

# **UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**INGENIERÍA EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

Tesis de Licenciatura

***Diseño y Construcción de un Captador Solar de Canal Parabólico***

Presenta:

**Josué Salomón Calam Chuc**

Director de Tesis:

**Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar**

**Chetumal Quintana Roo Noviembre de 2010**

*A mis padres*

*Olegario Calam Montejo*

*María Antoña Chuc Puch*

*A mis hermanos*

*Emmanuel, Moíces, Gaby, Rosy y Ruty*

*Al que es y será siempre el amor de mi vida*

*Angelica M. Chí Rivas*

*Gracias por su apoyo incondicional*

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi asesor de tesis al Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar, por su apoyo incondicional, paciencia y ayuda en la elaboración de esta tesis.

Gracias al Dr. Oscar Jaramillo Salgado por sus críticas y comentarios en la revisión de esta tesis.

Agradezco al Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago por su ayuda en las dudas que se presentaron en la tesis.

Agradezco al M.C. Roberto Acosta Olea, por los apoyos otorgados y por haber sido mi asesor de la carrera, por sus consejos y haber incursionado en mí en el área de energías renovables.

Agradezco al Ing. Set Jubal Castillo por las facilidades en préstamo de herramientas.

Un agradecimiento muy especial a mis amigos que estuvieron en todo momento apoyándome a: Julio, Freddy, Jorge, Gabriel, Marvin, Bety, Ruby, Giany, Nancy, Karen y a todos mis amigos en general, gracias por estar pendientes, sin ustedes no se que hubiera hecho.

Agradezco al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) por la beca otorgada para la realización de la tesis, bajo el proyecto “Colectores solares de canal parabólico para calor de procesos industriales”.

Este trabajo fue parcialmente financiado en la convocatoria 2010 “Apoyo a la titulación”, de la División de Ciencias e Ingeniería bajo el proyecto “Diseño y construcción de un colector solar de canal parabólico de mediana temperatura (80 °C a 250 °C).

Es imposible nombrar aquí a todas las personas a las que tengo que estar agradecido. Por eso, esta última línea está dedicada a todas esas personas cuyos nombres no he mencionado. Gracias, muchas gracias.

## Contenido

Introducción.....	9
1 Antecedentes.....	10
1.1. Energía Solar.....	10
1.2.- Tipos y clasificación de los captadores solares.....	20
1.2.1.- Captadores estacionarios y sus componentes.....	23
1.2.2.- Captadores con sistema de seguimiento solar.....	28
1.2.3.- Tecnología de captadores de canal parabólico y aplicaciones actuales.....	33
2 Antecedentes.....	46
2.1 Geometría Solar.....	46
2.1.1 Conceptos generales.....	46
2.1.2 Posicionamiento del captador en la superficie terrestre.....	53
2.1.3 Posición relativa del Sol respecto al captador: ángulo de incidencia.....	53
2.1.4 Ángulo de incidencia de un captador cilindro parabólico.....	54
2.1.5 Imagen linear de los concentradores.....	56
2.2 Parámetros de diseño del captador solar de canal parabólico.....	58
2.3 Trazado de Rayos.....	60
3 Análisis térmico del CCP.....	64
3.1 Análisis óptico.....	64
3.2 Análisis Térmico.....	68
3.3. Análisis de la Segunda Ley.....	71
3.4 Razón mínima de generación de entropía.....	74
3.5 Temperatura optima del captador.....	75
4.1 Introducción.....	79
4.2 Parámetros de Diseño del Captador Solar.....	79
4.3 Modelado en MEF (Método de Elementos Finitos) CCP.....	82
4.4 Resultados del modelado MEF.....	84
4.5 Construcción del captador.....	85
4.5.1 Maquinado de las piezas componentes del CCP en CAM.....	85
5.1 Conclusiones.....	89
5.2 Trabajos Futuros.....	89
APÉNDICE A Hoja de cálculo para determinar la abertura del CCP.....	91
APÉNDICE B: Esfuerzo de Von Mises.....	92

APÉNCICE C: Planos técnicos de los elementos componentes del Captador.....	93
APÉNDICE D: Imágenes de resultados en la simulación en ALGOR .....	101

## Índice de figuras y tablas

Figura 1. 1 Arquímedes quemando naves mediante espejos que concentraban la luz solar.	12
Figura 1. 2 Horno de Mouchot (7).....	12
Figura 1. 3 Central solar de Pifre de 1878 actuando sobre una presa de imprenta (7).....	13
Figura 1. 4 Captador solar de Ericsson de 1883 utilizando un cilindro parabólico para enfocar la radiación en un tubo absorbente montado sobre el espejo. (7).....	13
Figura 1. 5 Captador Axicon de 33 pies; la caldera está suspendida en el centro y el mecanismo conductor en la parte izquierda (7).....	14
Figura 1. 6 Horno solar construido por el Himalaya para fundir metales (7).....	14
Figura 1. 7 Planta de Meadi (Egipto) para el bombeo de agua con vapor (7).....	15
Figura 1. 8 Vivienda con captador solar, 1938 (7).....	15
Figura 1. 9 Planta solar de 1 kW, II-UNAM (19).....	20
Figura 1. 10 Clasificación de las tecnologías termosolares.....	22
Figura 1. 11 Captador solar plano (6).....	24
Figura 1. 12 Captador parabólico compuesto (6).....	25
Figura 1. 13 Esquema de tubos evacuados (27).....	25
Figura 1. 14 Esquema de una imagen de tubo evacuado (27).....	26
Figura 1. 15 Esquema e imagen de un tubo evacuado de flujo directo (27).....	27
Figura 1. 16 Esquema e imagen de un tubo evacuado Heat Pipe (27).....	28
Figura 1. 17 a) Concentrador solar tipo Fresnel y b) concentrador solar lineal Fresnel del tipo compacto (32).....	30
Figura 1. 18 Captador de canal parabólico (33).....	30
Figura 1. 19 Captador solar de plato parabólico (33).....	32
Figura 1. 20 Funcionamiento de la Torre Central o Campo de Heliostatos (33).....	32
Figura 1. 21 a) Orientación Norte-Sur, b) orientación Este-Oeste (39).....	41
Figura 1. 22 Diferentes tipos de mecanismos de accionamiento, a) motor eléctrico con reductora, b) mecanismo hidráulico.....	42
Figura 2. 1 Trayectoria aparente del Sol alrededor de la Tierra y parámetros característicos asociados.....	47
Figura 2. 2 Coordenadas horarias y horizontales para el posicionamiento del Sol.....	50
Figura 2. 3 Espectro electromagnético (5).....	51
Figura 2. 4 Ángulo de incidencia de un captador cilindro parabólico.....	55
Figura 2. 5 Sección de un concentrador lineal parabólico.....	56
Figura 2. 6 Dimensión de la imagen de un concentrador lineal.....	57
Figura 2. 7 Abertura de la parábola.....	58
Figura 2. 8 Diagrama de rayos para $w$ el ángulo sólido $2\alpha$ del Sol con desviación de $16'$ para mostrar el origen del volumen focal elipsoidal.....	61
Figura 2. 9 Trazado de rayos reflejados, con una apertura de $W_a = 1.187$ m, distancia focal de $0.716$ m y un diámetro aproximado de $0.00782$ m.....	62
Figura 3. 1 Razón de concentración local en el receptor del CCP.....	70
Figura 3. 2 Mejor representación del LCR del captador con el receptor con un diámetro de $22\text{mm}$ y un ángulo de borde de $90^\circ$ .....	70
Figura 3. 3 Secciones nodales y longitudinales del receptor.....	71

Figura 3. 4 Modelo de un captador concentrador de imagen. ....	72
Figura 3. 5 Diagrama de flujo de exergía. ....	74
Figura 3. 6 Entropía generada y temperatura óptima respecto a la razón de concentración del captador. ....	77
Figura 4. 1 Diseño del CCP realizado en Solid-Edge V.20.....	80
Figura 4. 2 Imagen del captador con el centro de masa (a), Soporte del captador con el pivote ubicado en el centro de masa de la estructura (b).....	81
Figura 4. 3 Colocación de la lámina de aluminio reflejante.....	81
Figura 4. 4 Ensamble final del CCP de 45°.....	82
Figura 4. 5 Detalle de la unión entre el tubo absorbedor y la cubierta de vidrio.....	82
Figura 4. 6 Condiciones de frontera para cargas de torsión. ....	83
Figura 4. 7 Condiciones de frontera para cargas laterales.....	84
Figura 4. 8 Condiciones de frontera para cargas frontales. ....	84
Figura 4. 9 Sistema de sujeción de las costillas del captador.....	86
Figura 4. 10 Modelo CAD y condiciones de frontera para el análisis por esfuerzos de torsión.....	87
Figura 4. 11 Prototipo del CCP de 45 ° de ángulo de borde. ....	87
Figura A. 1 Plano Técnico del soporte del centro de masa del CCP.....	93
Figura A. 2 Plano técnico del corcho utilizado en el diseño del CCP.....	94
Figura A. 3 Plano técnico del brazo soporte del CCP.....	95
Figura A. 4 Plano técnico de los tubos que se utilizaron como base en el CCP.....	96
Figura A. 5 Plano técnico de la costilla del CCP.....	97
Figura A. 6 Plano técnico de la cubierta de vidrio del CCP.....	98
Figura A. 7 Plano técnico del tubo absorbedor.....	99
Figura A. 8 Plano técnico de la lámina.....	100
Figura A. 9 Resultado FEA del CCP sujeto a carga frontal.....	101
Figura A. 10 Resultados FEA del colector sujeto a cargas laterales.....	101
Figura A. 11 Resultados FEA del CCP sujeto a cargas de torsión.....	102
Tabla 1. 1 Aplicación de los CCP en los diferentes sectores industriales (35).....	34
Tabla 1. 2 Características principales de los CCP.....	36
Tabla 1. 3 Parámetros de los principales CCP.....	37
Tabla 1. 4 Ventajas y desventajas de los diferentes materiales de los reflectores.....	38
Tabla 1. 5 Proyectos que se han llevado a cabo para el mejoramiento de receptores.....	40
Tabla 1. 6 Características más importantes de las SEGS.....	43
Tabla 2. 1 Valores teóricos del concentrador, sin tomar en consideración errores ópticos..	59
Tabla 3. 1 Temperaturas óptimas para varios tipos de captadores concentradores.....	76
Tabla 4. 1 Resultados obtenidos en el análisis MEF realizado al CCP.....	85

## Nomenclatura

$A_a$ :	área de abertura del concentrador de un colector solar ( $m^2$ )	$Q^*$ :	radiación incidente en el colector (W)
$A_c$ :	área del colector ( $m^2$ )	$Q_o$ :	razón de energía que se pierde en el ambiente (W)
$A_f$ :	factor geométrico del colector	s:	entropía específica (J/kg K)
$A_r$ :	área de abertura del receptor de un colector solar ( $m^2$ )	S:	energía solar absorbida ( $kJ/m^2$ )
cp:	calor específico a presión constante (J/kg-K)	$S_{gen}$ :	entropía generada (J/K)
C:	razón de concentración geométrica (adimensional)	T:	temperatura absoluta (K)
$C_{max}$ :	concentración máxima (adimensional)	$T_a$ :	temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ )
D:	diámetro externo del tubo absorbedor (m)	$T_b$ :	temperatura local base ( $^{\circ}C$ )
$D_i$ :	diámetro interior del tubo (m)	$T_f$ :	temperatura local del fluido
$D_o$ :	diámetro exterior del tubo (m)	$T_i$ :	temperatura del fluido de trabajo a la entrada del absorbedor ( $^{\circ}C$ )
$E_{x,in}$ :	exergía de entrada (W)	$T_o$ :	temperatura del fluido de trabajo a la salida del absorbedor ( $^{\circ}C$ )
$E_{x,out}$ :	exergía de salida (W)	$T_p$ :	temperatura promedio de la superficie absorbidora ( $^{\circ}C$ ), temperatura de estancamiento ( $^{\circ}C$ )
E:	ecuación del tiempo ( $W/m^2$ )	$T_r$ :	temperatura del absorbedor ( $^{\circ}C$ ), temperatura del receptor (K)
f:	distancia focal (m)	$T_{fi}$ :	temperatura del fluido a la entrada del colector ( $^{\circ}C$ )
$F'$ :	factor de eficiencia del colector	$T^*$ :	temperatura aparente del sol como fuente de exergía ( $\sim 4500$ K)
$F_R$ :	factor de remoción de calor	U:	coeficiente de transferencia de calor global
G:	irradiación, flujo de energía radiante que incide sobre una superficie ( $W/m^2$ )	$U_L$ :	coeficiente global de pérdidas de calor del colector solar ( $W/^{\circ}C$ )
$G_b$ :	irradiación directa ( $W/m^2$ )	$U_r$ :	coeficiente de transferencia de calor receptor-ambiente, basado en $A_r$ ( $W/m^2K$ )
$G_d$ :	irradiación difusa ( $W/m^2$ )	$W_a$ :	apertura del colector (m)
$G_o$ :	irradiación extraterrestre ( $W/m^2$ )	$\alpha$ :	absortividad de una superficie (adimensional)
$G_{on}$ :	flujo de radiación solar extraterrestre ( $W/m^2$ )	$\varepsilon$ :	emisividad de una superficie (adimensional)
$G_{sc}$ :	constante solar ( $1.353$ kW/ $m^2$ )	$\theta$ :	ángulo de incidencia ( $^{\circ}$ )
h:	entalpía del fluido de trabajo (J/kg)	$\varphi_r$ :	ángulo de borde ( $^{\circ}$ )
h:	coeficiente de transferencia de calor (constante de plank's)	$\rho$ :	reflectividad de una superficie (adimensional)
$h_s$ :	altura solar o ángulo de elevación del Sol ( $^{\circ}$ )	$\sigma$ :	constante de Stefan-Boltzmann ( $= 5.67 \times 10^{-8}$ ( $W/m^2 \cdot K^4$ ))
$h_{fi}$ :	coeficiente de transferencia de calor dentro del tubo ( $W/m^2^{\circ}C$ )	$\tau$ :	transmisividad de una superficie (adimensional)
$h_p$ :	altura de la parábola (m)	f:	distancia focal (m)
$I_b$ :	cantidad de radiación solar	$\varphi$ :	latitud del lugar
k:	conductividad térmica ( $W/m-K$ )	$\lambda$ :	longitud del lugar
$L_{Ref}$ :	longitud geográfica del meridiano de referencia ( $^{\circ}$ )	$\delta$ :	declinación solar ( $^{\circ}$ )
$L_{loc}$ :	longitud del meridiano local ( $^{\circ}$ )	$\beta$ :	inclinación de la superficie sobre la horizontal
m:	flujo masico del fluido (kg/s)	$\omega_s$ :	ángulo horario ( $^{\circ}$ )
$q^*$ :	radiación que recibe intercepta el receptor ( $W/m^2$ )		
$q_u$ :	razón de energía útil entregada por el colector (W)		
$q_u$ :	Energía útil ganada por unidad de longitud (J/m)		
$q_o^*$ :	radiación percibida por el receptor ( $W/m^2$ )		
Q:	razón de transferencia de calor a la salida (W)		

# CAPITULO I

---

## **Introducción**

La energía ha sido factor fundamental en el progreso económico de toda nación, desde la invención de la máquina de vapor a partir del siglo XVIII en Gran Bretaña, se produjo la capacidad de transformar el calor en tracción mecánica, incrementando la capacidad productiva de las primeras sociedades industriales y que durante el siglo XIX se extendió al resto de Europa y a América del Norte, teniendo como combustible básico el carbón.

Esta transformación energética fue seguida unos cien años más tarde, por el uso generalizado de la energía eléctrica cuyos beneficios no solo aumentaron la versatilidad de las fuentes energéticas, sino que dio un gran impulso a los niveles de vida de las sociedades occidentales. Sin embargo, el uso del carbón fue disminuyendo cuando se comienza a utilizar un nuevo combustible fósil, el petróleo, que modificaría radicalmente la estructura productiva de una buena parte de las economías del mundo, puesto que este combustible y sus derivados fomentaron el perfeccionamiento de los motores y en general de los medios

de transportes como la aparición del automóvil, la aviación y el desarrollo de la industrias químicas (1).

Así bien, la energía y el desarrollo mantienen una estrecha relación y una afirmación de lo anterior es que en la actualidad la humanidad consume cincuenta veces más energía que hace un siglo. Sin embargo las dificultades que se presentan como la escasez, la obtención y el precio del petróleo, están generando una inestabilidad en la base productiva y en la sociedad en general, y de manera particular de nuestro país. En México, desde 1984 las reservas probadas de hidrocarburos vienen disminuyendo y hoy suman 14.7 miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente a 9.2 años de producción, a sus niveles de 2007 (2).

Un problema importante del uso de los combustibles fósiles es que ocasionan un daño irreversible al medio ambiente, lo que está ocasionando cambios climáticos en todo el orbe.

Por tanto, es momento de reflexionar y actuar proponiendo el uso de fuentes alternas de energía, así como la mejora de las tecnologías para conseguir sustentabilidad ambiental.

## **1 Antecedentes**

Una de las fuentes renovable de energía más importantes es la energía solar, que garantiza energía limpia para los próximos 6.000 millones de años. El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la Historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades, si se aprovecha de forma racional la luz que continuamente derrama sobre el planeta (3).

### **1.1. Energía Solar**

Es la energía que proporciona el Sol a través de sus radiaciones y que se irradia, directamente o de modo difuso, en la atmosfera; está constituida simplemente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra. México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo. Dentro de las principales aplicaciones de la energía solar se encuentra:

- **Lumínica.** Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un captador solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple. (4)
- **Térmica.** Consiste en utilizar la radiación del Sol para calentar un fluido que, en función de su temperatura, se emplea para producir agua caliente e incluso vapor. (5)
- **Fotovoltaica.** Se llama "fotovoltaica" la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico. (4)

Para el aprovechamiento de energía, el Sol es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, con un diámetro de  $1.3 \times 10^9$  m, localizado a una distancia media de 150 millones de kilómetros respecto de la Tierra, distancia conocida como unidad astronómica (UA) y tiene una vida estimada de varios miles de millones de años, por lo cual tenemos asegurado su funcionamiento seguro y sin ningún gasto de inversión ni mantenimiento.

Se estima que la temperatura en el interior del Sol debe ser del orden de  $1.36 \times 10^7$  K, pero en la superficie externa del Sol, la temperatura "efectiva de cuerpo negro" es de 5762 K.

La energía solar captada por la Tierra, y posteriormente disipada como radiación infrarroja, determina el calentamiento o enfriamiento del aire, la cantidad de agua evaporada o precipitada, y las diferencias de presión que provocan vientos y brisas. Así la cantidad de energía solar y los gases disueltos en la atmósfera terrestre determinan el clima de nuestro planeta.

El área de la energía solar que nos compete en este trabajo es la energía solar fototérmica, específicamente la concentración solar. A continuación, se presenta una breve descripción del avance de la energía solar térmica hasta nuestros días.

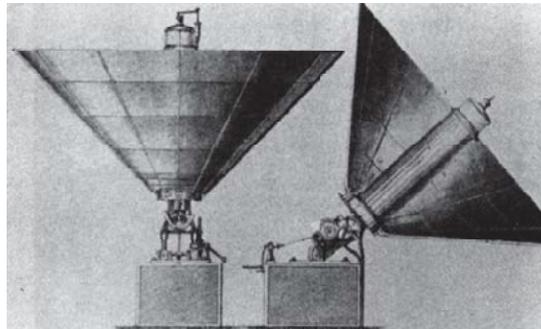
La idea de la utilización de captadores de energía solar para aprovechar la energía del Sol se registra desde los tiempos prehistóricos en el siglo III a.C., el filósofo griego Arquímedes utilizó espejos solares para incendiar la flota de Roma que atacaba la ciudad de Siracusa (6).



**Figura 1. 1** Arquímedes quemando naves mediante espejos que concentraban la luz solar.

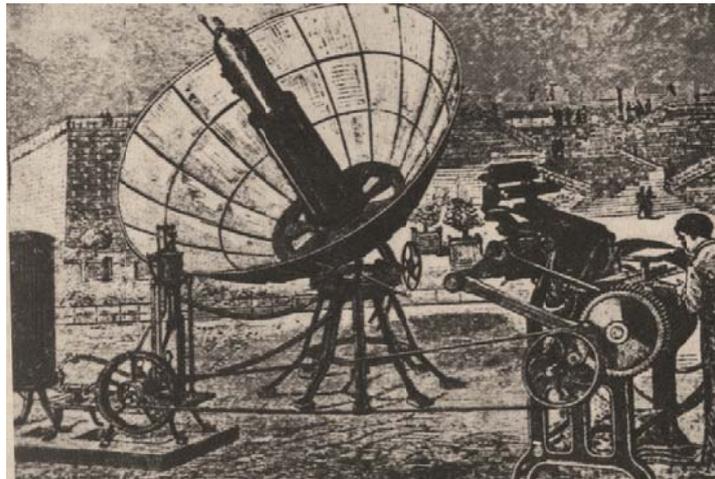
Athanasius Kicher (1601-1680) hizo algunas experiencias para prender fuego a una pila de madera situada a cierta distancia, con el objeto de ver si la historia de Arquímedes tenía alguna validez científica. Las lentes utilizadas para hacer arder habían sido sin duda los medios principales de utilizar la energía solar en los siglos intermedios, pero una vez más la curiosidad del hombre le empujó a buscar la respuesta a cuestiones más importantes. (7)

En 1875, el francés Mouchot realizó un captador cónico de 18.6 m<sup>2</sup> de área de abertura, destinado a la producción de vapor y que fue presentado en París. Este captador tuvo un accidente como consecuencia de haberse quedado sin agua. (7)



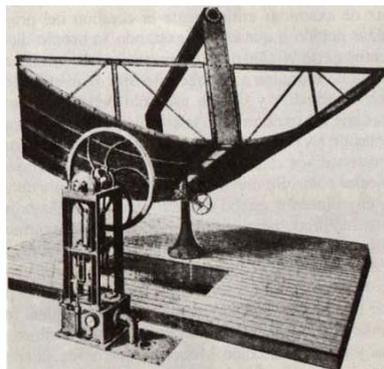
**Figura 1. 2** Horno de Mouchot (7)

Por otra parte, los captadores solares de Pifre eran reflectores parabólicos formados por muchos espejos pequeños; tenían un aspecto muy semejante a los conos truncados de Mouchot. En la exposición de París de 1878, Pifre exhibió una de sus máquinas solares haciendo funcionar una prensa de imprenta. Había esperado encontrar muchos compradores para su máquina con este experimento, pero sin duda se sintió defraudado al encontrar muchos curiosos pero pocos inversionistas interesados en su invención. Posteriormente, en 1882 montó la máquina en los jardines del Palacio de las Tullerías, donde de nuevo hizo demostraciones con una prensa de imprenta. (7)



**Figura 1. 3** Central solar de Pifre de 1878 actuando sobre una presa de imprenta (7)

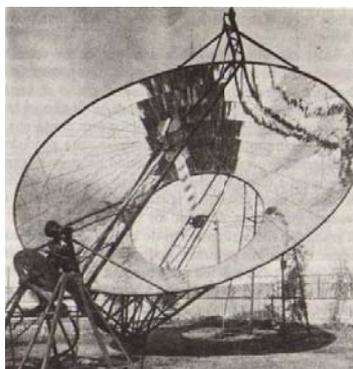
John Ericsson, adquirió gran fama durante la guerra de secesión de EE.UU. por su participación en el desarrollo del barco de guerra *Monitor*, también prestó atención a los motores de energía solar entre 1871 y 1884. Inventó así el ciclo Ericsson del motor de aire caliente para la conversión del calor solar en fuerza motriz, utilizando un captador en forma de paraboloide. Su modelo de 1883, uno de los siete que construyó, utilizaba una superficie reflectora cilíndrica con forma parabólica. Esta forma la adquirirían unas láminas delgadas de vidrio, plateadas por su cara inferior al sujetarlas a unas nervaduras de hierro. El dispositivo pivotaba alrededor de un eje vertical para seguir el sol. Según su inventor producía 0.7 kW por cada 9.3 m<sup>2</sup> de superficie reflectora. (7)



