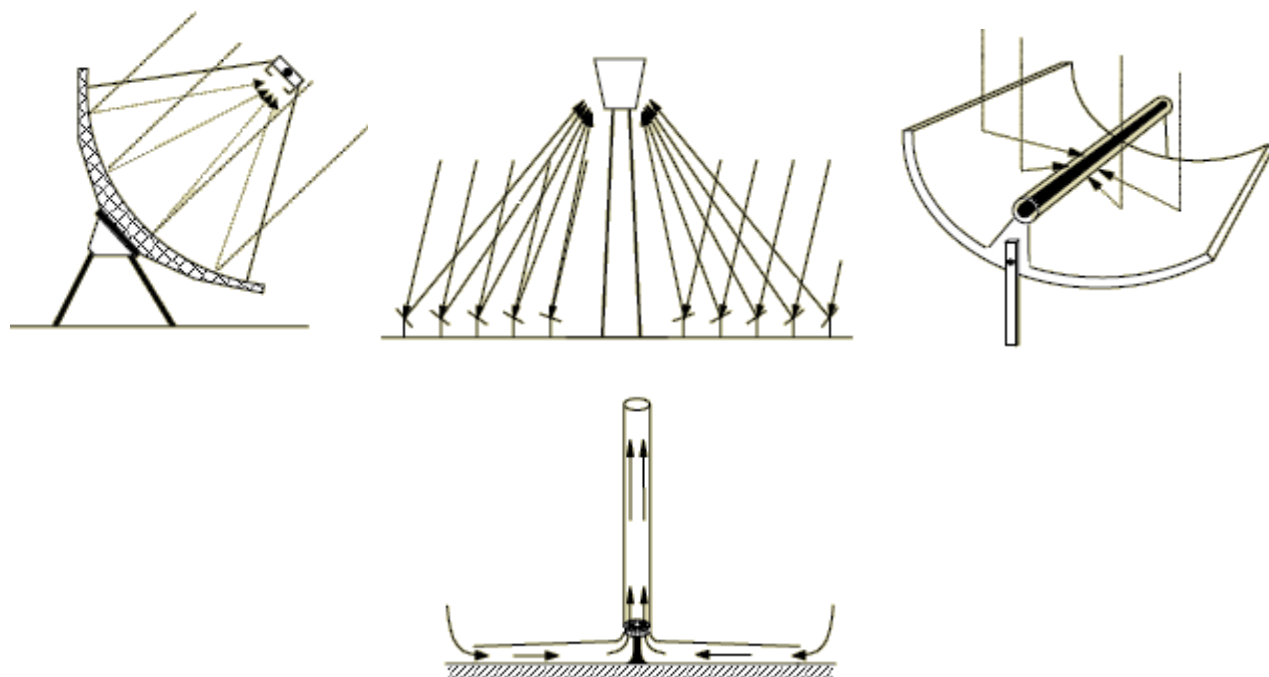
Existen muchas otras aplicaciones de la energía solar como al purificación de agua, la producción de hidrogeno, la desalación de agua de mar, entre muchos otros.



Ilustración 34. Estanque solar para desalación de agua (University of Nevada Reno).

Capítulo 2

Concentración Solar



Esta es la forma de aprovechamiento de la energía solar que proporciona las mayores temperaturas, y su principio se basa en captar primero la radiación solar y después reflejarla sobre un punto de un área menor, para así concentrar la radiación y obtener altas temperaturas.

Existen tres tecnologías principales para el aprovechamiento de la energía solar mediante concentración solar, la de concentrador cilindro parabólico, de disco y de receptor o torre central (Pillatowsky, 2009).

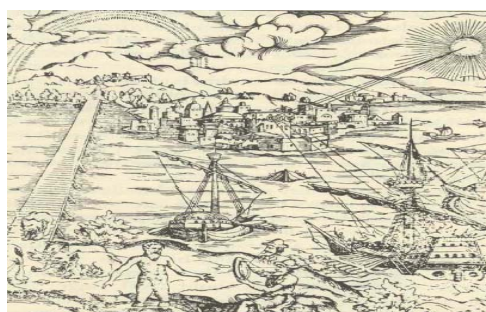


Ilustración 35. Pintura que muestra la historia de la hazaña de Arquímedes al defender Siracusa, mediante espejos concentra la radiación solar en las velas de los barcos romanos enemigos (Arancibia, 2009).

2.1 Principio de la concentración solar

Los sistemas termosolares de concentración se caracterizan por direccionar la radiación solar incidente sobre una determinada superficie, superficie receptora, y concentrarla sobre una superficie de menor tamaño, absorbedor.

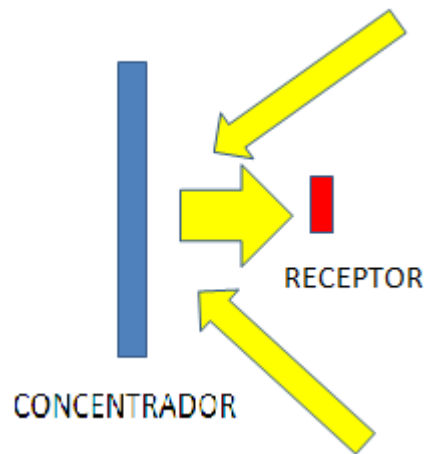


Ilustración 36. Elementos básicos de un sistema de concentración solar.

Este fenómeno óptico es posible gracias a las propiedades de la parábola que refleja los rayos que inciden en su superficie hacia un punto denominado como foco.

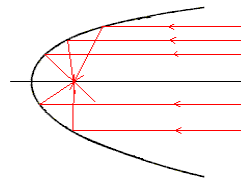


Ilustración 37. Rayos incidentes sobre una parábola.

El absorbedor se sitúa en el foco de la parábola que forma la superficie receptora, el cociente de las áreas de estas dos superficies se denomina relación de concentración (Pérez, 2005).

Ecuación 1. Relación de concentración.

$$C = A_{\text{receptor}} / A_{\text{absorbedor}} \dots \dots \dots (1)$$

Donde A_{receptor} = Área del receptor del concentrador (área de la parábola)

Donde $A_{\text{absorbedor}}$ = Área del absorbedor del concentrador (área del foco)

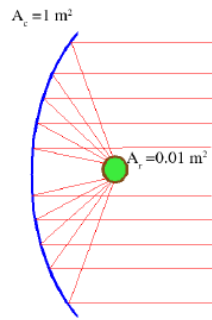


Ilustración 38. Relación de concentración de 100.

La razón de concentración máxima que puede obtenerse depende de la distribución angular de la radiación. En el caso de un haz de rayos perfectamente paralelos, no existe límite a la razón de concentración teórica, ya que si el eje óptico del concentrador (un paraboloide de revolución) es paralelo a la dirección del haz, todos los rayos reflejados pasarán por su punto focal, con lo que el área del receptor puede hacerse tan pequeña como se desee (Pérez, 2005).

La radiación solar es un caso intermedio, ya que el Sol no es una fuente luminosa puntual, y por lo tanto sus haces de luz no están perfectamente paralelos, así que se puede concentrar con un límite definido (Pérez, 2005).

Para un sistema tridimensional:

Ecuación 2. Concentración máxima sistema tridimensional.

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\text{sen}^2(\theta_s)} \dots\dots\dots(2)$$

Donde $C_{m\acute{a}x}$ = Es la razón de concentración máxima
 θ_s = Angulo de apertura de la parábola

Para un sistema bidimensional:

Ecuación 3. Concentración máxima sistema bidimensional.

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\text{sen}(\theta_s)} \dots\dots\dots(3)$$

Donde $C_{m\acute{a}x}$ = Es la razón de concentración máxima
 θ_s = Angulo de apertura de la parábola

Para el caso del Sol en donde el ángulo de incidencia puede ser de 4.653×10^{-3} [rad], se tiene una concentración máxima para sistema tridimensional y bidimensional de 46189 y 215 respectivamente (Pérez, 2005).

Tabla 3. Cuadro comparativo entre las relaciones de concentración y las temperaturas posibles alcanzadas en el absorbedor.

Concentrador	Relación de Concentración	Temperatura (°C)
Canal parabólico	5-40	70-450
Disco parabólico	100-1000	70-930
Torre central	100-1500	130-3000

2.2 Tecnologías de concentración solar.

Se tienen tres sistemas desarrollados actualmente para aprovechar la concentración solar (Pillatowsky, 2009).

- Sistemas de colectores cilindro parabólicos.
- Discos parabólicos o paraboloides de revolución.
- Sistemas de receptor central, o de torre central.

Los primeros concentran la radiación solar en dos dimensiones, mientras que los dos últimos lo hacen en tres dimensiones, pudiendo alcanzar por ello mayores relaciones de concentración (Pillatowsky, 2009).

El grado de desarrollo de las distintas opciones de concentración es diverso. Mientras que los sistemas de colectores cilindro-parabólicos se encuentran muy desarrollados, los sistemas de disco y de torre están todavía en etapa de desarrollo, pero sus aplicaciones son muy diversas y atractivas debido a las altas temperaturas alcanzadas.

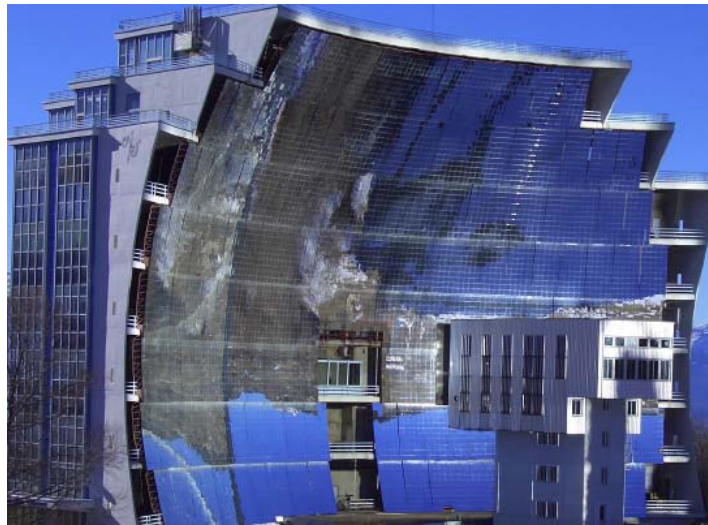


Ilustración 39. Horno solar de Odeillo en Francia (Pillatowsky, 2009).

2.2.1 Concentrador cilíndrico parabólico (CCP).

El concentrador cilindro parabólico (CCP), está compuesto básicamente por un espejo en forma de cilindro parabólico, el cual refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor de la radiación, colocado a lo largo de la línea del foco de la parábola, en donde se encuentra un tubo que lleva el fluido de trabajo del sistema.

Con estos sistemas se pueden alcanzar temperaturas de hasta 450°C (Arancibia, 2009).

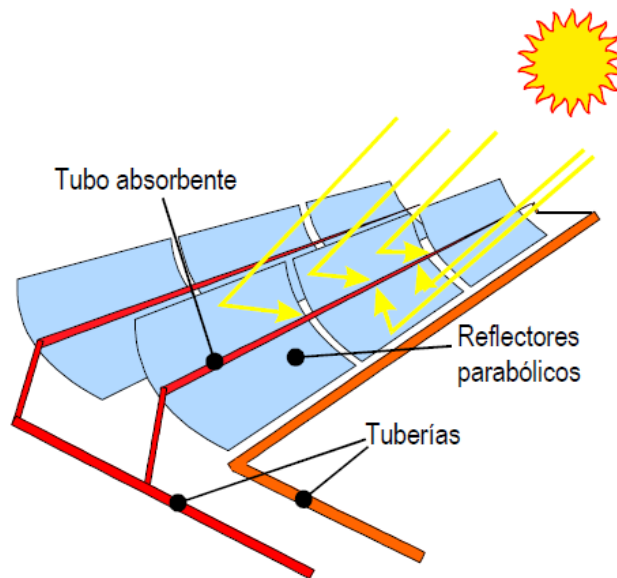


Ilustración 40. Esquema de un CCP.

2.2.2 Elementos principales de un CCP.

Los elementos principales de un CCP son:

- La superficie reflectora cilindro-parabólico.
- El tubo absorbedor.
- La estructura metálica con seguimiento solar.

2.2.2.1 Superficie reflectora.

El objetivo del concentrador cilíndrico parabólico es reflejar toda la radiación solar posible hacia el foco de la parábola. La superficie reflejante se consigue a base de películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da la suficiente rigidez. En la actualidad se utilizan diferentes soportes para la película reflectante (Pérez, 2005):

- Soporte de chapa metálica.
- Soporte de vidrio.
- Soporte de plástico.

Se suelen usar chapas de aluminio pulido de alta reflectividad o lamina de acero inoxidable acabado espejo en las que el material soporte actúa a la vez de elemento reflexivo. La principal desventaja de esta opción es su baja durabilidad, ya que la superficie metalizada se deteriora con rapidez, disminuyendo la reflectividad, cuando está expuesto a la intemperie.

Cuando el medio soporte es vidrio, sobre su cara posterior se deposita una fina película de plata protegida mediante una película de cobre y otra de pintura epoxi. Con esto se obtiene un espejo convencional.

Si el vidrio es grueso, el doblado se debe realizar mediante calor, mientras que si el vidrio es delgado, puede tener la suficiente flexibilidad para doblarse en frío y acoplarse a una chapa metálica que le mantenga la forma.

En el caso del soporte plástico el reflector consiste en una lámina de material plástico sobre la que se deposita una película de plata o aluminio, así se obtiene una superficie reflejante que puede pegarse sobre cualquier sustrato (chapa metálica). Al igual que con los otros sistemas, el principal problema es que con la intemperie las partículas en el aire dañan la superficie reflectora, disminuyendo su reflectividad. Y además estas películas plásticas presentan un grado de ensuciamiento mayor que los espejos de vidrio. Se piensa que es debido a que se cargan electrostáticamente por la acción del viento y se deposita sobre ellas una mayor cantidad de polvo atraído por esta carga electrostática (Pérez, 2005).

2.2.2.2 Tubo absorbedor.

El otro elemento toral de este sistema es el tubo absorbedor, sobre el cual fluye el fluido de trabajo y de él dependerán, las mayores o menores pérdidas de energía, así como la cantidad de calor absorbido.

Este tubo puede consistir en un solo tubo o en dos tubos concéntricos. Para el caso de los tubos concéntricos el interno consiste en un tubo metálico con una alta conductividad, alta absorción y baja reflectividad en su superficie, con el objetivo de tener una alta eficiencia térmica en la transmisión de calor. El tubo externo es regularmente de vidrio para evitar las pérdidas por convección por el viento externo, también el vidrio puede estar diseñado para favorecer la transmitancia de la radiación solar hacia dentro del tubo, pero evitar el flujo de radiación hacia fuera del tubo (Pérez, 2005).

Con respecto al fluido de trabajo que circula dentro del tubo, se tiene que si las temperaturas son moderadas (<200°C), se puede utilizar agua desmineralizada, o una mezcla de etilen-glicol. En cambio, se utiliza aceite sintético en aquellas aplicaciones donde se desean temperaturas más altas (200 °C < T < 450 °C) (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005). Esto es debido a que a altas temperaturas, si por el tubo está circulando agua, este estará sujeto a muy altas presiones, ya que es necesario mantenerla en esta condición para que el fluido no evapore a altas temperaturas. En cambio con aceite térmico, con una temperatura de ebullición más alta a presión atmosférica, no se requiere presurizar tanto el tubo.

Poder trabajar a menores presiones tiene muchas ventajas, posibilita el uso de materiales más económicos y simplifica la instalación y medidas de seguridad de las tuberías.

Existen diversos tipos de aceite y la elección de uno u otro se hace en base a la temperatura máxima de trabajo que soportan. A continuación se presenta una lista de estos.

Tabla 4. Diversos tipos de aceite térmico (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).

Nombre	Temp. máxima (°C)	Características principales
Santotherm 55	300	Bajo costo (≈1€/kg)
Monsanto VP-1	400	baja temperatura de congelación (12 °C)
Syltherm 800	425	alta temperatura de congelación (40 °C)

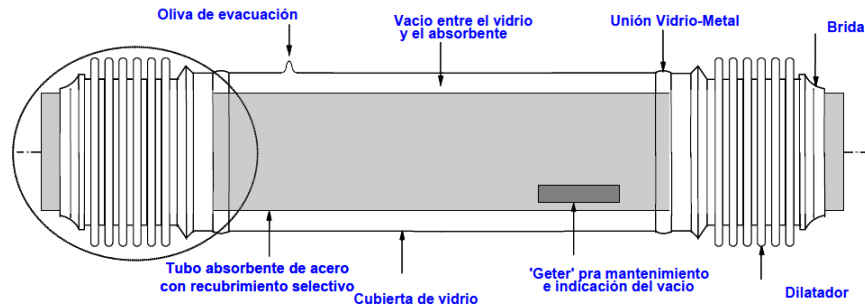


Ilustración 41. Corte de un tubo absorbedor (Pérez, 2005).

2.2.2.3 Sistema de seguimiento solar.

Un CCP, al igual que todo sistema de concentración solar, solo puede aprovechar la radiación directa del Sol, por lo tanto se requiere de un sistema que mueva el concentrador a lo largo del día conforme el Sol describe su trayectoria diaria en el cielo.

El sistema de seguimiento solar más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del Concentrador alrededor de un eje (Pérez, 2005).

La rotación del Concentrador requiere un mecanismo de accionamiento, eléctrico o hidráulico que dirija a la superficie del Concentrador conforme el movimiento del Sol.

Usualmente todo el CCP está conectado en serie a un solo Concentrador, cuando este es muy grande, el mecanismo es hidráulico.

En los campos de CCP, varios colectores se unen en serie para formar filas que, a su vez, se conectan en paralelo hasta conseguir la potencia térmica deseada.

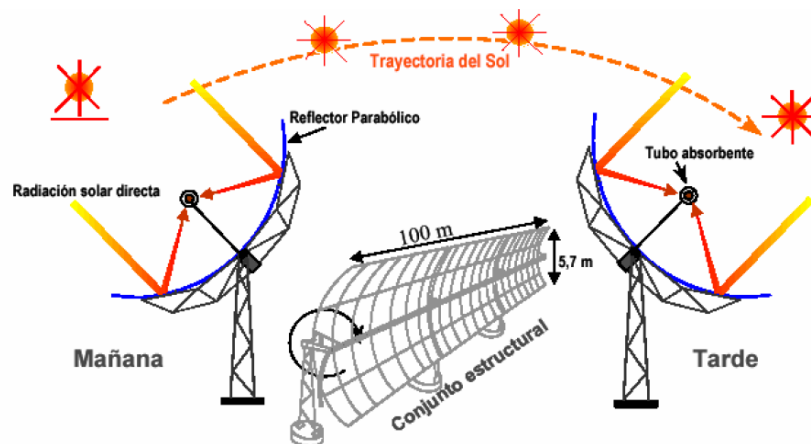


Ilustración 42. Sistema de seguimiento solar (Pérez, 2005).



Ilustración 43. CPCs en la planta solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM (el autor).

2.2.3 SISTEMA DE TORRE CENTRAL (STC)

Los STCs se caracterizan porque el sistema de captación solar está compuesto por un grupo de varios, de concentradores individuales llamados helióstatos, que dirigen la radiación solar concentrada hacia un receptor central, situado sobre una torre a cierta altura.

Debido al gran número de helióstatos que se pueden colocar para un solo receptor central se pueden alcanzar grandes relaciones de concentración y con ello temperaturas mayores a los 1000°C (Pillatowsky, 2009).

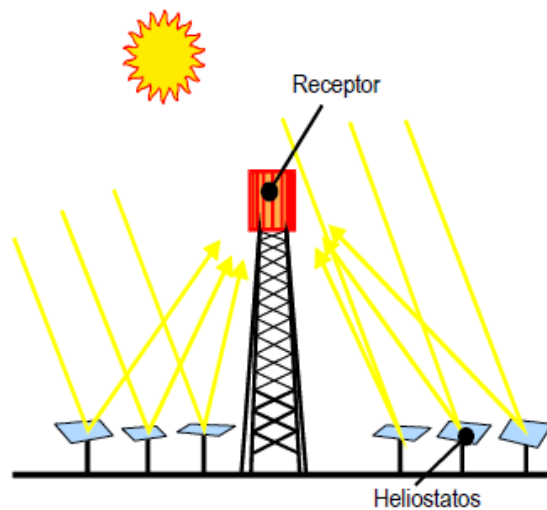


Ilustración 44. Diagrama de STC (Pérez, 2005).

2.2.4 Elementos principales de un STC

Estos sistemas están formados de tres elementos principales (Pérez, 2005):

- Campo de helióstatos.
- El receptor y su torre.
- Un sistema de control.

2.2.4.1 Campo de helióstatos

El helióstato es el componente más característico de un STC, y representa una fracción muy significativa del costo de la parte solar.

Las superficies reflectantes más empleadas son a base de espejos de vidrio; también se han empleado superficies reflectantes a base de películas de poliméricas reflejantes.

La superficie de cada helióstato ha ido evolucionando hacia tamaños cada vez mayores, partiendo de unos 40 – 50 m² para los helióstatos de las primeras plantas, hasta llegar a los 150 m² de algunos desarrollos recientes (Pérez, 2005).

Aun que hay algunos diseños de helióstatos más pequeños debido a la facilidad en la instalación y el transporte. El despliegue del campo de helióstatos en relación al receptor está condicionado en gran medida por las características del terreno disponible, por el tamaño de la planta y por la posición del receptor. Algunas distribuciones permiten prescindir de la torre.

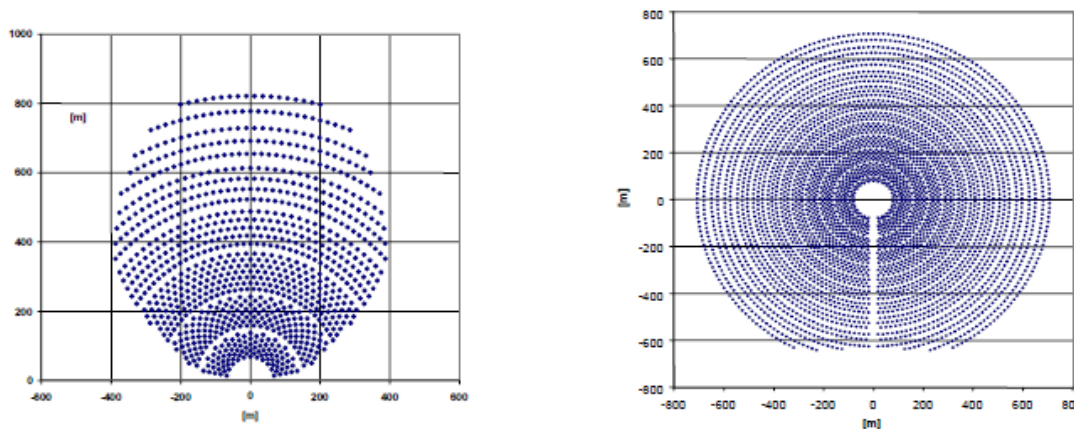


Ilustración 45. Dos tipos de distribuciones en un campo de heliostatos (Pérez, 2005).

2.2.4.2 Receptor

Desde el punto de vista de la geometría del receptor se puede distinguir entre receptores de cavidad y externos. A su vez, éstos últimos pueden clasificarse en planos, cilíndricos y semicilíndricos (Pérez, 2005).

Por el mecanismo de transferencia de calor, podemos distinguir entre receptores de absorción directa y de absorción indirecta, contando entre éstos con los tubulares, los de placa y los volumétricos, y pueden ser también atmosféricos o presurizados (Pérez, 2005).

El fluido de trabajo puede ser agua, en donde se puede tener un sistema de evaporación y sobrecalentamiento de vapor, o el fluido puede ser una sal fundida, sodio fundido, otras partículas sólidas etc.

La altura de la torre debe ser la adecuada para reducir las sombras y bloqueos entre los helióstatos, las torres son construidas de estructuras metálicas o de hormigón (Pérez, 2005).

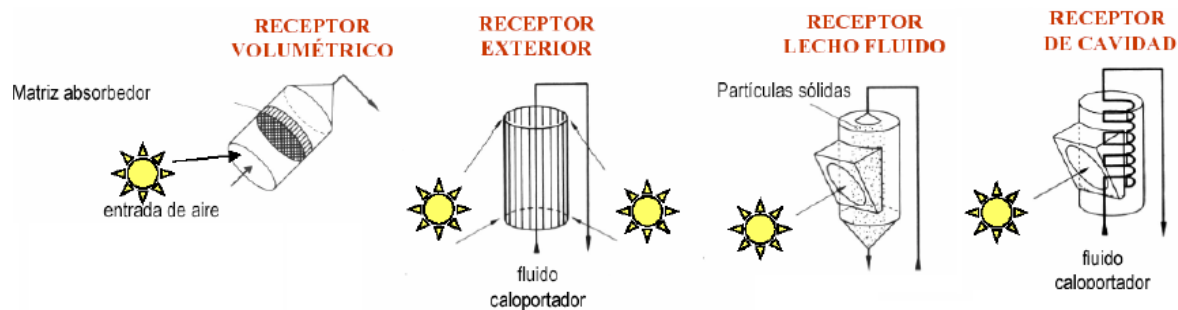


Ilustración 46. Diferentes tipos de receptores de un STC (Pérez, 2005).

Este tipo de concentración es la utilizada en las plantas termo-solares de generación eléctrica.



Ilustración 47. Planta termosolar en Sevilla España (Pillatowsky, 2009).