**Figura 1. 4** Captador solar de Ericsson de 1883 utilizando un cilindro parabólico para enfocar la radiación en un tubo absorbente montado sobre el espejo. (7)

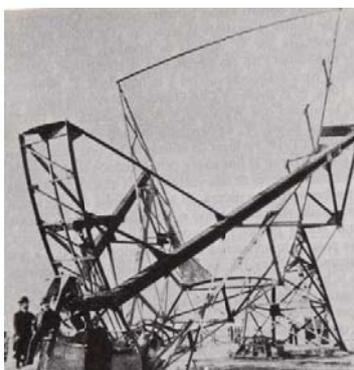
Aubrey Eneas, originario de Boston y creador de la empresa *Solar Motor Company of Boston*, basándose y mejorando el diseño de Mouchot construyó, en 1899, un sistema con un diámetro de 10 metros en la boca del reflector, que estaba formado por más de 1.800

pequeños espejos de vidrio plateado. Diversos mecanismos y artefactos de relojería permitían orientar el espejo hacia el Sol a lo largo del día y de las estaciones, sin excesivo esfuerzo. El conjunto pesaba más de 4 toneladas. (8)



**Figura 1. 5** Captador Axicon de 33 pies; la caldera está suspendida en el centro y el mecanismo conductor en la parte izquierda (7)

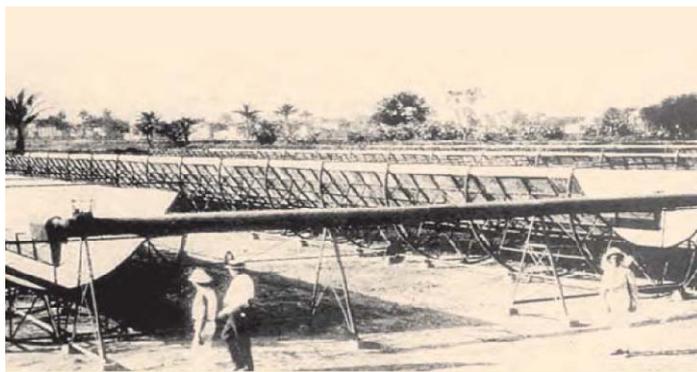
El científico e inventor portugués Mario Antonio Gómez, o Padre Himalaya fue uno de los pioneros en la investigación de la energía solar. Su mayor aportación fue el pirelióforo, un dispositivo capaz de reflejar el calor del Sol mediante una superficie curvada de unos 80 m<sup>2</sup> compuesta por miles de espejos, concentrándolo en un punto hasta obtener temperaturas de 3500 °C, suficiente para fundir metales y rocas. Esta instalación fue la estrella de la Expo de San Luis (1904), en la que ganó dos medallas de oro. (9)



**Figura 1. 6** Horno solar construido por el Himalaya para fundir metales (7)

En 1912 Frank Shuman, en colaboración con C.V. Boys, empezó a construir la planta solar de bombeo más grande del mundo en Egipto. La caldera original explotó pero fue sustituida en 1913 por otra más resistente. El sistema montado en Meadi (Egipto) empezó a funcionar en 1913 utilizando la máquina desmontada del sistema que construyó en 1911 en Tacony (cerca de Filadelfia). La nueva instalación de Meadi discrepaba considerablemente de la

planta simple de Tacony, utilizando largos cilindros parabólicos para enfocar la luz sobre un tubo absorbente largo. Cada cilindro tenía 62 m de largo y el área total de los diversos bancos de cilindro era 1200 m<sup>2</sup>. Los reflectores cilíndricos se montaron sobre horquillas circulares accionadas simultáneamente para mantener al Sol enfocado sobre el tubo absorbedor. (10)



**Figura 1. 7** Planta de Meadi (Egipto) para el bombeo de agua con vapor (7)

En 1938, un equipo de ingenieros del MIT (*Massachusetts Institute of Technology, USA*), dirigidos por Hoyt Hottel, iniciaron dos décadas de investigación en torno a la aplicación de captadores solares para calentamiento de viviendas. Diseñaron y construyeron una vivienda con captadores solares en el tejado, que almacenaba la energía del Sol en forma de agua caliente en un depósito subterráneo de 65.000 litros, situado en el subsuelo de la misma. La segunda guerra mundial interrumpió este trabajo (11).



**Figura 1. 8** Vivienda con captador solar, 1938 (7)

El resurgimiento de la energía solar como una disciplina científica se produce en 1953, cuando Farrington Daniels organiza en la Universidad de Wisconsin un Simposio Internacional sobre la utilización de la Energía Solar, auspiciado por la NSF (National Science

Foundation) de Estados Unidos. Dos años más tarde, en Tucson (Arizona), se celebró otro simposio y se formó la Asociación para la Aplicación de la Energía Solar. Como consecuencia de estos simposios se creó la revista “Solar Energy”, de muy alto nivel científico, que edita la Sociedad Internacional de la Energía Solar con sede en Australia, entidad que sucedió a la asociación para la aplicación de la energía solar. (12)

En 2005, Michel Brooks y Thomas Harms (13) diseñaron, construyeron y pusieron a prueba un captador solar de canal parabólico para la aplicación en ciudades en vía de desarrollo, el cual contaba con una longitud de 5 m, una apertura de 1.5 m y un ángulo de borde de 82.2°. La superficie estaba constituida de hojas de acero inoxidable cubiertas con una superficie reflectiva de papel aluminio de la marca 3M (SA-85). Dos receptores fueron fabricados para la prueba comparativa, incluyendo uno con envoltorio de vidrio y evacuado. El fluido de transferencia de calor era agua, circulada en 0.3 m<sup>3</sup>/h, para asegurar condiciones turbulentas en el amortiguador y una subida de temperatura razonable para los niveles previstos de irradiación. En 0.3 m<sup>3</sup>/h las constantes de tiempo de enfriamiento eran 30.5s y 28.6s para los receptores sin blindaje y blindados de vidrio respectivamente. Los valores máximos de 55.2 % y 53.8 % fueron obtenidos para los receptores sin blindaje y blindaje de vidrio respectivamente. Los resultados del ángulo de aceptación para los receptores sin blindaje y blindaje de vidrio eran 0.43° y 0.52°. En ambos casos la exactitud de seguimiento angular del PTSC fue satisfactoria, asegurándose de que el captador siempre funcione dentro del 2% de su eficiencia óptima.

En el 2001, Figueroa y Barffuson (14), diseñaron y construyeron un sistema de concentración solar de canal parabólico para su uso en desalación de agua de mar controlado por computadora. Dicho sistema consta básicamente del concentrador solar de canal parabólico montado en una estructura metálica, con dos soportes en sus extremos, que permite movimiento de 180° y puede seguir fácilmente el movimiento relativo del Sol en orientación norte-sur y este-oeste, alrededor de su eje de giro. El diseño y construcción del concentrador de canal parabólico presenta las siguientes características: tiene un área de 9.0 m<sup>2</sup> con 252 cm de apertura y 360 cm de largo con un foco de 64 cm, un diámetro mínimo del tubo receptor de 5cm con una concentración geométrica de 16 soles y un ángulo de apertura de 90° con una reflectividad del espejo de 65% aproximadamente. La superficie

reflectora está formada con lámina de acero inoxidable calibre 26 de acabado tipo espejo colocada con remaches en un marco de fibra de vidrio. El tiempo necesario para que el agua que se encuentra en el interior del tubo de dos pulgadas logre la temperatura de ebullición de 96 grados centígrados es de alrededor de 13 minutos y se presenta una temperatura de alrededor de los 110 grados centígrados en alrededor de 19 minutos, se tiene que el sistema en su totalidad es capaz de producir 890 litros de agua diarios.

En el 2004, Flores y Almanza (15), realizaron el análisis del sistema de concentrador de canal parabólico para la generación directa de vapor con receptores bimetálicos, la superficie reflectiva era de papel aluminio de la marca de 3m (SA-85P) con una reflexión de 85% aproximadamente, la longitud bimetálica del receptor fue de 3m con un diámetro interno 31.7 milímetros y un grosor de 2.6 milímetros, con un grosor de la pared de 2/3 para el cobre y 1/3 para el acero; esta proporción fue tomada de un estudio teórico anteriormente realizado. Para la superficie del receptor fue utilizada una superficie selectiva comercial para los usos en la energía solar, SOLKOTE Hi/Sorb II, con una emisividad de 0.28 a 0.49 y una absorptividad a partir de 0.88 a 0.94, para la cubierta del receptor se utilizó un tubo de cristal de Pyrex.

Teniendo como resultado que el comportamiento y la desviación térmica del receptor bimetálico es absolutamente estable en DSG, para obtener los usos para las energías bajas, donde la conductividad térmica del cobre causa la homogenización de la temperatura de la pared del receptor, eliminando los altos gradientes térmicos que aparecen internamente en los receptores de acero. Además, la capa de acero del receptor bimetálico mejora la resistencia mecánica a la deformación de tal receptor, reduciendo la desviación a la cual se pone bajo tensión térmica en la pared del tubo.

La desviación térmica se ha asociado al gradiente térmico producido por el flujo bifásico estratificado formado durante la ebullición del agua. En plantas de la energía baja a partir de 1 KWe hasta el 60 kWe, el flujo es bajo y no hay manera de evitar la estratificación, así que el receptor bimetálico se puede utilizar para conseguir DSG bajo cualquier condición termohidráulica.

En lo que respecta a las investigaciones realizadas en México, se tienen reportes que a un año de haberse iniciado la lucha revolucionaria en nuestro país, en 1911, el doctor de origen

polaco, Ladislao Gorczyński realizó las primeras mediciones actinométricas (relativas a las radiaciones visibles), continuándolas hasta 1917. Posteriormente, personal del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dirigidos por el mismo doctor Gorczyński, realizaron un segundo periodo de mediciones (1923-1928). Los datos de dichas mediciones fueron publicados por el SMN en boletines intitulados como “Serie del observatorio astronómico” entre los años 1926 y 1928. Estos datos consistían principalmente de la radiación solar directa efectuados con un periheliómetro de compensación eléctrica. (16)

En 1973 se produjeron eventos importantes en el mercado del petróleo en el mundo, que se manifestaron en los años posteriores en un encarecimiento notable de esta fuente de energía no renovable, resurgieron las preocupaciones sobre el suministro y precio futuro de la energía. Resultado de esto, los países consumidores, enfrentados a los altos costos del petróleo y a una dependencia casi total de este energético, tuvieron que modificar costumbres y buscar opciones para reducir su dependencia de fuentes no renovables.

Entre las opciones para reducir la dependencia del petróleo como principal energético, se reconsideró el mejor aprovechamiento de la energía solar y sus diversas manifestaciones secundarias tales como la energía eólica, hidráulica y las diversas formas de biomasa; es decir, las llamadas fuentes renovables de energía.

Así, hacia mediados de los años setenta, múltiples centros de investigación en el mundo retomaron viejos estudios, organizaron grupos de trabajo e iniciaron la construcción y operación de prototipos de equipos y sistemas operados con fuentes renovables de energía. Asimismo, se establecieron diversas empresas para aprovechar las oportunidades que se ofrecían para el desarrollo de estas tecnologías, dados los altos precios de las energías convencionales. (17)

Se sabe que los primeros captadores solares planos comerciales de fabricación mexicana aparecieron en la década de 1940, concediéndose una patente sobre esta tecnología desarrollado por Don Pantaleón Orozco Carricarte en la ciudad de Guadalajara, Jalisco. Fue precisamente en Guadalajara donde se instalaron las primeras fábricas o talleres donde se manufacturaron los primeros calentadores solares para uso doméstico. (18)

En 1972 se iniciaron los estudios para el aprovechamiento de la energía solar en el centro de investigaciones de Materiales, hoy Instituto de Investigación de Materiales (IIM) de la

UNAM, con lo que comenzó a formarse uno de los grupos de investigación más importantes en esta área. El primer banco de pruebas para la caracterización de calentadores planos se instaló en 1978 en el IIM-UNAM, en donde quedó oficialmente constituido su departamento de Energía Solar. En esas fechas, el uso de este tipo de captadores no era muy difundido, pero se comenzaba a tomar mayor conciencia de la necesidad de uso de fuentes alternas de energía. Entre los trabajos desarrollados por el IIM-UNAM se encuentran los siguientes:

*Calentadores solares para baños públicos.*

En el Estado de Tlaxcala (Almanza y Muñoz, 1994) se instalaron en 1979 baños públicos con agua caliente, cuya fuente de energía era solar, en sustitución de un baño Temascal cuyo uso de leña era de aproximadamente 30 kg por vez. Los calentadores que se instalaron, son los más eficientes que se han desarrollado en el Instituto, construidos con tubos de cobre soldados a una lámina del mismo material. La temperatura que alcanzan estos dispositivos es de 50 a 80 °C dependiendo de la época del año y de las condiciones ambientales; también se tienen instalados calentadores solares de agua en los baños de los trabajadores. Un sistema más sofisticado es el de tubos evacuados donde el tubo absorbedor va al vacío. Como un dispositivo especial se desarrolló un sistema absorbedor al alto vacío para concentradores solares tipo canal parabólico.

*Plantas Termo solares*

El aspecto de Plantas Termo solares se inició en 1978 [17]; la primera planta experimental fue de 1kW. Posteriormente se desarrolló una planta termo solar de canal parabólico la cual es la más grande en Latinoamérica, cuya área de captación en sus orígenes (1982) era de 548 m<sup>2</sup>, pero debido a problemas de costos de mantenimiento se redujo a la mitad (1998). En ella se llevaron a cabo pruebas de diferentes tipos, tales como diferentes configuraciones para operación del campo solar (19). En apartado 1.2.3 se hace una breve descripción de las aplicaciones actuales de las plantas termo-solares a nivel internacional.



**Figura 1. 9** Planta solar de 1 kW, II-UNAM (19)

## **1.2.- Tipos y clasificación de los captadores solares**

Una vez revisada la literatura referente a captadores solares hasta la fecha, se presenta una clasificación de los mismos. Existen dos tipos principales de sistemas de aprovechamiento de la energía solar: los fotovoltaicos y los fototérmicos. Los primeros están basados en el efecto fotovoltaico, que permite la conversión directa de la energía de la radiación solar en energía eléctrica (20). Los segundos, que para efectos de esta tesis se abordan a profundidad, son los que transforman la energía solar en calor, el cual puede luego ser utilizado en una gran variedad de procesos industriales que requieren de altas temperaturas y que para lograrlo es necesario incrementar la intensidad de la energía solar utilizando captadores concentradores cuyo principio fundamental es la interposición de un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (el Sol) y la superficie de absorción capaz de concentrar la radiación incidente sobre una superficie más pequeña que el dispositivo óptico. (21)

Los captadores concentradores únicamente aprovechan la radiación directa del Sol y parte de la radiación difusa, para lograr un aprovechamiento máximo se debe tener a consideración un sistema óptico con un acabado perfecto capaz de mantener sus propiedades por largos periodos de tiempo sin ser deterioradas por el polvo, lluvia y medio ambiente, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos, con el que se pueden lograr temperaturas entre 1500 y 3500°C. (22)

En general, los captadores de concentración solar constan fundamentalmente de tres partes: el concentrador o sistema óptico, el receptor donde se encuentra el absorbedor y un mecanismo de seguimiento para el Sol. (4)

El concentrador o sistema óptico es la parte del captador que envía la radiación al receptor y se puede clasificar en: Reflector o Refractor, Puntuales, Lineales y de No-enfoque y Fijo o Móviles.

El receptor es un elemento del sistema donde la radiación es absorbida y convertida en otra forma de energía (23). Los receptores están constituidos por el absorbedor y en ocasiones por cubiertas y aislantes. Los tipos de receptores pueden ser cóncavos, convexos, planos, hemisféricos, cilíndricos y elípticos.

Para maximizar el aprovechamiento de la radiación solar es necesaria la integración de un seguidor solar por los que podemos encontrar en un solo eje o seguidores en dos ejes.

Independientemente de los componentes que integran un sistema de concentración solar la parte común a todos es el intercambio de calor que transforma la energía radiante procedente del Sol en energía térmica. Los captadores se diferencian en varios aspectos de los intercambiadores de calor convencionales ya que estos llevan a cabo normalmente un intercambio de calor fluido a fluido, con altos valores de transferencia de calor, siendo la radiación un fenómeno poco importante, en contradicción a los captadores solares.

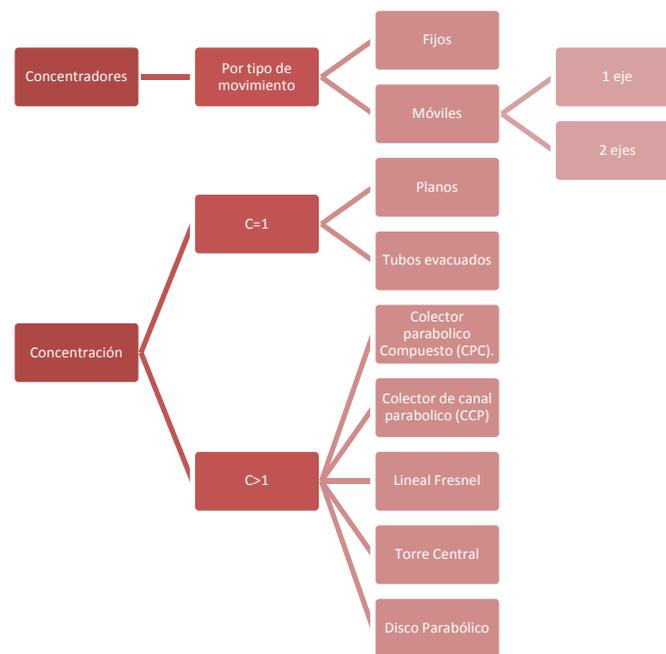
El aprovechamiento térmico de la radiación solar basa la mayoría de sus análisis a través de la clasificación tradicional que distingue entre captadores para aplicaciones de baja, media y alta temperatura (24). Estas dos últimas requieren de un concepto más objetivo puesto que no queda muy clara la frontera entre las aplicaciones de las mismas, con lo que conlleva a un nuevo parámetro, la razón de concentración  $C$ . (4)

Actualmente existen diferentes definiciones de razón de concentración, aunque la habitual es la razón entre el área de la abertura del concentrador respecto al área del receptor, ecuación (1.1)

$$C_{max} = \frac{A_a}{A_r} \quad (1.1)$$

Así para aplicaciones solares de baja temperatura se emplean siempre captadores solares sin concentración, es decir,  $C = 1$ , mientras que en aplicaciones de temperatura más elevada la razón de concentración es  $C > 1$  y depende de los componentes fundamentales del captador solar que integran el sistema de concentración.

Con base en la razón de concentración y componentes mencionados anteriormente se distinguen las siguientes tecnologías termosolares (Figura 1.10):



**Figura 1. 10** Clasificación de las tecnologías termosolares

Entre las características que podemos mencionar de los captadores sin concentración se encuentra:

- Diseñados para aplicaciones que demandan energía a una temperatura relativamente baja hasta 100 °C.
- Aprovechan tanto la radiación directa como la difusa
- No requieren seguir la trayectoria solar.
- Requieren poco mantenimiento y son mucho más simples en términos mecánicos con respecto a los captadores de concentración.

En cuanto a los captadores de concentración, se mencionan las siguientes características:

- Reducen las áreas por donde ocurre pérdidas de calor y se obtienen temperaturas altas (arriba de los 100 °C)
- Deben orientarse continuamente al Sol de manera precisa mediante un mecanismo apropiado.
- Poseen una mayor demanda para procesos industriales que requieren concentración de calor a lo largo de las horas de luz y durante todo el año.

Además de la clasificación de los captadores de acuerdo con su razón de concentración, los captadores solares también se pueden distinguir básicamente por su movimiento ya sea estacionario o con seguimiento al Sol en un eje o dos ejes, a continuación se examinará los captadores estacionarios.

### **1.2.1.- Captadores estacionarios y sus componentes.**

Estos captadores son permanentemente fijos en su posición y no realizan el seguimiento de la trayectoria del Sol. Existen tres tipos de captadores en esta categoría.

1. Captador de Placa plana.
2. Captador parabólico compuesto estacionario
3. Captador de tubo evacuado.

#### ***1.2.1.1.- Captadores de placa plana.***

Un típico captador solar de placa plana se muestra en la figura 1. Los captadores de placa plana son sofisticados invernaderos que atrapan y utilizan el calor del sol para aumentar la temperatura y transmitirla al agua hasta alrededor de los 70 °C.

Estos captadores consisten en una caja herméticamente cerrada con una cubierta de vidrio o algún otro material transparente. En su interior se ubica una placa de absorción la cual está en contacto con unos tubos por los que circula un fluido (agua, aire) que transporta el calor. El vidrio o su equivalente, además de permitir la entrada de la radiación solar hasta la placa absorción, sirven también para minimizar las pérdidas de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente por la parte superior del captador. (25)

El diseño de cada captador de este tipo depende fundamentalmente de la aplicación específica a la cual vaya a destinarse. Este debe ser diferente si por ejemplo se trata de

calentar agua para una alberca (22-30 °C), agua para uso doméstico (40-60 °C) o aire para el acondicionamiento calorífico de edificios (90-100°C).

Este tipo de captadores está usualmente fijo y no necesita seguir al Sol. Para obtener una mayor eficiencia, los captadores deben estar orientados en dirección norte e inclinados en un ángulo igual a la latitud del lugar (puede variar el ángulo según la estación del año). (21)

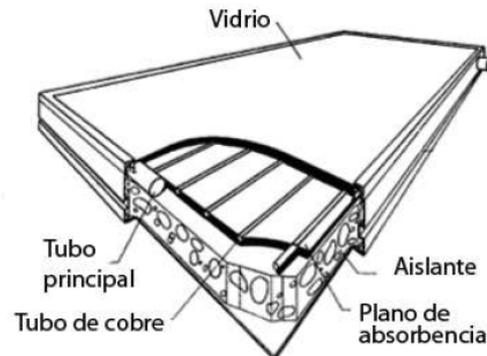


Figura 1. 11 Captador solar plano (6)

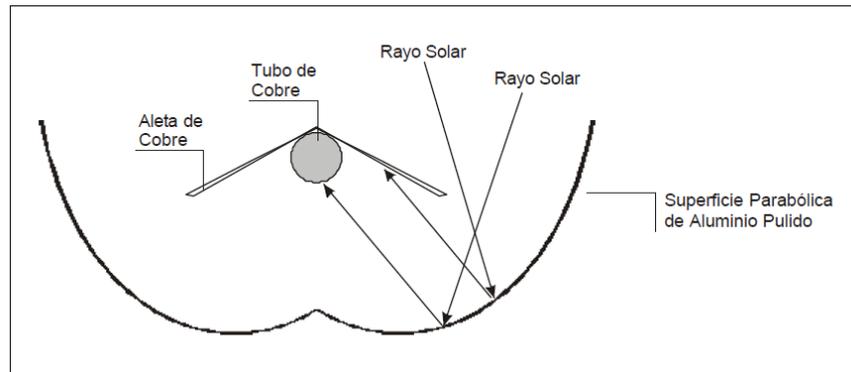
#### 1.2.1.2.- Captador parabólico Compuesto (CPC).

El captador parabólico compuesto (CPC) cuenta con dos superficies parabólicas que tiene como foco el mismo eje lo que permite concentrar en el eje luz que llegue al CPC con una inclinación menor que su ángulo de aceptación, se determina un ángulo de aceptación conveniente o sea que permite captar en el eje la mayor cantidad de luz incidente, combinando adecuadamente diámetro del eje y profundidad de CPC. (26)

Por razones de diseño propias de este tipo de captadores fijos, los ángulos de aceptación en la práctica deben ser amplios. A medida que el ángulo de aceptación se va haciendo pequeño, se hace necesario darle orientación al CPC, además de que la altura que debería tener es demasiado grande y por lo tanto impráctica. Por otro lado, que el ángulo de aceptación sea grande, ofrece tres ventajas muy importantes:

- Permite la operación del concentrador por períodos de tiempo extensos sin necesidad de ajustar su orientación.
- Permite el empleo de superficies reflejantes no muy precisas.
- Permite la captación y concentración de una porción de la radiación difusa.

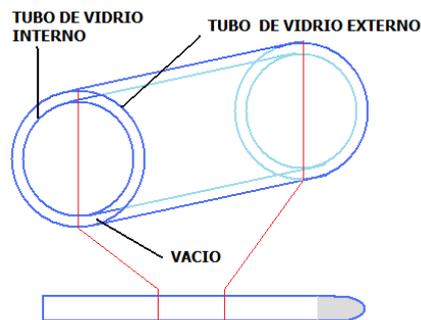
En el eje común del CPC se constituye un tubo de cobre pintado de negro para que el tubo se caliente con la luz en el concentrada, en su interior circula el fluido a ser calentada, la que se hace circular por los tubos mediante una bomba. Con la finalidad de aumentar la cantidad de luz captada que viene con cualquier inclinación es decir luz difusa, se suelda a los tubos de cobre unas aletas convenientemente dispuestas las que también se pintan de negro para convertir en calor la luz incidente.



**Figura 1. 12** Captador parabólico compuesto (6)

### 1.2.1.3.- Captadores de tubo evacuado

Los captadores de tubo evacuado están conformados por dos tubos concéntricos entre los cuales se ha aspirado el aire produciéndose un vacío. En uno de los extremos ambos tubos se unen sellándose el vacío. (27)



**Figura 1. 13** Esquema de tubos evacuados (27)

Debido a la forma cilíndrica de los tubos evacuados, el Sol siempre está impactando a los tubos en un ángulo que es perpendicular a su superficie, esto reduce la refracción y maximiza la cantidad total de radiación solar a la que los captadores están expuestos cada día. El vacío entre los tubos reduce grandemente las pérdidas de calor conductiva y convectiva del interior del tubo. Los tubos son capaces de absorber la energía de los rayos

infrarrojos y ultravioleta que pueden pasar a través de las nubes (28). El viento y las bajas temperaturas también tienen mínimo efecto en la eficiencia de los captadores de tubos evacuados comparados con los captadores solares planos que pueden producir similar cantidad de calor, pero que generalmente solo en tiempos de calor y condiciones soleadas y por ende la cantidad de calor por metro cuadrado proporcionado por el tubo evacuados es mucho mayor que la de los captadores planos.

Así bien los captadores de tubos evacuados vienen integrados con diferentes tipos de absorbedores que determinan los distintos sistemas de los cuales podemos mencionar los siguientes:

➤ Tubos evacuado simples

Este sistema es únicamente utilizado en calentadores solares termosifónicos<sup>1</sup>. Son tubos evacuados ensamblados directamente con el depósito acumulador y que por lo tanto contienen agua.

En la pared interior del tubo evacuado se sitúa una capa de color oscuro de material absorbente. Cuando la radiación solar incide sobre la capa de material absorbente se transforma en calor y eleva la temperatura del agua que está en contacto con él.

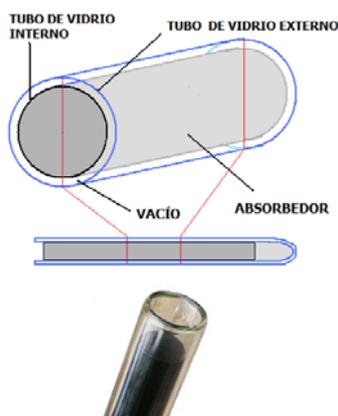


Figura 1. 14 Esquema de una imagen de tubo evacuado (27)

<sup>1</sup> Un **termosifón** es un aparato cuyo funcionamiento se explica con las corrientes de convección naturales de los fluidos, en los que las partes calientes de los mismos tienden a ascender. A este fenómeno se le conoce también como sistema de *circulación natural*, aplicado a la producción de agua caliente mediante captadores solares. El efecto del termosifón también es utilizado en la arquitectura, para mover aire en un recinto.

El agua calentada se eleva por convección y comienza a ascender siendo reemplazada por agua fría que a su vez se calienta y reinicia el proceso.

Este tipo de tubo evacuado ofrece la ventaja de tener las ya comentadas escasas pérdidas de calor y los inconvenientes de ser muy sensible a la presión y de no ofrecer ninguna protección contra las bajas temperaturas no siendo su posible utilización en zonas con inviernos fríos sin la inclusión de un calentador eléctrico que caliente el agua del depósito cuando esta alcanza temperaturas muy bajas.

En caso de baja temperatura la dilatación del agua al congelarse puede reventar los tubos y arruinar el equipo.

➤ Tubo evacuado de flujo directo

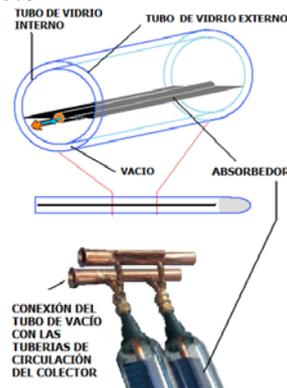
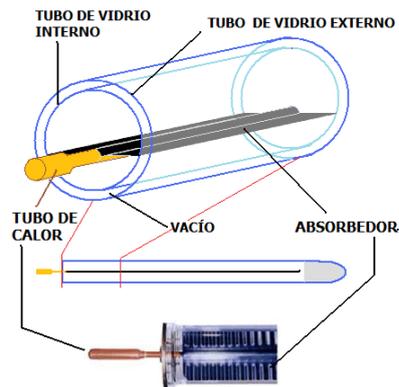


Figura 1. 15 Esquema e imagen de un tubo evacuado de flujo directo (27)

Los captadores de tubo evacuado de flujo directo colocan en el interior del tubo una plancha de material absorbente adecuado que hace las veces de absorbedor transformando la radiación solar en calor. El absorbedor es recorrido en su superficie por un tubo con flujo directo en el que circula un fluido que eleva su temperatura en contacto con él.

Los captadores de tubo de vacío de flujo directo tienen la ventaja de poder adoptar una posición tanto horizontal como vertical sin mermar su rendimiento ya que el tubo puede rotar sobre su eje inclinándose el absorbedor de la manera más adecuada, además de ser utilizable en áreas frías ya que permite usar las estrategias contra la congelación de uso general en la energía solar térmica.

➤ Tubo evacuado de *Heat pipe*.



**Figura 1. 16** Esquema e imagen de un tubo evacuado Heat Pipe (27)

Esta tecnología de captadores solares emplea un mecanismo denominado Heat pipe. (Tubo de calor). Este mecanismo consiste en un tubo cerrado en el cual se introduce un fluido de propiedades específicas. Cuando el Sol incide sobre el absorbedor adosado al tubo, el fluido se evapora y absorbe calor (calor latente). Como gas asciende sobre el líquido hasta lo alto del tubo donde se sitúa el foco frío. Allí se licua (condensa) y cede su calor latente al fluido que nos interesa calentar volviendo a caer al fondo del tubo por gravedad. Este proceso se repite mientras dure la radiación del Sol o hasta que el captador ha alcanzado una temperatura muy alta (de en torno los 130 grados o más). El *Heat Pipe* o tubo de calor es considerado como un superconductor térmico por lo eficaz de su funcionamiento y tiene la ventaja de no sufrir pérdidas por la noche ya que el proceso de transferencia de calor no es reversible (es decir el fluido caliente o el calor no puede pasar del acumulador al tubo y por lo tanto perderse). Además cada tubo es independiente pudiéndose cambiar en pleno funcionamiento del sistema. Es altamente resistente a las heladas.

### 1.2.2.- Captadores con sistema de seguimiento solar

Los captadores con sistema de seguimiento solar son diseñados con el objetivo de maximizar la energía solar que llega al receptor, dentro de esta categoría encontramos:

- El captador lineal de Fresnel
- El captador de canal parabólico (CCP)
- El captador de Disco parabólico
- Torre central.

Los primeros dos se clasifican como sistemas de foco lineal, donde la radiación solar es concentrada sobre un receptor alargado, frecuentemente tubular, en cuyo interior el fluido de trabajo circula y se va calentando progresivamente en su recorrido al sol, esto lo realizan a través de motores que giran alrededor de un solo eje (29), el cual es paralelo al eje del foco.

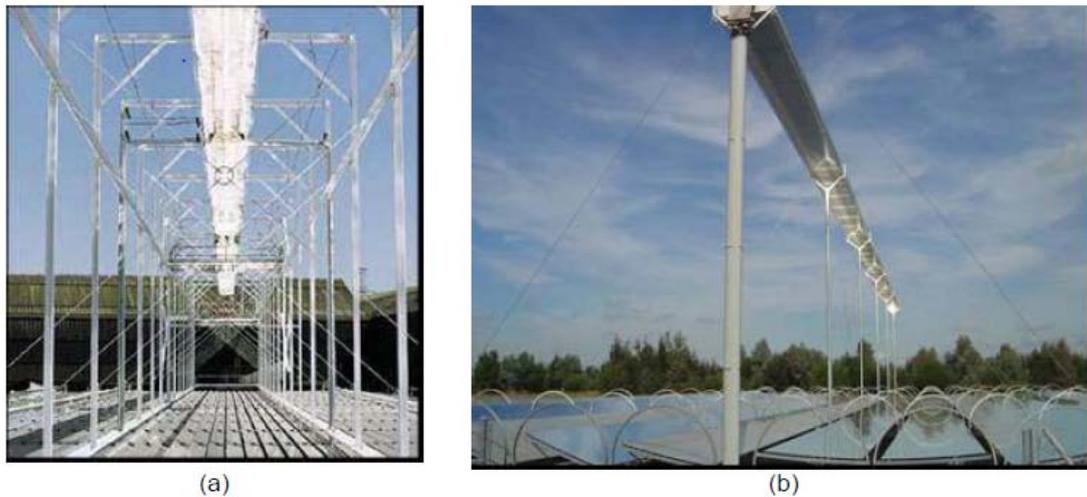
Por otro lado, los dos últimos sistemas son de foco puntual, donde el receptor es mucho más pequeño y el fluido es calentado de una manera mucho más rápida a su paso por él. . Esto implica por un lado, que son capaces de alcanzar mayores temperaturas y trabajar por tanto con mayor eficiencia; pero por el otro, que son más complejos ya que requieren de sistemas con motores que sean capaces de girar en dos ejes.

#### ***1.2.2.1.- Captador lineal de Fresnel.***

Esta es una tecnología de un solo eje de seguimiento y está compuesto de muchos segmentos largos y delgados de espejo, los cuales giran sobre ejes paralelos simultáneamente para enfocar la radiación solar en el receptor. (30)

Hay dos de este tipo de tecnología en el ámbito mundial (29), el Concentrador Lineal Compacto de Fresnel (compact linear Fresnel reflector, CLFR) y el concentrador lineal de Fresnel de Solarmundo. En el CLFR, se supone que habrá muchos receptores lineales paralelos que están muy cercanos entre sí, para que las filas individuales de espejos tengan la opción de dirigir la radiación solar reflejada a dos receptores lineales en torres separadas (30) (Véase Fig. 1.18b). Este grado de libertad adicional en la orientación del espejo puede permitir eliminar casi por completo el sombreado y bloqueo entre espejos adyacentes.

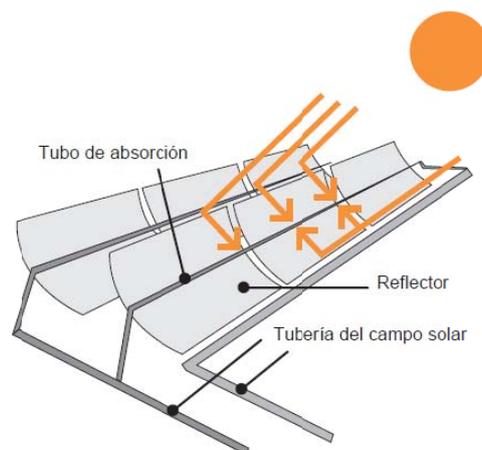
El diseño de Solarmundo, como el CLFR utiliza una cavidad receptora, sin embargo, tiene un reflector secundario dentro de la cavidad y un solo absorbedor tubular. El absorbedor está cubierto por un tubo evacuado y el diseño intenta usar nuevos recubrimientos absorbedores estables. Este sistema puede alcanzar hasta 500°C de temperatura en el tubo absorbedor (31) (véase Fig. 1.18a).



**Figura 1.17** a) Concentrador solar tipo Fresnel y b) concentrador solar lineal Fresnel del tipo compacto (32)

### 1.2.2.2.- Captador de canal parabólico (CCP)

Una característica importante de estos captadores es que pueden alcanzar temperaturas de hasta los 400 °C, aprovechando únicamente la radiación directa del Sol y parte de la difusa. Esta mejora de los CCP se logra a través de espejos o lámina de metal pulida en forma de canal parabólico que enfocan la luz solar sobre receptores tubulares de alta eficiencia por donde circula un fluido que transporta el calor, estos receptores generalmente está constituidos en un tubo metálico de color negro, recubierto con un tubo de vidrio para disminuir las pérdidas de dicho calor (ver Figura 1.19), que únicamente ocurren debidas a la convección o velocidad del viento y la radiación emitida en la superficie del absorbedor (temperaturas por arriba de los 400 °C.)



**Figura 1.18** Captador de canal parabólico (33)

Es común que los CCP presenten un sistema de seguimiento solar en un solo eje de rotación, que puede estar orientado de norte-sur, pues el concentrador debe obtener el máximo posible de radiación solar directa y formar una imagen del Sol en el absorbedor lineal.

Pero también puede tener una orientación este-oeste donde la correcta orientación del captador se lleva a cabo diariamente o en algunos casos dependiendo del tamaño del receptor hasta quincenalmente. (33)

El requerimiento de rastreo en conjunto con el uso de materiales que deben resistir altas temperaturas, eleva el costo y mantenimiento de estos sistemas CCP son las desventajas en general de estos sistemas. Sin embargo las ventajas son aún mayores otorgando aplicaciones en generación de energía eléctrica a través de la producción de vapor, así como también el calentamiento de agua, siendo esta última al ser construidos con materiales ligeros y baratos, lo cual disminuye el costo de la inversión inicial, por la cual la tecnología de los CCP son una de las más avanzadas dentro de las tecnologías solares.

#### ***1.2.2.3.- Captador Disco parabólico***

Estos captadores son sintéticamente un disco paraboloidal con un receptor en la zona focal que es donde incide la radiación procedente del Sol, absorbiéndola y posteriormente traspasándola en forma de calor a un fluido circulante, ahora bien la energía calórica presente en el fluido junto con el uso de un motor-generador puede ser convertida en electricidad y servir para diferentes propósitos (ver Figura 1.20).

La temperatura que pueden alcanzar los receptores de estos sistemas puede sobrepasar los 1500°C, sin embargo para lograrlo se requiere de un sistema de seguimiento al Sol en sus dos ejes, siendo esta la tecnología más eficiente de todas las tecnologías solares con cerca de 25% de eficiencia neta de conversión de la energía solar a eléctrica, pero también es una de las más costosas en material de construcción y mantenimiento (20).

#### ***1.2.2.4 Captador de membrana tensada***

Este captador es muy similar al Disco parabólico, solo que la curvatura es generada no necesariamente es una parábola. Dicha curva puede ser una catenaria, la cual se forma

mediante la deformación, por diferencia de presiones, de una membrana, que en este caso es la superficie reflectiva del captador.

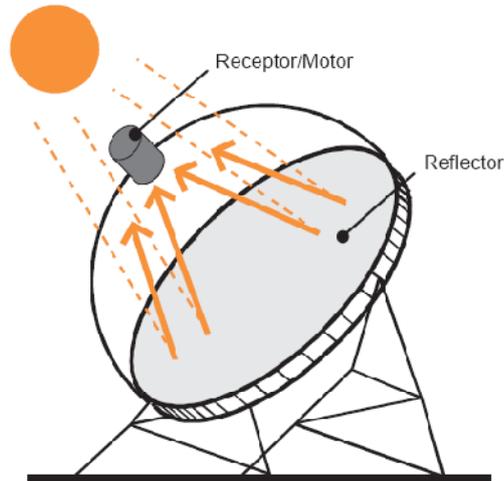


Figura 1. 19 Captador solar de plato parabólico (33)

#### 1.2.2.5.- Torre central o Heliostato

Con temperaturas aproximadas de entre 500 a 1500 °C estos sistemas utilizan un gran campo de espejos planos denominados heliostatos que siguen al sol utilizando un sistema en dos ejes, con la finalidad de enfocar la radiación solar en un receptor central que generalmente se encuentra ubicado en lo alto de una torre, con lo anterior se pueden lograr una eficiencia solar-eléctrica en el rango de 8 a 13%. (20)

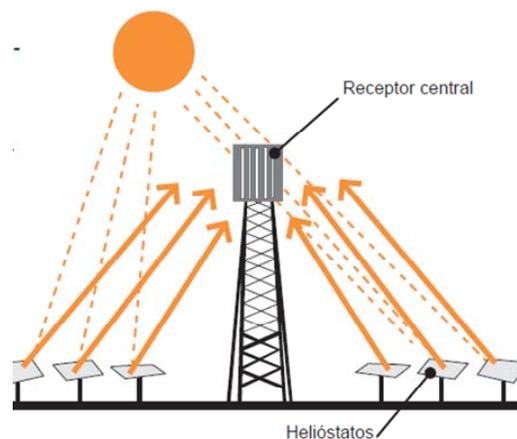


Figura 1. 20 Funcionamiento de la Torre Central o Campo de Heliostatos (33)

Cada tecnología de estos captadores con sistema de seguimiento solar tienen el mismo objetivo, la de concentrar los rayos solares que son aproximadamente paralelos e incidentes en el concentrador, en una superficie pequeña en términos relativos “el receptor”. Hablar en

profundidad de cada una de estas tecnologías implicaría demasiado tiempo y sería ineficiente solamente documentarla sin poder llevar a la práctica uno en particular, por tal motivo en conjunto con la Universidad de Quintana Roo se elabora esta tesis que en los capítulos siguientes se analiza la tecnología de los Concentradores de canal parabólico (CCP) concretamente aquellos que utilizan vapor de agua como fluido caloportador en los tubos receptores con el fin de diseñar y construir la misma.

### **1.2.3.- Tecnología de captadores de canal parabólico y aplicaciones actuales**

Como ya se ha dicho en el apartado (1.2.2.2) los captadores de canal parabólico (CCP) pueden alcanzar hasta los 400 °C con el hecho de calentar un fluido de trabajo a través de la energía térmica producida por la radiación directa del Sol, por lo que se engloban dentro de lo que se denomina captadores solares de media temperatura. Sin embargo, existían limitaciones impuestas a estos tipos de captadores como eran el fluido caloportador (aceite sintético) y la temperatura máxima admisible por la superficie selectiva, respecto a la primera el aceite sintético ha sido sustituido por fluidos caloportadores que aguantan más temperatura, como sales fundidas y el agua-vapor, y en cuanto a la segunda limitación se han desarrollado tubos absorbedores con superficies selectivas que soportan temperatura más elevadas sin degradarse. (34)

En un principio los CCP podían alcanzar temperaturas superiores a los 260 °C por lo que se utilizaron para alimentar térmicamente a una gran diversidad de procesos industriales (Industrial Process Heat, IPH) propiciando el auge y desarrollo de estos captadores en las décadas de los años 1970 y 1980. Sin embargo se presentaron obstáculos que hicieron que se frenara aun más el desarrollo de esta tecnología, como son el esfuerzo ingenieril y comercial que implicaba, incluso en proyectos pequeños, las decisiones de los clientes que ocasionaban que el proyecto no se completara en forma y tiempo y por último el rendimiento que no siempre se ajustaba a los criterios industriales del proyecto rentable.

A pesar de los obstáculos anteriormente descritos los CCP se siguen utilizando para proporcionar energía térmica a una gran diversidad de sectores industriales como lo representa la siguiente tabla (35):

**Tabla 1. 1** Aplicación de los CCP en los diferentes sectores industriales (35)

Sector	Proceso	Temperatura (°C)
<b>Alimentación y bebidas</b>	Secado	30-90
	Lavado	40-80
	Pasteurizado	80-110
	Hervido	95-105
	Esterilización	140-150
	Tratamiento térmico	40-60
<b>Industria Textil</b>	Lavado	40-80
	Blanqueado	60-100
	Tintado	100-160
<b>Industria Química</b>	Hervido	95-105
	Destilación-desalinización	110-300
	Procesos químicos varios	120-180
<b>Otros sectores</b>	Producción de frío por absorción	120-180
<b>Producción de electricidad</b>	Turbinas de vapor	150-300

La mayoría de los procesos industriales no necesita temperaturas superiores a los 400 °C, lo cual hace que el potencial de la aplicación de energía solar con CCP sea una realidad en una gran parte de ellos.

Conforme pasaron los años las investigaciones y aplicaciones de los CCP que en un principio fueron encaminados para ser utilizados en procesos industriales, en la década de los años de 1970 se fueron orientando hacia la producción de electricidad como consecuencia al debido aumento repentino en el precio del petróleo surgiendo proyectos de trascendencia que tienen impacto hasta en la actualidad como las plantas termosolares SEGS y la torre central Solar One en los EEUU. Más adelante abordaremos las principales características de la primera debida a su importancia, en Europa países como Italia se desarrolló la planta Eurelios, en Francia el Themis, el SSPA y CESA-1 en España, y países como Japón y la Unión Soviética incursionaron también a la tecnología para la generación de electricidad basadas en la energía solar.

### *Desarrollo de la tecnología de CCP.*

Desde el punto de vista estructural un CCP está compuesto por 4 componentes importantes (36):

1. La cimentación y la estructura soporte.
2. El reflector cilindro parabólico.
3. El tubo absorbedor o receptor.
4. El sistema de seguimiento solar.

#### *1.- Cimentación y la estructura*

La cimentación es de suma importancia debido a la función que realiza que es la de soportar el conjunto estructural del CCP y fijarlos al suelo, por lo tanto parámetros como las cargas del captador vienen determinadas por las dimensiones y características del mismo CCP, además de contemplar factores externos como la carga del viento y el tipo de terreno, por ende se selecciona un material adecuado como es el hormigón de armado estándar.

Además de la cimentación es muy importante contemplar la estructura del captador cuyo objetivo es la de dar rigidez al conjunto de elementos que lo componen y asimismo ser interfaz con la propia cimentación del CCP. Actualmente las estructuras son todas metálicas pero se han estudiado la implementación de diferentes materiales plásticos, fibra de vidrio o incluso madera con la finalidad de disminuir los costos de construcción y mantenimiento. (37)

Existen dos técnicas que se utilizan para construir la estructura de la parábola las cuales son la espacial y la de tubo soporte central o *torque tube*.

Existen diferentes diseños o modelos referentes a la construcción de la estructura de la parábola los cuales destacan los modelos LS-3, Eurotrough y Solargenix (38). A continuación en la Tabla 1.2, se presentan las características más importantes de cada uno de ellas:

Tabla 1. 2 Características principales de los CCP

Captador	Características:
LS-1 y LS-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Basadas en la estructura en tubo axial que soporta los perfiles metálicos a los que van sujetos los espejos y proporciona al conjunto la integridad necesaria y rigidez estructural.</li> <li>▶ Diseñados con grandes tolerancias y ensamblados en el lugar de la instalación para obtener el comportamiento óptico requerido.</li> <li>▶ Presentan mayores ventajas en aspectos como el rendimiento, mantenimiento y costo.</li> </ul>
LS-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Basada en la estructura espacial en V, constituido por un armazón central que es conformado en un patrón guía y ajustado con precisión antes de ser finalmente instalado.</li> <li>▶ Estructura más ligera y más resistente a la vez, capaz de operar con una precisión en condiciones de fuertes vientos.</li> <li>▶ Experiencia operacional, es excelente y gran capacidad de seguimiento solar.</li> <li>▶ Se ha utilizado en las plantas SEGS más recientes de la VII a IX.</li> </ul>
Eurotrough	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Perteneciente a un consorcio de empresas y laboratorios de investigación europeos, utiliza la filosofía de tubo central y consiste en un armazón rectangular con brazos soporte para los espejos.</li> <li>▶ Disminuye las roturas del cristal en condiciones de vientos fuertes y aumenta el rendimiento óptico debido a que su eje de rotación se sitúa en su centro de gravedad, unos milímetros por encima del armazón externo.</li> <li>▶ Existen dos versiones del captador Eurotrough: el ET-100 y ET-150 cuyos valores representan la longitud total en metros por cada captador, siendo ocho y doce respectivamente la diferencia entre ellos.</li> <li>▶ El SKAL-ET es la tercera generación de los captadores Eurotrough, y tiene ventajas como la reducción del peso, componentes, costes, requisitos de operación y mantenimiento y mejorando la rigidez, rendimiento óptico y permite la operación en vientos más desfavorables.</li> </ul>
Solargenix	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Basado en la estructura espacial de aluminio, disminuye los problemas presentados por el LS-1 y 2 como peso, simplicidad de fabricación, resistencia a la corrosión, coste de fabricación y facilidad de instalación.</li> </ul>

**Tabla 1. 3** Parámetros de los principales CCP

Captador	LS-1	LS-2	LS-3	Eurotrough	Solargenix
Apertura (m)	2.55	5	5.76	5.76	5
Distancia focal (m)	0.94	1.49	1.71	1.71	1.49
Longitud de un modulo (m)	6.3	8	12	12	8
Longitud de un captador (m)	50.2	49	99	150	49-65
Área de espejo por captador (m <sup>2</sup> )	128	235	545	817	235-313
Diámetro del receptor (m)	0.04	0.07	0.07	0.07	0.07
Concentración geométrica	61:1	71:1	82:1	82:1	71:1
Mecanismo de accionamiento	Mecánico	Mecánico	Hidráulico	Hidráulico	Mecánico o hidráulico
Peso (kg/m <sup>2</sup> )	-	29	33	29	24
Rendimiento óptico pico	71	76	80	80	80
Referencia	SEGS I y II	SEGS II-VII	SEGS V-IX	AndaSol I y II	Nevada Solar One.