2.2.5 Sistema de disco parabólico (SD)

Los sistemas de discos parabólicos se caracterizan porque la forma de la superficie reflejante es de un paraboloide de revolución y el receptor se sitúa en el foco del paraboloide.

El sistema de aprovechamiento de la energía solar captada en el receptor es usualmente mediante una conversión a energía mecánica (motor Stirling), aunque hay diversas otras aplicaciones que se le pueden dar al receptor de este tipo.

Este tipo de concentrador es muy versátil, pero sus costos de construcción no lo hacen todavía competitivo en el mercado.

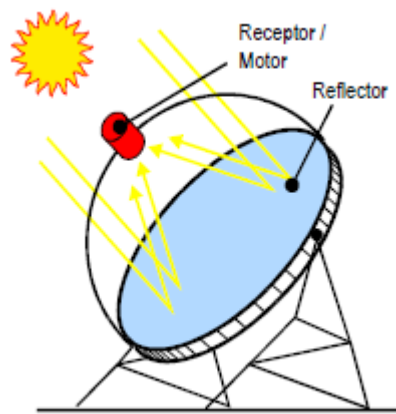


Ilustración 48. Esquema de un concentrador de disco parabólico (Pérez, 2005).

2.2.6 Componentes principales de un concentrador de disco parabólico.

Los componentes de un sistema de discos parabólicos son:

- Concentrador (plato).
- Receptor.
- Sistema de conversión de energía.
- Soporte y sistema de seguimiento solar.

2.2.6.1 Concentrador

La forma de la superficie reflejante en un sistema de este tipo es la de un paraboloide de revolución, y su forma geométrica es una cuestión de diseño. La cantidad de energía solar concentrada va a depender del área del plato.

Los discos pueden ser contruidos mediante secciones que proporcionen la forma aproximada del disco parabólico, o mediante laminas metálicas tensionadas a la forma del paraboloide, o polímeros con la forma deseada recubiertos de una película reflejante.

De igual forma la superficie reflejante puede consistir en espejos, película reflejante, ya sea polimérica o metálica, e incluso mediante evaporación de aluminio.



Ilustración 49. Superficie receptora conformada de diversos espejos (Lovegrove, 2008).

2.2.6.2 Soporte y sistema de seguimiento

Este sistema también posee una estructura soporte y un mecanismo de seguimiento al Sol en dos ejes.

Los dos tipos de seguimiento empleados son (Pérez, 2005):

- Seguimiento en acimut-elevación (el movimiento se realiza en dos ejes).
- Seguimiento polar, (sigue las variaciones estacionales del Sol).

El primer tipo de seguimiento es más fácil de montar mientras que el segundo es más fácil de controlar.

2.2.6.3 Receptor

El receptor tiene relativamente la misma función y operación que los sistemas de torre central, su objetivo es adsorber la radiación solar y transferirla al fluido de trabajo o a la aplicación térmica.

Los receptores de tubos directamente iluminados se adaptan directamente a los motores. En estos receptores el absorbedor está formado por un haz de tubos por donde circula el fluido de trabajo del motor. La radiación incide directamente sobre estos tubos. Las temperaturas de trabajo son altas.

Un inconveniente de estos receptores es la radiación no es uniforme en la radiación incidente en el receptor, lo que produce picos en la temperatura en algunas zonas del mismos, limitando por tanto la máxima temperatura del fluido de trabajo para evitar sobrepasar la temperatura máxima permitida en los materiales.

En los receptores de reflujos, un fluido intermedio es empleado para la transmisión del calor, (metal líquido), su alta capacidad para transportar la energía térmica permite realizar receptores más pequeños, además de que se mantiene una temperatura uniforme.

En el receptor tipo tubo de calor se tiene un metal líquido que asciende por fuerzas de capilaridad por unas mechas situadas en la parte posterior del receptor, de donde se evapora para ir a condensar en el calentador del motor y regresar al ciclo. La configuración tiene la ventaja de mayor seguridad asociada menos metal líquido para llevar a cabo la transmisión de calor (Pérez, 2005).

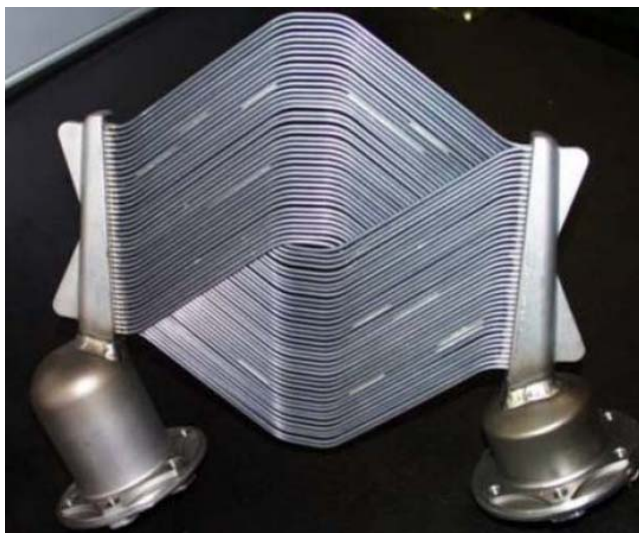


Ilustración 50. Receptor de tubos EuroDish (SOLO kleinenmotoren).

2.2.6.4 Sistema de conversión de energía

Usualmente este tipo de concentrador tiene un sistema generador de potencia eléctrica o mecánica que corresponde a un motor Stirling, que es un maquina térmica que funciona gobernado por el ciclo Stirling.

Este ciclo teóricamente consta de cuatro etapas, dos de ellas son de cesión de calor a temperatura casi constante y otras dos son de compresión y expansión con regeneración térmica.

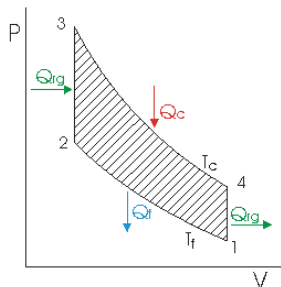


Ilustración 51. Diagrama del Ciclo Stirling (Yunus, Termodinámica, 2006).

Las etapas del ciclo son:

2-3: El gas se comprime por el aumento de temperatura provocado por el calor ganado en la regeneración.

3-4: El gas toma calor de la fuente de alta temperatura (radiación solar) y a la vez se expande.

4-1: Parte del calor del gas es cedido al fluido regenerador a volumen constante.

1-2: Se realiza la cesión de calor propia de cualquier ciclo termodinámico, hacia la fuente fría a temperatura casi constante.

El ciclo Stirling es un ciclo que se desarrolla dentro de un cilindro-émbolo.

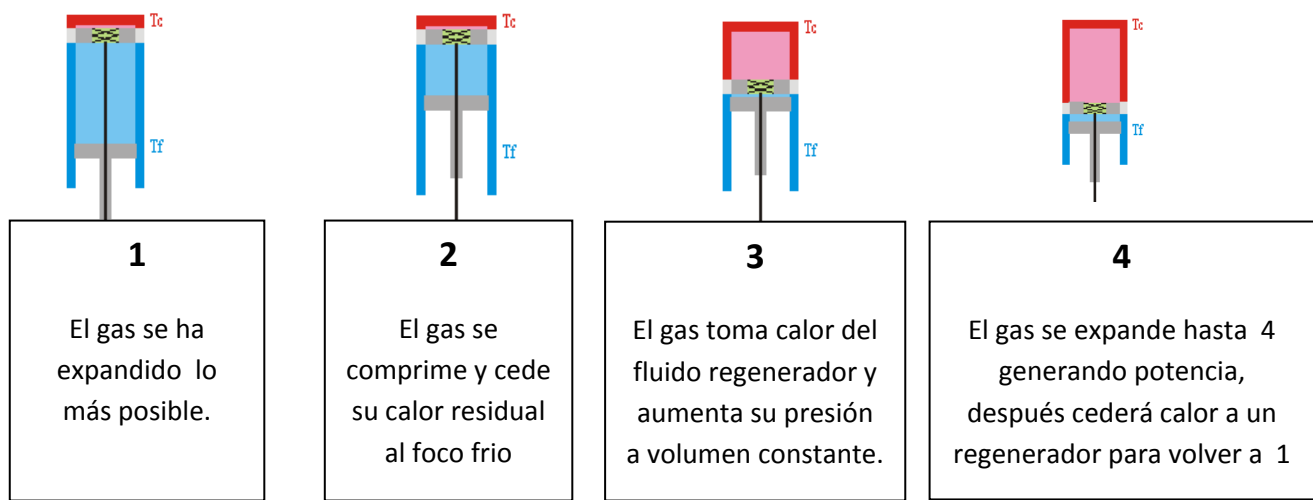


Ilustración 52. Parámetros importantes en el diseño de un concentrador de disco parabólico.

2.2.6.5 Parámetros del concentrador de disco parabólico

Los parámetros que caracterizan el concentrador son los siguientes:

- Área de apertura del concentrador.
- Área de apertura del receptor.
- Fracción del área de apertura no sombreada.
- Reflectividad de la superficie.
- Fracción de intercepción, que es la fracción de la energía reflejada por el concentrador que entra en el receptor y alcanza la superficie receptora.

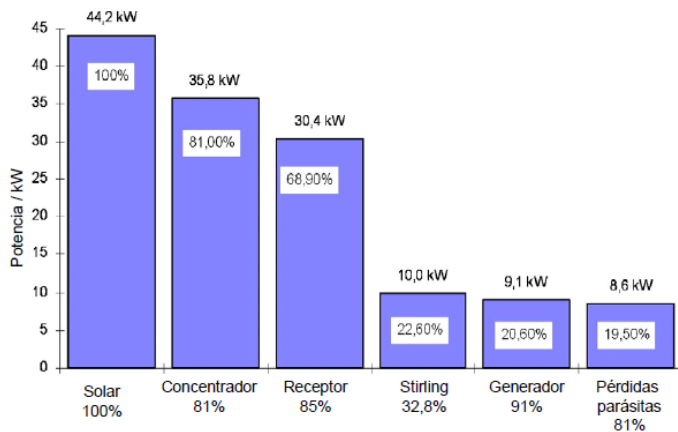


Ilustración 53. Rendimientos típicos en un sistema generador con concentrador de disco. (Pérez, 2005).

2.2.6.6 Perspectiva de los Concentradores de disco parabólico.

Desde hace tiempo se han venido desarrollando diversos tipos de concentradores de disco parabólico para diferentes aplicaciones, a continuación se presentan algunos de ellos con sus características principales.



Ilustración 54. Concentrador solar de disco parabólico, construido en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

El concentrador solar de disco parabólico, construido en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, ubicado en Temixco, Morelos México, ha sido utilizado para diferentes pruebas experimentales en diversos procesos que requieren energía térmica, fue adaptado de una antena parabólica, a la cual se le pulió su superficie para incrementar su reflectividad.



Ilustración 55. Concentrador solar de disco parabólico, construido en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (Ramirez, 2007) .

El concentrador solar de disco parabólico, construido en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, ubicado en Cuernavaca Morelos, fue diseñado con el objetivo de generar electricidad a partir de un motor Stirling de 10 kW, el concentrador mide 7.5 m de diámetro y tiene una distancia focal de 4.5 m, está construido en secciones de fibra de vidrio y su superficie es de aluminio anodizado con una reluctancia del 86%. (Ramirez, 2007)

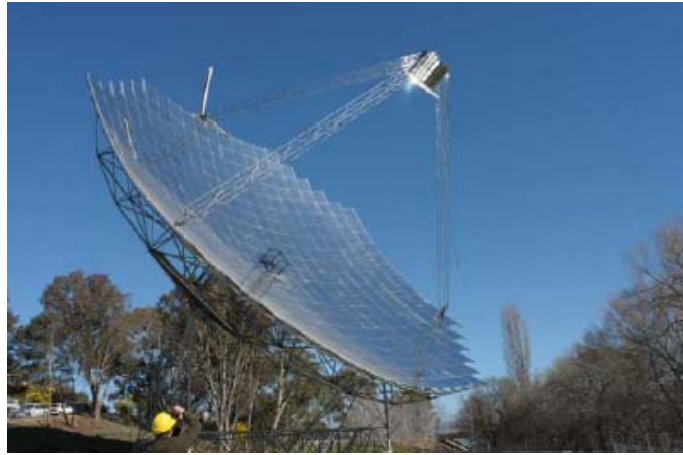


Ilustración 56. Concentrador de disco parabolico en la Australian National University (Lovegrove, 2008).

La Australian National University, desarrolló un concentrador con un área de captación de 500 m² (25 m de diámetro), con una distancia focal de 13.4m, está formado por 380 espejos curvados de 1.17 x 1,17 m, con una reflectancia de 93%. Las pruebas arrojaron que era posible obtener relaciones de concentración de hasta 2000 (Lovegrove, 2008).

A su vez también el mercado de concentradores solares de disco se está expandiendo y están surgiendo empresas en el mundo que están apostando a las ventajas de esta tecnología, tal es el caso de Stirling Energy Systems SES, que tiene proyectado una planta termosolar de este tipo en el desierto de Mojave.



Ilustración 57. Tecnología de SES en Peoria Arizona (Renewable Energy News, 2008).

Capítulo 3

Radiación Térmica

Visto anteriormente el gran potencial que se puede obtener a través del uso de la energía solar, lo que resta es ofrecer los conceptos fundamentales teóricos para poder analizar a la energía solar desde el punto de vista técnico e ingenieril. Así mismo se presentan varios conceptos fundamentales que se utilizaron para el desarrollo del proyecto presente.

3.1 Fundamentos

Existen tres formas diferentes de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. La conducción es la transferencia de energía entre partículas de un mismo medio, ya sea un sólido, líquido o gas; la conducción se lleva a cabo de un punto de mayor temperatura a uno de menor dando como resultado un flujo de energía, la cual será proporcional al factor llamado conductividad térmica que cambia de acuerdo al tipo de material. La convección transfiere energía de un cuerpo sólido a un flujo en movimiento sea líquido o gas. Y por último, la transferencia de calor por radiación, que es la única que no necesita algún medio para poder ser transmitida ya que se transmite a través de ondas electromagnéticas y viaja a la velocidad de la luz. Esta es la forma en la que la energía del Sol llega hasta la tierra y de igual forma todo cuerpo que este por arriba de cero grados centígrados tiene la capacidad de transmitir radiación térmica.

La radiación térmica es solo una parte correspondiente al espectro de ondas electromagnéticas que se encuentra entre 0.1 hasta 100 μm de longitud de onda (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007). Lo que caracteriza a este rango de longitudes de onda es la sensación de visión en el ojo humano.

La radiación electromagnética emitida por el Sol es la radiación solar y cae en el rango de longitud de onda de 0.3 – 3 μm . La radiación solar comprende al espectro visible, a las ondas electromagnéticas infrarrojas y ultravioletas. Alrededor del 12% de la radiación solar corresponde a los rayos ultravioleta, los cuales son capturados por la capa de ozono (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

La Tabla 5 muestra el espectro visible:

Tabla 5. Espectro visible (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

Color	Longitudes de onda μm
Violeta	0.40 – 0.44
Azul	0.44 – 0.49
Verde	0.49 – 0.54
Amarillo	0.54 – 0.60
Naranja	0.60 – 0.67
Rojo	0.63 – 0.76

Dentro de este espectro visible podemos notar que en una superficie negra se absorbe una mayor cantidad de energía, mientras que en una superficie blanca se refleja esta energía. Pero cuando hablamos de un cuerpo negro, nos referimos a una idealización de un cuerpo, el cual puede absorber o emitir perfectamente la radiación, lo cual indica que ningún otro cuerpo puede emitir o absorber más radiación que el cuerpo negro a la misma temperatura.

La radiación es emitida por cada punto sobre una superficie plana, en todas direcciones hacia el hemisferio que está arriba de ella. La cantidad que describe la magnitud de radiación emitida o incidente en una dirección especificada en el espacio es la intensidad de radiación. Todas las superficies emiten radiación, pero también reciben radiación, por lo cual podemos hacer distinción entre tres flujos de radiación (Pérez, 2005):

- Poder de emisión E: flujo de radiación emitida por un cuerpo.
- Irradiación G: flujo de radiación incidente sobre una superficie.
- Radiosidad J: es la razón a la cual la radiación sale de una superficie y es la suma del poder de emisión y la irradiación reflejada.

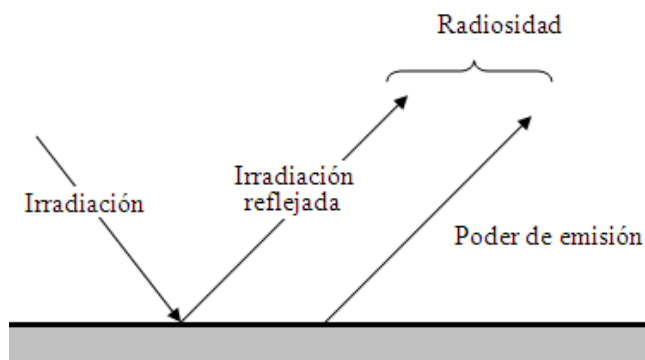


Ilustración 58. Flujos de radiación (Pérez, 2005).

3.2 Propiedades de radiación de los materiales:

La radiación de los materiales depende de la longitud de onda, la dirección y la temperatura, y existen propiedades de los materiales que definen su interacción con la radiación incidente en sus superficies.

3.2.1 Emisividad:

Es la razón que existe entre la radiación emitida por una superficie cualquiera a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. La emisividad de una superficie se denota por ϵ y varía entre 0 y 1, dado una $\epsilon = 1$ al cuerpo negro. La emisividad de un material no es constante varía dependiendo de la longitud de onda y la temperatura (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

3.2.2 Absortividad:

Otra propiedad importante relativa a la radiación es la absortividad α a que representa la fracción de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Su valor está comprendido en el rango $0 < \alpha < 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él, es un absorbente perfecto ($\alpha = 1$) (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

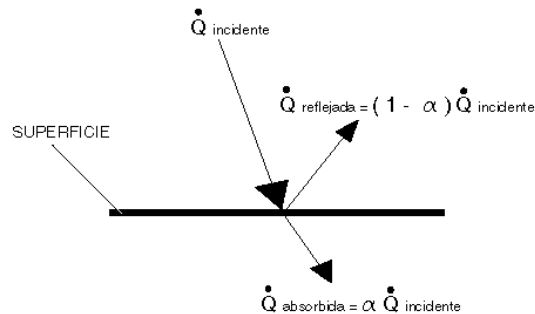


Ilustración 59. Concepto de absortividad.

3.2.3 Transmisividad

Es una propiedad de los materiales que permite a la radiación viajar a través de ellos. Si la fracción de radiación transmitida es cero, es decir que la transmisividad τ sea nula, el cuerpo se considera opaco; si $\tau = 1$, entonces será transparente a la irradiación. La radiación incidente cuando pasa a través del material se refracta, es decir cambia su dirección y velocidad, y se define un índice de refracción n , que es una velocidad relativa del haz de luz que atraviesa el material v y la velocidad de la luz en el vacío C (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

Ecuación 4. Índice de refracción.

$$n = C/v \dots \dots \dots (4)$$

Donde n = índice de refracción

C = velocidad de la luz en el vacío

V = velocidad relativa del haz de luz que atraviesa el material.

3.2.4 Reflectividad

Es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie. Esta propiedad es sumamente importante en la concentración, mientras mayor sea la reflectividad de una material, más adecuado será para la concentración solar. En general se busca que el material tenga una reflectividad arriba de 0.9 donde el 1 es el valor teórico en el cual toda la radiación incidente se refleja. El valor de la refracción está relacionado con el índice de refracción a través de la fórmula de Fresnel. Los materiales con un alto índice de refracción son altamente reflectantes.

Ecuación 5. Formula de Fresnel (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \dots\dots\dots(5)$$

Donde R: reflectividad.
N: índice de refracción.

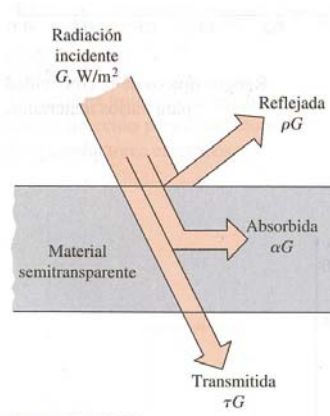


Ilustración 60. Emisividad, absortividad y transmitancia (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

3.3 Cuerpo negro y Ley de Stefan-Boltzmann

Un cuerpo con temperatura emite radiación en todas direcciones en forma de onda electromagnética a diferentes longitudes de onda. Dicha cantidad de energía por radiación emitida desde una superficie, a una longitud de onda dada, depende del material del cuerpo y de la condición de su superficie y también de la temperatura de esta. Por lo tanto, cuerpos diferentes pueden emitir cantidades diferentes de radiación por unidad de área, incluso cuando se encuentran a la misma temperatura.

Un cuerpo negro, es un estándar de emisión de radiación, y se define como un emisor y absorbedor perfecto de la radiación. A una temperatura y longitud de onda específica, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro. Además, un cuerpo negro puede absorber toda la radiación incidente sin importar la longitud de onda. También emite energía de radiación de manera uniforme en todas direcciones.

La energía de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área superficial se define:

Ecuación 6. Radiación de cuerpo negro (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

$$E_b = \sigma T_s^4 \dots\dots\dots(6)$$

En donde: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ (W/m² K⁴) es la constante de Stefan Boltzmann
 T_s : la temperatura absoluta de la superficie en grados K.
 E_b : poder de emisión de cuerpo negro.

La ecuación se conoce como ley de Stefan – Boltzmann y es válida para una superficie ideal, es decir un cuerpo negro, para una superficie real se debe considerar un factor de emisividad, como se observa en la ecuación 7.

Ecuación 7. Potencia térmica de la superficie considerando un factor de emisividad (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

$$E = e\sigma T_s^4 \dots\dots\dots(7)$$

En donde: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ (W/m² K⁴) es la constante de Stefan Boltzmann
 T_s : la temperatura absoluta de la superficie en grados K.
 E : poder de emisión de la superficie.
 e : emisividad de la superficie

Este valor e ($0 < e < 1$), representa una eficiencia de la emisividad de la superficie con respecto a la de un cuerpo negro.

Para el caso en el que la emisividad sea igual a la absorptividad se tiene el concepto de cuerpo gris, que es como se modelan la mayoría de los cuerpos (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007), y la potencia térmica que emite la superficie queda como:

Ecuación 8 Potencia térmica de la superficie de un cuerpo gris.

$$E = e\sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \dots\dots\dots(8)$$

En donde: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ (W/m² K⁴) es la constante de Stefan Boltzmann
 T_s : la temperatura absoluta de la superficie en grados K.
 E : poder de emisión del cuerpo gris.
 e : emisividad de la superficie
 T_∞ : la temperatura absoluta del ambiente en grados K.

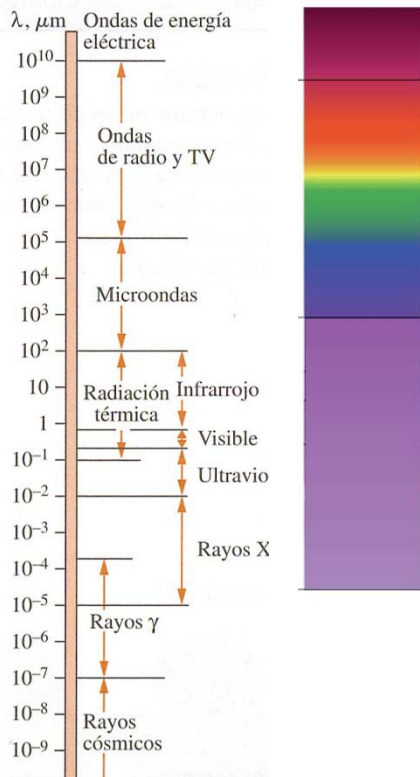


Ilustración 61. Espectro electromagnético con componente térmica (UV, luz visible e IR) (Yunus, Transferencia de calor y masa, 2007).

3.4 Radiación atmosférica y solar

El flujo de energía del Sol está definido por las condiciones meteorológicas en la Tierra así como de la ubicación (latitud y longitud) del lugar donde se requiere evaluar la radiación solar, así como también se verá influenciada al atravesar la atmosfera terrestre, derivándose en radiación directa y la radiación solar que se difunde en la atmosfera pero que sigue llegando a la superficie terrestre.

3.4.1 Constante solar

Para evaluar la energía que llega a la atmosfera terrestre, se debe definir una constante, la constante solar.

El valor de esta constante se obtiene de colocar una superficie hipotética a una distancia media entre la Tierra y el Sol, y que sea perpendicular al flujo de energía del Sol. La superficie debe de estar colocada fuera de la atmosfera precisamente para evitar influencias de esta sobre el valor de la constante solar.