## 2.- Reflector cilindro parabólico.

La importancia del reflector se basa como su nombre lo indica en reflejar la radiación solar que incide sobre él y proyectarla al tubo absorbedor situado en la línea focal del propio reflector.

Es substancial el medio de soporte para tener una mayor reflexión por lo cual se debe elegir un material como chapas metálicas, plástico o cristal (39), cada una de las cuales tienen sus ventajas y desventajas que a continuación representamos en la siguiente tabla:

**Tabla 1. 4** Ventajas y desventajas de los diferentes materiales de los reflectores

Material	Chapa metálica	Plástico	Vidrio
<b>Función</b>	Soporte y reflectante	Soporte y reflectante	Soporte y reflectante
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Cuando se utiliza chapas de aluminio pulido se puede lograrse una reflectancia especular de 80%</li> <li>▶ Bajo costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Puede pegarse a cualquier soporte rígido.</li> <li>▶ En el mercado se pueden encontrar diferentes productos de este tipo.</li> <li>▶ Actualmente tienen alta reflectividad &gt;95%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ La opción que más se utiliza.</li> <li>▶ Cuando el espesor del vidrio es pequeño (&lt;1.5mm) tienen suficiente flexibilidad como para curvarse.</li> <li>▶ Pueden alcanzar una reflectividad del 93.5% cuando están cubiertos por una película de plata.</li> <li>▶ La degradación y los fallos en los espejos son mínimos.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Se deteriora con rapidez cuando el material está en la intemperie.</li> <li>▶ No suelen utilizarse en aplicaciones industriales donde se requiere de mayor durabilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Baja durabilidad ya que las partículas que transporta el aire rasgan y erosionan la superficie.</li> <li>▶ Presentan un mayor grado de ensuciamiento debido a que se cargan electrostáticamente por la acción del viento y atraen de esta forma mayor cantidad de polvo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Cuando los espejos son muy delgados pueden fracturarse y dañar el tubo receptor y producir la rotura de otros espejos.</li> </ul>

### 3.- Tubo absorbedor o receptor:

Es uno de los elementos fundamentales de todo CCP y es también llamado *Heat Collector Element* (HCE) cuya función es la de transportar el fluido calorífico y luego convertirla en radiación solar concentrada en energía térmica. Consiste en un tubo absorbedor que a su vez está compuesto por dos tubos concéntricos: uno interior metálico, por el que circula el fluido calorífico y otro exterior de cristal.

- ▶ Tubo interior metálico: Compuesto por un recubrimiento selectivo que le proporciona una elevada absorptividad aprox. de 94% en el rango de la radiación solar y una baja emisividad en el espectro infrarrojo aprox. de 15% dando como resultado un elevado rendimiento térmico. Existen diferentes tipos de recubrimientos uno de los cuales destacan los PVD<sup>2</sup> (Physical Vapour Deposition) por su absorptividad mayor aprox. 95% y una emisividad del 15% incluso a menor de 400°C. sin embargo presenta un problema los recubrimientos PDV que es la degradación del mismo al contacto con el aire cuando están calientes, para evitar lo anterior se requiere que exista un alto vacío en la cámara que queda entre el tubo metálico interior y la cubierta de cristal.
- ▶ Tubo exterior de cristal: Este tubo tiene una doble misión la primera es la de proteger el recubrimiento selectivo de las incidencias meteorológicas y por otra reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo absorbedor. Para aumentar el rendimiento de transmittividad es necesario un tratamiento anti reflectivo en sus dos caras.

Luz internacional Inc. fue una de las primeras empresas en fabricar tubos absorbedores durante la década de 1980 y fueron aplicados en los captadores LS-3, pero tenían un nivel de fallos bastante elevados como son la ruptura de la cubierta de vidrio y la degradación del recubrimiento selectivo cuando se perdía el vacío lo que ocasionaba un costo importante en la operación y el mantenimiento de los receptores.

Por tal motivo surgieron varios proyectos con la finalidad de modificar la configuración, buscando mantener los niveles de estrés térmico y mecánico por debajo del límite de rotura del vidrio. Estos proyectos son expresados en la Tabla 1.5.

#### 4.- Sistema de seguimiento solar.

La finalidad de contar con un sistema de seguimiento solar en un CCP es para poder concentrar al tubo receptor a una mayor radiación emitida durante el día, el más común de estos sistemas de seguimiento se basa en un dispositivo que gira los reflectores cilíndrico parabólicos del captador alrededor de un eje.

---

<sup>2</sup> El PVD (Physical Vapour Deposition; Deposición en Fase Vapor) es una tecnología avanzada y sofisticada para la aplicación de recubrimiento de piezas en alto vacío, que presenta un buen número de ventajas con respecto a los tratamientos superficiales convencionales -anodizado, niquelado o galvanizado, entre otros- a los cuales parece llamada a sustituir o complementar

**Tabla 1. 5** Proyectos que se han llevado a cabo para el mejoramiento de receptores

Proyecto	Empresa desarrolladora	Mejoramiento
UVAC HCE (Universal Vacuum, Heat Collector Element)	Solel Solar Systems	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Diseño mejorado.</li> <li>▶ El tubo incorpora un revestimiento (selectivo Cermet<sup>3</sup>) interno reflectante que protege el interior de la soldadura vidrio-metal durante condiciones de operación.</li> <li>▶ Elimina el riesgo de oxidación por pérdida de vacío.</li> </ul>
NAC (New Absorber Coating)	Schott	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Trabaja temperaturas de hasta 550°C</li> <li>▶ El absorbedor está formado por una cubierta reflectante delgada, un recubrimiento tipo cermet de gran calidad para absorber la radiación solar y finalmente un fino recubrimiento con un índice de refracción muy bajo para mejorar la absorptividad.</li> </ul>
-	Sunray Energy junto con Sandia National Laboratories (SNL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Se crea un nuevo receptor utilizando tubos de acero inoxidable reciclado.</li> <li>▶ Como recubrimiento se utiliza una fina capa de pintura negra (Pyromark<sup>4</sup>) Aumenta el 90% del rendimiento en comparación con los UVAC y disminuye el coste hasta en un 30% en relación a la última.</li> </ul>
-	ELI (Energy Laboratorie, Inc) y SNL (Sandia National Laboratories)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Incorpora un sobre-recubrimiento de sol-gel, reduciendo la oxidación en presencia de aire.</li> <li>▶ Presenta estabilidad térmica</li> <li>▶ Se puede aplicar tanto a tubos de acero inoxidable nuevos como en tubos en funcionamiento que tengan el recubrimiento dañado.</li> </ul>

<sup>3</sup> Un cermet es un material compuesto formado por materiales metálicos y cerámicos. Los cermets están diseñados para combinar la resistencia a altas temperaturas y a la abrasión de los cerámicos con la maleabilidad de los metales.

<sup>4</sup> Se trata de una pintura de alta temperatura especialmente formulado para la protección, la decoración o el color de la identificación de las superficies de metal que se sujeta a alta temperatura. Hay dos series disponibles. Serie 1200-capaz de soportar 1200° F, Serie 2500-capaz de soportar 2000° F

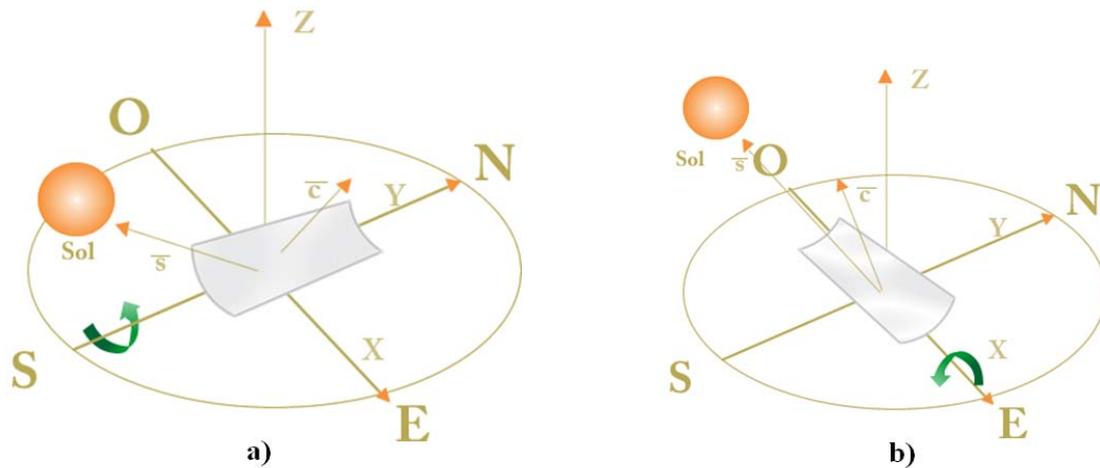
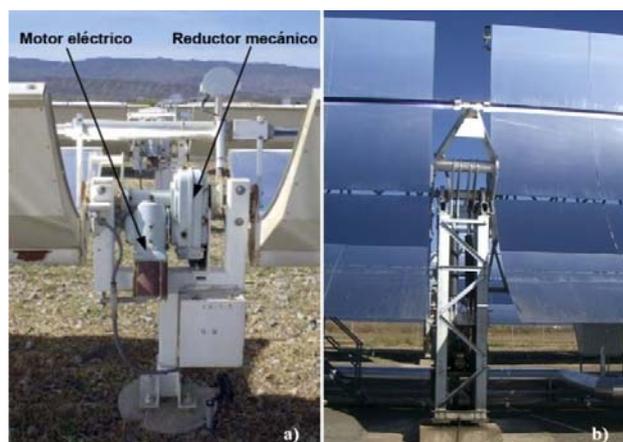


Figura 1. 21 a) Orientación Norte-Sur, b) orientación Este-Oeste (39) .

Sin embargo, los sistemas de seguimiento se han puesto a prueba en dos ejes pero la experiencia demuestra que estos sistemas tienen un rendimiento menor que los de seguimiento en un eje, además de presentar este último ventajas como: menor costo, más rentables debido a que son más mecánicamente sencillos son más robustos y resisten cargas de viento muy superiores lo cual hace que su supervivencia sea mayor.

Las figuras anteriores muestran la orientación en las que normalmente son instalados los CCPs, la primera es en la dirección Este-Oeste y la segunda Norte-Sur, aunque también suelen utilizarse orientaciones intermedias.

Para la rotación del captador se emplean mecanismos de accionamiento, eléctrico o hidráulico, que mueva al captador de acuerdo con la posición del Sol. Para captadores de tamaño pequeño o medio se utilizan mecanismos eléctricos que incluyen un motor como se muestra en la Figura (1.23 (a)). Para captadores grandes se utilizan generalmente mecanismos hidráulicos que en lugar de un motor son desplazados por una bomba eléctrica que alimentan dos pistones hidráulicos como se aprecia en la Figura (1.23 (b)), por lo que este mecanismo otorga beneficios como la reducción de costos y simplifica la construcción del captador del CCP, ya que un solo mecanismos de accionamiento debe ser capaz de mover varios módulos concentradores conectados en serie y operados conjuntamente como un solo elemento.



**Figura 1. 22** Diferentes tipos de mecanismos de accionamiento, a) motor eléctrico con reductora, b) mecanismo hidráulico

### *Las plantas termosolares SEGS.*

Las plantas termosolares SEGS (Solar Electric Generating System) en Los Ángeles, CA, EEUU fueron construidas entre los años 1984 y 1991 por la empresa Luz Internacional Inc. con tamaños de 14 MWe a 80 MWe consistiendo en 9 sistemas de captadores cilindroparabólicos separados en el desierto de Mojave con una capacidad total de 354 MWe, generan electricidad a través de una turbina de vapor altamente eficiente alimentada con vapor del campo solar y usan quemadores de gas de respaldo para mantener la temperatura del fluido de transferencia de calor a las horas de insolación insuficiente. Esta SEGS genera más de 10,000 millones de kWh de electricidad solar desde 1985 y esto se debe gracias a que cuenta con más de 2 millones de m<sup>2</sup> de espejos de cristal y claro está en la inversión fijada para construir estas centrales cuyo capital procedió de dependencias privadas debido a la creciente confianza en la madurez de esta tecnología otorgando incentivos fiscales y atractivos contratos de compra en electricidad. Sin embargo la caída en los precios de los combustibles a finales de la década de 1980 llevó a un 40% la reducción en los ingresos en la ventas de electricidad solar por lo que puso en manifiesto la necesidad de reducir costes e incrementar la eficiencia de los sistemas solares con CCP para aumentar su competitividad frente a los sistemas convencionales basados en combustibles fósiles.

A continuación la siguiente tabla muestra las características de las SEGS (40) más significativas de las distintas SEGS:

Tabla 1. 6 Características más importantes de las SEGS

	SEGS I	SEGS II	SEGS III	SEGS IV	SEGS V	SEGS VI	SEGS VII	SEGS VIII	SEGS IX
<b>Primer año de operaciones</b>	1985	1986	1987	1987	1988	1989	1989	1990	1991
<b>Potencia Neta (MW<sup>e</sup>)</b>	13.8	30	30	30	30	30	30	80	80
<b>Superficie que ocupa (m<sup>2</sup>)</b>	82 960	190 338	230 300	230 300	250 560	18 800	194 280	464 340	483 960
<b>Rendimiento térmico neto solar (%)</b>	-	26.7	27.8	27.8	27.8	34.1	34.1	34.2	34.2
<b>Rendimiento térmico neto híbrido/fósil (%)</b>	29.6	33.9	33.9	33.9	33.9	35.9	35.9	34.2	34.2
<b>Fluido de trabajo</b>	Aceite (ESSO 500)	Aceite (Therminol VP1)	Aceite (Therminol VP1)	Aceite (Therminol VP1)	Aceite (Therminol VP1)				
<b>Modelo de Captador</b>	Primera generación (Modelo LS-1)	Primera generación (Modelo LS-1)	Segunda generación (Modelo LS-2)	Tercera generación (Modelo LS-3)	Tercera generación (Modelo LS-3)	Tercera generación (Modelo LS-3)			
<b>Funciona con el ciclo</b>	Rankine regenerativo	Rankine regenerativo sin recalentamiento	Rankine regenerativo con recalentamiento						
<b>Hibridación</b>	Sobrecalentador	Caldera	Caldera	Caldera	Caldera	Caldera	Caldera	Calentador aceite	Calentador aceite

## Referencias

1. *Energía y desarrollo económico en America Latina*. **Béjar, Ramón Casilda**. Diciembre 2002, págs. 31,32.
2. **SENER**. *Situación Actual PEMEX*. 2007. pág. 17.
3. <http://www.arqhys.com/arquitectura/energia-solar.html>. [En línea] [Citado el: 12 de Septiembre de 2009.]
4. *Solar Engineering of Thermal Processes*. **Duffie, John A.** New York : John Wiley , 1991.
5. *Guía de la energía solar*. **Madrid, Comunidad de**. s.l. : Madrid Solar, 2006, págs. 11-13.
6. *Solar Thermal Collector and Applications*. **Kalogirou, Soteris A.** s.l. : Elsevier Ltd., 2004, pág. 238.
7. **Meinel, Aden B. Meinel y Marjorie P.** *Aplicaciones de la Energía Solar*. Barcelona : Reverté, S.A., 1982. págs. 2-8.
8. *Tesis Doctoral "Contribución al diseño de procedimientos de control de calidad para sistemas de bombeo Fotovoltaico"*. **Saura, Fernando Poza**. Madrid : s.n., 2007, pág. 21.
9. <http://www.arquibio.com/padre-himalaya-pionero-de-la-energia-solar/>. [En línea] [Citado el: 17 de septiembre de 2009.]
10. <http://www.solarhaven.org/SolarHistoryQuiz1.htm>. [En línea] [Citado el: 17 de Septiembre de 2009.]
11. *Energías Renovables para todos "Solar Termica"*. **Pep Puig, Marta Jofra**. s.l. : Haya Comunicación, 2008, págs. 1-7.
12. <http://www.dforcesolar.com/energia-solar/historia-de-la-energia-solar/>. [En línea] 19 de Septiembre de 2009.
13. *Design, Construction and Testing of a Parabolic Trough Solar Collector for a Developing-Country Application*. **Harms, Michel Brooks Ian Mills y Thomas**. South Africa : s.n., 2005.
14. *Diseño y construcción de un sistema de concentración solar de canal parabolico para su uso en desalación de agua de mar controlado por computadora*. **D., José A. FigueroaM. Y Felipe Barffuson**. Hermosillo Sonora, México : s.n., 2001.
15. *Direct steam generation in parabolic trough concentrators with bimetallic receivers*. **Almanza, Vicente Flores y Rafael**. México, D.F : Elsevier, 2004.
16. *Desarrollo de un modelo para generación directa de vapor en concentradores solares de canal parabólico, bajo diferentes patrones de radiación*. **Rodríguez, Omar Nava**. Iztapalapa : s.n., 2000.
17. [http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA\\_1026\\_semblanza\\_de\\_energia](http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_1026_semblanza_de_energia). [En línea] [Citado el: 17 de Septiembre de 2009.]
18. *Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de las energías renovables en Mexico*. **CIE, Universidad Autonoma de México**. Mayo de 2005, pág. 22.
19. *Energía y cambio climático*. **Salgado, Rafael Almanza**. México : s.n., 2007.
20. *Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de las Energías Renovables en México*. **Dr. Pablo Mulás del Pozo, Dr. Claudio A. Estrada Gasca, Dr. Camilo A. Arancibia Bulnes, Dr. Rubén Dorantes Rodríguez, Dr. Jorge Islas Samperio, Dr. Agustín Muhlia Velásquez**. Mayo del 2005.
21. *COLECTORES CONCENTRADORES DE ENERGÍA SOLAR*. **Gabriel Villeda Muñoz, José T. Vega Durán, Jorge Pineda Piñón, Ángel Arvizu Zaragoza, Rubén Contreras Flores**.
22. *Notas sobre el curso de Energía Solar*. **Juan Jorge Hermoso Villalobos Coordinador general, David Gudiño, Miryam Mendoza Ramirez**. Tlaquepaque, Jalisco : s.n., 1995.

23. *Understanding solar concentrators*, Technical Report No. 30. **M., Kaplan G.**
24. **Ibañez, M., Rossell, J.R. y Rossell, J.I.,** “*Tecnología Solar*”. Madrid, España. : Ed. Mundi-Prensa., 2005.
25. **Baeza, J. Gonzalo Carrillo.** Estudio, desarrollo y construcción de un calentador solar para uso residencial. s.l. : Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
26. *Piscina Temperada con Energía Solar.* **Luján, Warner Pachego.** 2004. ISSN:1560-9146 (Impreso)/ISSN:1810-9993 (Electrónico).
27. [En línea] [Citado el: 11 de Octubre de 2009.] <http://www.sitiosolar.com>.
28. Thermosol es la primera marca de calentadores solares de sistema de tubos evacuados en el mercado mexicano. [En línea] [Citado el: 11 de 10 de 2009.] <http://www.ecotecnias-solares.com.mx/>.
29. **Mills, D. R.** *Advances in solar thermal electricity technology.* *Solar Energy*, Vol.76. 2004.
30. **Mills, D., Morrison, G.** “*Compact Linear Fresnel Reflector Solar Thermal Power plants*”, Elsevier, *Solar Energy*, Vol. 78. 2002.
31. **Bals, C., Gerhard, K.** *The Solarmundo Fresnel Light Collector (SFC) can make Solar Energy cheaper than Oil.* 2003.
32. Solar mundo power. *Solar power for the world.* [En línea] [Citado el: 22 de octubre de 2009.] [WWW.solarmundo-power.com](http://WWW.solarmundo-power.com).
33. **Rainer Aringhoff, Georg Brakmann, Crispin Aubrey.** *ENERGIA SOLAR TERMOELÉCTRICA-2020 Pasos Firmes contra el cambio Climático.* Reino Unido-Amsterdam Países Bajos : European Solar Thermal Power Industry and Greenpeace Internacional.
34. **Benz, N. et al.** *Advances in Receiver Technology for Parabolic Troughs*”. In: *Proceedings of 14th International SolarPACES Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies.* Las Vegas, EEUU : s.n., 2008.
35. **Mojá A., Pujol R., Martínez V.** Potencial de instalación de captadores de baja y media temperatura para aplicaciones industriales. *XIV Congreso ibérico y IX congreso Iberoamericano de energía solar.* Vigo, Galicia, España. : s.n., 2008.
36. **Rabl, A.** *Active solar collectors and their applications.* New York (EEUU) : Ed. Oxford University Press ISBN: 0195035461, 1985.
37. *Solar Steam Generating using PTC.* **Thomas, A.** s.l. : Pergamon.
38. **Dudley, E.V. et al.** SEGS LS-2 Solar Collector (Test Results). [aut. libro] Report No. SAND94-1884 Sandia National Laboratories. California (EEUU). : s.n., 1994.
39. **Zarza, E. et al.** The DISS Project: Direct Steam Generation in Parabolic Trough Systems .Operation and Maintenance Experience and Update on Project Status. [aut. libro] ASME Journal of Solar Energy. 2002.
40. **Solar Electric Generating System IX Technical Description”, LUZ International Limited: 1990.** [http://www.nrel.gov/csp/troughnet/power\\_plant\\_data.html#segs\\_i](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/power_plant_data.html#segs_i). [En línea] [Citado el: 20 de 10 de 2009.]

---

## CAPITULO 2

---

### **2 Antecedentes**

#### **2.1 Geometría Solar**

Los captadores cilindro parabólicos son captadores solares de concentración, constituidos por un espejo cilíndrico, de sección parabólica, y un receptor lineal, a lo largo del eje de la parábola. Por ser captadores de concentración, necesitan un sistema de seguimiento que les permita estar en todo momento enfocados al Sol, para que la radiación solar directa concentrada incida sobre el tubo receptor. La magnitud de la radiación solar que incide sobre el receptor depende de la posición relativa del captador respecto al Sol, caracterizada por el ángulo de incidencia,  $\theta$  (1).

##### **2.1.1 Conceptos generales**

###### *La relación entre el sol y la Tierra*

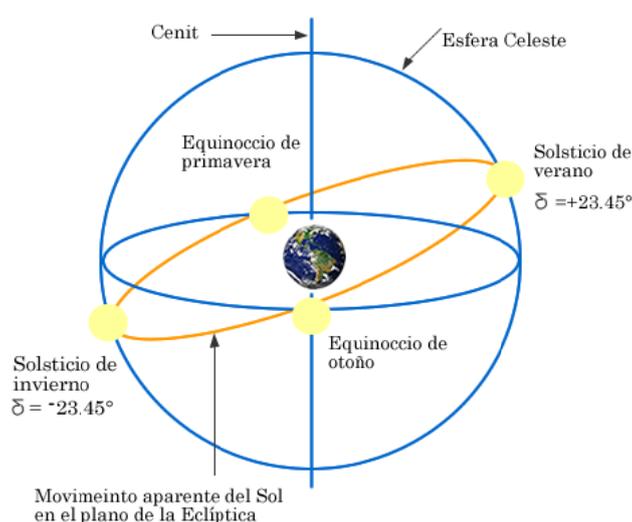
Cualquier persona que quiera aprovechar la energía solar debe ser capaz de responder a la pregunta ¿qué cantidad de energía llega al lugar donde prevé realizar la captación?, cada hora, cada mes, cada año o en promedio (horario, mensual, anual). Para ello es necesario comprender el movimiento relativo de la Tierra y el Sol. (2)

La Tierra, en su traslación alrededor del Sol, describe una órbita elíptica de muy poca excentricidad, llamada eclíptica, estando el Sol situado en uno de sus focos. La duración del

recorrido es de 365 días, 5 horas y 48 minutos. Esta órbita está inclinada con respecto al plano del ecuador un ángulo de  $23.45^\circ$  y ello hace que los rayos del Sol caigan unas veces más perpendicularmente que otras y, por tanto, que la radiación incidente sobre una superficie determinada sea diferente en cada caso. (3)

Por otra parte, la Tierra tiene un movimiento de rotación alrededor de su eje en el que emplea 24 horas. Ahora bien, debido a la inclinación del eje de rotación y del movimiento orbital de la Tierra, la duración del día y de la noche varía según la latitud  $\phi$  del lugar.

En la Figura 2.1 aparecen de forma gráfica algunos de los conceptos antes expuestos. Donde, por simplicidad se supone la tierra fija y se muestra el movimiento aparente del Sol.



**Figura 2. 1** Trayectoria aparente del Sol alrededor de la Tierra y parámetros característicos asociados.

La posición del Sol se puede referir en dos sistemas de coordenadas distintos, ambos centrados en el observador: coordenadas horarias (declinación,  $\delta_s$ , y ángulo horario,  $\omega_s$ ) y coordenadas horizontales (altura solar,  $h_s$ , y azimut,  $\alpha_s$ ). Estas coordenadas determinan el vector solar, entendido éste como el vector con origen en el observador y extremo en el Sol.

Las coordenadas horizontales del Sol, altura solar y azimut, varían dependiendo de la hora del día, el día del año y la latitud del lugar. Por el contrario, las coordenadas horarias son más fáciles de obtener, la declinación sólo depende del día del año, y el ángulo horario, de la hora. Se determinan las coordenadas horarias como paso previo para el cálculo de las coordenadas horizontales.

Se define el tiempo solar como el tiempo basado en el movimiento angular aparente del Sol a través del cielo, tomando como mediodía solar el instante en el que el Sol cruza el meridiano del observador.

Para las relaciones entre los ángulos solares que se exponen a continuación, el tiempo que se utiliza es el tiempo solar, que no coincide con el tiempo civil del reloj local. Para convertir la hora local a hora solar, se aplican dos correcciones (1):

- Una corrección constante para la diferencia de longitud entre el meridiano del observador y el meridiano en el cual se basa el tiempo local estándar, sabiendo que el Sol tarda 4 minutos en atravesar un grado de longitud.
- La segunda corrección proviene de la ecuación del tiempo, que tiene en cuenta las perturbaciones en el valor de rotación de la Tierra, y que afectan al instante en el que el Sol cruza el meridiano del observador.

Por tanto, para pasar la hora local a hora solar, se aplica la ecuación (2.1):

$$\text{Hora solar} = \text{hora local} + 4(\text{min} / ^\circ) \cdot (L_{\text{Ref}} - L_{\text{Loc}}) + E \quad (2.1)$$

donde:  $L_{\text{Ref}}$  es la longitud geográfica del meridiano de referencia ( $^\circ$ ),  $L_{\text{loc}}$  es la longitud del meridiano local ( $^\circ$ ) y  $E$  es la ecuación del tiempo (en minutos), dada por la ecuación (2.2):

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (2.2)$$

$B$  se calcula mediante la ecuación (2.3):

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.3)$$

Siendo  $n$  el día del año, por tanto,  $1 \leq n \leq 365$

### *Coordenadas horarias*

La declinación ( $\delta_s$ ) es la posición angular del Sol en el mediodía solar -cuando el Sol pasa por el meridiano local- respecto al plano del ecuador terrestre.

El valor de este ángulo se suele tomar cada día al mediodía solar. Esto es debido a que el eje de rotación de la Tierra está inclinado un ángulo de  $23.45^\circ$  respecto al eje del plano que contiene la órbita que describe alrededor del Sol y de ahí que el valor de la declinación varíe entre  $\pm 23.45^\circ$  a lo largo del año.

El valor de la declinación  $\delta_s$  se puede calcular a partir de la ecuación (2.4) (4)

$$\delta_s = 23.45 \sin 360 \left( \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.4)$$

donde  $n$  es el día del año. La declinación es una función continua del tiempo. La tasa de cambio máxima de la declinación es en los equinoccios, con un valor aproximado de  $0,5^\circ/\text{día}$ .

El ángulo horario ( $\omega_s$ ) es el desplazamiento angular del Sol (hacia el este u oeste) respecto al meridiano local debido a la rotación de la Tierra, sobre su eje, a  $15^\circ/\text{hora}$ .

Antemeridiano:  $\omega_s < 0$

Pasado meridiano:  $\omega_s > 0$

Para una hora solar dada, ST, el ángulo horario se calcula según la ecuación (2.5):

$$\omega_s = 15(ST - 12) \quad (2.5)$$

### *Coordenadas horizontales*

La altura solar ( $h_s$ ) o ángulo de elevación del Sol por encima del horizonte es el ángulo entre la horizontal y la dirección de la radiación directa. Es el ángulo complementario del ángulo cenital, por lo que su cálculo se realiza aplicando la propiedad de que el coseno de un ángulo es igual al seno de su complementario. El ángulo cenital es una particularización del ángulo de incidencia.

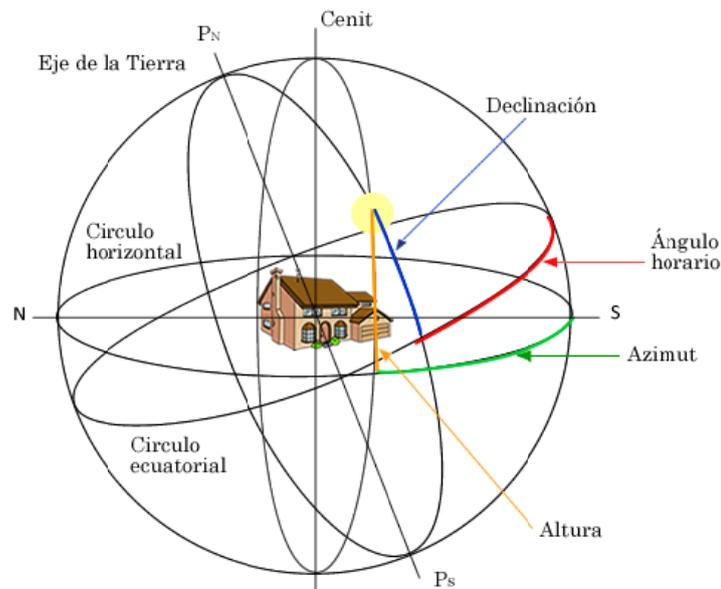
El azimut solar ( $\alpha_s$ ) o ángulo azimutal solar es el ángulo entre la proyección sobre un plano horizontal de la radiación directa y el meridiano local. Se toma como origen de azimut el mediodía solar. Para el hemisferio norte, el azimut es positivo si el captador está orientado hacia el oeste, negativo si el captador está orientado hacia el este. La ecuación (2.6) muestra la variación del azimut solar.

$$-180^\circ \leq \omega_s \leq 180^\circ \quad (2.6)$$

- Si está orientado hacia el este  $\omega_s < 0^\circ$

- Si está orientado hacia el oeste  $\omega_s > 0^\circ$
- y en el sur  $\omega_s = 0^\circ$

En la Figura (2.2) aparecen los ángulos descritos hasta el momento, tanto en coordenadas horarias como coordenadas horizontales.



**Figura 2. 2** Coordenadas horarias y horizontales para el posicionamiento del Sol

### *Radiación solar*

La radiación que emite el Sol en todas direcciones, producto de las reacciones termonucleares, corresponde a una parte del llamado espectro electromagnético, que en raras ocasiones suele superar los  $1000 \text{ W/m}^2$ , sobre la superficie de la Tierra, debido a la absorción y reflexión de la atmósfera y a la inclinación de los rayos solares. Toda la energía radiante absorbida por la cara soleada de la Tierra se equilibra con la irradiación infrarroja que toda la superficie de la Tierra reenvía al espacio.

De toda la energía irradiada por el Sol, el sistema atmósfera–Tierra intercepta durante su viaje alrededor de éste, el equivalente a  $1.7 \times 10^{14} \text{ kW}$ . Lo anterior representa que una superficie perpendicular a los rayos solares recibe  $1,367 \text{ W/m}^2$  y a esta unidad se le conoce como constante solar.

En la superficie terrestre la insolación diaria queda bastante alejada de los niveles extra-atmosféricos, por efecto de la absorción, la reflexión (efecto “albedo”) y la dispersión de radiación por parte de las nubes y del resto de elementos químicos en suspensión que, además de recortar los niveles de radiación directa que llega a la Tierra la transforman en radiación difusa.

Como ejemplo, en días soleados más del 90% de la radiación es directa, superando  $1.000 \text{ W/m}^2$  a nivel de la superficie de la Tierra; en cambio, para días seminublados se reduce hasta  $600 \text{ W/m}^2$ , en días nublados llega a  $300 \text{ W/m}^2$  y en días con niebla se puede llegar hasta  $100 \text{ W/m}^2$ .

La fracción de energía solar absorbida por la Tierra equivale a  $1,2 \times 10^{14} \text{ kW}$ , lo que representa más de 19.000 kW/habitante, la potencia correspondiente a 120 millones de reactores nucleares de 1.000 MW de potencia eléctrica unitaria o 340.000 veces la potencia nuclear instalada en el mundo. A lo largo de un año representa 14.000 veces el consumo energético mundial o 28.000 veces la producción mundial de petróleo. (2)

Cada cuerpo debido a su temperatura, según sus características intrínsecas, emite un patrón de radiación electromagnética (una forma de radiación característica) que puede identificarse en el espectro electromagnético. En la Figura 2.3 pueden apreciarse las diferentes formas de radiación electromagnética que emite el Sol. La radiación más común es la luz visible, pero también los rayos X o los rayos infrarrojos constituyen otras formas de radiación electromagnética. La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende, de forma complicada pero predecible, del día del año, de la hora y de la latitud.

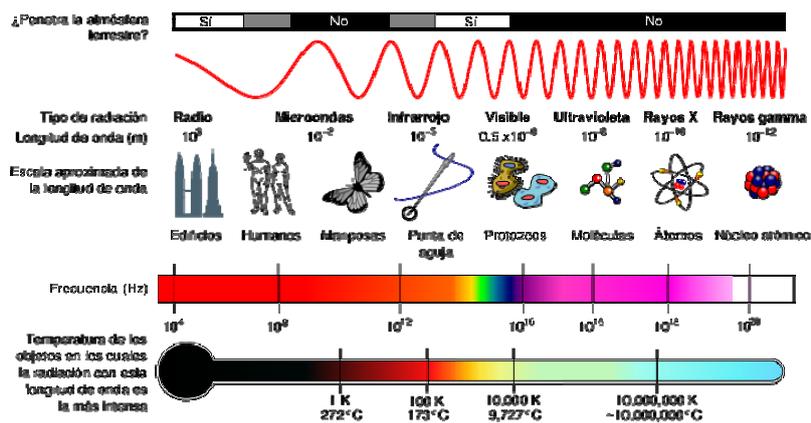


Figura 2. 3 Espectro electromagnético (5)

### Tipos de radiación y sus relaciones geométricas

A continuación se definen algunos conceptos comúnmente utilizados a lo largo de esta tesis, a saber.

- Radiación directa: Es la que se recibe directamente del Sol, sin sufrir ninguna dispersión o esparcimiento debido a la atmósfera. Generalmente se usa el subíndice “**b**” para indicar radiación directa, por el término que se utiliza en inglés *beam* (haz, rayo).
- Radiación difusa: es la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro, aun de día, como sucede por ejemplo en la Luna. Suele utilizarse el subíndice “**d**” para la radiación difusa.
- Radiación terrestre o albedo: es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, etc.
- Radiación total: la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie.
- Radiación global: es la suma de la radiación directa más la radiación difusa.

Para expresar la potencia solar, y de cualquier radiación, se utiliza el término irradiancia. La irradiancia,  $Wm^{-2}$ , es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área. Generalmente se usa el símbolo  $G$  para la irradiancia, junto con los subíndices adecuados:  $G_o$ ,  $G_b$ ,  $G_d$ , para la irradiancia extraterrestre, directa y difusa.

### La constante solar

La constante solar  $G_{sc}$ , es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera.

El valor comúnmente aceptado para  $G_{sc}$  ha variado en los últimos años, según las técnicas de medición que se han empleado, lo cual no indica que haya variado en sí la magnitud de la energía que se recibe del Sol.

$$G_{sc} = 1353 Wm^{-2} \quad (2.7)$$

que en otras unidades equivale a:

$$G_{sc} = 1.90 \text{ Cal}/\text{Cm}^2\text{min} = 428 \text{ Btu}/\text{ft}^2 \text{ hr} = 4871 \text{ MJ}/\text{m}^2 \text{ hr} \quad (2.8)$$

Estos valores fueron aceptados por la NASA (1971) y por la ASTM (6)

### *La radiación normal extraterrestre*

La radiación extraterrestre es equivalente a la radiación directa; esta radiación que incide sobre la Tierra está sujeta a las variaciones geométricas y a las condiciones físicas del propio Sol. La ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre, a lo largo del año es:

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.9)$$

En donde  $G_{on}$  es el flujo de radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación, y  $n$  es el número de día del año.

### **2.1.2 Posicionamiento del captador en la superficie terrestre**

La latitud y la longitud son coordenadas que localizan un punto cualquiera en la superficie terrestre. Se llama latitud ( $\phi$ ) de un lugar a la distancia angular o arco, medida en grados sobre un meridiano, entre dicho lugar y el Ecuador, que es la línea que se toma como origen de latitudes. Se mide en grados, minutos y segundos. Varía de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  y puede ser:

- Norte o positiva, si el lugar se encuentra por encima del Ecuador:  $\phi > 0$
- Sur o negativa, si el lugar se encuentra por debajo del Ecuador:  $\phi < 0$

Se llama longitud ( $\lambda$ ) de un lugar a la distancia angular o arco, medida en grados sobre el Ecuador, entre el meridiano del lugar y el meridiano de origen o de Greenwich. Se mide en grados, minutos y segundos. Varía de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  y puede ser:

- Este o positiva, si el lugar se encuentra a la derecha del meridiano origen:  $\lambda > 0$
- Oeste o negativa, si el lugar se encuentra a la izquierda del meridiano origen:  $\lambda < 0$

### **2.1.3 Posición relativa del Sol respecto al captador: ángulo de incidencia**

Por último, para caracterizar cómo la radiación incide sobre la superficie, se utilizan los siguientes parámetros:

Ángulo de incidencia ( $\theta$ ): es el ángulo entre la radiación directa sobre una superficie y la normal a dicha superficie, y es función de la latitud ( $\phi$ ), declinación ( $\delta_s$ ), ángulo horario ( $\omega_s$ ), azimut solar ( $\alpha_s$ ) y la inclinación de la superficie sobre la horizontal ( $\beta$ ).

La ecuación (2.7) es la expresión general para este ángulo (1).

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta_s \sin \phi \cos \beta - \sin \delta_s \cos \phi \sin \beta \cos \alpha_s \\ & + \cos \delta_s \cos \phi \cos \beta \cos \omega_s + \cos \delta_s \sin \phi \sin \beta \cos \alpha_s \cos \omega_s \\ & + \cos \delta_s \sin \beta \sin \alpha_s \sin \omega_s \end{aligned} \quad (2.10)$$

Para el caso particular de  $\beta=0^\circ$  (superficie horizontal), se define el ángulo cenital ( $\theta_z$ ) como el ángulo de incidencia de la radiación solar particularizado para  $\beta=0^\circ$ , ecuación (2.8).

$$\cos \theta_z = \sin \delta_s \cdot \sin \phi + \cos \delta_s \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega_s \quad (2.11)$$

También se define como el ángulo entre la vertical y la dirección que apunta hacia al Sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie horizontal. Introduciendo la definición de ángulo cenital en la expresión del ángulo de incidencia, se tiene la ecuación (2.12):

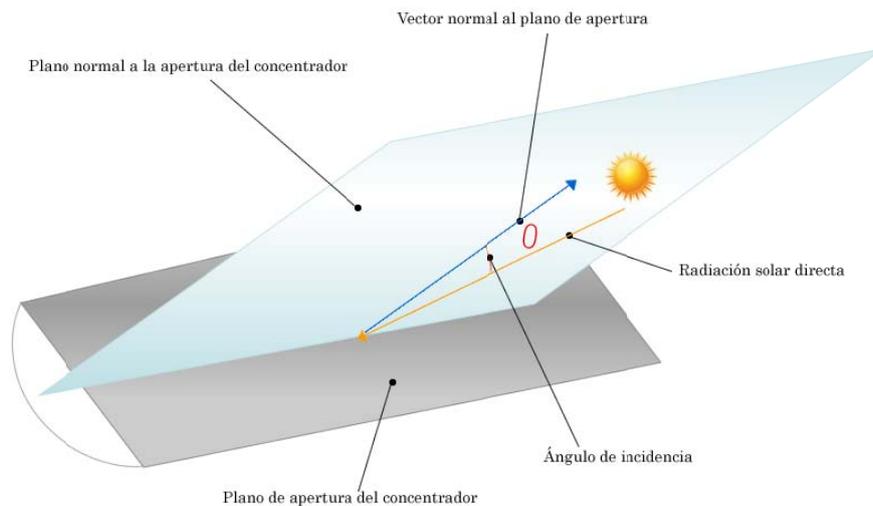
$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\alpha_s - \alpha_c) \quad (2.12)$$

Siendo  $\alpha_c$  el ángulo azimutal de la superficie en cuestión, es decir, el ángulo que forma la proyección sobre la horizontal del vector normal a dicha superficie, y la dirección sur.

#### 2.1.4 Ángulo de incidencia de un captador cilindro parabólico

A diferencia de los otros captadores de concentración (discos parabólicos y helióstatos), el sistema de seguimiento de los captadores cilindro parabólicos comúnmente posee un único grado de libertad, es decir, el espejo concentrador puede moverse según la elevación, pero no según el azimut cuando se encuentra orientado en la dirección norte-sur. Es por ello que el sistema de seguimiento solar solo puede posicionar el captador cilindro parabólico de forma adecuada para que el vector solar y el vector normal al plano de apertura del concentrador estén contenidos en el mismo plano, perpendicular a la apertura del concentrador. Lo ideal sería que la radiación solar directa fuera perpendicular al plano de apertura del concentrador pero, cuando se dispone de un

único grado de libertad en el sistema de seguimiento, esto se consigue en momentos muy concretos, y sólo en una orientación determinada del eje de los captadores (orientación N-S). La mayor parte del tiempo en que el captador cilindro parabólico esté funcionando, el vector solar y el vector normal al plano de apertura del concentrador formarán un ángulo de incidencia determinado, tal como se aprecia en la figura (2.3).



**Figura 2.4** Ángulo de incidencia de un captador cilindro parabólico.

El ángulo de incidencia tiene gran importancia en el aprovechamiento térmico del captador, pues no sólo limita la cantidad de radiación solar que resulta aprovechable por el captador ( $I_b \cos \theta$ ), sino también el área de apertura útil del concentrador, ya que influye en las pérdidas geométricas. Así pues, el cálculo del ángulo de incidencia resulta imprescindible si se desea conocer el comportamiento térmico de un captador cilindro parabólico. El cálculo concreto se realiza mediante un análisis trigonométrico las ecuaciones (2.13) y (2.14), dependen si el eje de giro del captador está orientado en dirección norte-sur o dirección este-oeste (7).

Captador con su eje de giro horizontal, orientación este-oeste:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \sqrt{1 + \cos^2 \delta_s (\cos^2 \omega - 1)} \right) \quad (2.13)$$

Captador con su eje de giro horizontal, orientación norte-sur:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \cos \delta_s \sqrt{(\cos \phi \cos \omega_s + \tan \delta_s)^2 + \text{sen}^2 \omega_s} \right) \quad (2.14)$$

Se pueden encontrar en la literatura especializada expresiones diferentes a las mostradas en estas ecuaciones, pero todas ellas conducen a un mismo valor de ángulo de incidencia. Aunque actualmente existen procedimientos de cálculo mucho más exactos, que pueden determinar el vector solar con una precisión mayor de la décima de grado, a efectos de cálculos de eficiencias y pérdidas geométricas, las ecuaciones anteriores son suficientemente exactas.

### 2.1.5 Imagen linear de los concentradores

Para entender cómo funcionan los captadores, es necesario describir las propiedades ópticas de los concentradores y la imagen que proyecta, es decir, el flujo de la radiación solar a través del foco, que esta produce. La imagen teórica que produce el concentrador alineada perfectamente, depende de la geometría del concentrador. Un concentrador parabólico se obtiene por rotación de una parábola alrededor de su eje, la intersección de la parábola y su eje es el vértice. En la Figura 2.5, se muestran las secciones representativas de un concentrador parabólico solar.

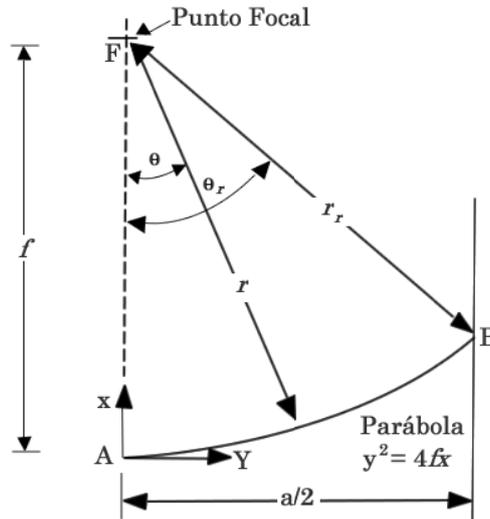


Figura 2. 5 Sección de un concentrador lineal parabólico

La radiación solar que incide sobre el concentrador con dirección paralela al eje principal de la parábola tiene una anchura angular  $\theta_s$  de  $0.53^\circ$  (i.e.  $32'$  ó  $0.00931$ ) (1). El punto sobre la parábola donde incide la radiación es el punto extremo B. Con este punto se forma el ángulo  $\theta_r$  que es el

ángulo de borde, y es descrito por AFB, la distancia máxima del foco F a la superficie es FB y se denota  $r_r$ . En la Figura 2.6 se muestra el tamaño de la imagen del cono reflejado.

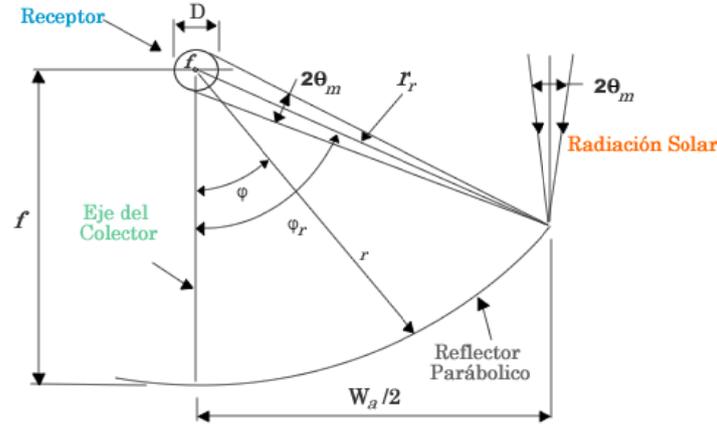


Figura 2. 6 Dimensión de la imagen de un concentrador lineal.