De acuerdo con las mediciones este valor se encontró que:

Ecuación 9. Constante solar (Ruíz, 2006).

$$G_s = 1353 \text{ (W/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (9)$$

Considerando la excentricidad en la órbita de la Tierra, se tiene que el flujo de esta superficie hipotética, es decir el flujo que llega a la atmósfera de la Tierra es:

Ecuación 10. Flujo de radiación de una superficie hipotética (Ruíz, 2006).

$$G_{on} = G_s(1 + 0.033 \cos(360n/365)) \dots\dots\dots (9)$$

Donde: G_{on} : flujo de radiación en la superficie hipotética

G_s : constante solar

n : depende del día del año (Ver Tabla 6)

Tabla 6. Valores de excentricidad de acuerdo con el mes del año.

enero	1
febrero	31+i
marzo	59+i
abril	90+i
mayo	120+i
junio	151+i
julio	181+i
agosto	212+i
septiembre	243+i
octubre	273+i
noviembre	304+i
diciembre	334+i

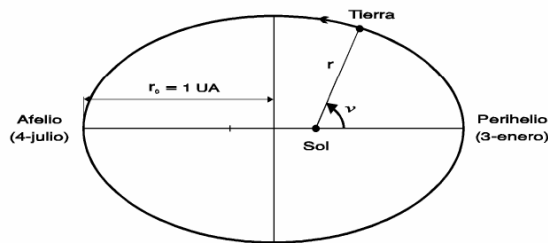


Ilustración 62. Órbita de la tierra y variación de su distancia al Sol. (Ruíz, 2006).

3.4.2 Latitud y longitud.

Un punto cualquiera sobre la superficie terrestre queda determinado por sus coordenadas geográficas, que son latitud y longitud.

La longitud se define como el ángulo diedro entre el plano meridiano cero y el plano meridiano que pasa por esa ubicación. Su valor va desde 0° hasta 180° y hasta -180° , el signo positivo es hacia el Este y el negativo hacia el Oeste (Ruíz, 2006).

La latitud se define como el ángulo formado por la normal a la Tierra en la posición en cuestión y el plano del ecuador. Su valor va a de 0° a 90° , y se cuenta a partir del Ecuador, positivamente hacia el polo norte y viceversa hacia el sur (Ruíz, 2006).

3.4.3 Características de la radiación solar

La radiación solar se presenta todo el espectro electromagnético de la luz, pero solo es aprovechable la parte térmica de esta radiación y eso incluye a los espectros (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005):

- Ultravioleta (UV), 7%
- Luz visible (amarillo, azul, violeta, verde, rojo), 47%
- Infrarrojos (IR), 46%

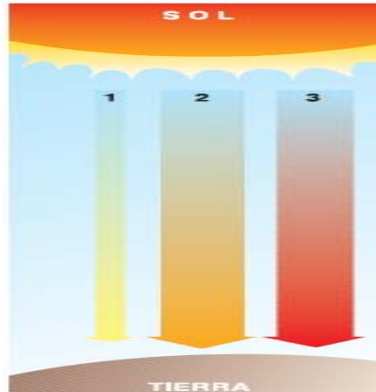


Ilustración 63. Espectros de la radiación aprovechables, 1.-UV, 2.-Luz visible, 3.-IR (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).

La radiación que proviene del Sol, la que pasa por esa superficie hipotética, se atenúa al pasar por la atmosfera, es decir se va separando en diferentes componentes en el momento de llegar a la superficie.

Primero alrededor de un 30% de la radiación es reflejada de regreso al espacio, de lo que ingresa, parte se absorbe en la atmosfera 15%, y el resto ingresa a la superficie de la Tierra (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005).

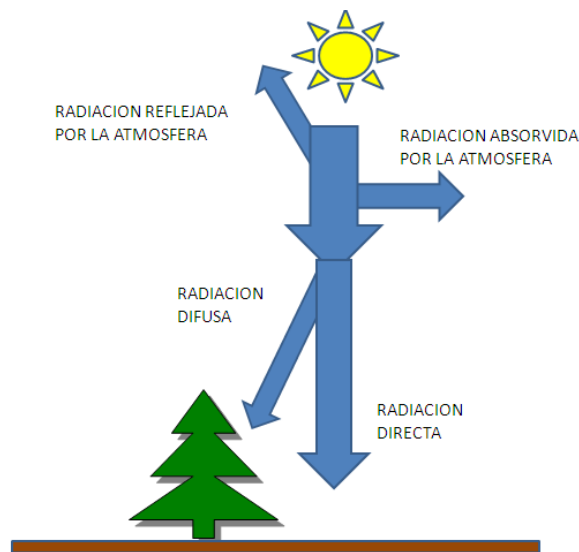


Ilustración 64. Balance simplificado de la energía proveniente del Sol.

De la radiación que ingresa la superficie, se conoce como radiación global incidente, y está formada por dos componentes, directa y difusa (7%) (EVE Ente Vasco de la Energía, 2005)

- Radiación directa. Los rayos son perpendiculares a la superficie de la Tierra.
- Radiación difusa. Los rayos son reflejados de manera irregular por la atmosfera.

La difusión de la radiación es la razón por la cual se observa el cielo azul, de otra forma se vería negro como en la luna.

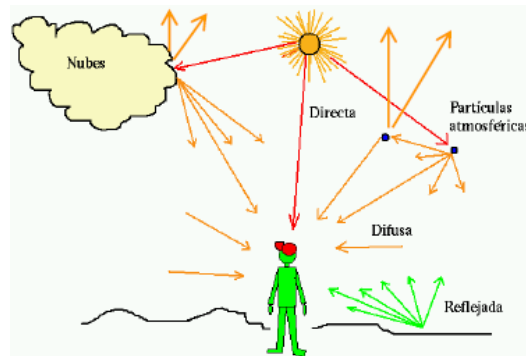


Ilustración 65. Radiación solar directa y difusa (Arancibia, 2009).

La suma de estas dos radiaciones que incide sobre una superficie se conoce como radiación global. La radiación total sobre la superficie de un objeto en la tierra debe incluir la radiación terrestre, que es la radiación de los cuerpos que se encuentran a mayor temperatura que la del ambiente.

Si la superficie se encuentra viendo hacia arriba se considera que no existe radiación terrestre que pase por la superficie y la suma de la radiación directa más la difusa se conoce como irradiación, que es la razón a la cual el flujo de calor atraviesa la superficie (W/m^2), este valor no es constante y cambia evidentemente, a lo largo de día (Arancibia, 2009).

3.5 Instrumentos de medición

Para cualquier proyecto de energía solar, se requiere tener una estimación del recurso solar, es decir la irradiación solar de la zona. La estimación teórica de la radiación solar, involucra ecuaciones complejas y sujetas a muchos parámetros variables; por esta razón para efectos prácticos para obtener un valor muy aproximado de la radiación solar a determinada hora y lugar, se hace uso de instrumentos de medición.

3.5.1 Piranómetro

El piranómetro consiste en dos sensores de temperatura, uno expuesto a la radiación solar y de superficie negra, y el otro sensor, completamente protegido de la radiación solar.



Ilustración 66. Foto de un piranómetro (Juan Hermosillo, 1995).

Los sensores también están protegidos por una cubierta de vidrio, con las condiciones ópticas adecuadas para no distorsionar el valor de la radiación, y protegerlos de la convección del aire.

Este aparato mide la radiación global (directa más difusa), si se quisiera saber el valor de estas por separado, la técnica es colocar una sombra sobre la dirección perpendicular a la superficie del piranómetro, y así se obtendría la radiación difusa (Juan Hermosillo, 1995).



Ilustración 67. Piranómetro con sistema de sombra para radiación difusa. (Ruíz, 2006).

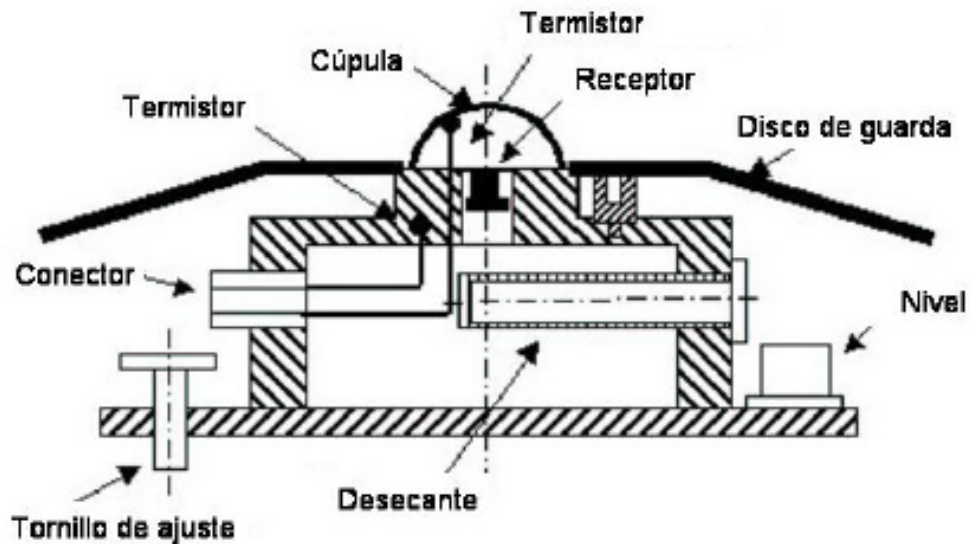


Ilustración 68. Esquema de un piranómetro. (Ruíz, 2006).

3.5.2 Piroheliómetro

Otro aparato para medir la radiación solar se conoce como piroheliómetro, que se enfoca directamente al Sol y mide la radiación directa de este.



Ilustración 69. Piroheliómetro EPPLEY NIP (Ruíz, 2006).

Este equipo requiere un sistema de seguimiento solar, y obtiene valores más exactos, manteniendo siempre la superficie receptora perpendicular a la radiación solar directa.

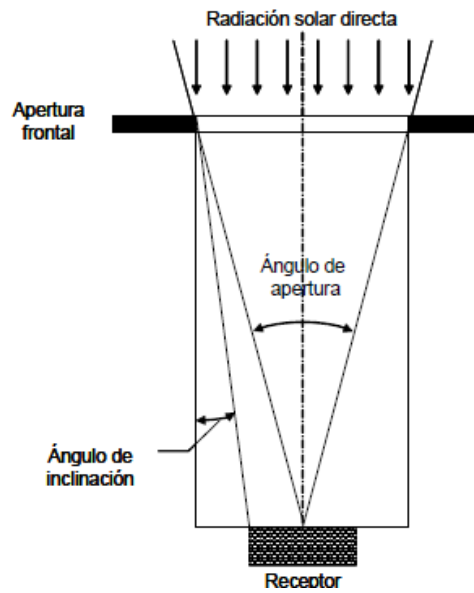


Ilustración 70. Geometría básica de un piroheliometro (Ruiz, 2006).

3.5.3 Medición vía satélite

También es posible estimar la radiación solar a partir de datos satelitales, y esto se basa en una estimación mediante un balance de energía en el cual, el satélite mide la radiación que no entra a la atmosfera.

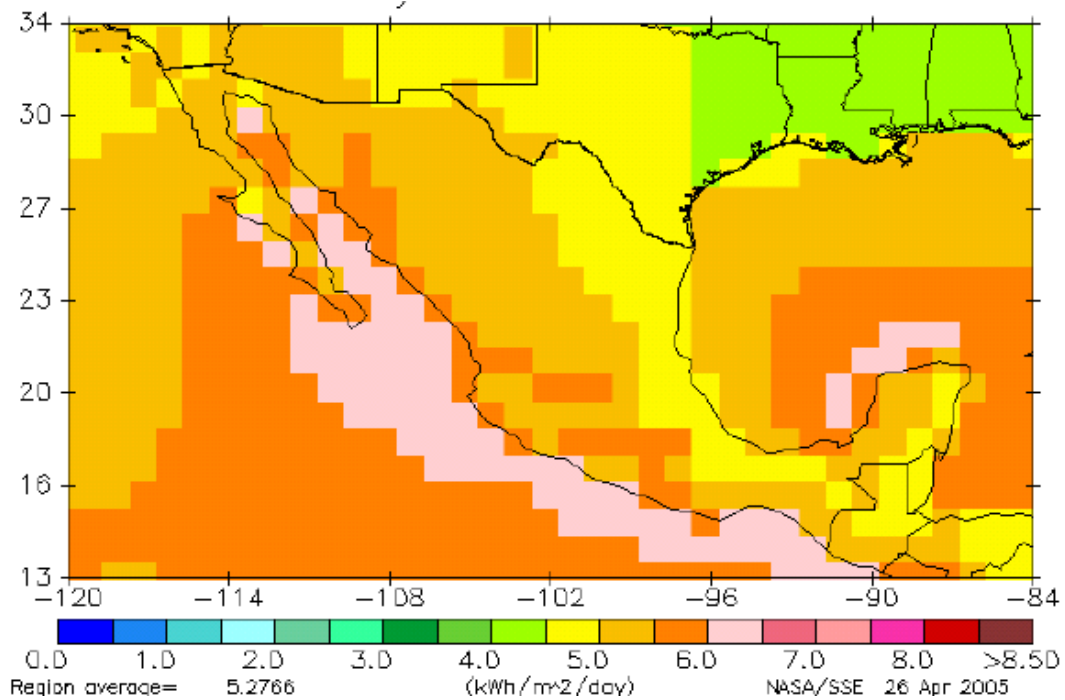


Ilustración 71. Valores de irradiación global en México (Almaza, 1976).

Como se observa la zona noroeste del país presenta un enorme recurso solar que puede ser aprovechado.

Capítulo 4

Diseño óptico y mecánico del disco parabólico

Una de las partes más importantes en un sistema de disco parabólico es la geometría empleada para reflejar los rayos solares hacia el receptor, es decir la geometría del plato parabólico. De la correcta geometría del disco parabólico dependerá la relación de concentración del sistema y el máximo aprovechamiento de la energía solar. En el presente trabajo se aborda el diseño y construcción de un disco parabólico, se eligió este sistema por ser óptimo para una construcción en masa y con una muy buena relación de concentración, no tan alta como la de un sistema de torre central, pero si más alta que un sistema de canal parabólico.

Ya definida la elección de la geometría óptima de la superficie Concentradora de este sistema, lo que nos queda es realizar un diseño de dicho paraboloide con los parámetros geométricos correspondientes.

El proceso de diseño desde la definición de la geometría optima hasta el diseño del soporte, es un proceso complejo que involucró varios factores es que se verán a lo largo de este capítulo.

4.1 Condiciones de operación y especificaciones

El sistema de concentración en cuestión estará sometido a diversos factores que se usan como partida para las especificaciones de diseño mecánico de nuestro disco parabólico; y que se enlistan a continuación:

- El disco podrá estar sujeto a velocidades del viento como máximo de 60 km/h, la estructura debe soportar ráfagas de viento de esta clase.
- La irradiación solar promedio que le llegará a nuestro sistema será de 254 (W/m²), este valor fue medido mediante un piranómetro en el sitio de instalación; este valor es de vital importancia para calcular el flujo reflejado por el material de superficie seleccionado.
- El peso de la estructura deberá ser el mínimo que se pueda obtener, para facilitar su traslado y manipulación; y es un punto importante para el diseño de la estructura y la selección de su material.
- La superficie reflejante deberá tener una buena reflectividad, este parámetro es de hecho el criterio más importante para la selección del material reflejante del disco parabólico.
- El diámetro de apertura del disco será de 2 m.



Ubicación geográfica: 19.19 N, 99.11 O
 Altura: 2321 [m]
 Radiación solar promedio: 254 [W/m²]
 Radiación solar máxima promedio: 800 [W/m²]
 Velocidad del viento promedio: 3 [m/s]
 Velocidad del viento máxima promedio: 60 [km/h]

Ilustración 72. Condiciones del sitio de la instalación en la Planta solar del Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México.

4.2 Diseño óptico

En este apartado se realizará un análisis óptico-geométrico de la superficie del concentrador solar para obtener la mejor geometría a utilizar en el diseño, que permita aprovechar al máximo la radiación solar presente. Esto se realizará en base a un método de trazado de rayos solares. Al igual también se seleccionará el material reflejante para la superficie del receptor.

4.2.1 Parámetros de la parábola

La parábola se define como los puntos geométricos equidistantes entre una línea recta llamada directriz y un punto fijo llamado foco.

La característica que hace muy útil la geometría parabólica para la concentración solar es que, en cualquier punto de la parábola, la tangente de esta refleja hacia el foco todos los rayos solares paralelos al eje de la parábola que inciden en la superficie. Es así como se produce la concentración solar.

Cabe señalar que para los concentradores parabólicos solo les es útil la radiación solar directa y no la difusa.

La ilustración 73 muestra la definición de la parábola y la ilustración 73 muestra el efecto de la concentración.

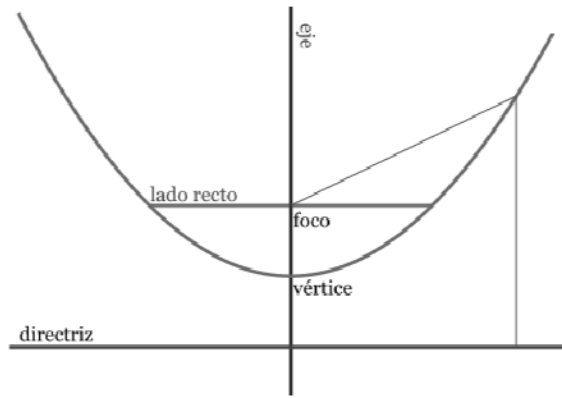


Ilustración 73. Definición de parábola (Juan Hermosillo, 1995).

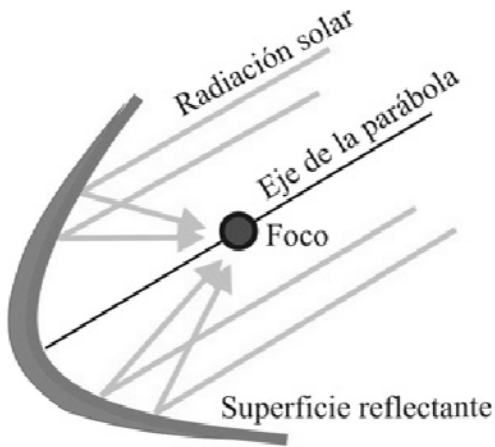


Ilustración 74. Efecto de concentración (Juan Hermosillo, 1995).

Matemáticamente la parábola se puede definir de diferentes formas, dentro de ellas se encuentra una de acuerdo a nuestras necesidades, ya define la parábola mediante la distancia focal f y es dependiente del ángulo de apertura, que son precisamente los parámetros que se van a variar para obtener la geometría óptima. La ilustración 75 muestra el proceso para definir una parábola.

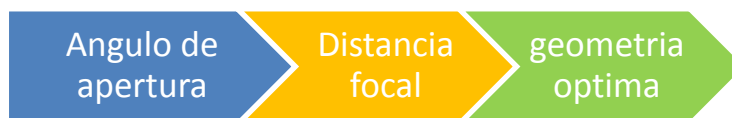


Ilustración 75. Proceso para definir la parábola.

Ecuación 11. Ecuación de la parábola.

$$y = \frac{x^2}{4*f} \dots\dots\dots(11)$$

Donde **y**: Ecuación de la parábola

x: Abscisa de la parábola

f: Distancia focal

Ecuación 12. Distancia focal.

$$f = \frac{D}{4*\tan(\frac{\varphi}{2})} \dots\dots\dots(12)$$

Donde **D**: Diámetro de apertura

φ: Ángulo de apertura

f: Distancia focal

Con estas ecuaciones ahora se pueden generar una variedad de parábolas para poder hacer la elección con base a la más conveniente, de acuerdo con la máxima ganancia de radiación solar, este último análisis se realizó mediante un análisis de trazado de rayos solares.

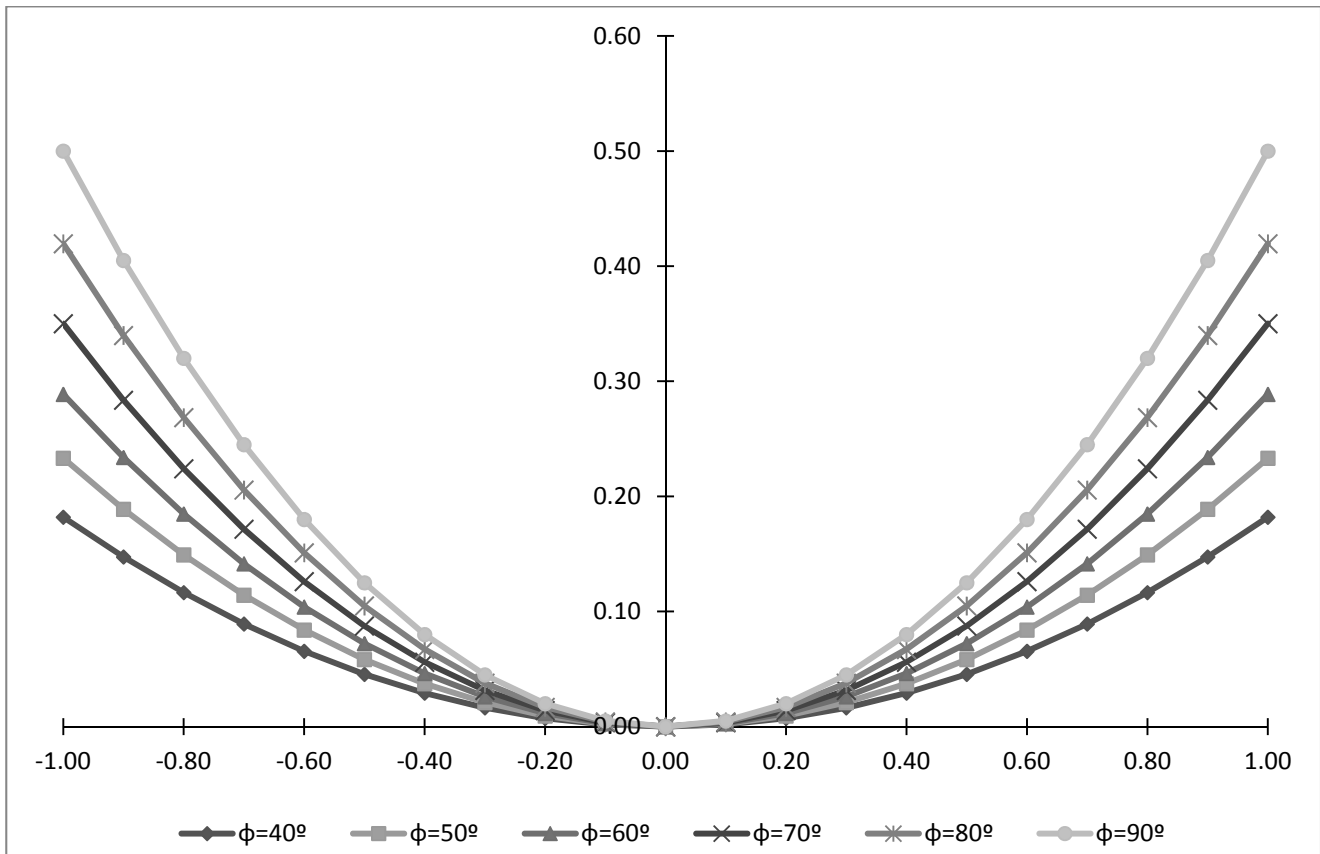


Ilustración 76. Diferentes geometrías para un diámetro de apertura de 2 m.

En la Ilustración 76 se las observan las diferentes formas que la parábola puede presentar con diferentes ángulos de apertura, que van desde los 40 y hasta 90 grados, estas diferentes formas se analizaron con el software SolTrace para elegir la de mayor concentración de energía en el foco.

4.2.2 Análisis geométrico de la parábola del concentrador

El punto de partida para la elección del ángulo de apertura es el área de apertura teniendo un concentrador con diámetro de 2m. Se determinan las distancias focales las constantes c_x y c_y , teniendo estos valores iguales para la geometría escogida, estos datos se utilizarán más adelante en el Software.

Requerimientos

Área de apertura $A_{app} = 3.14 \pm 0.2 \text{ m}^2$

Angulo Apertura $\phi = 45 \pm 10^\circ$

Elección De Parábola

Diámetro de apertura $D = 2 \text{ m}$

En la tabla 7 se observan las constantes del SolTRACE para diferentes ángulos de apertura.

ang. Apertura ϕ		distancia focal f (mm)	m	cx=cy=1/(2*f)
grados	radianes			
40	0.698	1373.739	1.374	0.364
45	0.785	1207.107	1.207	0.414
50	0.873	1072.253	1.072	0.466
55	0.960	960.491	0.960	0.521
60	1.047	866.025	0.866	0.577
65	1.134	784.843	0.785	0.637
70	1.222	714.074	0.714	0.700
75	1.309	651.613	0.652	0.767
80	1.396	595.877	0.596	0.839
85	1.484	545.654	0.546	0.916
90	1.571	500.000	0.500	1.000

Tabla 7. Constantes de SolTrace para diferentes ángulos de apertura.

cx y cy son constantes que se usan en el software y determinan ϕ en el trazado de rayos solares. La ilustración 77 muestra las geometrías correspondientes a diferentes ángulos der apertura con su foco.

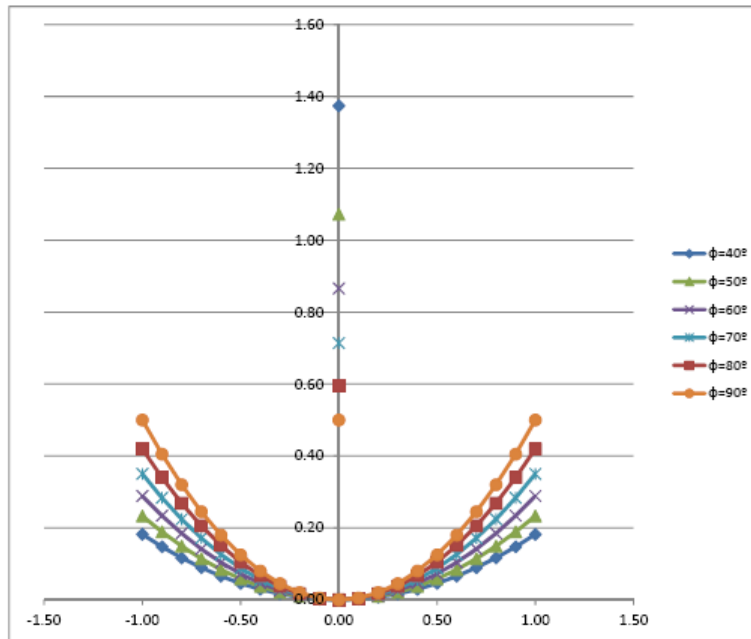


Ilustración 77. Geometrías correspondientes a diferentes ángulos de apertura con su foco.