El ángulo de borde descrito por AFB está dado por:

$$\phi_r = \tan^{-1} \left[ \frac{8 \left( \frac{f}{a} \right)}{16 \left( \frac{f}{a} \right)^2 - 1} \right] = \sin^{-1} \left( \frac{a}{2r_r} \right) \quad (2.15)$$

Para un concentrador de forma perfecta y bien alineado, el diámetro del receptor cilíndrico que intercepta todos los rayos reflejados esta dado por:

$$D_r = 2r_r \sin 0.267 = \frac{a \sin 0.267}{\sin \phi_r} \quad (2.16)$$

Donde  $0.267^\circ$  ( $\theta_s/2$ ) es la mitad del ángulo del disco solar visto desde la Tierra.

Para un receptor plano y normal al eje de la parábola, la anchura W que intercepta toda la radiación reflejada es:

$$W = \frac{2r_r \sin 0.267}{\cos(\phi_r + 0.267)} = \frac{a \sin 0.267}{\sin \phi_r \cos(\phi_r + 0.267)} \quad (2.17)$$

De la Figura 2.6. Se tiene que para cualquier punto del reflector parabólico es:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \phi} \quad (2.18)$$

La distancia focal juega un papel determinante en el tamaño de la imagen, y la abertura  $a$ , es el factor determinante en la energía total que se recibe, por lo tanto la brillantez o la concentración del flujo de energía radiativa en el receptor del sistema de enfoque, será en función de la razón  $a/f$ .

## 2.2 Parámetros de diseño del captador solar de canal parabólico

Los concentradores de canal parabólico (CCP) se generan a partir de una parábola, como superficie reflectora, mediante una translación lineal dando como resultado un concentrador lineal. Las características geométricas de la parábola son las que la hace tan interesante en aplicaciones prácticas. La intersección de la parábola y su eje es el vértice; si se elige este vértice como origen de coordenadas, la ecuación de la parábola es:

$$Y^2 = 4fx \quad (2.19)$$

El diámetro  $D_a$  de la abertura de la parábola y el ángulo máximo  $\phi$  que la define (Figura 2.7), vienen relacionados por (8):

$$D_a = 4f \tan \frac{\phi}{2} \quad (2.20)$$

y el área de aceptación viene dada por:

$$A_a = \frac{\Pi D_a^2}{4} \quad (2.21)$$

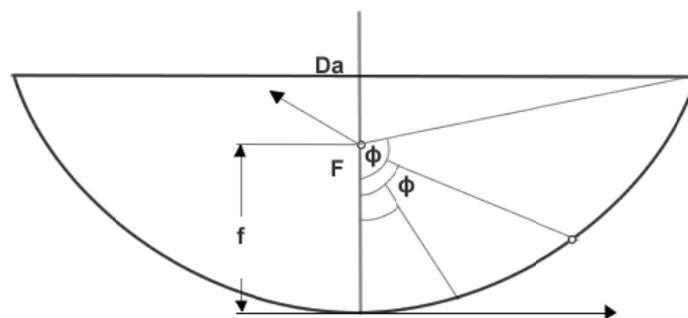


Figura 2.7 Abertura de la parábola.

Para el diseño de la superficie parabólica del concentrador se eligió una lámina reflejante de aluminio anodizado, de la marca Alanod<sup>®</sup>, con dimensiones 1.22 x 2.44 m y una reflectividad

cercana a 95%. El concepto de diseño utilizado fue no cortar la lámina para evitar distorsiones a la misma y por tanto, pérdidas ópticas. Considerando lo anterior, se eligió un ángulo de borde de 45°, ya que esta configuración, con la misma anchura de lámina, permite tener un área de captación mayor que con la configuración de  $\phi=90^\circ$ .

Con las ecuaciones 2.18, 2.19, 2.20 y conociendo los parámetros anteriores e iterando la abertura ( $D_a$ ) en una hoja de cálculo (Apéndice A), podemos obtener los parámetros desconocidos; dándonos como resultados la distancia del foco, siendo de  $f \sim 0.716$  m. Conociendo las restricciones que debía tener el CCP se procedió a diseñar el prototipo; en la cual se determino la abertura ( $D_a = 1.187$  m) y área de aceptación ( $A_a = 2.896$  m<sup>2</sup>) del CCP.

De acuerdo a la geometría de la parábola y con los parámetros dados, se puede determinar el diámetro del receptor teórico de acuerdo la ecuación 2.22, dado por (1):

$$D_r = 2r_r \sin 0.267 = \frac{a \sin 0.267}{\sin \phi_r} = \frac{D_a \sin \left(\frac{\theta_s}{2}\right)}{\sin \phi} \tag{2.22}$$

$$D_r = \frac{1.187 \sin(0.267)}{\sin 45} = 0.00782m$$

Por otro lado, una vez calculado el diámetro del receptor la concentración geométrica máxima está dada por:

$$C_{max} = \frac{A_a}{A_r} = \frac{WaL}{2\pi rL} = \frac{Wa}{\pi D} = \frac{1.187m}{\pi(0.00782m)} = 48.31 \tag{2.23}$$

**Tabla 2. 1** Valores teóricos del concentrador, sin tomar en consideración errores ópticos.

Especificaciones de diseño	Simbología	Valor	Unidades	Especificaciones de diseño
Área de abertura	$A_a$	~2.896	m <sup>2</sup>	Área de abertura
Ancho de abertura	$W_a$	1.187	M	Ancho de abertura
Longitud	L	2.44	M	Longitud
Distancia Focal	$D_f$	~0.716	M	Distancia Focal
Diámetro del tubo (teórico)	D	0.00782	M	Diámetro del tubo (teórico)
Área del receptor (teórico)	$A_r$	0.0599	m <sup>2</sup>	Área del receptor (teórico)
Concentración	C	~48.3	-	Concentración

Los cálculos anteriores fueron realizados tomando en consideración las dimensiones de la lamina, ya que este fue el parámetro de entrada para la construcción del CCP, se busco no dañar a la superficie al no hacerle cortes para facilitar su construcción del captador, otro factor fue que el captador fuera modular, es decir que se podría llevar a diferentes lugares sin dificultades y que sea de fácil ensamble para que en un futuro pueda ser comercialmente factible.

### 2.3 Trazado de Rayos

La óptica geométrica se fundamenta en la teoría de los rayos de luz, la cual considera que cualquier objeto visible emite rayos rectos de luz en cada punto de él y en todas direcciones a su alrededor. Cuando estos rayos inciden sobre otros cuerpos pueden ser absorbidos, reflejados o desviados (9).

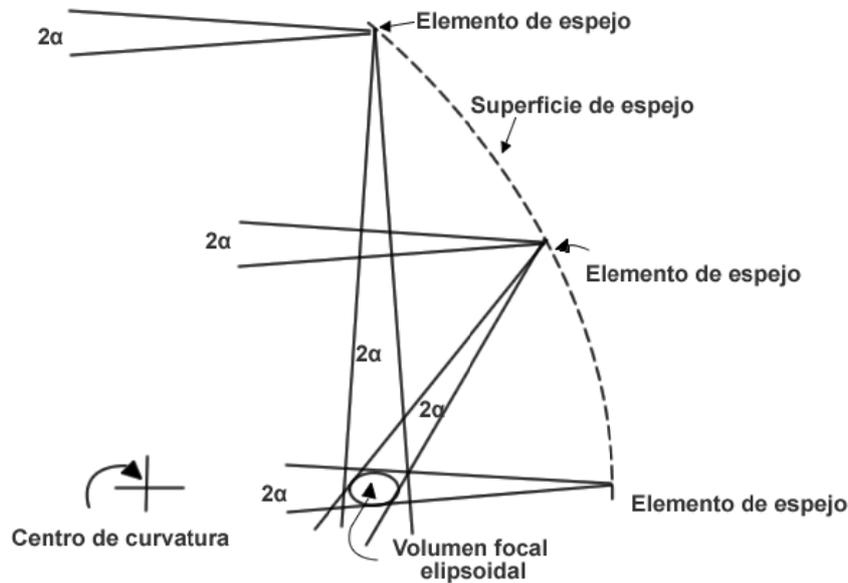
El trazado de rayos es el proceso gráfico para seguir la trayectoria de un gran número de rayos de radiación incidente en el sistema óptico de concentración y determinar su distribución en la superficie que los intercepta. Para un captador concentrador, el trazado de rayos inicia con el ensamble de rayos de radiación incidente en la apertura y determina la distribución e intensidad de aquellos rayos en el receptor.

En los sistemas de captadores solares el trazado de rayos se realiza mediante vectores. Para una superficie reflejante, se determinan la dirección y sentido, así como el punto de intersección de un rayo incidente con la superficie reflejante. La normal a la superficie se determina con base en la forma de la superficie reflejante y con base en la ley de reflexión donde el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, se establece la dirección de los rayos reflejados (1).

El volumen focal es aproximadamente elipsoidal como se ve en la Figura 2.7, en él se muestran los rayos del Sol con una desviación de  $\alpha = 16'$  (10). Con lo anterior, la forma óptima resulta elíptica, sin embargo por razones de disponibilidad y costos, se optó por un receptor tubular de sección transversal circular.

Para determinar por métodos gráficos (trazado de rayos) la posición, el tamaño y la orientación de la imagen (o del objeto) que proporciona un sistema óptico, supuesto perfecto, se pueden utilizar tres rayos singulares que pasen por el extremo del objeto (11). En este caso se ubicaron 21 puntos representativos a lo largo de la superficie de la parábola, ver Figura 2.8, reflejando tres rayos, cuyo rayo central va dirigido al foco de la parábola y los dos restantes con un ángulo

desviado  $\pm\delta$  con respecto al rayo central.



**Figura 2. 8** Diagrama de rayos para  $w$  el ángulo sólido  $2\alpha$  del Sol con desviación de  $16'$  para mostrar el origen del volumen focal elipsoidal.

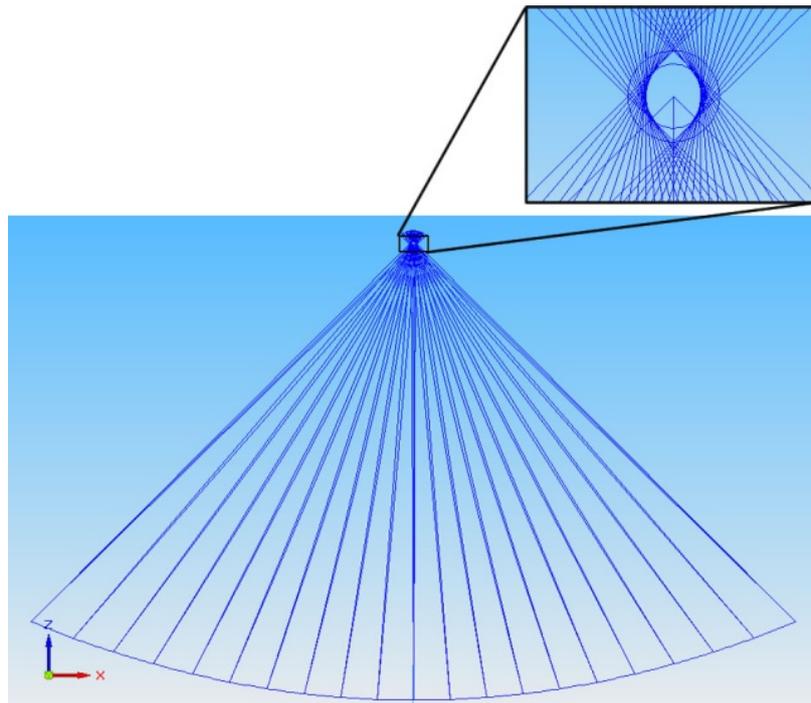
El tamaño del receptor se determinó de forma que intercepte la mayor cantidad de rayos reflejados desde todos los puntos de la parábola, es decir, el diámetro del receptor cilíndrico debe ser más grande que la máxima desviación de los rayos reflejados. En este caso, el radio mínimo está dado por el rayo reflejado desde el borde, debido a que el rayo recorre la mayor distancia  $D_s$  hacia el foco  $f$ :

$$R_{\min} = D \sin \delta = \left( \frac{x_o^2}{4f} + f \right) \sin \delta \tag{2.24}$$

Una ecuación equivalente es:

$$R_{\min} = \frac{2f \sin \delta}{(1 + \cos \phi)} \tag{2.25}$$

Esta última ecuación indica que si el ángulo de borde se incrementa también  $R_{\min}$  debe incrementarse, para una distancia focal fija. Un caso de estudio es considerar el área de apertura constante ( $x_o$ ) y minimizar el receptor, con el fin de maximizar la razón de concentración.



**Figura 2.9** Trazado de rayos reflejados, con una abertura de  $W_a = 1.187$  m, distancia focal de  $0.716$  m y un diámetro aproximado de  $0.00782$  m.

## Referencias

1. **John A. Duffie, William A. Beckman.** *Solar Engineering of thermal process.* New York : Jhon Wiley, 1991. págs. 369-370.
2. *Energías Renovables para todos "Solar Termica".* **Pep Puig, Marta Jofra.** s.l. : Haya Comunicación, 2008, pág. 7.
3. [http://www.elcielodelmes.com/Curso\\_iniciacion/curso\\_1.php](http://www.elcielodelmes.com/Curso_iniciacion/curso_1.php). [En línea] [Citado el: 20 de octubre de 2009.]
4. *Methods of testing to determine the thermal performance of solar collector.* **STANDARD, ASHRAE.** Ansi/Ashrae 93-1986.
5. [http://www.espectrometria.com/espectro\\_electromagntico](http://www.espectrometria.com/espectro_electromagntico). [En línea] [Citado el: 19 de Septiembre de 2009.]
6. *Notas sobre el curso de "Energía Solar".* **Miryam Mendoza Martínez.** Tlaquepaque, Jalisco : TESO, 1995.
7. **Rabl, A.** Active solar collectors and their applications. New York (EEUU) : Ed. Oxford University Press ISBN: 0195035461, 1985.
8. **M. Ibañez P., J.R. Rosell P., J.I. Rosell U.** *Tecnología Solar.* Madrid : Mundi-Prensa, 2005. pp 165-178.
9. **Aguilar, Rivas, Evelia y Valenzuela.** *Física III.* México : DGTI, 1999.
10. **Meinel, Aden B. Meinel y Marjorie P.** *Aplicaciones de la energía solar.* España : Reverté, 1982. págs. 180-182. ISBN-84-291-4199-5.
11. **García, José Rodríguez.** *Fundamentos de óptica geométrica.* España : Universidad de Oviedo, 1997. 8483170043.

## CAPITULO 3. Análisis térmico del CCP

---

### 3 Análisis térmico del CCP

En este capítulo se presenta el análisis térmico del captador solar, considerando las variables que se requieren para obtener la energía útil colectada y su interacción con los diversos parámetros de construcción. Es práctica común que el parámetro fundamental a considerar en un captador solar sea la eficiencia térmica. Esta se define como la razón de la energía útil entregada respecto a la energía incidente en la apertura del captador. El flujo solar incidente lo constituye la radiación solar directa y difusa. Mientras que los captadores solares planos pueden colectar ambos tipos de radiación, los captadores concentradores solo pueden utilizar la radiación directa si la razón de concentración es mayor a 10 (1).

Para determinar el funcionamiento de los captadores concentradores, se requiere de un análisis térmico y óptico. A continuación se presentan ambos análisis.

#### 3.1 Análisis óptico

La razón de concentración (C) se define como la razón del área de abertura respecto al área combinada receptor/absorbedor.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (3.1)$$

Para los captadores solares planos,  $C=1$ . Para captadores concentradores  $C$  siempre es mayor a 1. Para un captador con seguimiento en un solo eje, la máxima razón de concentración está dada por (2):

$$C_{\max} = \frac{1}{\text{sen}(\theta_m)} \quad (3.2)$$

y para un captador con seguimiento en dos ejes

$$C_{\max} = \frac{1}{\text{sen}^2(\theta_m)} \quad (3.3)$$

donde  $\theta_m$  es la mitad del ángulo de aceptación. Este ángulo denota la cobertura de la mitad de la zona angular dentro de la cual la radiación es aceptada por el receptor del concentrador. La radiación es recibida o colectada en un ángulo de  $2\theta_m$  porque la radiación incidente dentro de este ángulo alcanza al receptor después de pasar a través de la abertura. Este ángulo describe el campo angular dentro del cual la radiación se puede colectar en el receptor sin tener que posicionar el concentrador. Las ecuaciones 3.2 y 3.3 definen el límite máximo de concentración que se puede obtener para un determinado ángulo de visión del captador solar.

Para un captador con seguimiento,  $\theta_m$  está limitado por el tamaño del disco solar, pequeños errores de escala y por las irregularidades de la superficie del reflector aunado a errores de seguimiento. Para un captador solar perfecto con sistema de seguimiento,  $C_{\max}$  depende solo del disco solar, el cual tiene un ancho de  $0.53^\circ$  ( $32'$ ), (2). Por tanto,

$$\text{Para un seguidor de un solo eje: } C_{\max} = 1/\text{sen}(16') = 216$$

$$\text{Para un seguidor con dos ejes: } C_{\max} = 1/\text{sen}^2(16') = 46747$$

Por lo anterior se concluye que la razón de concentración para los captadores en movimiento es mucho más grande. Sin embargo, se requiere una gran exactitud en los mecanismos de seguimiento solar y una cuidadosa construcción del captador para incrementar la razón de concentración. En la práctica, debido a diversos errores, como pueden ser, errores en la tolerancia del mecanismo de movimiento, precisión de los sistemas de control de motores o precisión de los sensores de seguimiento, se utilizan valores de concentración muy bajos respecto a los teóricos.

Otro factor que se necesita determinar es el ángulo de incidencia para los diversos modos de seguimiento, en uno o dos ejes. En el caso de seguimiento en un eje, el movimiento se puede hacer de varias maneras, por ejemplo, este-oeste, norte-sur o paralelo al eje de la tierra. El modo de seguimiento afecta la cantidad de radiación incidente en la superficie del captador en proporción al coseno del ángulo de incidencia.

Por otra parte, la eficiencia óptica se define como la razón de la energía absorbida por el receptor respecto a la energía incidente en la apertura del captador. La eficiencia óptica depende de las propiedades ópticas de los materiales involucrados, la geometría del captador y de las imperfecciones que surgen de la construcción del captador. La eficiencia óptica está definida por (3)

$$n_o = \rho\tau\alpha\gamma \left[ (1 - A_f \tan(\theta)\cos(\theta)) \right] \quad (3.4)$$

donde,  $\rho$  es la reflectancia,  $\tau$  es la transmitancia,  $\alpha$  absorción,  $\gamma$  es el factor de intercepción del colector y  $A_f$  es el factor geométrico del colector.

La geometría del captador define el factor de forma  $A_f$ , el cual es un indicativo de la reducción efectiva del área de apertura debido a los efectos anormales de incidencia. Para un CCP, estos valores pueden obtenerse siguiendo la relación por (4):

$$A_f = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left[ 1 + \frac{W_a^2}{48f^2} \right] \quad (3.5)$$

El parámetro más complejo para determinar la eficiencia óptica en el CCP es el factor de intercepción  $\gamma$ . Este se define como la razón de la energía interceptada por el receptor respecto a la energía reflejada por el dispositivo de concentración, por ejemplo, la parábola. Estos valores dependen del tamaño del receptor, de los errores del ángulo de superficie del espejo parabólico y de la difusión de los rayos del sol.

Los errores asociados con la superficie de la parábola pueden ser de dos tipos, aleatorios y no aleatorios (5) Los errores aleatorios se definen como aquellos errores que son realmente arbitrarios en la naturaleza y por lo tanto, pueden ser representados por distribuciones de probabilidad normales. Dichos errores aleatorios se identifican por cambios aparente en la anchura del sol, efectos de dispersión causados por los errores aleatorios en la pendiente (por

ejemplo, la distorsión de la parábola durante la carga del viento) y efectos de dispersión asociados con la superficie reflectiva. Por otra parte, los errores no aleatorios surgen en la manufactura, ensamble y/o la operación del captador. Estos se pueden identificar en imperfecciones en la superficie reflectiva, errores de desalineación y posición (ubicación) del receptor. Los errores aleatorios se modelan estadísticamente para determinar la desviación estándar del total de la distribución de energía reflejada, e incidencia normal y se determinan por (6):

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + 4\sigma_{slope}^2 + \sigma_{mirror}^2} \quad (3.6)$$

donde  $\sigma_{sun}$ , es la desviación del ángulo del cono solar,  $\sigma_{slope}$ , desviación del ángulo por ajuste de seguimiento,  $\sigma_{mirror}$ , errores de superficie.

Los errores no aleatorios se pueden determinar si conocemos el error del ángulo de *desalineamiento*  $\beta$  (el ángulo entre el rayo reflejado desde el centro del Sol y la normal al plano de apertura del reflector) y el desplazamiento del receptor del foco de la parábola ( $d_r$ ). Como los errores en el perfil de la superficie reflectiva y el *desalinamiento* del receptor en el eje Y, tienen el mismo efecto solo se toma en cuenta un parámetro para ambos casos. De acuerdo con Guven y Bannerot [(6)] los errores aleatorios y no aleatorios se pueden combinar con los parámetros geométricos del captador, la razón de concentración ( $C$ ) y el diámetro del receptor ( $D$ ) para proporcionar parámetros de error universales en toda la geometría del captador. Estos son llamados “parámetros universales de errores” y se utiliza un asterisco para distinguirlo de los parámetros ya definidos. Usando los parámetros universales de error, es posible formular el factor de interceptación  $\gamma$  (5).

$$\gamma = \frac{1 - \cos \phi_r}{2 \sin \phi_r} x \int_0^{\phi_r} Erf \left( \frac{\sin \phi_r (1 + \cos \phi)(1 - 2d^* \sin \phi) - \pi\beta^*(1 + \cos \phi_r)}{\sqrt{2\pi}\sigma^*(1 + \cos \phi_r)} \right) - Erf \left( -\frac{\sin \phi_r (1 + \cos \phi)(1 + 2d^* \sin \phi) + \pi\beta^*(1 + \cos \phi_r)}{\sqrt{2\pi}\sigma^*(1 + \cos \phi_r)} \right) x \frac{d\phi}{(1 + \cos \phi)} \quad (3.7)$$

donde

- $d^*$  Parámetro de error no aleatorio universal debido a la mala ubicación del receptor y errores de perfil del reflector, ( $d^* = d_r/D$ )
- $\beta^*$  Parámetro de error no aleatorio universal debido a los errores angulares ( $\beta^* = \beta C$ )
- $\sigma^*$  Parámetro de error aleatorio universal ( $\sigma^* = \sigma C$ )
- $C$  Razón de concentración del captador [=  $A_a/A_r$ ]
- $D$  Diámetro exterior del tubo (m)
- $d_r$  Desplazamiento del receptor desde el foco (m)
- $\beta$  Error de desalineación angular (grados)

### 3.2 Análisis Térmico.

El análisis térmico generalizado de un captador concentrador solar es similar a la de un captador de placa plana (Flat-Plate collector, FPC). Es necesario derivar la expresión apropiada para el factor de eficiencia del captador  $F'$ , la pérdida de los coeficientes  $U_L$  en el captador y el factor de remoción de calor  $F_R$ . Para determinar los coeficientes de pérdida estándar, se pueden utilizar relaciones de transferencia de calor para tubos de vidrio.

La eficiencia instantánea de un captador concentrador se puede calcular haciendo un balance de energía en el receptor.

La ecuación (3.8) que determina la energía útil en un captador plano, se puede adaptar para el uso en captadores de concentración (ec. 3.9). Por lo tanto, la energía útil que proporciona un captador es:

$$q_u = A_c [G_t \tau \alpha - U_L (T_p - T_a)] = mc_p [T_o - T_i] \quad (3.8)$$

$$q_u = G_b n_0 A_a - A_r U_l (T_r - T_a) \quad (3.9)$$

La ganancia de energía útil por unidad de longitud del captador se puede expresar en términos de la temperatura local del receptor  $T_r$  como:

$$q'_u = \frac{q_u}{L} = \frac{A_a n_0 G_b}{L} - \frac{A_r U_L}{L} (T_r - T_a) \quad (3.10)$$

En términos de transferencia de energía al fluido a una temperatura local del fluido  $T_f$ :

$$q'_u = \frac{\left(\frac{A_r}{L}\right) (T_r - T_f)}{\frac{D_0}{h_{fi}} + \left(\frac{D_0}{2k} \ln \frac{D_0}{D_i}\right)} \quad (3.11)$$

Si  $T_r$  se elimina de las ecuaciones (3.10) y (3.11) tenemos:

$$q'_u = F' \frac{A_a}{L} \left[ n_0 G_b - \frac{U_L}{C} (T_f - T_a) \right] \quad (3.12)$$

Donde  $F'$  es el factor de eficiencia del captador y esta dado por:

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_0}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_0}{2K} + \ln \frac{D_0}{D_i}\right)} \quad (3.13)$$

Del mismo modo que para los captadores de placa plana, se puede utilizar el factor de remoción de calor y la ecuación (3.9) se puede escribir como:

$$q_u = F_R [G_b n_0 A_a - A_r U_L (T_i - T_a)] \quad (3.14)$$

La eficiencia del captador se puede obtener dividiendo  $q_u$  entre  $(G_b A_a)$ . Por lo tanto:

$$n = F_R \left[ n_0 - U_L \left( \frac{T_i - T_a}{G_b C} \right) \right] \quad (3.15)$$

Donde  $C$  es la razón de concentración [ $C=A_a/A_r$ ]. Para determinar el factor de remoción de calor ( $F_R$ ), se utiliza la ecuación (3.16), similar a la utilizada en captadores planos.

$$F_r = \frac{m c_p}{A_r U_L} \left( 1 - \exp \left[ \frac{U_L F' A_r}{m c_p} \right] \right) \quad (3.16)$$

Otro análisis usualmente realizado para los captadores solares de canal parabólico, es mediante la aplicación de un modelo de variables de dos dimensiones para el receptor, considerando la

variación circunferencial del flujo solar que se muestra en la Figura 3.1 y 3.2. Ese análisis puede realizarse dividiendo en secciones nodales longitudinales e isotérmicas al receptor (7), como se muestra en la Figura 3.3, y aplicando el principio de balance de la energía a los cristales como también al nodo del receptor.

Este análisis puede dar la distribución de temperaturas a lo largo de la circunferencia y la longitud del receptor, por tanto, los puntos de alta temperatura, que podría alcanzar una temperatura por encima de la temperatura de degradación del receptor del recubrimiento selectivo, se puede determinar.

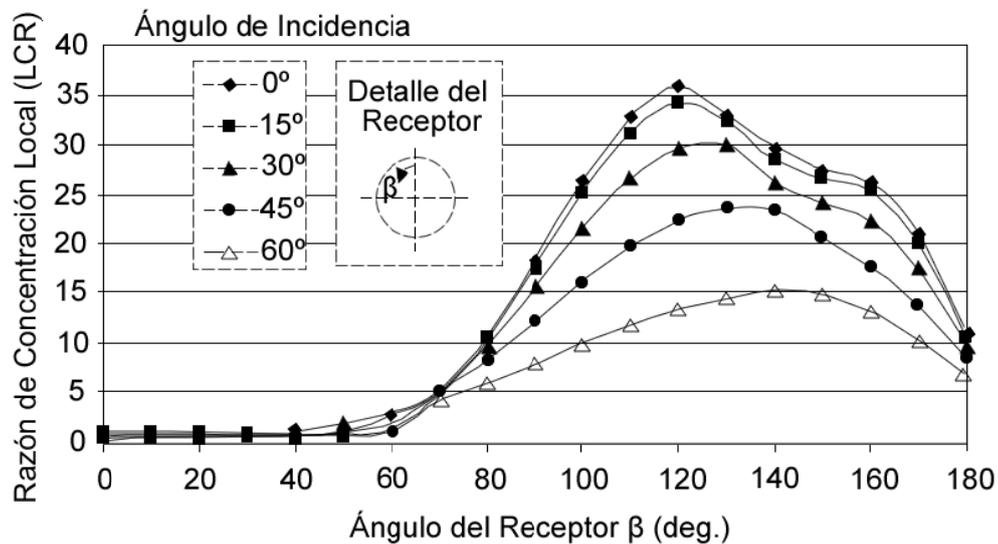


Figura 3.1 Razón de concentración local en el receptor del CCP

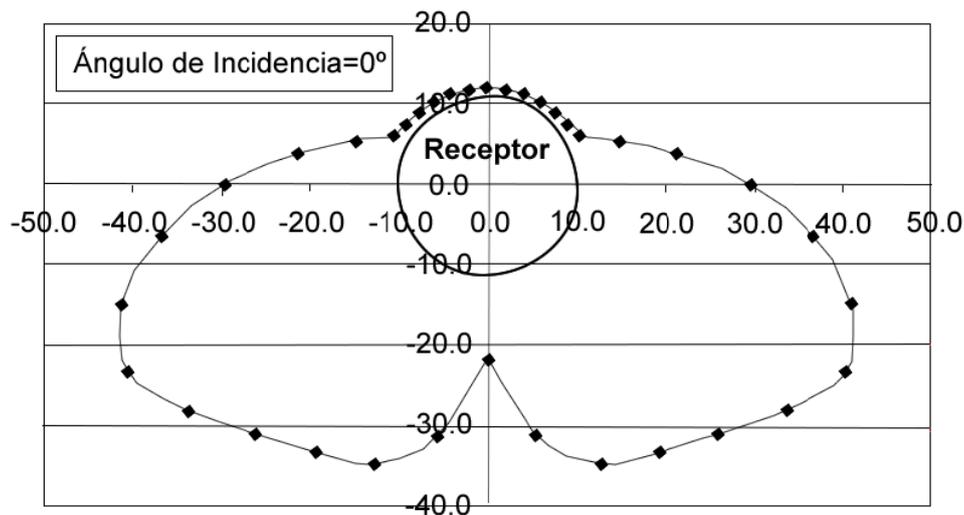


Figura 3.2 Mejor representación del LCR del captador con el receptor con un diámetro de 22mm y un ángulo de borde de 90°

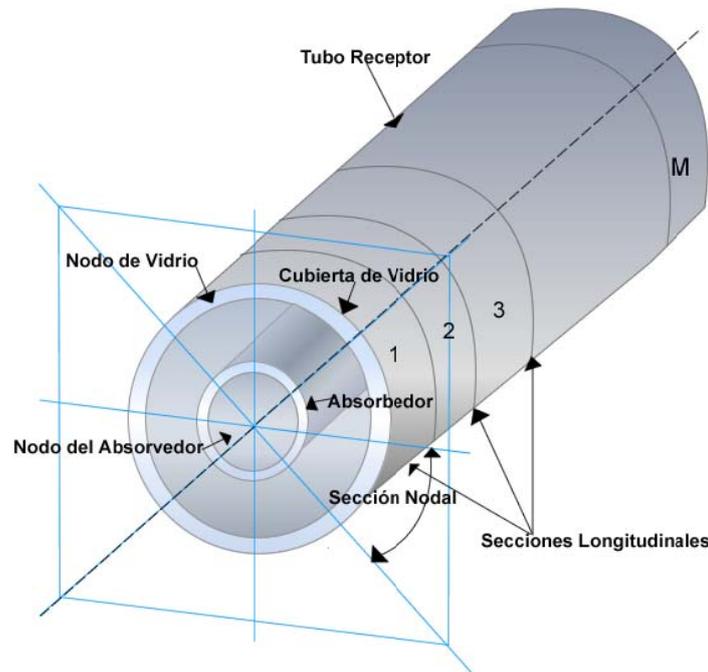


Figura 3. 3 Secciones nodales y longitudinales del receptor

### 3.3. Análisis de la Segunda Ley.

El análisis presentado ahora está basado en el trabajo reportado por Bejan's [(8),(9)]. Sin embargo, el análisis se adapta a los captadores de imagen, debido a que la reducción de generación entropía es más importante en sistemas de alta temperatura. Considerando que el captador tiene un área de apertura  $A_a$  (o superficie total de helióstatos) y recibe la radiación solar a una razón  $Q^*$  del Sol como se muestra en la Fig. 3.4. La transferencia neta de calor solar  $Q^*$  es proporcional al área del captador  $A_a$  y el factor de proporcionalidad  $q^*$  ( $W/m^2$ ) el cual varía con la posición geográfica de la Tierra, la orientación del captador, condiciones meteorológicas y la hora del día. En este análisis  $q^*$  se asume como una constante y el sistema en estado estable.

$$Q^* = q^* A_a \quad (3.17)$$

Para sistemas de concentración  $q^*$  es la energía solar que incide sobre el reflector. Con el fin de obtener la mayor parte de esta energía incidente se deben utilizar mecanismos de seguimiento con gran precisión y además, tener en cuenta los errores ópticos de la superficie reflectiva, incluida su reflectancia y las propiedades ópticas del cristal del receptor.

Por lo tanto, la radiación que incide sobre el receptor  $q^*$  es una función de la eficiencia óptica, representada por todos los errores anteriores. Para los captadores de concentración se puede utilizar la ecuación (3.4). La radiación que incide sobre el receptor es:

$$q_0^* = \eta_o q^* = \frac{\eta_o Q^*}{A_a} \tag{3.18}$$

La radiación solar incidente se entrega parcialmente a un ciclo de potencia (o usuario), mediante transferencia de calor  $Q$  en el receptor (el cual esta a temperatura  $T_r$ ). La fracción restante  $Q_o$  representa la pérdida de calor ambiental del captador

$$Q_o = Q^* - Q \tag{3.19}$$

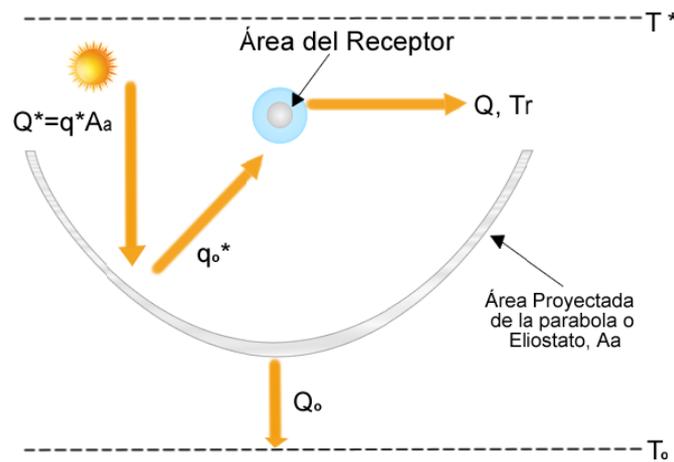


Figura 3. 4 Modelo de un captador concentrador de imagen.

Para captadores concentradores de imagen,  $Q_o$  es proporcional a la diferencia de la temperatura ambiente del receptor y el área del receptor, dado por:

$$Q_o = U_r A_r (T_r - T_o) \tag{3.20}$$

donde  $U_r$  es el coeficiente global de transferencia de calor basado en  $A_r$ . Cabe señalar que  $U_r$  es una constante característica del captador.

Combinando las ecuaciones (3.19) y (3.20), es evidente que la temperatura máxima del receptor ocurre cuando  $Q = 0$ , por ejemplo, cuando la transferencia de calor solar  $Q^*$  se pierde en el ambiente. La temperatura máxima del captador se da en forma adimensional por.

$$\theta_{max} = \frac{T_{r,max}}{T_o} = 1 + \frac{Q^*}{U_r A_r T_o} \quad (3.21)$$

Combinando las ecuaciones (3.18) y (3.21)

$$\theta_{max} = 1 + \frac{q_o^* A_a}{\eta_o U_r A_r T_o} \quad (3.22)$$

Considerando que  $C = A_a/A_r$ , se tiene:

$$\theta_{m\acute{a}x} = 1 + \frac{q_o^* C}{\eta_o U_r T_o} \quad (3.23)$$

Como se puede observar en la ecuación anterior  $\theta_{m\acute{a}x}$  es proporcional a  $C$ , por ejemplo, cuanto mayor sea la razón de concentración del captador, mayor es  $\theta_{m\acute{a}x}$  y  $T_{r, m\acute{a}x}$ . Al término  $T_{r, m\acute{a}x}$  en la ecuación (3.21) se le conoce también como temperatura de estancamiento del captador, por ejemplo, la temperatura que se puede obtener sin flujo de fluido. En forma adimensional la temperatura del captador  $\theta = T_r/T_o$  variará entre 1 y  $\theta_{m\acute{a}x}$ , en función de la razón de calor entregado  $Q$ . El temperatura de estancamiento  $\theta_{m\acute{a}x}$  es el parámetro que describe el comportamiento del captador con respecto a la pérdida de energía del captador hacia el ambiente, como no hay flujo a través del captador y toda la energía colectada se utiliza para elevar la temperatura del fluido de trabajo a temperatura de estancamiento, que se fija en un valor correspondiente a la energía colectada igual a la energía perdida al ambiente. De esta manera la eficiencia del captador se da por:

$$\eta_c = \frac{Q}{Q^*} = 1 - \frac{\theta - 1}{\theta_{max} - 1} \quad (3.24)$$

Por lo tanto,  $\eta_c$  es una función lineal de la temperatura del captador. En un punto de estancamiento la transferencia de calor  $Q$ , conduce a cero exergía o cero potencial para producir trabajo útil.

### 3.4 Razón mínima de generación de entropía.

La reducción en la razón de generación de entropía es la misma que la maximización en la potencia de salida. El proceso de colección de energía solar se acompaña por la generación de entropía aguas arriba, aguas abajo y dentro del captador, como se muestra en la Figura 3.5.

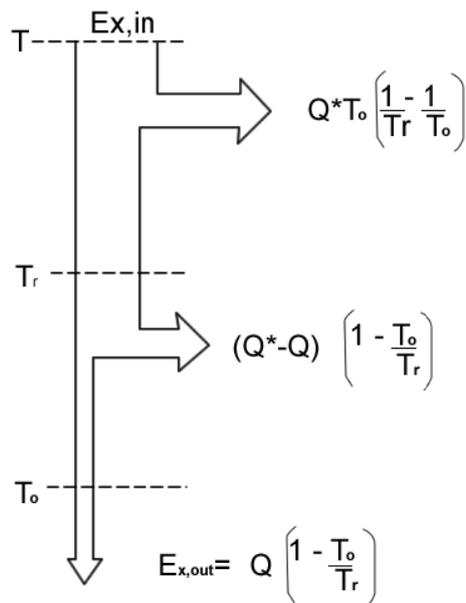


Figura 3.5 Diagrama de flujo de exergía.

La entrada de exergía viene de la radiación solar incidente en la superficie del captador como:

$$E_{x,in} = Q^* \left( 1 - \frac{T_o}{T^*} \right) \quad (3.25)$$

Donde  $T^*$  es la temperatura aparente del sol como una fuente de exergía. En este análisis se utiliza el valor sugerido por Petela (10), por ejemplo  $T^*$  es aproximadamente igual a  $\frac{3}{4} T_s$ , donde  $T_s$  es la temperatura de cuerpo negro del sol, la cual es aproximadamente de 6000 K. Por tanto, la  $T^*$  considerada aquí es de 4500 K. Se debe notar que en este análisis  $T^*$  también se considera una constante y su valor es mucho más grande que  $T_o$ ,  $E_{x,in}$  es muy cercano a  $Q^*$ . La exergía de salida del captador está dada por:

$$E_{x,out} = Q \left( 1 - \frac{T_o}{T_r} \right) \quad (3.26)$$

Mientras que la diferencia entre  $E_{x,in} - E_{x,out}$  representa la exergía destruida. De la Figura 3.5, la razón de generación de entropía se puede escribir como:

$$S_{gen} = \frac{Q_o}{T_o} + \frac{Q}{T_r} - \frac{Q^*}{T_*} \quad (3.27)$$

Esta ecuación se puede escribir también con la ayuda de la ecuación (3.20) como:

$$S_{gen} = \frac{1}{T_o} \left[ Q^* \left( 1 - \frac{T_o}{T_*} \right) - Q \left( 1 - \frac{T_o}{T_r} \right) \right] \quad (3.28)$$

Utilizando las ecuaciones (3.25) y (3.26), la ecuación (3.28) queda:

$$S_{gen} = \frac{1}{T_o} (E_{x,in} - E_{x,out}) \quad (3.29)$$

O

$$E_{x,out} = E_{x,in} - T_o S_{gen} \quad (3.30)$$

Por tanto, si consideramos  $E_{x,in}$  constante, la maximización de la exergía de salida ( $E_{x,out}$ ) es la misma que la minimización de la generación de entropía total,  $S_{gen}$ .

### 3.5 Temperatura óptima del captador

Sustituyendo las ecuaciones (3.19) y (3.20) en la ecuación (3.28) la razón de generación de entropía puede ser escrito como:

$$S_{gen} = \frac{U_r A_r (T_r - T_o)}{T_o} - \frac{Q^*}{T_*} + \frac{Q^* - U_r A_r (T_r - T_o)}{T_r} \quad (3.31)$$

Aplicando la ecuación (3.23) en la ecuación (3.31) y realizando varias manipulaciones se tiene:

$$\frac{S_{gen}}{U_r A_r} = \theta - 2 - \frac{q_o^* C}{\eta_o U_r T_*} + \frac{\theta_{max}}{\theta} \quad (3.32)$$

El término adimensional  $S_{gen}/U_r A_r$  representando por el hecho de que la razón de generación de entropía se escala con el tamaño finito del sistema, el cual se describe mediante  $A_f = A_a/C$ .

Derivando la ecuación (3.32) con respecto a  $\theta$  y fijando en cero la temperatura óptima del captador ( $\theta_{opt}$ ) para la mínima generación de entropía se obtiene.

$$\theta_{opt} = \sqrt{\theta_{max}} = \left(1 + \frac{q_o^* C}{\eta_o U_r T_o}\right)^{1/2} \quad (3.33)$$

sustituyendo  $\theta_{max}$  por  $T_{r,max}/T_o$  y  $\theta_{opt}$  por  $T_{r,opt}/T_o$ , ecuación (3.33) se puede escribir como:

$$T_{r,opt} = \sqrt{T_{r,max} T_o} \quad (3.34)$$

Esta ecuación afirma que la temperatura óptima del captador es la media geométrica de la máxima temperatura del captador (estancamiento) y la temperatura ambiente. Las temperaturas típicas de estancamiento y las temperaturas óptimas de operación resultantes de varios tipos de captadores concentradores se muestran en la Tabla 3.1. Las temperaturas de estancamiento mostradas en la Tabla 8 fueron estimadas considerando principalmente las pérdidas por radiación del captador.

Como se puede ver de los datos mostrados en la Tabla 3.1, para captadores de alto rendimiento, similares a los de receptor central, es mejor operar el sistema con altas razones de flujo a fin de bajar la temperatura cerca del valor mostrado en vez de operar a altas temperaturas, a fin de obtener una eficiencia termodinámica mayor del captador.

**Tabla 3. 1** Temperaturas óptimas para varios tipos de captadores concentradores.

Tipo de captador	Razón de concentración	Temp. de estancamiento (°C)	Temperatura Óptima (°C)
Canal parabólico	50	565	227
Disco parabólico	500	1285	408
Torre (receptor) central	1500	1750	503

Utilizando la ecuación (3.32) en la ecuación (3.33), la mínima razón de generación de entropía correspondiente es:

$$\frac{S_{gen,min}}{U_r A_r} = 2(\sqrt{\theta_{max}} - 1) - \frac{\theta_{max} - 1}{\theta_*} \quad (3.35)$$

Donde  $\theta_* = T^*/T_o$ . Cabe señalar que para captadores de placa plana y captadores de baja razón de concentración, el último término de la ecuación (3.35) es insignificante, ya que  $\theta_*$  es mucho más

grande que  $\theta_{max-1}$ , pero esto no es para captadores de alta concentración, como el receptor central y el disco parabólico, los cuales tienen temperaturas de estancamiento de varios miles de grados.

Aplicando las temperaturas de estancamiento mostradas en la Tabla 3.1 en la ecuación (3.35), se obtiene la gráfica de entropía adimensional generada respecto a la razón de concentración de los captadores, ver Figura 3.6.

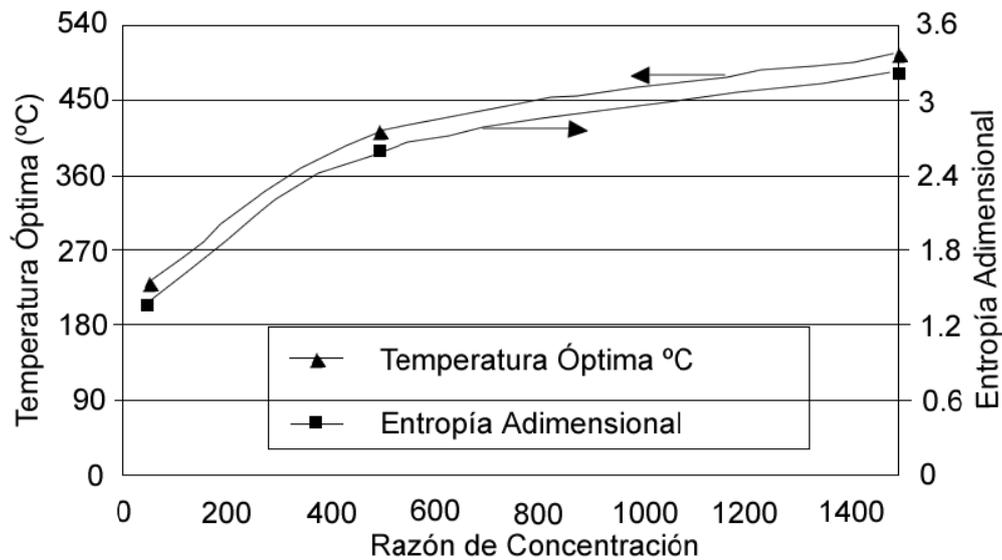


Figura 3. 6 Entropía generada y temperatura óptima respecto a la razón de concentración del captador.

## Referencias

1. *Optics of parabolic trough solar energy collectors possessing small concentration ratios.* **Prapas DE, Norton B, Probert SD.** s.l. : solar energy, 1987, págs. 541-50.
2. **John A. Duffie, William A. Beckman.** *Solar Engineering of thermal process.* New York : Jhon Wiley, 1991. págs. 369-370.
3. **Shoda MS, Mathur SS, Malik MAS.** *Reviews of renewable energy resources.* New York : Wiley, 1984.
4. *Geometrical effects on the performance of trough collector.* **MS, Jeter.** s.l. : Solar Energy, 1993.
5. *Derivation of universal error parameter for comprehensive opitical analysis of parabolic troughs.* **Guyen HM, Bannerot RB.** Knoxville, USA : Solar Energy, 1985.
6. *Determination of error tolerances for the opitical design of parabolic troughs for developing countries.* **Guyen HM, Bannerot RB.** s.l. : Solar Energy, 1986.
7. *Thermal Analysis of direct steam generation in parabolic trough collector.* **Karimi A, Guven HM, Thomas A.** s.l. : Solar Energy.
8. *Second law analysis and syntesis of solar collector systems.* **Bejan A, Kearney DW, Kreith F.** s.l. : J Solar Energy Engng, 1981.
9. *Entropy generation minimization 2nd ed.* **A., Bejan.** s.l. : Boca raton: CRC, 1995.
10. *Exergy of heat radiation.* **R., Petela.** s.l. : ASME J Heat Transfer, 1964.

# CAPITULO 4. Diseño, modelado FEM y construcción del CCP

---

## 4.1 Introducción

En este capítulo se presenta el diseño y modelado por elementos finitos del CCP. Con base en la geometría obtenida por trazado de rayos, se determino el diseño de las costillas que componen la estructura del captador. Las características que debe cumplir el CCP diseñado son las siguientes: bajo costo de producción, estructuralmente resistente y diseño de fácil construcción. Por esta razón, se decidió utilizar una lámina reflectiva de aluminio ALANOD® en su tamaño comercial, de 1.22 m x 2.44 m, con el propósito de evitar cortes que la puedan deformar permanentemente y reducir al mínimo desperdicios de material, ya que la lámina se instala en la estructura sin modificaciones, tal y como procede de la fabrica. Se presenta además, el proceso de construcción del captador y su ensamble hasta obtener la configuración final.