4.2.3 Método de trazado de rayos solares

El análisis para obtener la geometría de la parábola que mejor relación de concentración solar tenga, se hizo mediante el software SolTrace, desarrollado en el National Renewable Energy Laboratory en Estados Unidos, y utiliza el método de trazado de rayos, con el cual se calcula de acuerdo con la geometría de la parábola, como se reflejan los rayos y su eficiencia. Este método mide el flujo de energía que se concentra en un punto; en este caso se usó un receptor tipo disco parabólico y se concentró en un foco de forma rectangular. Mediante análisis geométrico calcula la trayectoria de cada uno de los rayos dirigidos al concentrador.

El análisis óptico del SolTrace analiza un sistema, que está dividido en etapas y estas a su vez en elementos. Basado en lo anterior se va a definir un sistema coordenado global, donde se localizan las etapas; y un sistema coordenado particular donde están definidos los elementos, que forman las etapas.

La geometría del sistema completo puede estar compuesta por una o más etapas. Cada uno de los elementos se conforma de:

- Superficie
- Interacción óptica
- Forma de apertura
- Propiedades ópticas

Las etapas pueden ser de dos tipos:

- Ópticas
Los rayos interactúan de manera real
- Virtuales
Tiene como objetivo el determinar la dirección y la posición de los rayos a diferentes posiciones a lo largo del eje óptico, sin afectar la trayectoria seguida por los rayos. En este caso, los elementos definidos como etapa virtual no presentan propiedades ópticas, debido a que no hay interacción de rayos.

Para lograr un adecuado acoplamiento de las etapas con sus respectivos elementos, SolTRACE utiliza tres sistemas coordenados del tipo de mano derecha:

1. el sistema coordenado global
2. el sistema coordenado de la etapa
3. el sistema coordenado del elemento

En la ilustración 78 se muestran las diferentes etapas en el SOLTRACE.

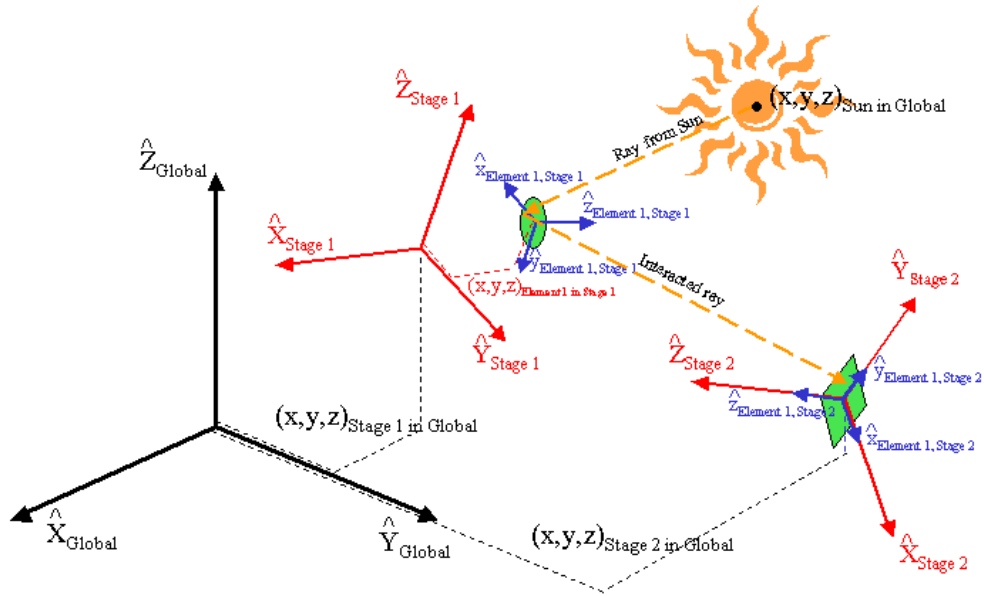


Ilustración 78. Definición de las etapas en SolTrace. (Soltrace Documentation, 2008).

El análisis del SolTrace sigue una serie de pasos que consisten en:

1. Definir el Sol

Se tiene que definir al Sol, es decir la fuente de los rayos analizar, y se define mediante dos propiedades:

- Distribución del perfil solar
- Posición del Sol

Existen tres formas para definir la distribución solar, la gaussiana, la de caja plana y mediante definir la intensidad solar. Para la mayoría de los casos, la distribución gaussiana es la más usada.

Para la posición de Sol se tiene que definir un sistema de coordenadas, o definir el tiempo y la latitud de un lugar específico.

2. Definición de la geometría óptica.

Para esto se tienen dos opciones. La primera es cargar una geometría predeterminada y la segunda es definir por vez primera dicha geometría.

Si se elige definir la geometría desde un principio, se define el número de etapas que componen al sistema. Cada etapa debe presentar sus propios parámetros, todos ellos con respecto al sistema coordinado global. Seguido de esto se lista el número de elementos en cuestión, es decir el disco parabólico y el receptor, con su respectiva geometría.

3. Trazado de rayos

Se deberá ingresar el número de rayos que serán trazados y el valor de la insolación normal directa.

4. Resultados

El programa entrega el flujo solar a través del receptor y lo hace en forma grafica mediante:

- trazado de la intersección de los rayos
- trazado de la superficie del flujo de radiación en 3-D
- trazado del contorno de la distribución del de radiación en 2-D.

4.2.3.1 Definición de la geometría

En este caso se definieron las dos geometrías para el segundo prototipo es decir, 70 grados de apertura y diámetro de 2 m, así como el área de concentración de 9 x 9 cm. Utilizando 900 W/m^2 y un numero de rayos de 100 000, se tuvieron los siguientes resultados. En la ilustración 79 se observan los pasos iniciales del SolTRACE

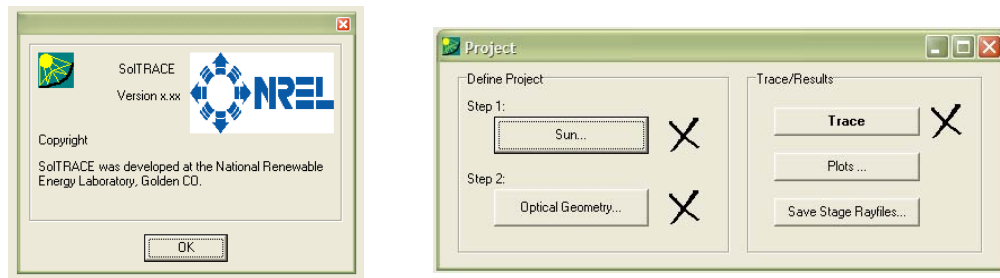


Ilustración 79. Software SolTRACE y sus pasos.

Como primer paso se tiene que definir la fuente de energía que en este caso es el Sol y suponiendo que se encuentra en posición cenit. En la ilustración 80 se observa la definición del Sol.

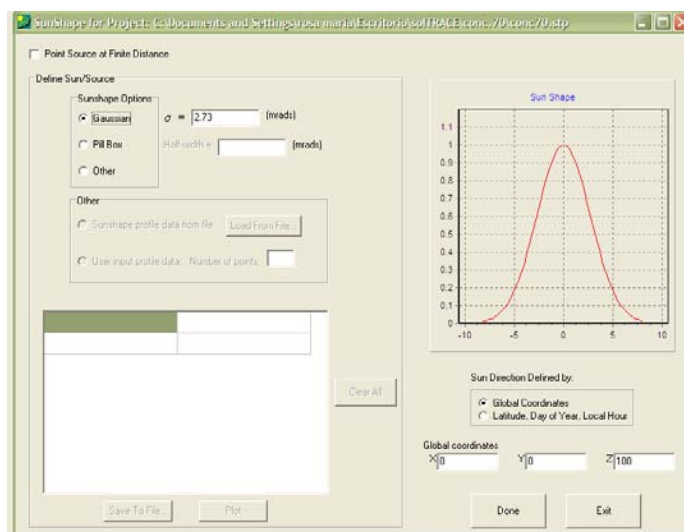


Ilustración 80. Definición del Sol.

Como segundo paso se define la geometría, en este caso vamos a trabajarlo como una sola etapa de dirección de rayos solares, por lo tanto en esta etapa tenemos las dos geometrías al mismo tiempo, el paraboloide y el receptor plano.

En los dos casos se tienen que dar parámetros de geometría y propiedades de reflectividad, usando en Reflec Tech tenemos una reflectividad de 0.95. En la ilustración 81 se observa la definición de las geometrías, y en la ilustración 82 la distancia focal.

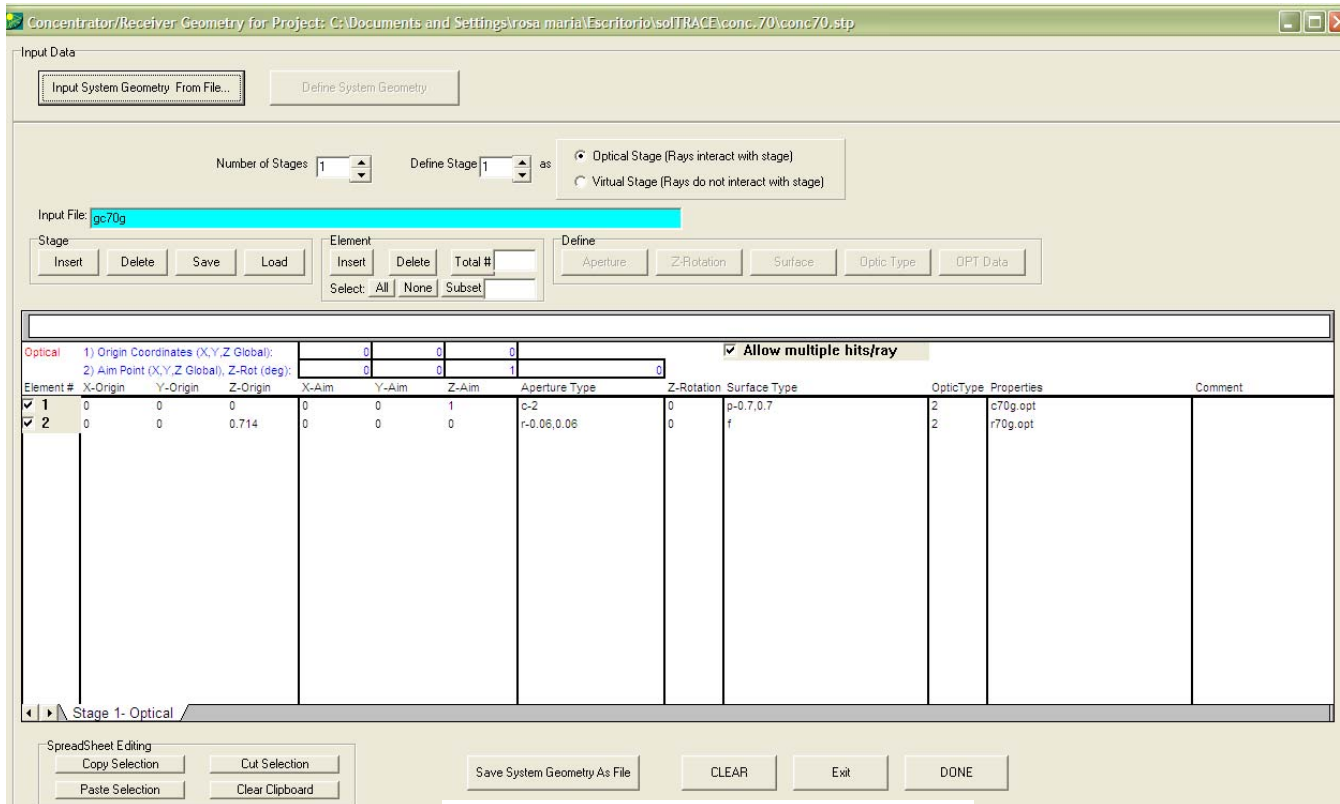


Ilustración 81. Definición de geometrías.

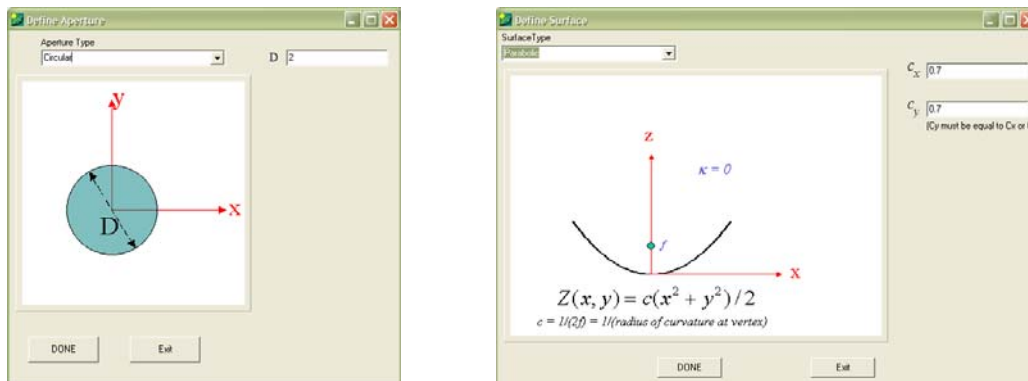


Ilustración 82. Distancia focal

También se define la distancia a la cual se encuentra una geometría de la otra, es decir la distancia focal, que mas adelante la estaremos variando para observar el comportamiento.

También se definen las coordenadas a la cual se encuentran las dos geometrías, como base se tiene primero en las coordenadas (0, 0, 0) al disco paraboloide y muy importante también se define la dirección, y como en la etapa anterior se definió a la fuente en el zenit, entonces el disco paraboloide estará direccionado hacia el eje z. En la ilustración 83 se muestra la forma y el tamaño del receptor. En la ilustración 84 se muestran los pasos en la selección de materiales y selección de la radiación.

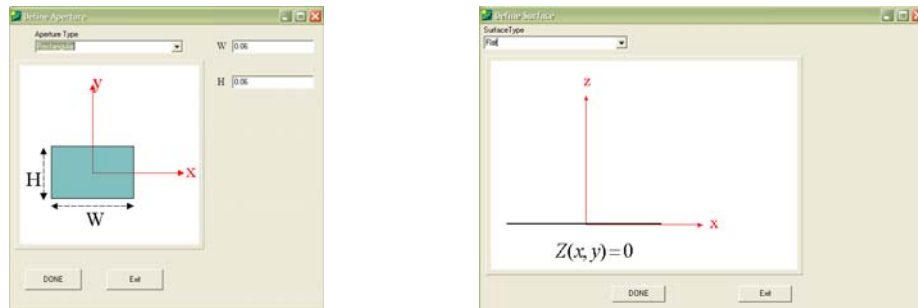


Ilustración 83. Tamaño y forma del receptor.

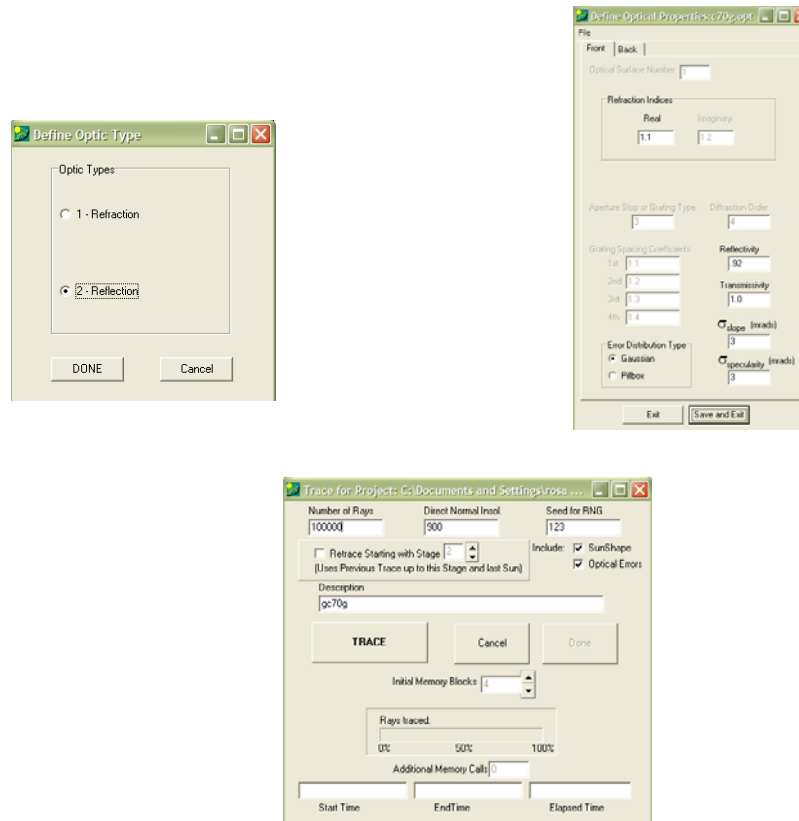


Ilustración 84. Selección de materiales y definición de radiación.

Finalmente, en la ilustración 85 se observa la energía en el receptor.

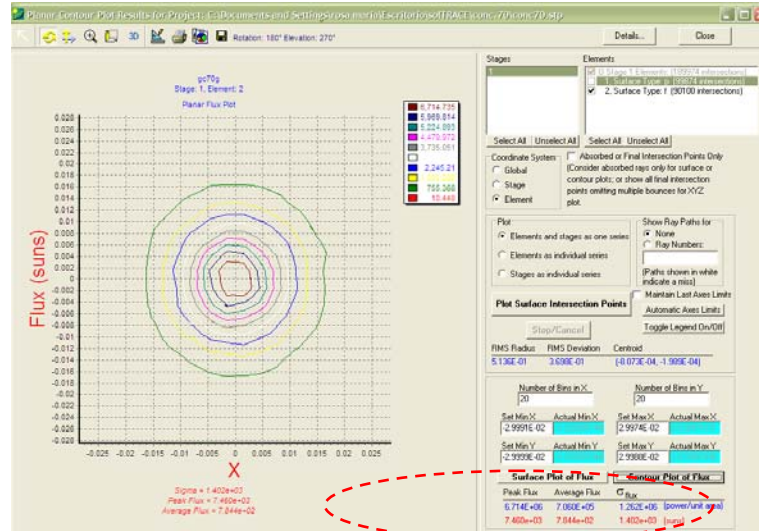


Ilustración 85. Energía en el receptor.

4.2.3.2 Estimación de la densidad del flujo de energía

Se realizó el análisis de trazado de rayos en el software anterior mencionado, de donde vemos en la Ilustración 86 y la Ilustración 87, que los rayos incidentes en el paraboloide se direccionan al receptor y se observa la concentración de los rayos; de esta última se estima el flujo de energía, y que depende entre otras cosas de la distancia focal.

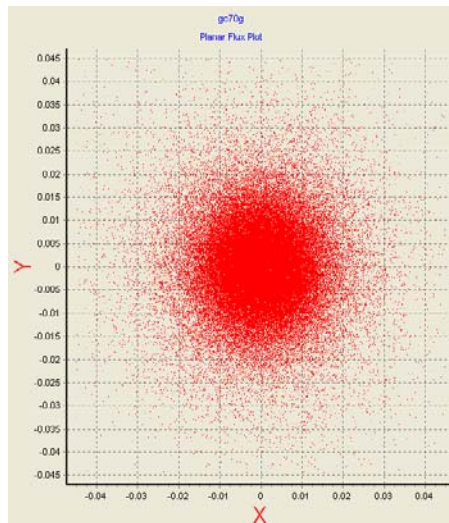


Ilustración 86. Concentración de rayos solares en el receptor.

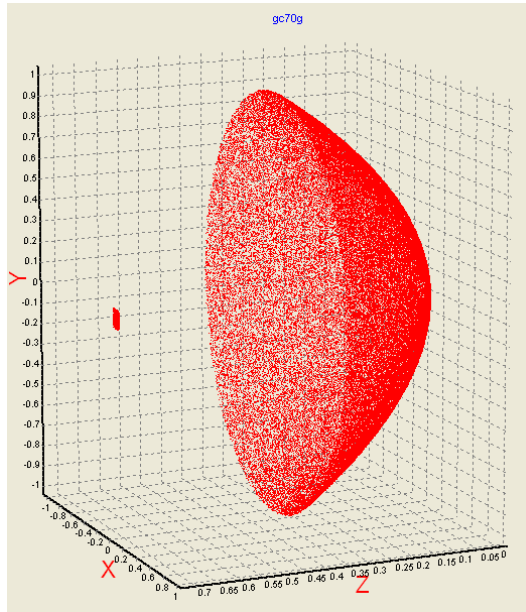


Ilustración 87. Reflexión de rayos solares en el paraboloide.

Si variamos la distancia focal en +/- 2 cm se tiene lo siguiente, ver ilustración 88.

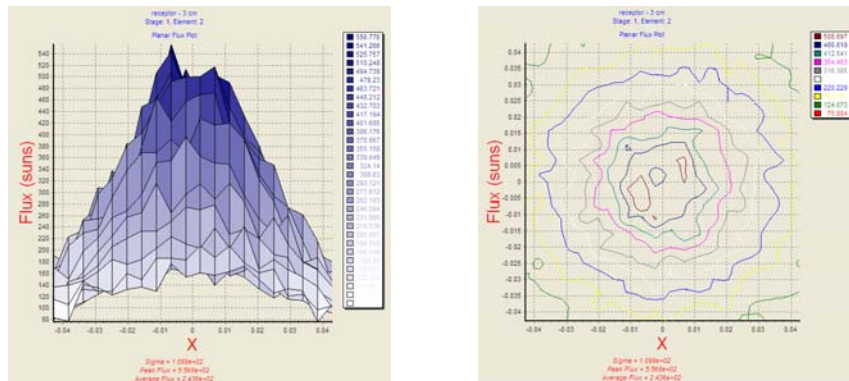


Ilustración 88. Distancia focal de 68.4 cm (-3 cm).

A una distancia de -3 cm por debajo del foco tenemos una concentración de rayos solares un tanto dispersa, observamos el valor del flujo de energía contra la ubicación en el foco, teniendo este foco con geometría cuadrada y plana, en los extremos tenemos menos concentración que en el centro. En la ilustración 89 se observa una distancia focal de 69.4 cm.

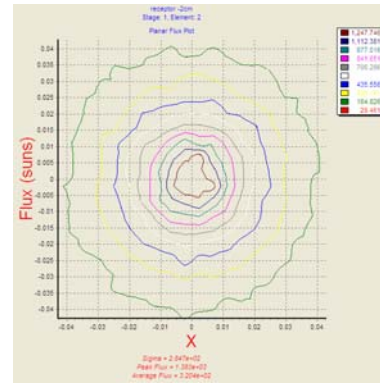
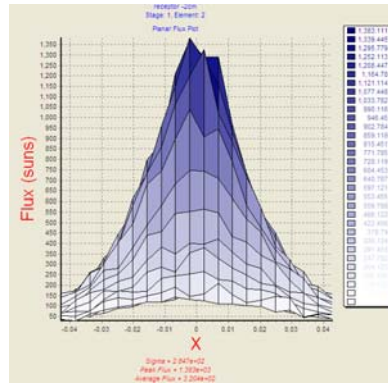


Ilustración 89. Distancia focal de 69.4 cm (-2 cm).

A una distancia de -2 cm por debajo del foco podemos observar que la concentración de rayos solares se comporta de manera más ordenada y tiende a concentrarse más al centro la energía calorífica. Conforme nos acercamos mas al la distancia focal podemos observar que la concentración se vuelve más puntual sobre el receptor, como se observa en las ilustraciones 90 y 91.

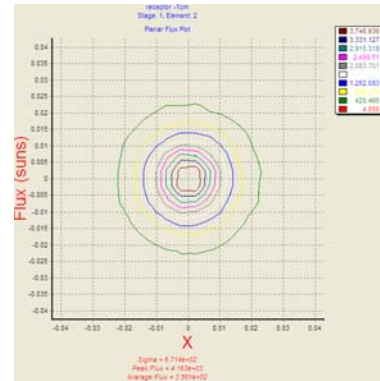
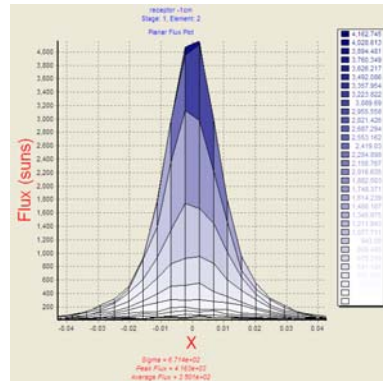


Ilustración 90. Distancia focal de 70.4 cm (-1 cm).

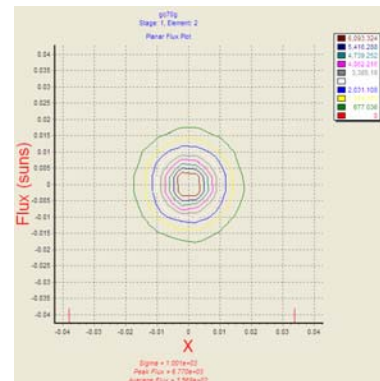
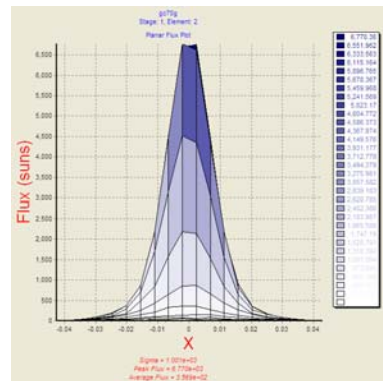


Ilustración 91. Distancia focal de 71.4 cm (mayor concentración).

Si colocamos el receptor exactamente a la distancia focal de acuerdo a la geometría seleccionada se observa una concentración de rayos solares totalmente puntual y se alcanza la mayor concentración de flujo energético. Distancia óptima para poder captar la mayoría de rayos solares reflejados.

Por el contrario, si movemos el receptor por arriba de la distancia focal podemos observar el mismo efecto, como se ve a continuación en +1, +2 y +3 cm por arriba del foco, ver ilustraciones 92, 93 y 94.

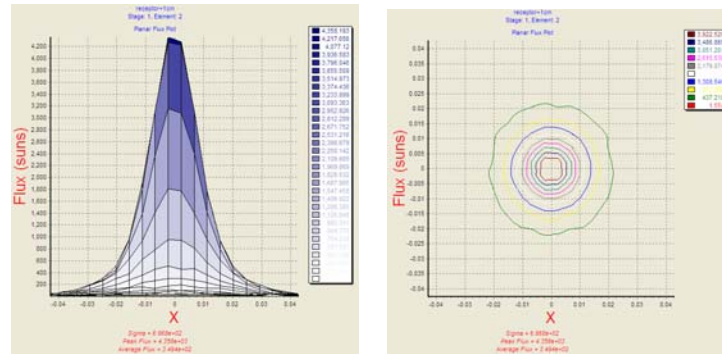


Ilustración 92. Distancia focal de 72.4 cm (+1 cm).

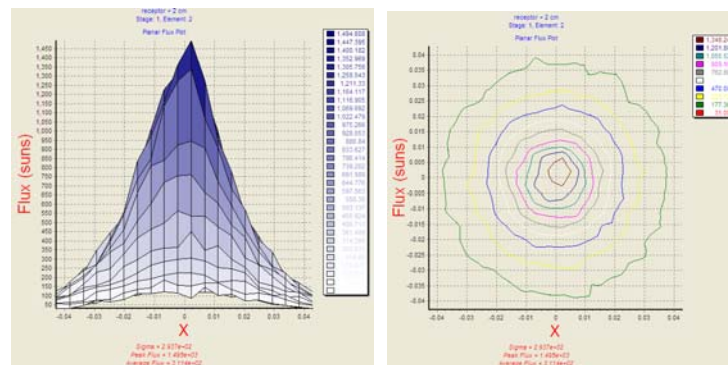


Ilustración 93. Distancia focal de 73.4 cm (+2 cm).

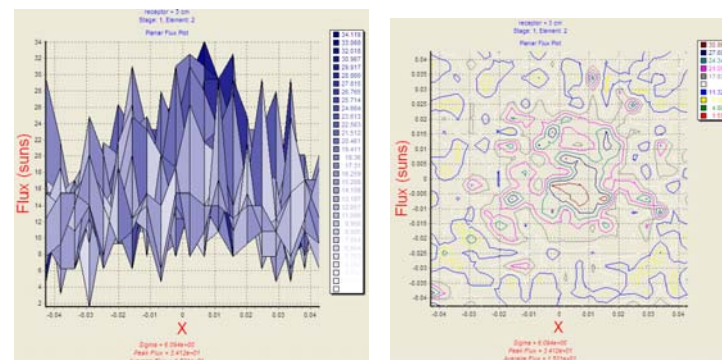


Ilustración 94. Distancia focal de 73.4 cm (+3 cm).

Graficando estos resultados, tenemos que la mayor concentración de energía la tenemos en el punto focal, es decir a 0.174 m, ver Tabla 8.

Tabla 8 Flujo de energía variando la distancia focal

Angulo de apertura 70° variación de la distancia focal cada 1 cm		
foco (cm)	flujo pico	flujo prom
	(kW/m ²)	
10.684	501100	219200
10.694	1245000	288400
10.704	3746000	315100
10.714	6093000	321200
10.724	3922000	314400
10.734	1345000	280200
10.744	30710	13780

También observamos en la ilustración 95 y 96 que si movemos nuestro receptor, ya sea hacia arriba o hacia abajo del foco del paraboloide, tenemos una disminución en el flujo de energía así como también aumenta el área de concentración de rayos solares; mas sin en cambio se observa también que el decremento no es proporcional en las direcciones, existe mayor flujo de energía si nos movemos hacia arriba del foco que en la dirección opuesta pero a la misma distancia.

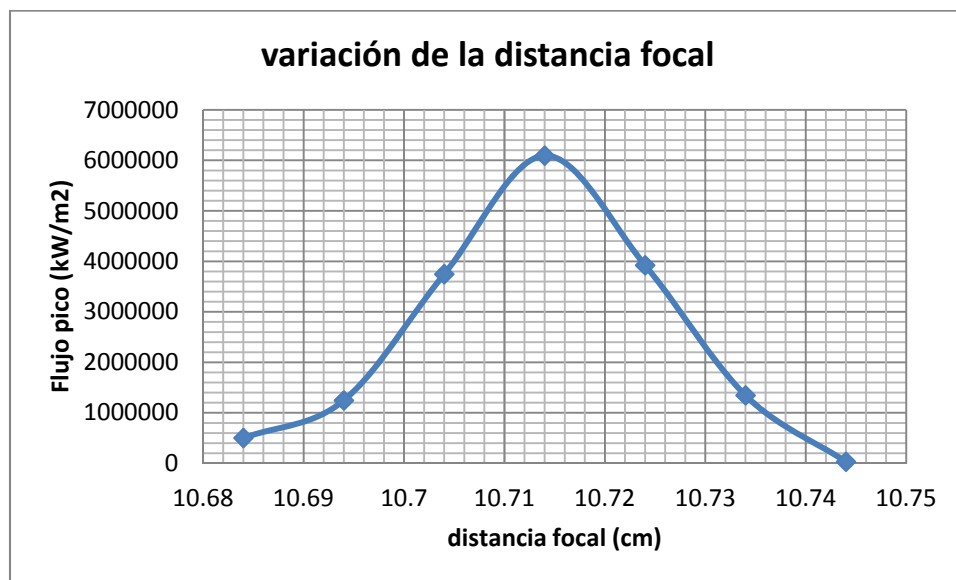


Ilustración 95. Flujo pico vs distancia focal.

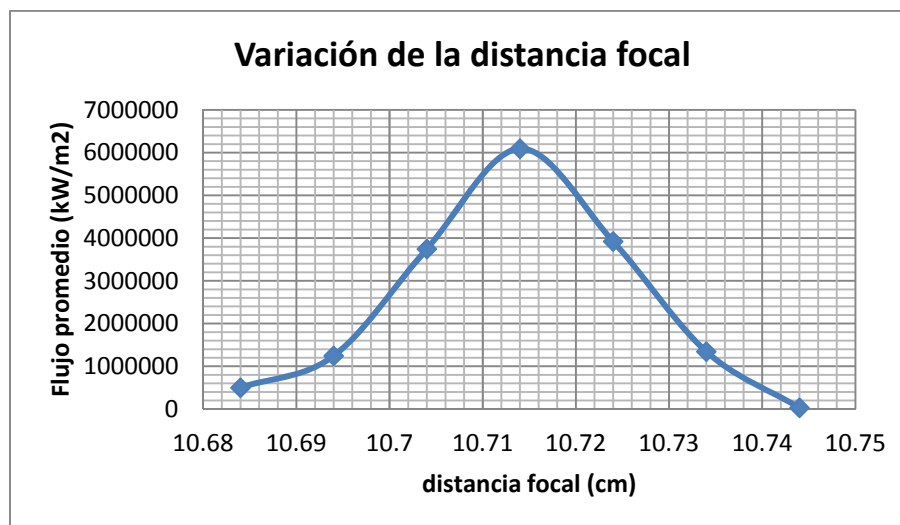


Ilustración 96. Flujo promedio vs distancia focal.

En resumen, ya definido el Sol y la geometría del disco parabólico con su ángulo apertura, se obtiene el flujo promedio que atraviesa el receptor después de que los rayos llegan y se reflejan en el concentrador. Y de acuerdo con del SolTrace estos valores son:

Flujo máximo: 6 MW/m²

Flujo promedio: 0.3 MW/m²

Cabe aclarar que este un valor teórico, y que depende del área efectiva del receptor, en la concentración de los rayos solares se uso el valor de 900 W/m² pero solo para decidir la geometría de la parábola.

4.3 Superficie reflejante

Una base indispensable en el diseño y construcción de concentradores solares ya sea de disco parabólico, cilindro parabólico e incluso en heliostatos es la reflectividad de la superficie, dependiendo de este factor podemos lograr mayores concentraciones de calor lo cual se traduce en mayor posibilidad de obtener energía. No es un factor determinante pero si es de gran importancia y por lo cual se hizo una especial selección dependiendo del índice de reflectividad, la resistencia al ambiente, el costo y el método para la adherencia al sustrato elegido.

4.3.1 Posibles materiales

A continuación se describen una serie de materiales encontrados en el mercado para ser utilizados como materiales reflejantes para el concentrador.

4.3.1.1 *Metacrilato o acrílico espejo*

Acrílico transparente de 1.5 mm de espesor con una superficie espejo, lograda por vaporización de aluminio. Ver Ilustración 97. Este material tiene excelente acabado espejo pero su película de aluminio es frágil y tiende a desprenderse con facilidad, además de que el acrílico no es tan flexible por su alto grosor que es el más pequeño que pueda haber en el mercado.



Ilustración 97. Acrílico acabado espejo.

4.3.1.2 *Poliéster metalizado con aluminio (manta de supervivencia)*

La presentación que se encontró de este poliéster es en forma de una manta de supervivencia. Esta manta cuenta con la capacidad de refractar los rayos solares en caso de exposición a altas temperaturas o de forma inversa para refractar el calor del cuerpo humano de regreso al mismo en casa de exposiciones a bajas temperaturas. Ver Ilustración 98. La ventaja de este material es que es resistente al medio ambiente y muy ligero, pero no cuenta con un adhesivo propio ya que para su principal aplicación no lo necesita, por lo tanto se tendría que agregar un adhesivo extra para su aplicación al sustrato a emplear y esto provocaría imperfecciones en el pegado final.



Ilustración 98. Poliéster metalizado.

4.3.1.3 *Poliéster plata espejo con adhesivo (Mylar)*

Esta presentación de poliéster metalizado presenta buena reflectancia a simple vista y cuenta con su propio adhesivo, sin embargo, presenta muchas imperfecciones al ser pegado al sustrato además de que se raya con facilidad y no resiste altas temperaturas. Ver Ilustración 99.

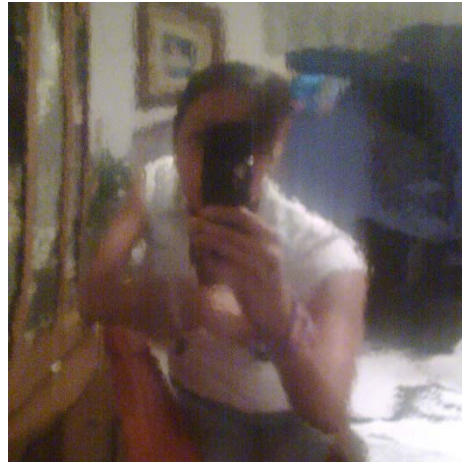


Ilustración 99. Papel Mylar.

4.3.1.4 *Lámina de acero inoxidable acabado espejo*

A pesar de ser acero inoxidable a largo plazo pierde su reflectividad por estar expuesto al medio ambiente, pero a simple vista presenta buena índice de reflectividad. Otro inconveniente de esta lamina es que por más delgada que sea, el acero presenta una densidad alta lo cual lo hace ser el material más pesado en comparación de los otros. La ilustración 100 muestra la lamina de acero inoxidable.

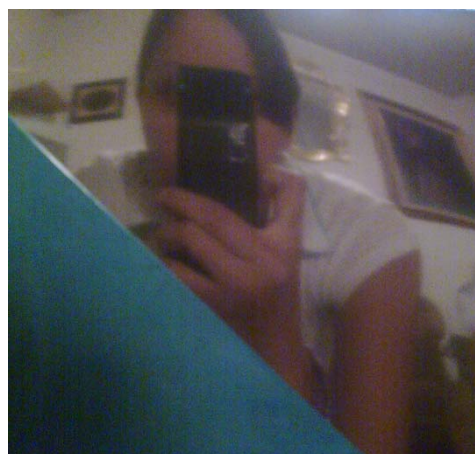


Ilustración 100. Lamina de acero inoxidable.

4.3.1.5 Película polarizada plata reflejante

Esta es una película de control solar para cristales hecha de polietileno que se usa en los edificios para disminuir la ganancia de carga térmica dentro de este, a simple vista presenta buena reflectividad pero también por ser para vidrios presenta un alto grado de transmitancia, lo cual para nuestro fin no es aplicable.

4.3.1.6 ReflecTech

ReflecTech es una película conformada de varias capas de polímero protegiendo una capa de plata puro que proporciona una alta reflectividad, es muy resistente al medio ambiente y con protección de la radiación UV, también es muy flexible por su espesor ultra delgado. Los demás valores técnicos de importancia se encuentran en el anexo respectivo. Los valores básicos se muestran en la Tabla 9. Una imagen de la película ReflecTech puede observarse en la ilustración 101. En la ilustración 102 se observa el ReflecTech antes de ser utilizado.

Tabla 9. Propiedades de los diferentes materiales reflejantes.

Propiedades	
Reflectancia especular	94%
Reflectancia hemisférica	94%
Espesor	0.1mm
Temperatura máxima de operación	60°C



Ilustración 101. ReflecTech.

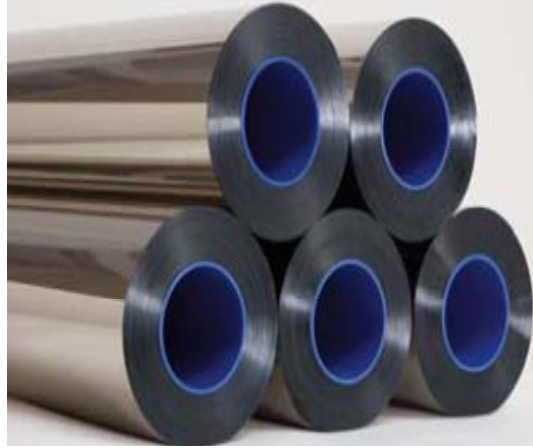


Ilustración 102. Rollo de ReflecTech.

4.3.2 Selección

Para poder hacer una selección adecuada del material reflejante de la superficie del paraboloide es importante considerar muchos factores, básicamente aquí se toman en cuenta solamente la reflectividad, el costo y el peso de cada material posible; este último con mucho menos importancia ya que la película reflectora no es la que define el peso total, sino el sustrato en donde se va a colocar, sin embargo se hace la comparación ya que en el caso de la lámina de acero inoxidable esta funcionaría como base y como superficie reflectora por la gran densidad de este material lo que permite ser un elemento estructural, también.

Para valorar el más importante de los factores se tiene un reflectómetro para medir las correspondientes reflectancias de los materiales, el material es montado o pegado sobre un sustrato de aluminio para facilitar su medición. Una comparación entre el poliéster con y sin adhesivo puede verse en la ilustración 103.



Ilustración 103. Poliéster sin adhesivo y Poliéster con adhesivo.

La ilustración 104 muestra la película de polietileno y la lamina de acer4o inoxidable.

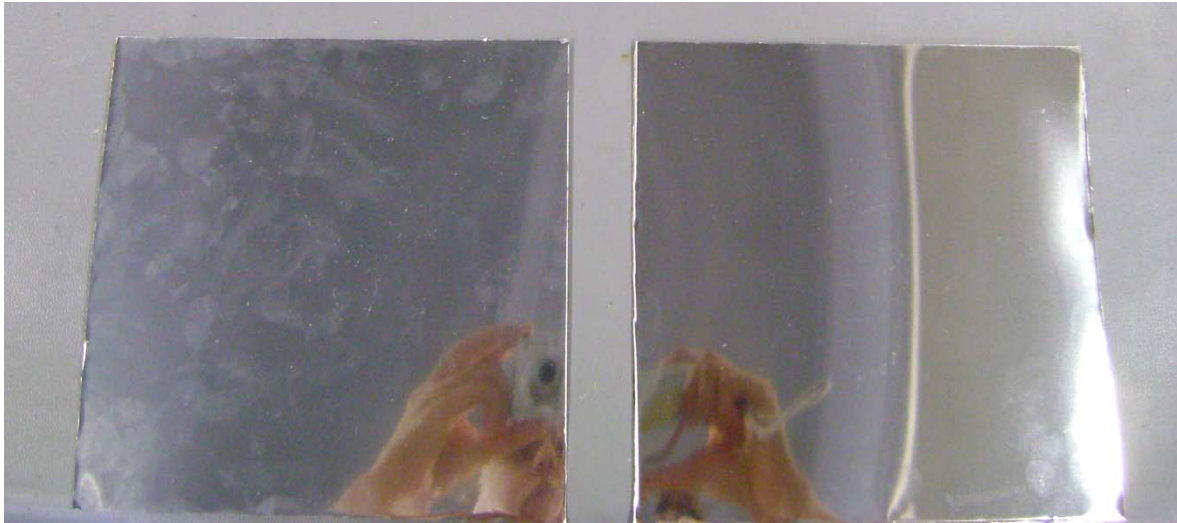


Ilustración 104. Película de polietileno y Lámina de acero inoxidable.

Para hacer las mediciones se utilizó un reflectómetro de espectro solar SSR (Solar Spectrum Reflectometer). Este reflectómetro es un instrumento modular. El módulo electrónico tiene un display digital que indica la reflectancia o la transmitancia. Estas dos propiedades son recíprocas. Tanto para la reflectancia como para la transmitancia la superficie muestra es iluminada y la energía reflejada o transmitida es registrada al ángulo de incidencia colocado por el reflectómetro. La ilustración 105 muestra un esquema de la medición de la reflectancia y transmitancia

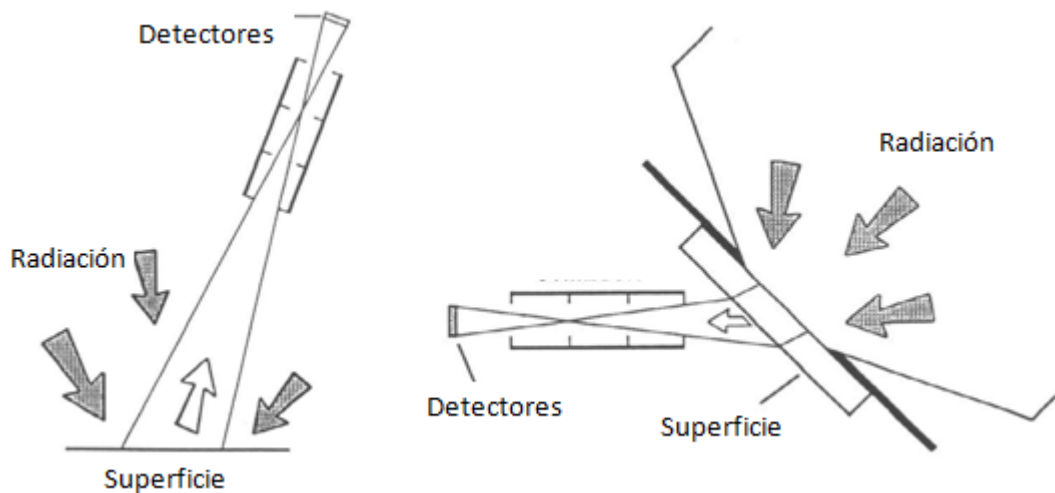


Ilustración 105. Medición de reflectancia y transmitancia (Pérez, 2005).

La medición de la energía solar reflejada o transmitida es medida por cuatro detectores de diferentes longitudes de onda. La suma de la radiación captada por los cuatro receptores forma el total de la energía transmitida o reflejada. La ilustración 106 muestra un reflectómetro de espectro solar.

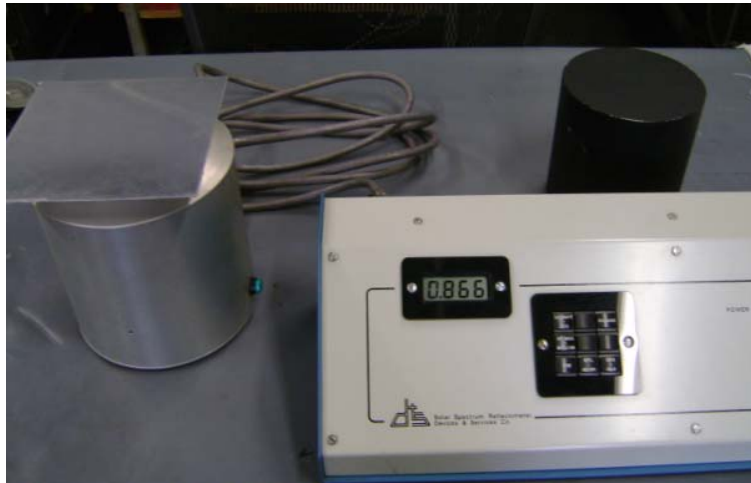


Ilustración 106. Reflectómetro de espectro solar en el Instituto de Ingeniería UNAM.

El reflectómetro se calibró en base un cuerpo negro y a un valor de AM=1 (masa de aire). La masa de aire es la longitud del camino que la luz sigue a través de la atmosfera, normalizada a la longitud del camino más corto posible, es decir, cuando el Sol está directamente en el cenit. La masa de aire cuantifica la reducción en potencia de la luz cuando pasa a través de la atmosfera y es absorbida y dispersada por el aire y el polvo.

Esta masa se define como:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta}$$

Ecuación 13. Masa de aire.

Donde θ es el ángulo dese la vertical cuando el Sol está directamente en el cenit la masa de aire es 1. La masa de aire se representa en la ilustración 107.

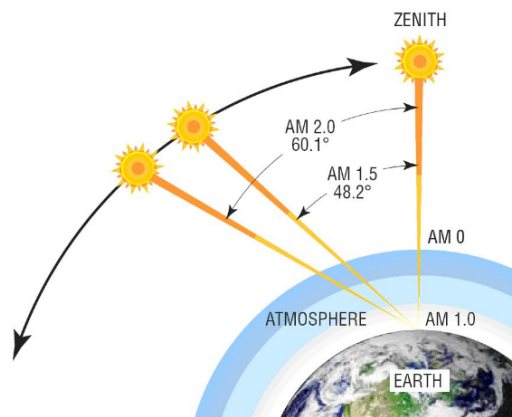


Ilustración 107 .Factor masa de aire (University of Nevada Reno).

Con el reflectómetro se encontraron una serie de diez valores para cada material, a los cuales se les obtuvo la media y la desviación estándar, encontrando una mayor reflectancia en el ReflecTech como era de esperarse, ya que es el material más indicado para esta aplicación. Las pruebas de reflectancia se pueden observar en la tabla 10.

Tabla 10. Pruebas de reflectancia.

Reflectividad					
Bolsa de supervivencia poliéster	Película adherente plata Mylar	Acero inoxidable acabado espejo	Polarizado espejo plata	ReflecTech	
A	B	C	D	E	
0.867	0.867	0.624	0.630	0.927	
0.867	0.869	0.624	0.630	0.927	
0.866	0.867	0.623	0.631	0.928	
0.866	0.871	0.625	0.632	0.925	
0.865	0.871	0.626	0.630	0.927	
0.866	0.871	0.625	0.632	0.927	
0.866	0.871	0.625	0.634	0.927	
0.865	0.871	0.625	0.633	0.927	
0.868	0.871	0.626	0.632	0.928	
0.865	0.872	0.625	0.632	0.926	
σ	0.0010	0.0018	0.0009	0.0013	0.0009
media	0.866	0.870	0.625	0.632	0.927

Pero no solo se tomaron en cuenta estos valores, también se hizo una comparación entre el costo y pesos de los materiales. Comparando los resultados se obtiene que el poliéster de la bolsa de supervivencia es la opción con menor peso y menor costo, pero como ya se menciona con anterioridad el peso no es un parámetro definitivo para este poliéster, por lo tanto queda desechada esta opción debido a las complejidades que presentaría al ser adherida al sustrato sin un adhesivo propio.

El material con mayor peso es obviamente el acero inoxidable, material que había sido contemplado como opción antes de realizar las pruebas de reflectancia, los resultados demostraron no ser buen material reflejante, por lo tanto queda desechado de las posibilidades por el mayor peso obtenido y sin ninguna compensación en un valor óptimo para la reflectancia.

De igual forma la lámina de acrílico es difícil de moldear para obtener una superficie lo más próxima a nuestra selección de geometría ya hecha. Con buena reflectancia debido a que este material es lo más parecido a un espejo (no comprobable ya que no se pudo obtener una pequeña muestra para hacer la prueba de reflectancia), pero sin buena flexibilidad no es opción para nuestro concentrador.

Respecto al polarizado espejo plata no se obtuvo una buena reflectancia como se esperaba por lo tanto tenemos como opción la película adherente Mylar y el material especial ReflecTech. La tabla 11 muestra un resumen de las propiedades de todos los materiales en estudio.

Tabla 11. Resumen de las propiedades de los materiales.

	Acrílico espejo	Bolsa de supervivencia poliéster	Película adherente plata Mylar	Acero inoxidable acabado espejo	Polarizado espejo plata	ReflecTech
\$/m²	437.15	37.04	29.71	205.49	100.00	807.29
kg/m²	1.79	0.01	0.42	2.46	0.14	0.00
\$/pza.	1259	80	10	187	150	10000
Medida/pza. (m)	1.2 x 2.4	1.2 x 1.8	0.51 x 0.66	0.91 x 1	1.5 x 1	48"*400"
Peso/pza. (kg)	5.14	0.03	0.14	2.243	0.207	
Densidad (kg/m³)	1190	1400	1400	8039.43	920	
m²	2.88	2.16	0.3366	0.91	1.5	12.4
Espesor (mm)	1.5	0.01	0.3	0.31	0.15	0.1
Reflectividad	0.90	0.866	0.870	0.625	0.632	0.927
Reflectividad/peso	0.504	61.864	2.072	0.253	4.577	
Reflectividad/costo	0.002	0.023	0.029	0.003	0.006	0.001

El criterio principal de selección hasta ahora ha sido el índice de reflectancia, a continuación se observa una comparación entre estas dos últimas alternativas contemplando una relación reflectancia – costo, siendo el Mylar la mejor opción a simple vista, sin embargo Mylar no cubre las necesidades específicas, como lo es la resistencia al medio ambiente, resistencia a altas temperaturas y con el tiempo o daño del material bajará la reflectividad por lo tanto optamos por el uso de la película de uso especial para concentración solar. El valor del 92% de reflectividad nos ayudará en gran medida a cumplir con el objetivo de alcanzar la mayor temperatura para este tipo de concentradores, ya que los demás parámetros ya están definidos.

Más detalles acerca del material Reflectech se encuentran en el Anexo 1. La tabla 12 muestra el material elegido contra la película de plata Mylar en relación a la reflectividad/Costo.

Tabla 12. Relación reflectividad y costo.

	Película adherente plata Mylar	ReflecTech
Reflectividad / costo	0.029	0.001

4.3.3 Aplicación de la superficie reflejante

ReflecTech necesita de un laminado para poder ser adherido al sustrato de aluminio, esta película es muy delicada al momento de la adhesión, por lo tanto se diseñó y construyó una laminadora especial y sencilla debido a que las laminadoras destinadas a esta aplicación son para uso comercial y con un elevado costo. La ilustración 108, muestra el modo de aplicación de la película.

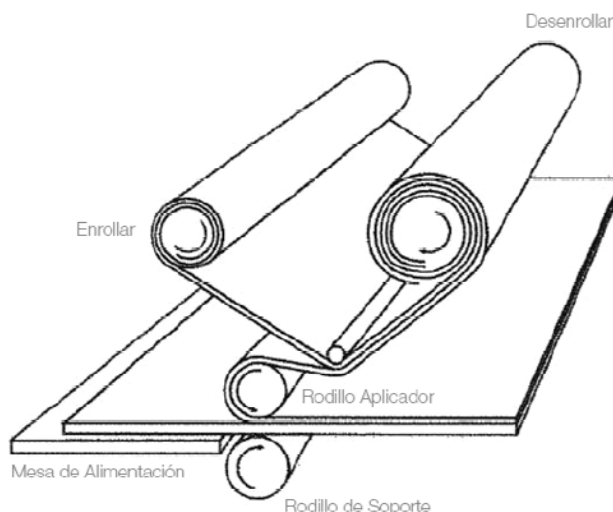


Ilustración 108. Aplicación del reflectech mirror film.

Esto es lo que se propone en la guía de ReflecTech, la implementación real es una opción más sencilla sin dejar de lado el hecho de que la película necesita de presión para no permitir introducción de burbujas y esto pueda afectar a la superficie.

4.3.4 Método de construcción de la laminadora

Para la construcción de esta laminadora se necesitaron principalmente dos rodillos de poliuretano, dichos rodillos permiten ejercer la presión necesaria para el laminado ya que el poliuretano es flexible.

También se requirió de dos catarinas como sustituto de los engranes, los cuales hacen la función de tracción para el movimiento de los rodillos con la ayuda de una manivela que se usa de forma manual.

Con un soporte hecho básicamente de perfiles de aluminio hacen de la laminadora un instrumento de fácil armado y fácil uso para el implemento de la película ReflecTech al sustrato de aluminio.

No obstante, la construcción de tal laminadora requirió del apoyo de maquinas herramientas como el centro de maquinado VM100 para el fresado de dos cajas circulares para colocar los baleros correspondientes como sustituto de chumaceras de pared, las cuales incrementarían mas el costo final de la laminadora. También se uso un ciclo de taladrado para la sujeción de estas cajas.

El costo de los rodillos de poliuretano por sus aplicaciones en las artes graficas es elevado, por lo cual se buscaron rodillos de re-uso bajando considerablemente su costo. No obstante al adquirir las catarinas se tuvo que hacer un pos-tratamiento como lo fue el torneado para acoplarlas a la medida del diámetro del rodillo.

En el anexo correspondiente se encuentran los planos de fabricación.

La implementación de la película fue de mejor calidad a la que se pudo haber logrado mediante una aplicación directa sin laminado, sin embargo no se logró en un cien por ciento la eliminación de imperfecciones aunque si en gran medida. La ilustración 109 muestra una foto de la laminadora construida.



Ilustración 109. Laminadora diseñada para la aplicación de la película.

4.4 Diseño de la estructura

Este disco parabólico ya con la película reflejante adherida debe tener un soporte para su instalación. Este soporte debe proveer al sistema de concentración la estabilidad necesaria contra las ráfagas de viento presentes, debe de ser ligero, de costo accesible, y debe de poder montarse a un sistema de seguimiento solar y debe alojar también la estructura del receptor.

4.4.1 Selección del material

El material elegido para la estructura, fue aluminio anodizado, debido a su excelente relación resistencia/peso, factores con relevancia dentro de las especificaciones del diseño del concentrador. También se eligió aluminio debido a su buena resistencia a la corrosión, ya que esta estructura alojará al disco parabólico en la intemperie y debe mantenerse intacto ante los factores externos.

4.4.2 Diseño CAD de la estructura.

Inicialmente, el diseño original contemplo realizar una estructura que cubriera la geometría exacta entregada por el método trazado de rayos. Para esto se realizó un diseño en el software de CAD, NX6.

Del método de trazado de rayos se obtuvo la ecuación de la parábola, la cual fue exportada y graficada en el software Excel y Maple, de donde los valores puntales que forman la parábola fueron exportados hacia el software Solid Edge, que permite el importar este arreglo de valores puntuales de manera sencilla.

Ya con la geometría de la parábola en Solid Edge, se pudo haber continuado el diseño en este software de CAD, sin embargo debido al mejor manejo que se tenía del software NX6 se decidió exportar a ese programa

Ya con el software en NX6, se procedió al diseño de detalle de la estructura. Para esto se planteo un arreglo de perfiles de aluminio. Esta estructura fue diseñada a detalle y contempla todas las uniones entre los perfiles y el hueco para el foco.

Este diseño además tiene la característica de que está dividido en 6 partes o pétalos, desmontables y armables, con el objetivo de facilitar su transporte e instalación. Ver Ilustración 110.

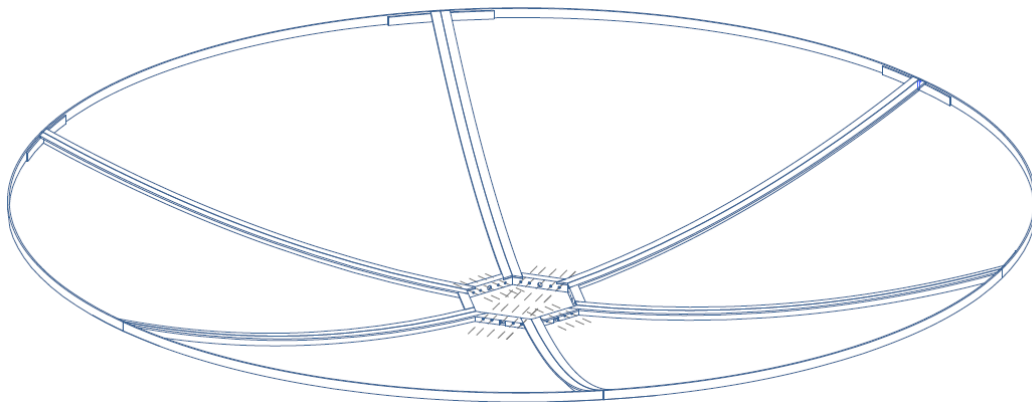


Ilustración 110. Imagen en CAD del arreglo propuesto.

La ilustración 110 muestra los detalles de las uniones en las secciones.

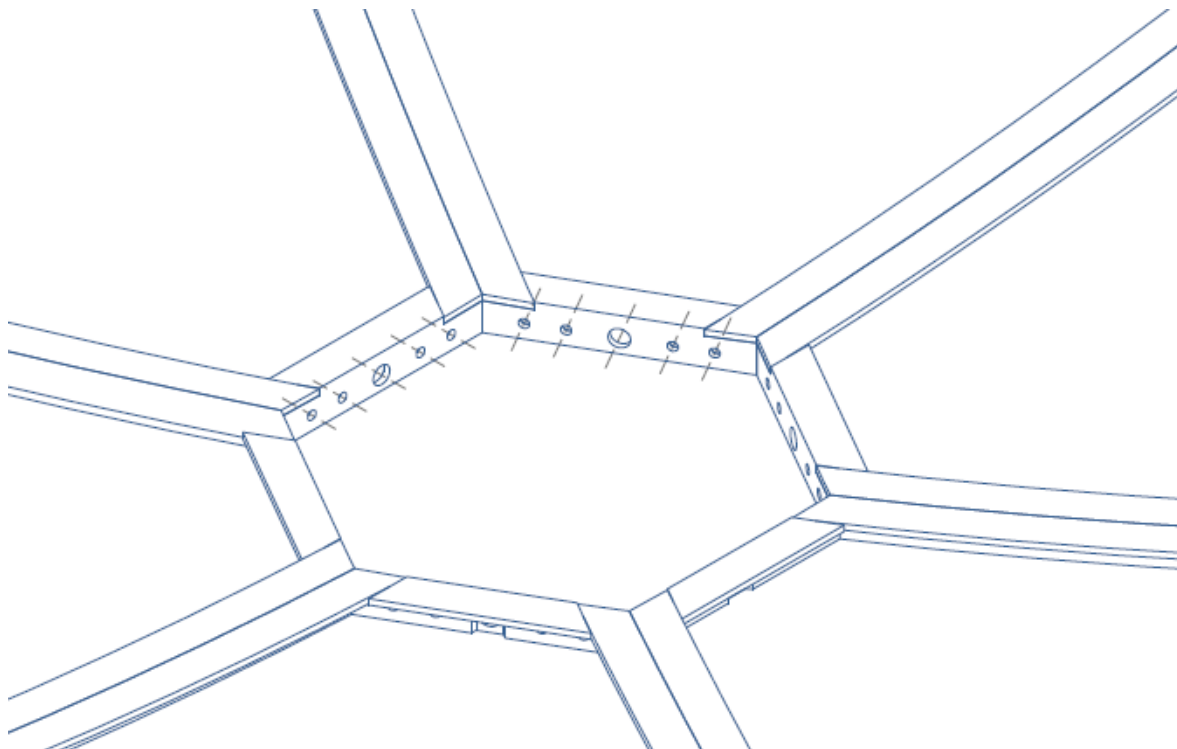


Ilustración 111. Detalle de las uniones de los perfiles en el hueco.

Se obtuvieron los planos de fabricación de esta estructura propuesta y se construyó uno de sus pétalos.

Al final de la construcción del primer pétalo, se concluyó que era muy complicado fabricar el perfil de aluminio a la geometría exacta propuesto por el diseño, se requería de mano de obra calificada y el costo y tiempo de realización de este concentrador de iba a incrementar fuera de lo previsto si se continuaba con los otros 5 pétalos.

Sin embargo se tienen los planos a detalle para un proyecto futuro que requiera de una geometría exactamente como con el método de trazado de rayos lo calculó.

Los planos de fabricación del concentrador se encuentran en el Anexo 2.

4.5 Estructura final.

Al no continuar con el diseño en CAD propuesto originalmente, se buscaron otras opciones para el diseño de la estructura y se concluyó que la opción más viable fue adaptar la estructura de una antena parabólica de telecomunicaciones de malla en desuso.

Esta antena consiste en una antena de aluminio seccionada en 3 partes. Se realizó la forma de esta antena en CAD. Ver Ilustración 112.

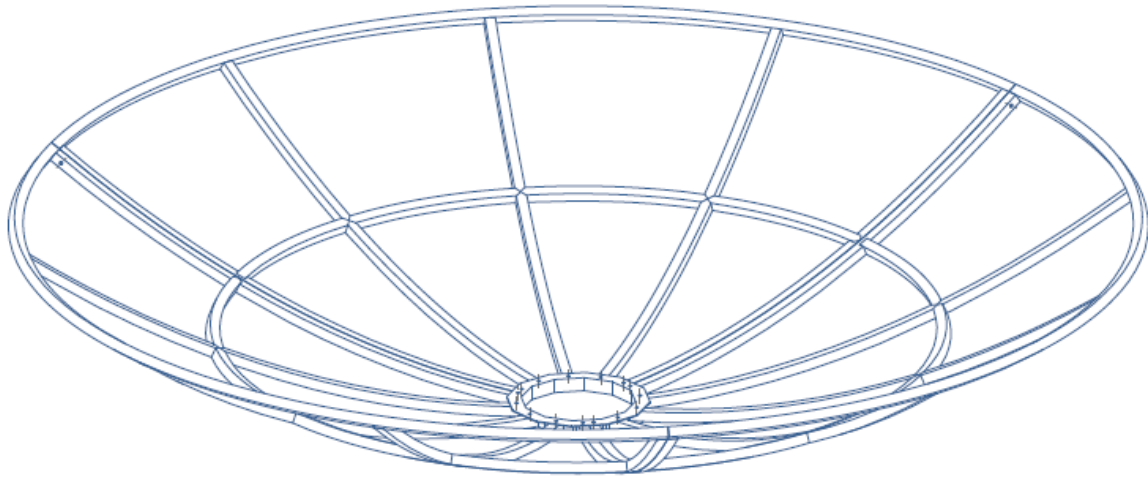


Ilustración 112. Imagen en CAD de la antena final seleccionada.

Esta antena se adaptó para poder recibir a las secciones del disco parabólico, fue lijada, y se modificaron sus uniones entre si, además de que se le adaptó en la base para poder recibir la estructura del foco o receptor.

4.6 Diseño del receptor

El receptor del sistema de concentración solar, corresponde a la aplicación práctica de la energía solar, así como forma de aprovechamiento. Debido a que las aplicaciones del concentrador son muy variadas y hasta la fecha no tiene una aplicación en específico, el receptor será un receptor de carácter general, que servirá para medir la temperatura que se puede alcanzar con este concentrador.

4.6.1 Selección del material

El concentrador consiste en un tubo hueco, con una tapa en la base del cilindro, con la cual se forma una cavidad, donde en la base de la cavidad se espera tener la mayor intensidad de concentración solar. La ilustración 113 muestra una imagen CAD del receptor.

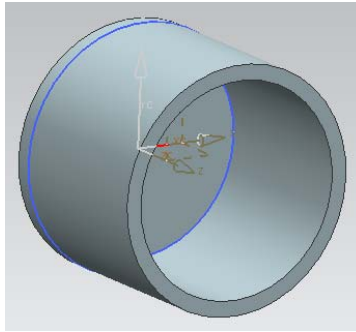


Ilustración 113. Receptor del concentrador solar.

El material es de acero al carbono 1018 y se construyó a partir de una barra hueca de 2 mm de espesor y 76.2 mm de diámetro a la cual le fue soldada una tapa de hierro del mismo espesor.

4.6.2 Soporte

La estructura se sujetó mediante una corona de aluminio que se adjuntó al tubo principal y a la cual se le unieron tres postes de aluminio también los cuales se unieron a la estructura principal. El material del soporte se eligió simplemente por las propiedades del aluminio en cuanto a la relación resistencia peso. La ilustración 114 muestra el diseño CAD del soporte de las uniones.

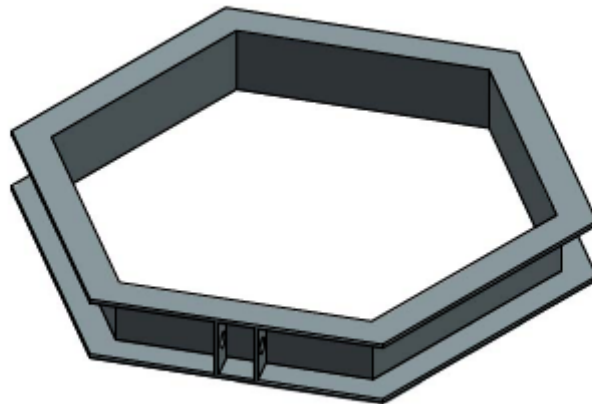


Ilustración 114. Soporte de la estructura.

4.6.3 Modelo de transferencia de calor

Con el objetivo de tener una estimación previa a las pruebas de la temperatura que puede alcanzar el receptor se estimó la temperatura que se podía alcanzar dentro del mismo.

El modelo consiste en una simplificación del modelo real, se considera transferencia de calor en estado estable, es decir no se considera el tiempo en que el concentrador alcanza esta temperatura; y también la transferencia de calor se considera unidimensional es decir se desprecia el flujo de calor por paredes del receptor excepto la tapa. La ilustración 115 un muestra el balance de energía simplificado en al receptor.

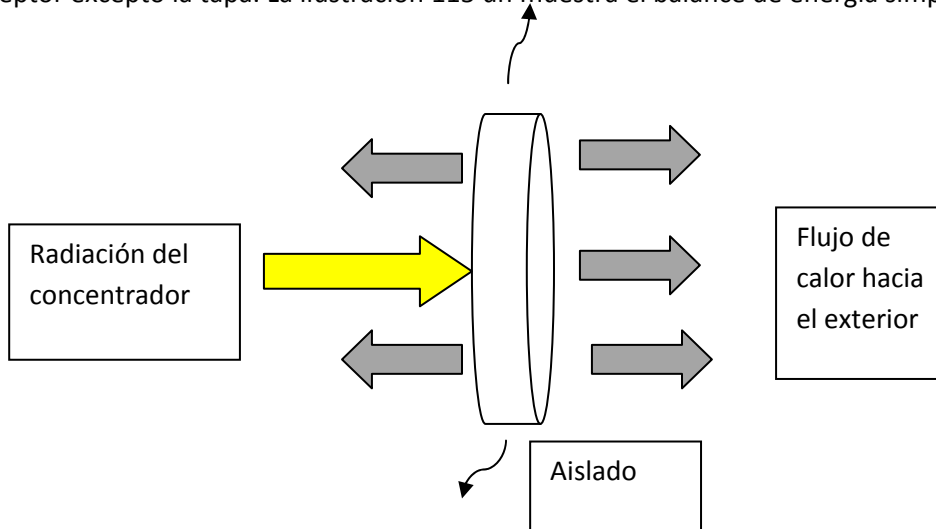


Ilustración 115. Modelo de transferencia de calor del receptor.

Debido a que solo es una estimación, se va a despreciar la resistencia térmica del acero, por lo que se tiene que las temperaturas en un lado y en otro lado del receptor son las mismas. Ahora bien el modelo se simplifica a una transferencia de calor por radiación y convección en cada lado del disco o tapa del receptor. Es decir la energía de entrada que es la radiación solar se va a liberar al ambiente ya sea en forma de radiación o por convección del aire exterior y el que se encuentre dentro del cilindro, se recuerda que no hay almacenamiento de energía al ser un modelo en estado estacionario. De acuerdo con los valores de radiación usados en el SolTrace se tiene que el valor de radiación usado para la Ciudad de México será de 254 W/m^2 según lo medido con el pirómetro, y la temperatura ambiente del aire se considerará en $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y los valores de coeficientes de transferencia de la calor dentro del receptor y fuera de él se toman como 5 y $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Para la emisividad de la superficie del material se considerara 0.9 . De acuerdo con la geometría del concentrador se tiene que la relación de concentración de nuestro concentrador es 250 . Ver Ilustración 116.

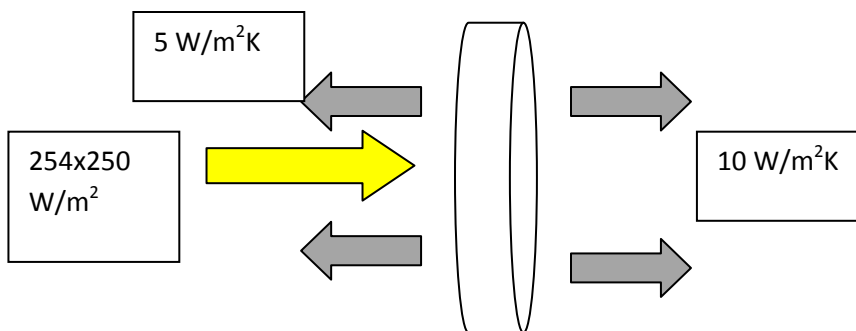


Ilustración 116. Valores de radiación en el modelo de transferencia de calor.

Del capítulo 2, se tienen las bases para la transferencia de calor por convección y radiación, así entonces, la ecuación de balance de energía se expresa como:

Ecuación 14. Balance de energía en el receptor.

Energía de radiación solar – Energía perdida por convección en la cara interna – Energía perdida por convección en la cara externa-Energía de radiación al ambiente = 0

$$250*254- 5*(T-25) - 10*(T-25) - 0.9*5.67E^{-8}(T^4-(298)^4)=0 \dots\dots\dots(14)$$

De donde se observa que la incógnita es precisamente la temperatura de la superficie que se desea estimar.

Resolviendo la ecuación se tiene que **T = 737.5 °C**

Así entonces el valor esperado en las mediciones debe de ser cercano a este valor.

Capítulo 5

Construcción y pruebas

Conforme a lo encontrado al Software de trazado de rayos SolTrace se encontró que el mejor ángulo de apertura para captar la mayor cantidad de rayos solares es de 45° , por otro lado las estructuras comerciales para captación de ondas electromagnéticas es de 70° . Así que se decidió hacer dos prototipos para la construcción del concentrador.

En el primer caso se realizaron diferentes rolados de acuerdo a lo requerido, conforme a lo diseñado en el Software de diseño Unigraphics 5, para obtener una sexta parte del paraboloides. Ver Ilustración 117. La ilustración 121 muestra el diseño de la estructura completa.

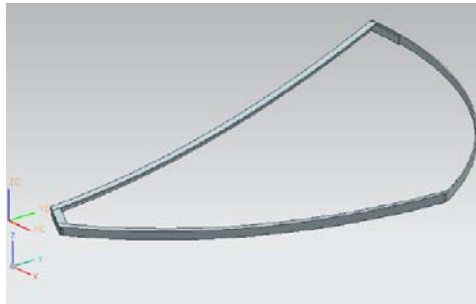


Ilustración 117. Estructura gajo a 45 grados.

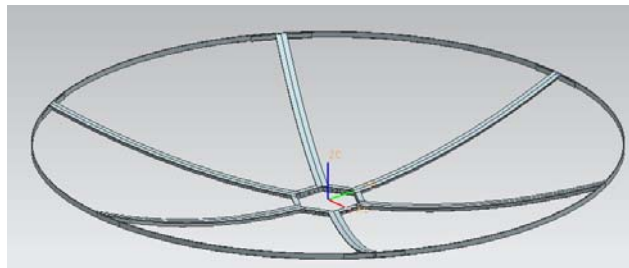


Ilustración 118. Estructura completa para ángulo de apertura de 45 grados.

El gajo consiste en la sexta parte del paraboloides con ángulo de apertura de 45° . Este prototipo consta en el rolado de un perfil en forma de ángulo con material de aluminio de $1\frac{1}{2}$ ", el rolado se usa para deformar el material hasta darle la forma del perfil de la parábola. Ver Ilustración 119.



Ilustración 119. Rolado de ángulo de aluminio.

Para las esquinas se utilizó el mismo doblado de ángulo para su sujeción. Ver Ilustración 120.



Ilustración 120. Sujeción en esquinas.

Además se utilizó una lámina de acero inoxidable acabado espejo sujeta con tornillos de gota en la estructura anterior.

Las Ilustraciones 121, 122 y 123 muestran las secciones terminadas del concentrador.



Ilustración 121. Muestra de esquinas en gajo terminado a 45 grados.



Ilustración 122. Vista inferior de gajo terminado a 45 grados.



Ilustración 123. Vista frontal de gajo terminado a 45 grados.

Debido a la rigidez de la lámina de acero inoxidable se encontró con la dificultad de moldearlo a la forma requerida. Además del estudio realizado anteriormente, se encontró que la mejor opción para la superficie reflejante es el ReflechTech.

El segundo prototipo es la modificación de una antena de captación de ondas electromagnéticas. Contando con una estructura de aluminio y malla de aluminio, se comenzó por limpiarla y quitarle la malla. Ver Ilustración 124 y 125..



Ilustración 124. Estructura inicial gajo a 70 grados.

Esta estructura está dividida en tres secciones, las cuales se unen entre sí con tornillería. De la misma forma que el modelo anterior se realizó el modelo en Unigraphics 5 para complementar la estructura ya existente con el soporte de captación. Ver Ilustración 126 y 127.



Ilustración 125. Gajo a 70 grados limpio y sin malla.

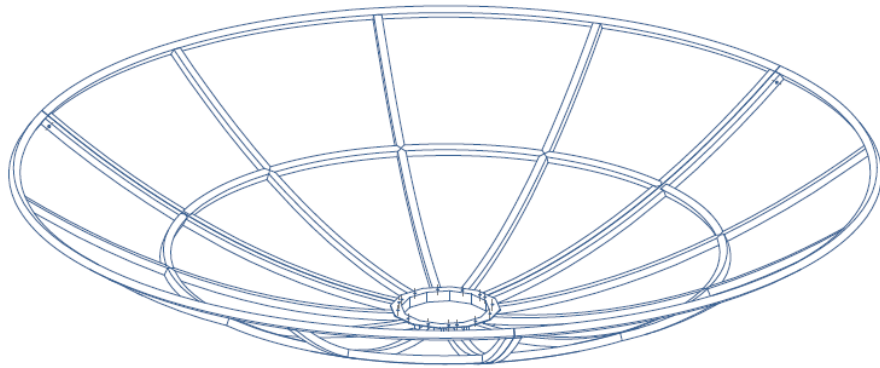


Ilustración 126. Modelado de estructura a 70 grados en Unigraphics 5.

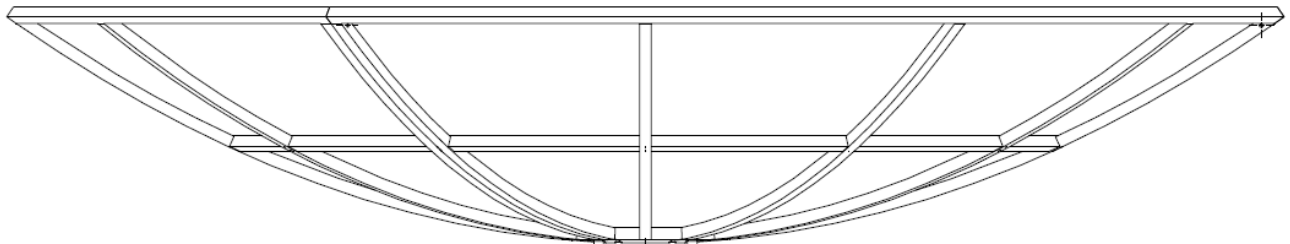


Ilustración 127. Vista frontal del concentrador a 70 grados en Unigraphics 5.

Para la superficie se utilizó lámina de aluminio, la cual es más flexible que la lámina de acero inoxidable, además de otras propiedades mejor enfocadas al uso del concentrador solar como lo es el peso, el cual es más ligero que el acero inoxidable.

Dicha lámina se cortó con la forma adecuada para colocarla como superficie del concentrado parabólico, con la ayuda de tijeras para lámina. Ver Ilustración 128.



Ilustración 128. Cortes al sustrato de aluminio.

Una vez teniendo cortados los doce tramos, ya que la estructura está dividida en cuatro secciones, y en total son tres secciones, tenemos las doce piezas necesarias para poder cubrir la superficie en su totalidad.

Como proyecto alternativo se fabricó una laminadora con rodillos de poliuretano para realizar el pegado del material ReflecTech ya adquirido y que nos dio como resultado en el análisis la mejor opción para el material reflejante del concentrador.

Dicha laminadora está construida a base de perfiles de aluminio y algunos maquinados que se realizaron en los centros de maquinado CNC que se encuentran en la Facultad de Ingeniería, en específico en la DIMEI. Los maquinados consistieron en la fabricación cajeados circulares para la fabricación de chumaceras de pared para colocar los dos rodillos de poliuretano, material elegido para colocar el material ReflecTech sobre la lámina de aluminio, este material cuenta con una capa de pegamento para ser colocada en una superficie lisa; para realizar el correcto pegado del material reflejante es necesario hacerlo a presión y así evitar formación de burbujas de aire entre la lamina de aluminio y la película reflejante. Además de colocar chumaceras de pared, también se colocaron catarinas como sistema de tracción entre los dos rodillos y así girarlos mediante el uso de una manivela. Dicha laminadora se fabricó con el propósito de obtener el pegado correcto del material reflejante para este proyecto y en lo sucesivo para otros posibles proyectos.

La ilustración 129 y 130 muestra el diseño de los rodillos de la laminadora. La ilustración 131 muestra la foto de la laminadora.

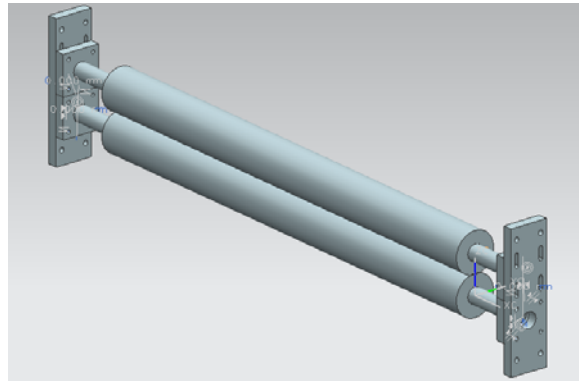


Ilustración 129. Modelo en Unigraphics 5 de laminadora.

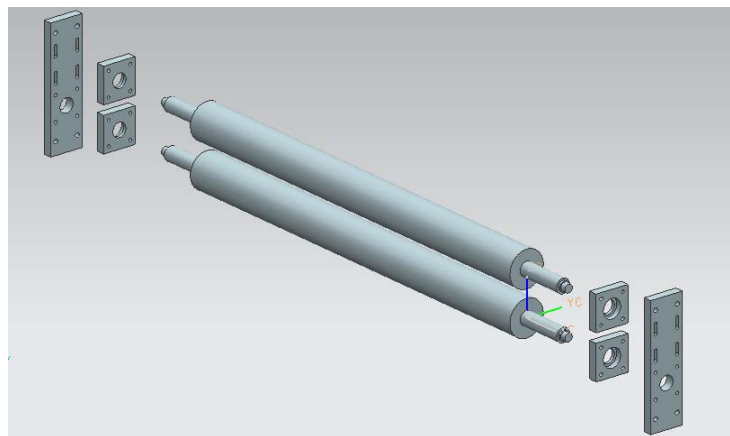


Ilustración 130. Vista en explosivo laminadora en Unigraphics.



Ilustración 131. Laminadora con rodillos de poliuretano.



Ilustración 132. Reflec Tech pegado al sustrato de aluminio.

Una vez pegada la película de Reflec Tech al sustrato de aluminio, como se observa en la ilustración 132 se procedió a colocarlas en la estructura a 70 grados con remaches de tamaño 1/8". Ver Ilustración 133.

El diseño CAD final se observa en la ilustración 134.



Ilustración 133. Paraboloide final con material reflejante Reflec Tech.

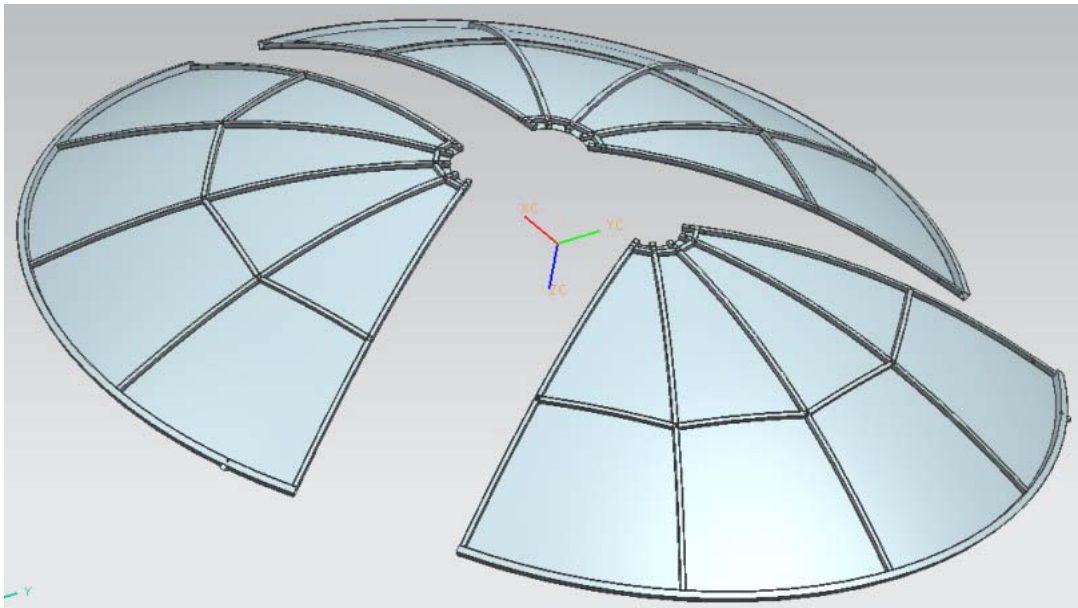


Ilustración 134. Despiece de paraboloide.

A la parte posterior de la estructura se le adaptó una pequeña corona como acoplamiento hacia el sistema de movimiento de dos dimensiones del concentrador solar, dicho sistema es de tipo “ecuatorial”, diseñado y construido mediante otro tema de tesis.

La brida fabricada, consiste en una estructura de soleras de acero 1018 de 1/8 x 1.1/2”, con la forma adecuada para acoplar la base del paraboloide con el mecanismo de movimiento y fijada con 15 tornillos de 3/16” de diámetro y un largo de 1.1/2”. Ver Ilustración 135 y 136.



Ilustración 135. Vista posterior de paraboloide.



Ilustración 136. Brida de sujeción hacia el mecanismo de movimiento.

Además de colocar una brida para la sujeción del concentrador parabólico también se diseñó y se construyó un soporte para el receptor. El modelo final puede observarse en la ilustración 137.



Ilustración 137. Modelo final en Unigraphics 5.

También construido con perfiles de aluminio consta de una estructura hexagonal y tres soportes para sujetarlos al concentrador. Ver Ilustración 138.

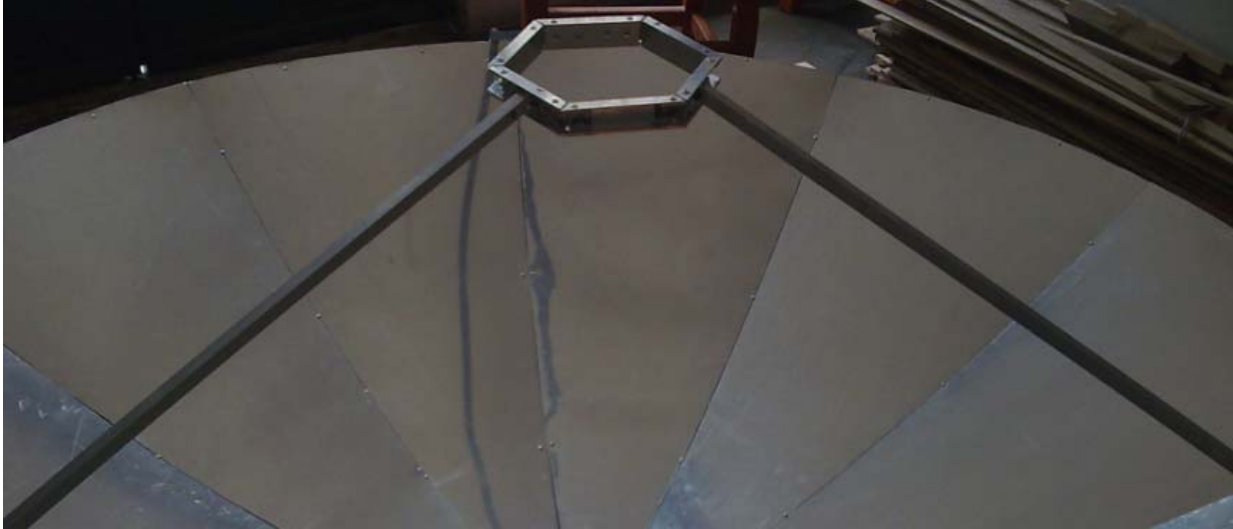


Ilustración 138. Soporte para el concentrador de rayos solares.

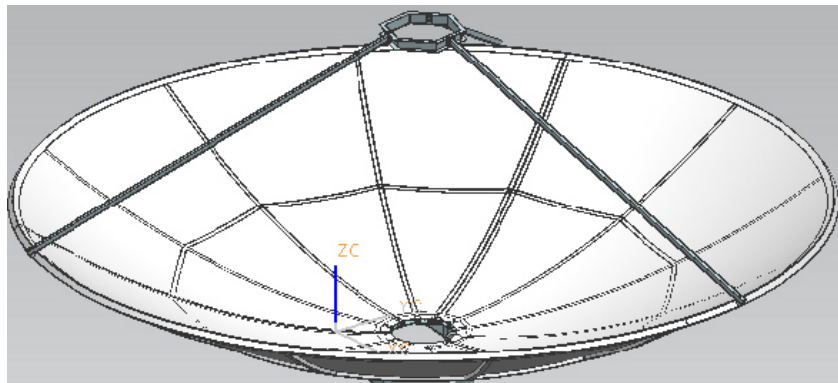


Ilustración 139. Modelo soporte del receptor en Unigraphics.

Una imagen del modelo final en NX puede verse en la ilustración 139, y el sistema completo puede observarse en la ilustración 140.

Esta estructura se encuentra situada a la misma distancia focal correspondiente a la parábola con un ángulo de apertura de 70 grados.

Además de la fabricación de un pequeño dispositivo para disminuir o aumentar la distancia focal en +/- 10 cm. Distancias a las cuales se tiene contemplado realizar pruebas.

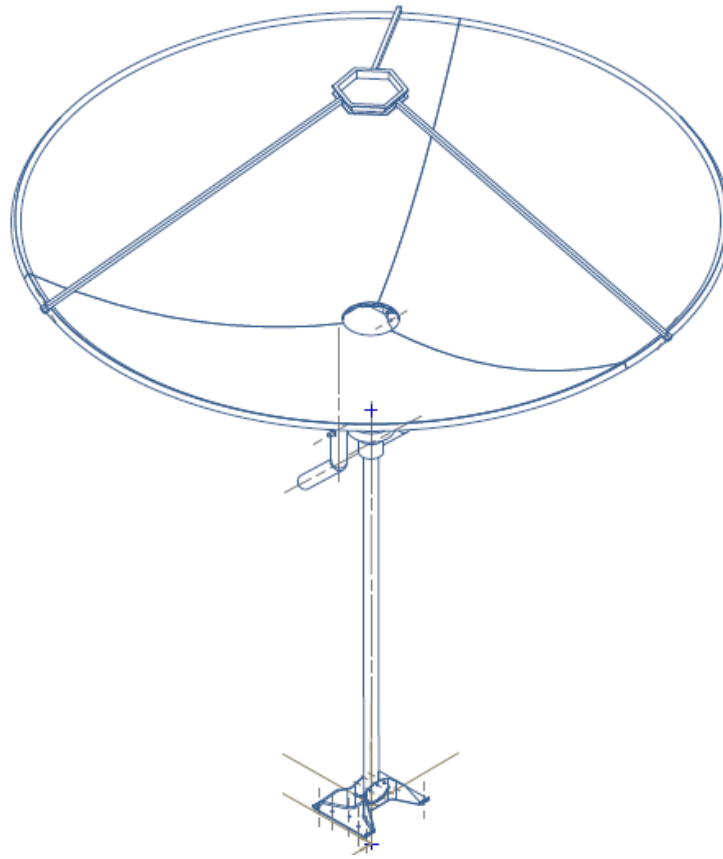


Ilustración 140. Modelo final. Paraboloide - soporte concentrador - mecanismo de movimiento.

Una vez concluido el segundo prototipo en su totalidad, así como la estructura para el movimiento y el receptor se llevó todo el prototipo a las instalaciones de la Plataforma Solar del Instituto de Ingeniería, donde se realizaron las pruebas que se describirán más adelante, ver Ilustración 141.



Ilustración 141. Pruebas de funcionamiento.

En la sección 4.1 se muestran todas las condiciones en las cuales se realizaron las pruebas: radiación global, radiación directa y difusa, además de la velocidad del viento, temperatura del ambiente y la humedad relativa.

La ilustración 142 muestra el comportamiento real de la concentración de los rayos solares.

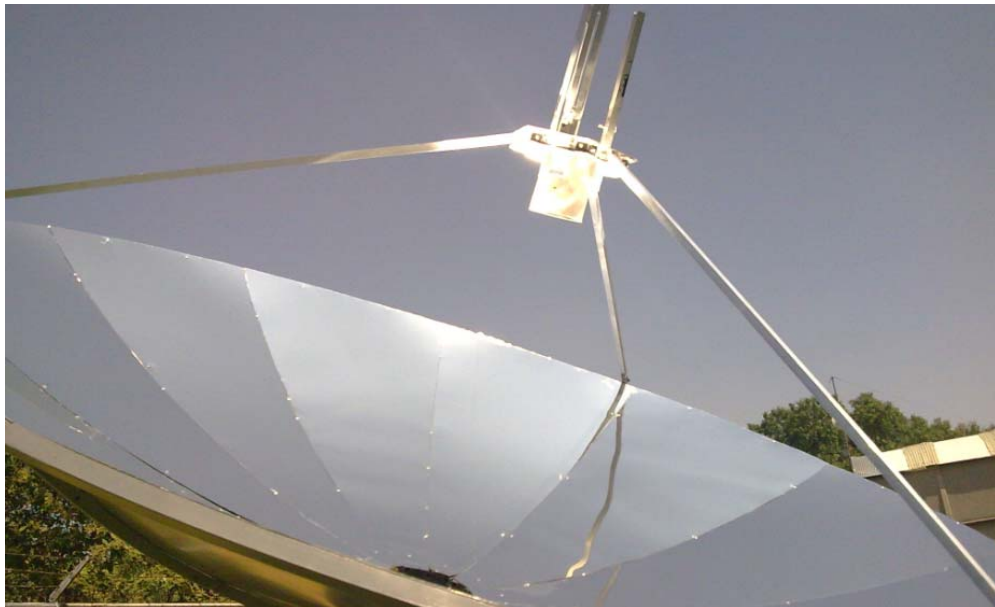


Ilustración 142. Concentración de rayos solares.

Como se observa en la Ilustración 143 y la Ilustración 144, la mancha de concentración es más amplia a lo esperado esto se debe a las imperfecciones que se tienen en la superficie ya que en el sustrato de aluminio hicieron falta más puntos de sujeción, por lo cual no todos los rayos solares fueron dirigidos directamente al foco del concentrador, no obstante se tuvo una buena relación de concentración ya que se acercó un pedazo de madera al foco y este se empezó a quemar a los pocos segundos de ser colocado.



Ilustración 143. Alcance de temperatura para quemar madera.



Ilustración 144. Aumento del área de concentración.

La máxima temperatura a la que se llegó fue de 402 °C. La medición se realizó mediante un termómetro infrarrojo modelo OS-651, marca OMEGA, con capacidad de medición desde -29°C hasta 1093 °C, con una exactitud de +/- 1 °C. El concentrador terminado con el equipo de trabajo puede observarse en la ilustración 145.



Ilustración 145. Prototipo final.

La ilustración 146 muestra la medición de la temperatura alcanzada en el receptor.



Ilustración 146. Medición de la temperatura alcanzada (402 °C).

Conclusiones

Mediante la ayuda del software de trazado de rayos SolTrace y el software de diseño mecánico NX6, se diseñó un disco parabólico para implementarlo en un sistema de concentración solar, un campo que ofrece que ofrece varias oportunidades para generación renovable de electricidad y calor industrial en México debido a la alta radiación presente el territorio.

Mediante una comparación de diversos materiales reflejantes, tanto en el ámbito técnico como económico, se eligió REFLECTECH, una película con una reflectividad del 95%. Para su óptima implementación en la lámina de aluminio se diseñó y construyó una laminadora de rodillos de poliuretano, esto permitió aplicar la película reduciendo el daño al mínimo en la superficie y evitó la formación de burbujas entre la lámina de aluminio y la película reflejante.

Debido a que la manufactura del ángulo de apertura exacto implicó un proceso complejo y caro de rolado de aluminio, se decidió utilizar una estructura de disco parabólico de una antena de telecomunicaciones, esta opción abre la posibilidad de la construcción de discos parabólicos de bajo costo utilizando el reciclaje de antenas de este tipo.

Para la pruebas del sistema, el disco parabólico y el receptor se llevaron a la Planta de Energía Solar del Instituto de Ingeniería, donde se fue posible medir la temperatura del receptor que alcanzó los 400 °C, esta temperatura es menor a la prevista en el modelo de transferencia de calor calculado previamente usando los datos meteorológicos medidos, 720 °C. Las diferencias se deben básicamente a imperfecciones en la parábola de la antena de telecomunicaciones, que llevaron a que la película no tomará completamente la forma de la parábola (más puntos de apoyo fueron necesarios), además las condiciones meteorológicas como el viento y el la radiación solar están sujetas a variaciones que no fueron consideradas en el modelo simplificado de transferencia de calor en el receptor.

Finalmente, el disco parabólico diseñado ofrece una temperatura óptima para diversos procesos que requieren calor, además que podría ser posible instalar un moderno motor Stirling.

Bibliografía

- Almaza, R. (1976). *Energía Solar*. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Arancibia, C. (2009). *Escuela de Investigación en Energía CIE UNAM*. Temixco.
- Armando, R. M. (2006). *DISEÑO MECánico de una estructura ecuatorial y caracterización térmica del receptor de un concentrador solar de foco puntual con ángulo de apertura de 90°*. CIE UNAM.
- Centro Mario Molina. (2008).
- CFE. (2007). Obtenido de www.cfe.gob.mx
- EVE Ente Vasco de la Energía. (2005).
- Florida Energy center. (2008). Obtenido de www.fsec.ucf.edu
- German Aerospace Center. (2009). Obtenido de www.dlr.de
- International Energy Agency. (2008). Obtenido de Statistics.
- Juan Hermosillo, D. G. (1995). *Notas del curso de energía solar*. ITESO.
- Lovegrove. (2008). *Australian National University*. Obtenido de www.anu.edu.au
- Morin, A. R. (2006). *ANÁLISIS TEÓRICO DE TRAZADO DE RAYOS PARA EL DISTAL I*.
- Morín, A. R. (2006). Diseño mecánico de una estructura tipo ecuatorial y caracterización térmica de un concentrador de foco puntual con ángulo de apertura de 90 grados. *Tesis doctoral*. CIE, UNAM.
- Pérez, S. (2005). *Sistemas solares de termoconcentración*.
- Pillatowsky. (2009). La utilización de la energía termosolar en el sector industrial. *Escuela de investigación en energía*. Temixco: CIE, UNAM.
- Ramirez, C. R. (2007). *Instituto de Investigaciones Eléctricas*. Obtenido de iie.org.mx
- (2008). *Reflectech specifications*. Reflectech solar.
- Renewable Energy News. (2008). Obtenido de www.stirlingenergy.com
- Ruíz. (2006). *Radiación solar*. Universidad de Sevilla.
- SENER. (2008). Obtenido de www.sener.gob.mx
- Shell global. (2007). Obtenido de Energy scenary.
- SOLO kleinenmotoren. (s.f.). Obtenido de www.solo-germany.com

(2008). *Soltrace Help*. National Renewable Energy Laboratory.

University of Nevada Reno. (s.f.). Obtenido de www.unr.edu

Yunus, C. (2006). *Termodinámica*. Mc Graw Hill.

Yunus, C. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Mc. Graw Hill.

Technical Data

ReflecTech® Mirror Film

Performance Characteristics

Specular Reflectance ⁽¹⁾	94%	At 25 mrad, 660 nm
Solar-Weighted Hemispherical Reflectance ⁽²⁾	93%	DIN 5036-1, 3 ASTM E891

(1) At 1.4° acceptance angle measured on Devices & Services 15R Specular Reflectometer
 (2) Integrated over dired normal air mass 1.5 solar spectrum.

Product/Physical Characteristics

	Machine Direction	Transverse Direction	
Tensile Strength (MPa)	61	64	ASTM D882
Elongation at Break (%)	88	72	ASTM D882
Yield Strength at 2 % Offset (MPa)	4.0	3.6	ASTM D882
Yield Elongation at 2% Offset (%)	4.7	4.6	ASTM D882
Modulus (MPa)	1430	1566	ASTM D882
Nominal Thickness	0.004 in	(4 mils, 0.1 mm)	
Coefficient of Thermal Expansion (cm/cm/°C)	5.5x 10 ⁻⁵		ASTM E831

Application Characteristics

Adhesion to Aluminum ⁽³⁾	Initial 11.4	ASTM D903
180° Peel Strength (N/25mm)	Fully Cured 19.9	ASTM D903

(3) Adhesion depends on the nature of the surface. The indicated values are for reference only.

Storage and Operation

Shelf Life ⁽⁴⁾	1 year	
Maximum Operating Temperature	60°C	(140°F)
Cleaning	Brushless pressure wash with de-mineralized or de-ionized water only	

(4) Store in clean and dry environment that is not in direct sunlight in a location with an ambient temperature of 100°F (38°C) or less.

Guía Del Usuario

Por favor lea toda la guía antes de sacar la película de la caja.

Adhesivo Sensible a la Presión

La película reflectante ReflecTech® viene con un adhesivo sensible a la presión (cubierto por papel antiadherente) en la parte posterior. El adhesivo tiene base de sílice, muy durable y lista para aplicarse a un sustrato estructural y perfectamente adecuado para usarse en exteriores. Tiene que dejar que pasen 48 horas después de la aplicación para que el adhesivo desarrolle toda su fuerza. Para levantar la esquina del papel antiadherente, use dos pequeñas piezas de cinta— una en la superficie del espejo y otra en papel, jalando o suavemente las piezas de cinta.

Materiales del Sustrato

Normalmente la película reflectante ReflecTech® está aplicada a: Esmaltes de aluminio grado mil, cuya suavidad preserva la cohesividad de la superficie del espejo terminada. También se pueden usar otros sustratos— tal como hojas de plástico, fibra de vidrio y acero galvanizado. El adhesivo se pega bien a la mayoría de los materiales; sin embargo, las irregularidades de la superficie pueden ser vitales en la película reflectante después de la laminación. Antes de usar la película para espejo ReflecTech® en sustratos (rústicos o de energía superficial baja (como polietileno o fluoropolímero); verifique la adhesión con una muestra pequeña.

Mascarilla Protectora

La película reflectante ReflecTech® viene con una mascarilla desprendible para proteger la superficie delantera del espejo de husillos digitales y daños durante el transporte, montaje, procesamiento e instalación. Nunca pretendo que esta mascarilla protectora se use para una exposición prolongada y se debe quitar en cuanto la película se coloque en el exterior.

Técnicas de Aplicación

La película reflectante ReflecTech® debe aplicarse a un sustrato utilizando un laminador de película equipado con rodillos de hule. La película se monta en el eje de desenrollado y se alimenta alrededor de los rodillos de aplicación. El sustrato se alimenta entre la aplicación y los rodillos de soporte. El laminador quita el papel antiadherente en el eje de desenrollado y se adhiere al sustrato— continuamente y sin arrugas o burbujas.

Para mejorar la adhesión y eliminar el polvo atrapado que se imprime a través de la película, limpie el sustrato con un solvente para eliminar residuos. Limpie con un trapo seco y use un paño de adhesión inmediatamente antes de la laminación. Quite cualquier contaminación de la esencia

Para más información, contacte a:

info@reflecsolarsolar.com

ReflecTech, Inc.

18200 West Highway 72

Arvada, CO 80007

(303) 555-0000

www.ReflecTechSolar.com

y limpie todo lo ancho del sustrato justo antes de que pase entre los rodillos. Las barras estáticas reducen la carga estática y se recomiendan ampliamente.

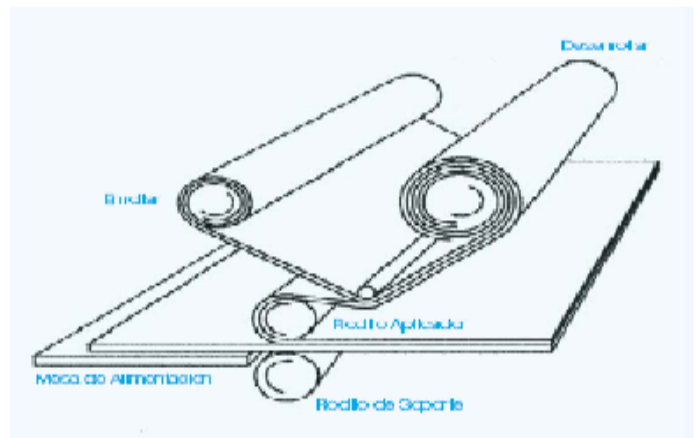
En pequeñas áreas es posible la aplicación manual, pero es difícil, requiere de tiempo y las partículas pequeñas en el aire o en el agua pueden producir defectos. Si no se puede evitar la laminación manual, aplique una capa ligera de agua al sustrato con un rociador, quite el papel antiadherente, coloque la película en su lugar y use un pequeño rodillo de hule o limpie con paños que se seque al agua (limpiadores de pasta dental y trapejos también funcionan). Si la película no tiene una máscara protectora, durante este proceso del ensamblaje con una espátula y presión del dedo.

Guíada Apropiada de la Película

Use métodos que no sean de contacto colomente para limpiar la película reflectante ReflecTech®. Los métodos de lavado de presión limpian y restauran espesas de polímeros con la misma efectividad que las técnicas de cepillo en vitro en las plantas de energía muy grandes. Nunca aplique agua sin tratar a la película reflectante ReflecTech®. Para la limpieza solamente use agua deionizada o desmineralizada.

Almacenamiento de la Película

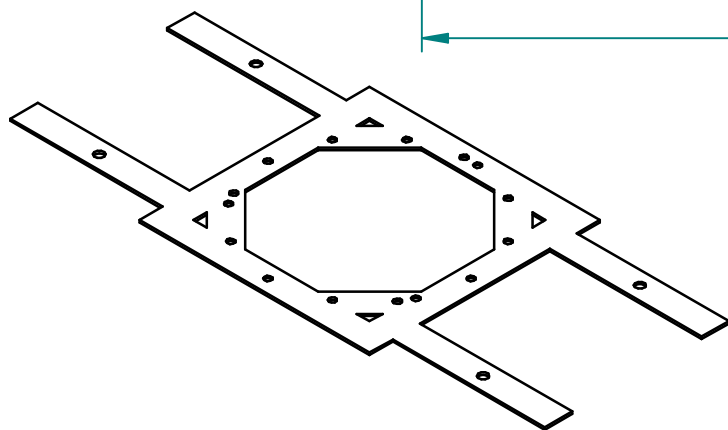
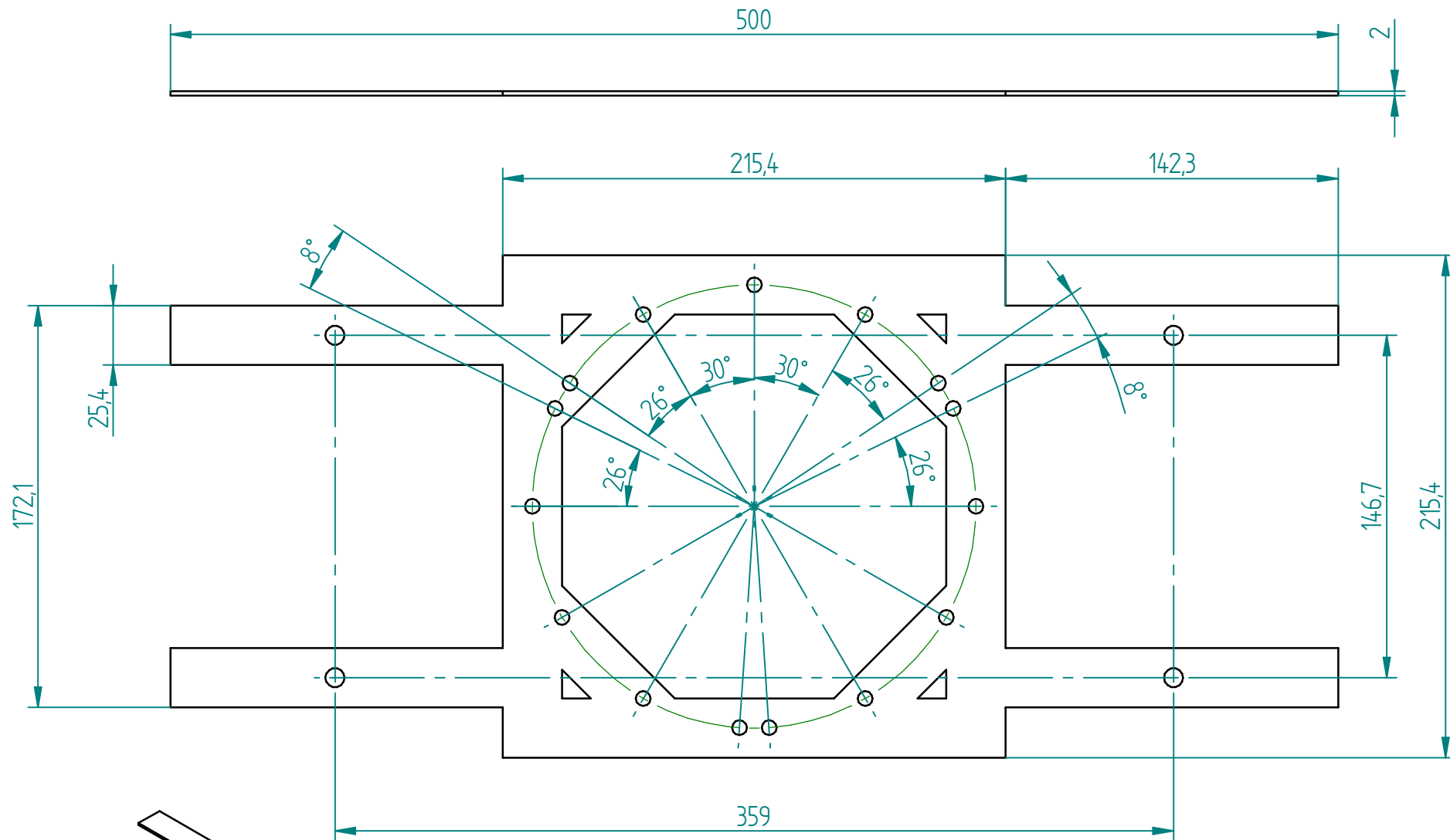
La película reflectante ReflecTech® debe almacenarse lejos de la luz solar directa a temperaturas por debajo de 100°F/38°C y protegida de la humedad. Los rodillos de desbobinado deben almacenarse horizontalmente (o perpendicular a sus extremos), apoyados uniformemente y colomente se deben de equilibrar en cajas o muelles de almacenamiento en altura.



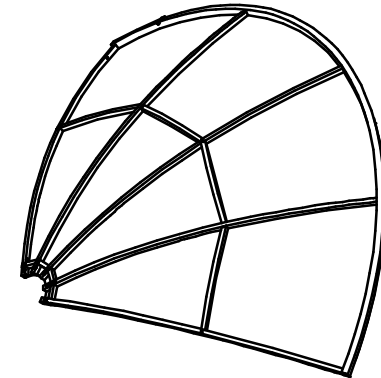
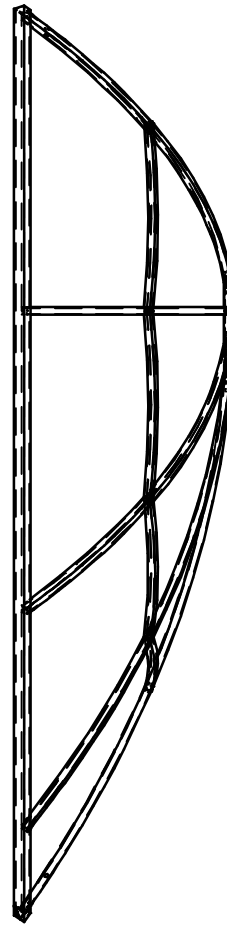
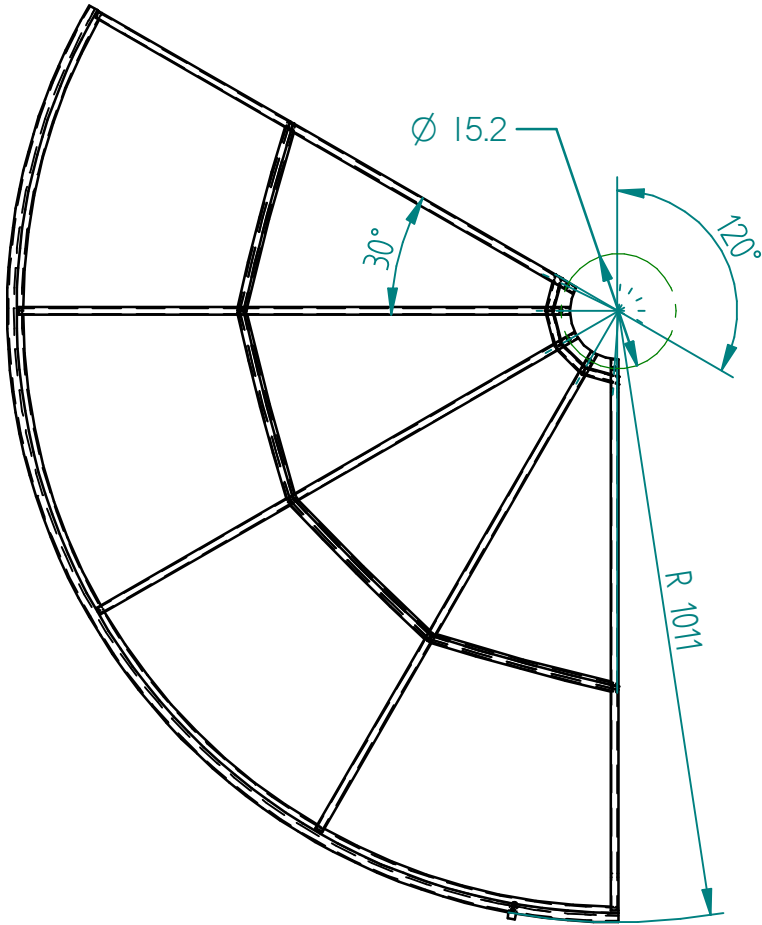
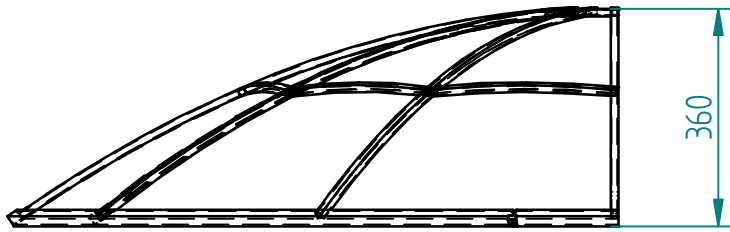
Cuando se le imprime este documento, considere el medio ambiente.
 © 2008 ReflecTech, Inc. Todos los derechos reservados.
 Guía Del Usuario de la ReflecTech® 200808


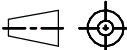
Lista de planos:

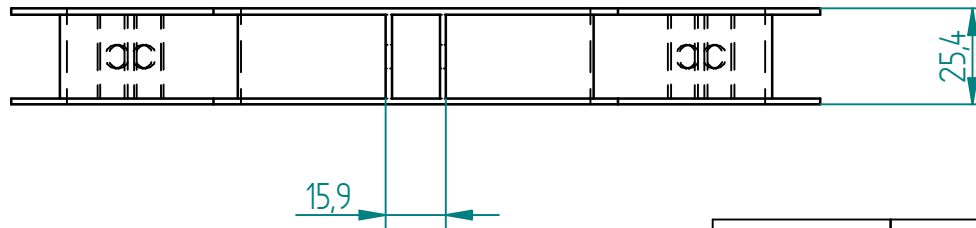
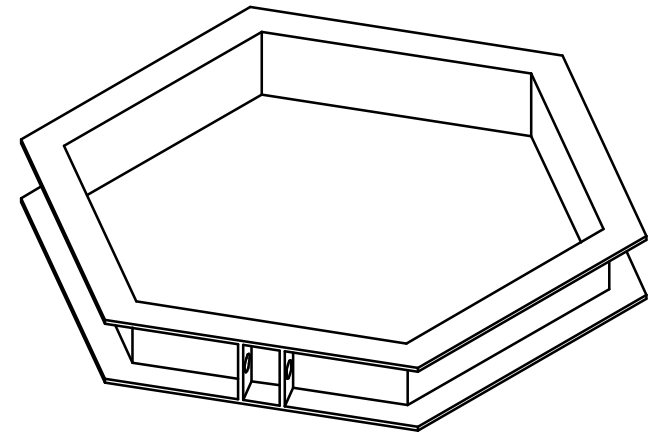
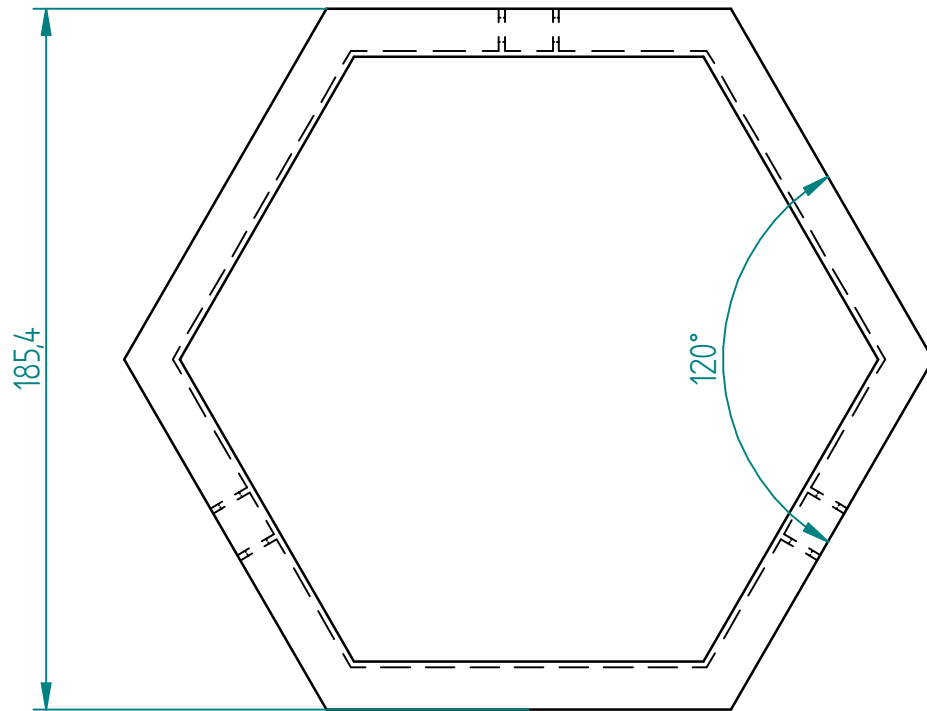
1. Brida de sujeción
2. Soporte del receptor
3. Sección de la estructura
4. Poste

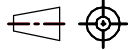


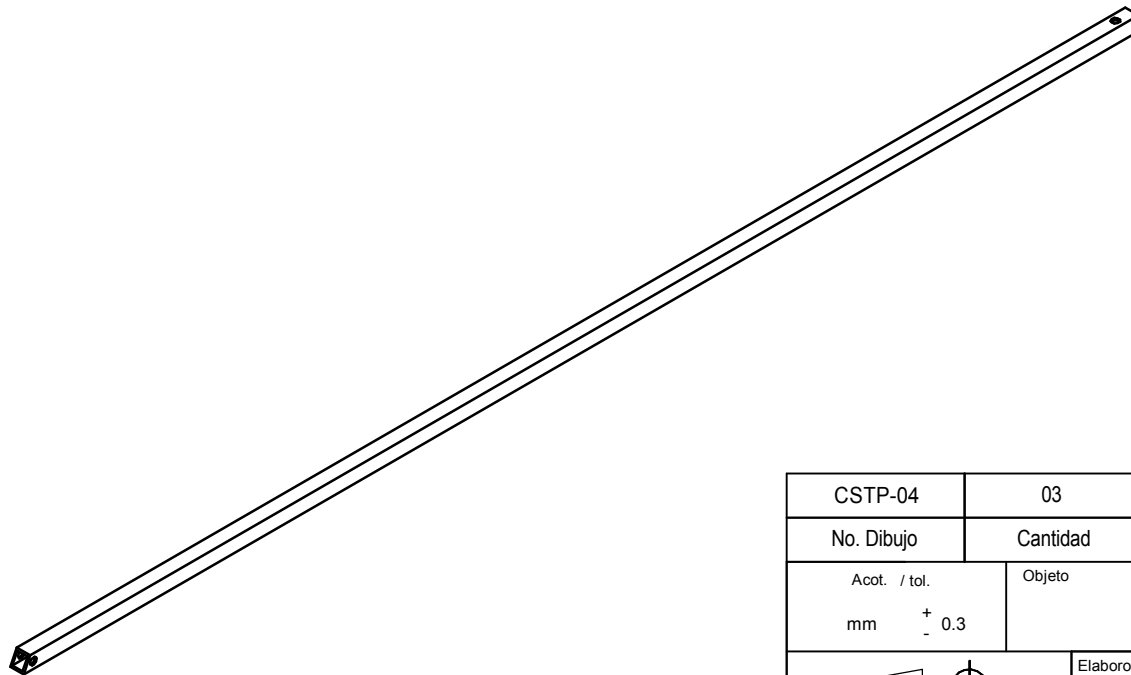
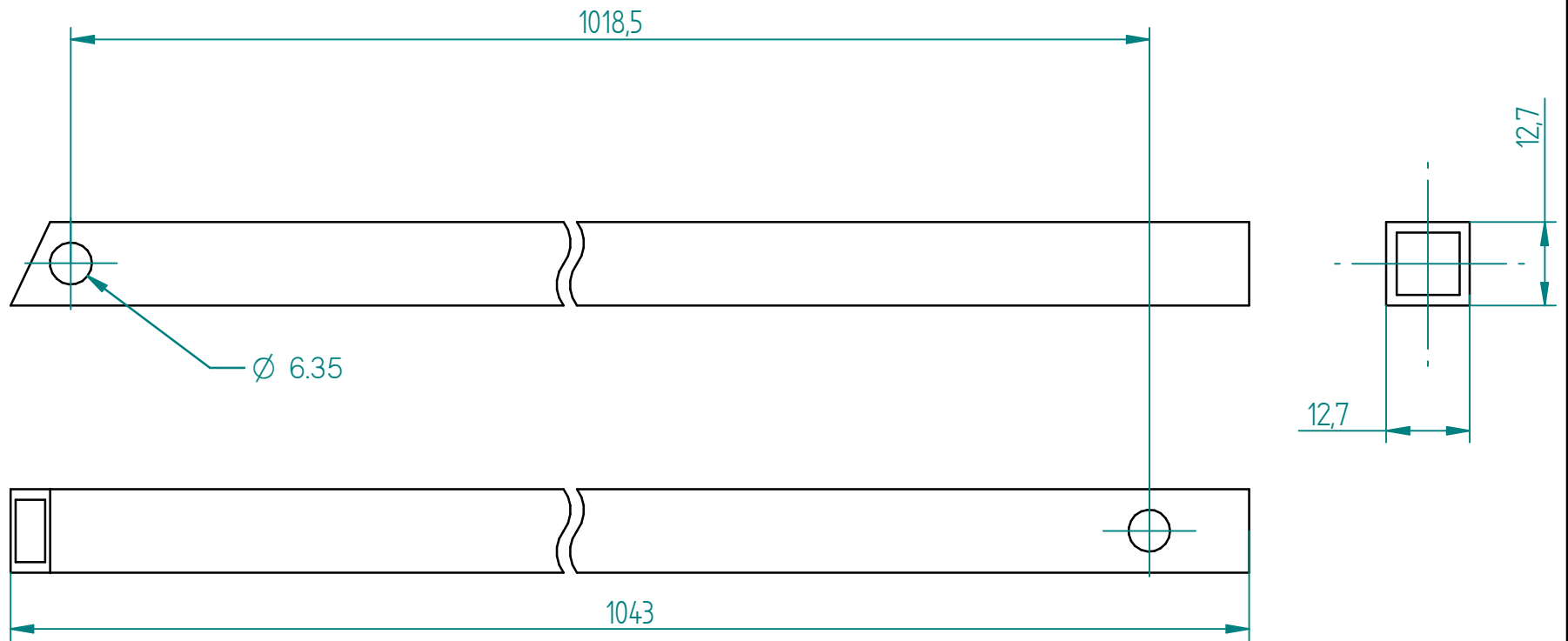
CSTP-03	01	BRIDA DE SUJESIÓN	SOLERA DE FE	1/8 X 1"
No. Dibujo	Cantidad	Denominación	Material	Medidas en bruto
Acot. / tol. mm	Objeto			FACULTAD DE INGENIERIA UNAM
+ 0.3 - 0.3	CONCENTRADOR SOLAR TIPO PARABOLICO			
 		Elaboro Rosa María González	Aprobó Armando Rojas Morin	Fecha 24/03/2014

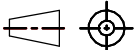


CSTP-02	03	GAJO DE LA ESTRUCTURA	PTR ALUMINIO	1/8 X 1/2"
No. Dibujo	Cantidad	Denominación	Material	Medidas en bruto
Acot. / tol. mm + 0.3	Objeto CONCENTRADOR SOLAR TIPO PARABOLICO			FACULTAD DE INGENIERIA UNAM
	Elaboro Rosa María González	Aprobó Armando Rojas Morin		



CSTP-01	01	SOPORTE DEL RECEPTOR		CANAL U DE ALUMINIO	1/2 X 1"
No. Dibujo	Cantidad	Denominación		Material	Medidas en bruto
El presente dibujo constituye secreto industrial y no puede ser reproducido sin autorización escrita		Acot. / tol. mm + 0.3 - 0.3	Objeto CONCENTRADOR SOLAR TIPO PARABOLICO		FACULTAD DE INGENIERIA UNAM
		Elaboro Rosa María González	Aprobó Armando Rojas Morin Fecha 10/03/2014		



CSTP-04	03	POSTE	PTR DE ALUMINIO	5/32 X 1/2"
No. Dibujo	Cantidad	Denominación	Material	Medidas en bruto
Acot. / tol. mm	Objeto CONCENTRADOR SOLAR TIPO PARABOLICO			FACULTAD DE INGENIERIA UNAM
	Elaboro Rosa María González	Aprobó Armando Rojas Morin		