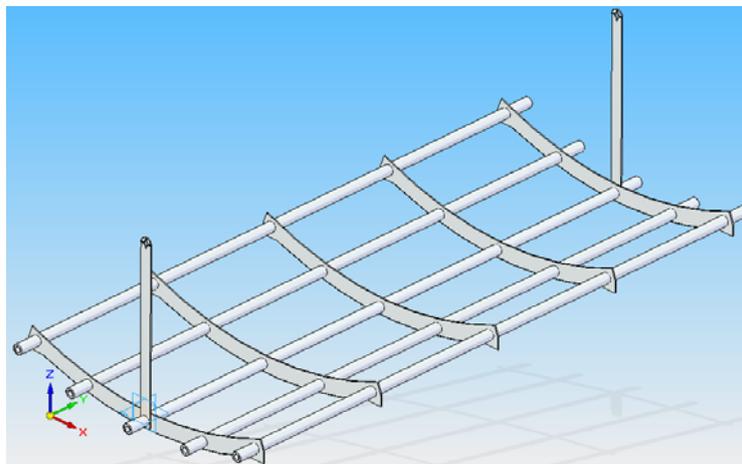
## 4.2 Parámetros de Diseño del Captador Solar

La reflectividad de la lámina de aluminio es cercana a 95%. Además del tamaño de la lámina, se decidió utilizar como parámetro de diseño un ángulo de borde ( $\varphi$ ) de  $45^\circ$ , con el objetivo de tener un área de abertura mayor comparada con un CCP de  $90^\circ$ . Si bien se ha demostrado que con el ángulo de  $90^\circ$ , se minimiza la distancia media entre el foco y el reflector y por tanto la desviación de la radiación directa, de tal forma que los errores de inclinación y seguimiento son menos pronunciados. Sin embargo, la construcción de un captador con  $45^\circ$  de apertura proporciona un área de captación mayor que uno de  $90^\circ$ , si se considera utilizar la misma lámina reflectiva. En un trabajo previo (1) se presentó el diseño de un CCP de  $90^\circ$  y los resultados se compararán con los obtenidos en esta investigación.

El diseño de este tipo de captador presenta mayores complicaciones que uno de  $90^\circ$ , ya que la distancia focal aumenta, por tanto el diseño estructural debe considerar un soporte para el tubo absorbedor, el cuál debe llevar una cubierta tubular de vidrio para evitar las pérdidas convectivas. Con base en las dimensiones de la lámina de aluminio y el ángulo de borde se determinó la distancia focal cercana a 0.716m.

Para el diseño del CCP se utilizó el software Solid-Edge para diseño de elementos en tres dimensiones. Permite el modelado de piezas de distintos materiales, doblado de chapas, ensamblaje de conjuntos, soldadura y funciones de dibujo en plano para ingenieros (2).

El diseño de las costillas así como toda la estructura del CCP, fueron obtenidos con base en los resultados de una hoja dinámica de cálculo (Apéndice A), la cual contiene parámetros como: abertura del captador, distancia focal y las coordenadas de la parábola, con la cual se genera el elemento sólido, en este caso, la costilla del captador. Los parámetros de diseño se especificaron en el apartado 2.2. En el Apéndice C se presentan los planos técnicos de los elementos componentes del captador. En la Figura 4.1 se observa el diseño final del captador.

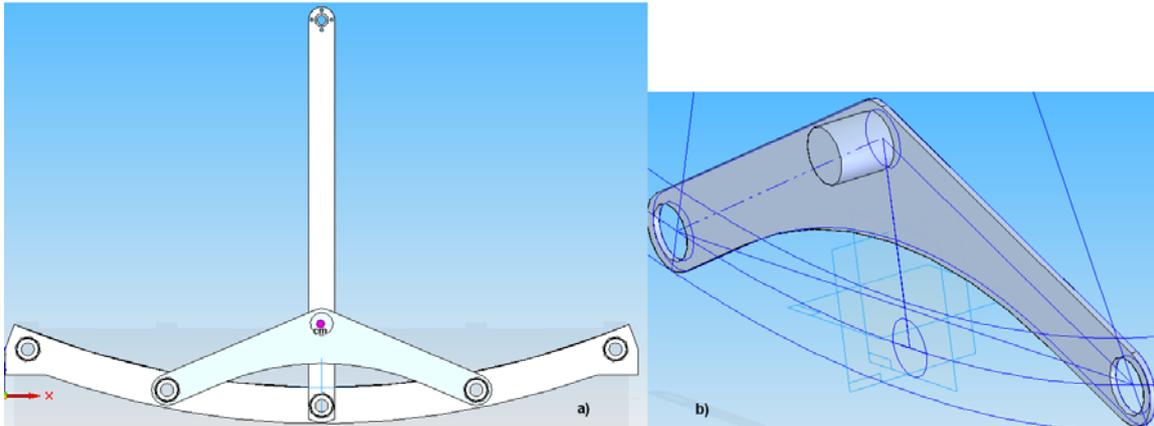


**Figura 4. 1** Diseño del CCP realizado en Solid-Edge V.20

El CCP cuenta con un diseño que lo hace ligero y a la vez rígido, ya que cuenta con cinco costillas transversales de forma parabólica, unidas por cinco tubos, como se observa en la Figura 4.2. Se observan también los brazos que soportan el tubo absorbedor. Todo el material utilizado en la construcción del captador fue aluminio.

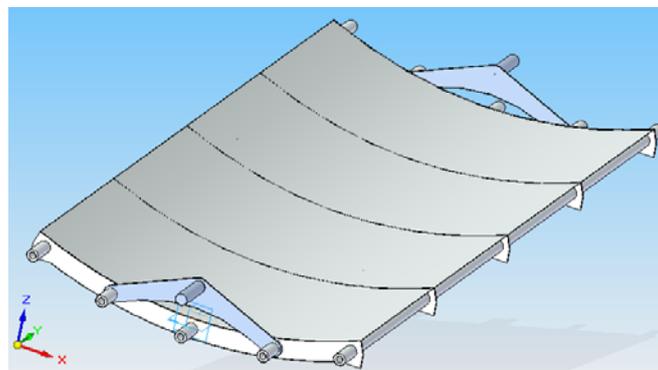
Para diseñar el soporte del captador, fue necesario determinar el centro de masa del mismo, con el propósito de utilizar una carga mínima para su posicionamiento norte-sur. Es decir, al ubicar el soporte pivote en el centro de masa del captador, éste se podría mover con una mínima fuerza. En

la Figura 4.2 a y b, se observan el centro de masa y el brazo soporte para colocar el captador en el banco de pruebas.



**Figura 4. 2** Imagen del captador con el centro de masa (a), Soporte del captador con el pivote ubicado en el centro de masa de la estructura (b).

En la Figura 4.3 se muestra la estructura del captador con la lámina de aluminio colocada sobre las costillas. Aunque no se utilizó este modelo para el análisis por elementos finitos, se presenta el diseño para fines ilustrativos.



**Figura 4. 3** Colocación de la lámina de aluminio reflejante

Para colocar el tubo absorbedor en el punto focal, se colocaron dos placas de aluminio en los extremos del captador y unidas a éste. En los extremos de las placas se perforaron dos agujeros de 19 mm de diámetro, en donde se colocó el tubo absorbedor de acero inoxidable. En la Figura 4.4 se observa una imagen del captador con el tubo absorbedor ya instalado. Es preciso mencionar que adicionalmente se le colocaron unos cables tensores de acero a los soportes del absorbedor para darles más rigidez.

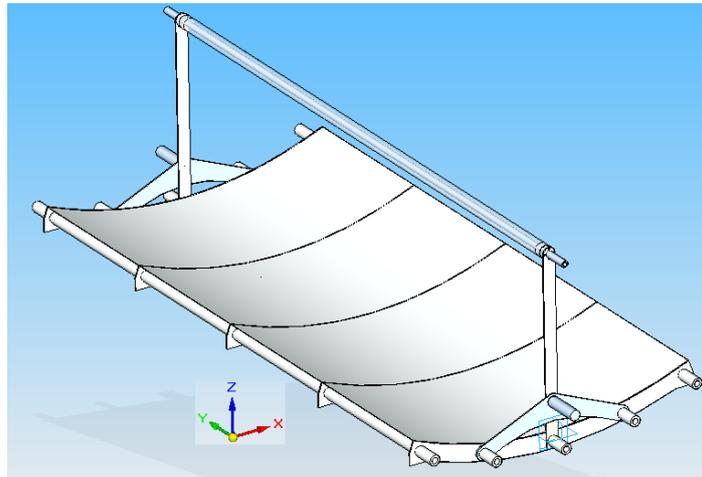


Figura 4. 4 Ensamble final del CCP de 45°

Finalmente, para colocar la cubierta de vidrio sobre el tubo absorbedor, para reducir las pérdidas convectivas, se diseñó un soporte de teflón que evita el contacto entre la cubierta de vidrio y el tubo de acero inoxidable. El soporte de teflón se atornilla al extremo de las placa soporte del tubo absorbedor, ver Figura 4.5.

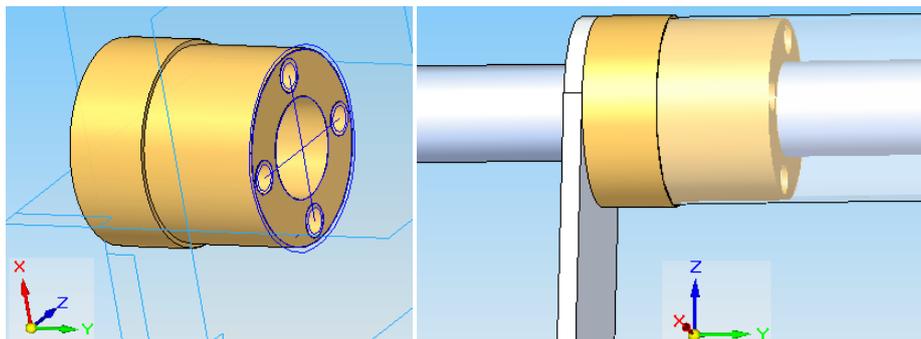


Figura 4. 5 Detalle de la unión entre el tubo absorbedor y la cubierta de vidrio.

El siguiente paso en el diseño del captador es el modelado por elementos finitos, para evaluar su resistencia estructural. A continuación se presentan los detalles del modelado por elementos finitos.

### 4.3 Modelado en MEF (Método de Elementos Finitos) CCP

Para el modelado FEM se utilizó el software comercial ALGOR (3), utilizando el módulo de análisis de esfuerzos estáticos, es decir, no se considera ningún efecto dinámico como pueden ser las cargas ocasionadas por el viento o esfuerzos térmicos.

Esta simulación tiene como finalidad conocer los esfuerzos mecánicos del captador cuando está sujeto a cargas estáticas que le ocasionen flexión, torsión, tensión, compresión o cortantes. Los

resultados obtenidos de la simulación se comparan con el esfuerzo permisible del material, y si éstos son menores se considera que el diseño propuesto es satisfactorio. El criterio de diseño para esfuerzos mecánicos fue el de von Mises, el cual se describe brevemente en el apéndice B.

El análisis estructural que se debió haber hecho para este modelo fue el de efecto túnel de viento. Es decir, el modelo CAD del captador se coloca en un volumen de control que simula un túnel de viento, por donde se hace pasar un fluido, en este caso aire. Con este análisis es posible determinar las regiones en donde el viento genera los esfuerzos mayores. Sin embargo, por las restricciones en el equipo de cómputo no se llevó a cabo. En su lugar se utilizaron tres casos específicos que, en un momento dado, simulan los efectos del viento en la estructura.

El primer caso fue para someter al captador a torsión, para esto se colocaron dos cargas de 200 N en los dos extremos del captador. La dirección de las cargas, ver Figura 4.6, ocasiona que el captador quede sometido a torsión. Por su parte, ambos soportes del captador se restringieron de rotación y traslación en  $x$ ,  $y$  y  $z$ , para los tres casos de análisis. En el segundo caso, someter al captador a cargas laterales, se aplicaron dos fuerzas en 300 N en las costillas exteriores y 3 fuerzas de 200 N en las costillas interiores, ver Figura 4.7. En el tercer caso, someter al captador a cargas frontales, se aplicaron cuatro fuerzas de 200 N cada una en las esquinas del captador, todas en la misma dirección, ver Figura 4.8.

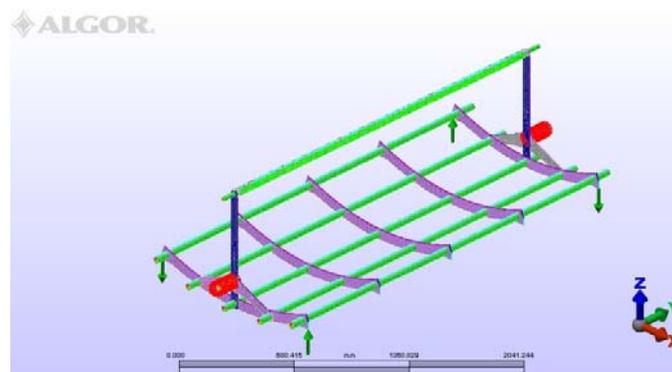


Figura 4.6 Condiciones de frontera para cargas de torsión.

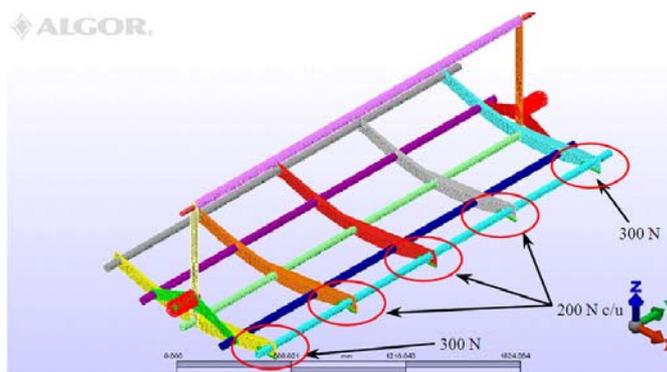


Figura 4. 7 Condiciones de frontera para cargas laterales

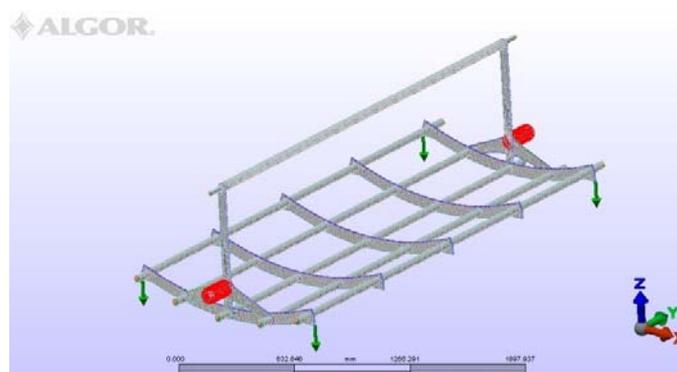


Figura 4. 8 Condiciones de frontera para cargas frontales.

El material utilizado en la simulación fue aluminio para las cortillas y los tubos de aluminio que las unen y acero inoxidable (AISI 202) para el tubo absorbedor. Los elementos utilizados fueron bloques y tetraedros, con los cuales se tiene una malla más uniforme. La unión entre los elementos que componen el captador se considero como soldadura, es decir, solo los nodos exteriores están unidos y los interiores no se consideran unidos, como en una soldadura real.

#### 4.4 Resultados del modelado MEF

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.1. De aquí se observa que el caso más crítico es cuando el captador está sujeto a cargas laterales. Sin embargo, en este caso el factor de seguridad mínimo es de 4.20 y tomando en cuenta que el esfuerzo permisible del aluminio es de 145 MPa, se tiene que la estructura del CCP resistirá estas cargas sin deformarse permanentemente. Debido a la geometría de las costillas del captador y a la dirección de la carga, las cargas frontales presentaron los mejores resultados, con el esfuerzo máximo más bajo (2.46 MPa) y la deformación más pequeña (0.32 mm).

**Tabla 4. 1** Resultados obtenidos en el análisis MEF realizado al CCP.

Tipo de análisis	Cargas Aplicadas (N)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Esfuerzo Mínimo (MPa)	Desplazamiento Máximo (mm)	Factor de Seguridad Mínimo
Frontal	250	2.4611	$3.032 \times 10^{-3}$	0.3263	12.5758
Lateral	300 y 200	7.3709	$4.337 \times 10^{-3}$	1.24323	4.2092
Torsión	200	7.0693	$2.668 \times 10^{-4}$	0.3852	4.3883

En el apéndice D se presentan los resultados en imágenes de los análisis anteriores, que por brevedad se omiten en esta sección.

## 4.5 Construcción del captador

Finalmente, con los resultados del análisis FEM se procedió a construir el captador. Como se mencionó anteriormente, las costillas se construyeron de aluminio y se maquinaron utilizando herramientas de control numérico computarizado (CNC) con el diseño previamente realizado en el software CAD (Solid Edge). Posteriormente, las costillas se unieron mediante tubos de aluminio de 25 mm de diámetro utilizando fijación con tornillos opresores. A continuación se describe brevemente el proceso de construcción y ensamble del captador.

### 4.5.1 Maquinado de las piezas componentes del CCP en CAM

El maquinado de las costillas, que son las piezas principales que componen al CCP porque éstas tienen la geometría de la parábola, fueron realizadas mediante control numérico por computadora (CNC). Dada la inexperiencia de la empresa contratada para el maquinado de las costillas, fue necesario re-trabajarlas en el taller, para lo cual se utilizó una plantilla de papel con la imagen de la costilla. La plantilla se colocó sobre una de la costilla y se le dio un acabado con lima. Es importante mencionar que para tener un diseño uniforme, las cinco costillas se unieron mecánicamente con pinzas de presión de tal forma que los orificios por donde pasan los tubos de aluminio quedaran concéntricos. Esto permitió darle un acabado uniforme a las cinco costillas y así reducir al mínimo las pérdidas ópticas.

Con las costillas terminadas, se procedió a la construcción del captador. Las costillas se unieron a los tubos de aluminio mediante un sistema de sujeción por tornillos opresores. En la Figura 4.9 se observa el sistema de sujeción utilizado para la construcción del captador.



**Figura 4. 9** Sistema de sujeción de las costillas del captador

La Figura 4.10 muestra la estructura base del captador terminada, sobre la cual se colocó una lámina reflectiva de aluminio ALANOD<sup>®</sup> y se fijaron los soportes del tubo absorbedor en los extremos del captador así como también los soportes que unen el captador con el banco de pruebas. Para posicionar el captador en orientación este-oeste, se construyó una estructura de soporte que permite libre movimiento mediante un mecanismo de tornillo sinfín. La Figura 4.11 muestra el captador terminado montado en el banco de pruebas o estructura de soporte. Actualmente se encuentra bajo estudio la cubierta de vidrio del tubo absorbedor, de la cual ya se tiene el diseño de montaje. Este captador se encuentra en fase de pruebas preliminares y se espera en breve presentar los resultados de la evaluación térmica del CCP.

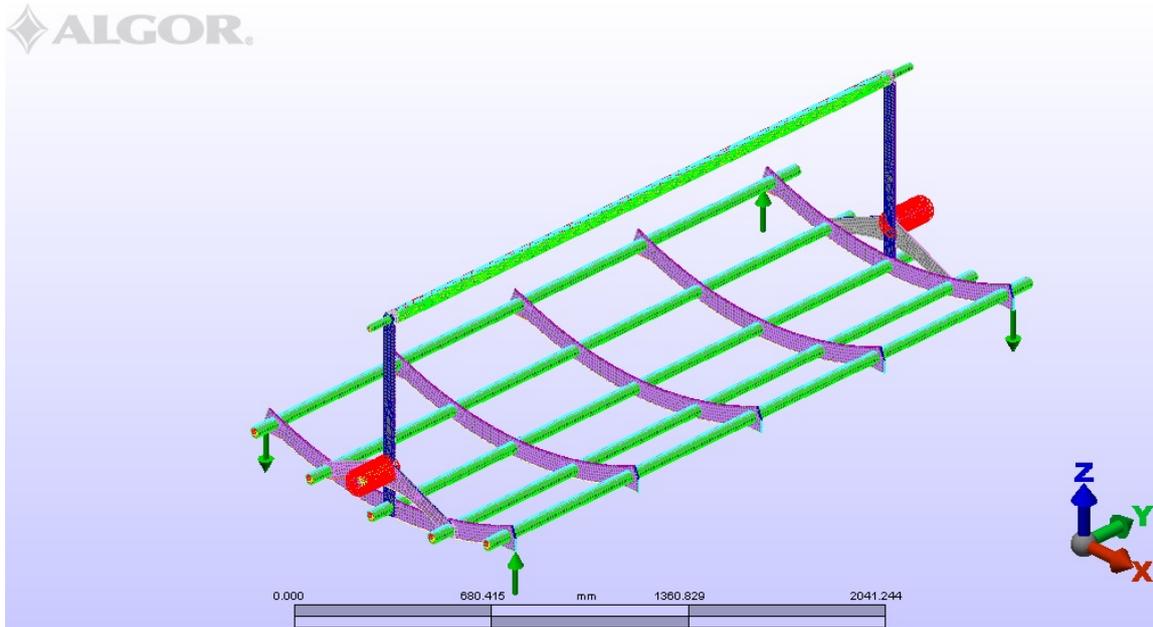


Figura 4. 10 Modelo CAD y condiciones de frontera para el análisis por esfuerzos de torsión.



Figura 4. 11 Prototipo del CCP de 45 ° de ángulo de borde.

## **Referencias**

1. *Diseño y construcción de un colector solar de canal parabólico*. **J. O. Aguilar, J. S. Calam, R. Acosta, J.D. Cuevas, J. Hernández, O.A. Jaramillo, C. Pérez-Rábago, J.J. Flores.** s.l. : XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energía Solar, Vigo, Galicia, España (2008) 509.
2. [http://es.wikipedia.org/wiki/solid\\_Edge](http://es.wikipedia.org/wiki/solid_Edge). [En línea] [Citado el: 18 de Marzo de 2010.]
3. <http://WWW.tuexpertoit.com/2009/09/21/autodesk-algor-simulation-20010-nuevas-soluciones-de-autodesk-para-prototipos-digitales/>. [En línea] [Citado el: 18 de Marzo de 2010.]

## CAPITULO 5. Conclusiones y Trabajos futuros

---

### 5.1 Conclusiones

Se diseñó un captador de canal parabólico de  $45^\circ$  de ángulo de borde,  $\sim 2.9$  m<sup>2</sup> de apertura y concentración máxima de  $\sim 20$ . Se utilizaron herramientas de Control Numérico Computarizado (CNC) para maquinar los perfiles de las costillas, con el objetivo de tener una parábola más exacta que reduzca las pérdidas ópticas. Se realizó un análisis FEM para determinar los desplazamientos y esfuerzos de trabajo. Se encontró que el diseño propuesto cumple satisfactoriamente para cargas estáticas, encontrándose un esfuerzo máximo de 7.37 MPa para cargas laterales, muy inferior a los 145 MPa del esfuerzo permisible del aluminio, por tanto, la resistencia estructural del colector no se ve comprometida. Cabe mencionar que aunque no se llevó a cabo un análisis en túnel de viento (FEM) para determinar los esfuerzos máximos en el colector, se simuló cargas que ocasionan un efecto similar, aunque puede variar en magnitud.

### 5.2 Trabajos Futuros

1. Diseñar un mecanismo de sujeción de los elementos estructurales del CCP que proporcione mayor rigidez estructural. El mecanismo actual se desajusta fácilmente con las vibraciones ocasionadas por el viento y se requiere ajustes periódicos.
2. Realizar un análisis por CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para evaluar los esfuerzos a los que está sometido el CCP debido al efecto de la velocidad del viento. Esto permitirá determinar la posición de seguridad del colector durante velocidades de viento mayores a 80 km/h y evitar daños estructurales.

3. Evaluar térmicamente el CCP. Esta actividad se está llevando a cabo actualmente, con la participación de dos alumnos de tesis de licenciatura.
4. Construir al menos dos colectores más y conectarlos como un sistema y evaluar su desempeño térmico con el objetivo de proponer una aplicación dicho sistema.

## APÉNDICE A Hoja de cálculo para determinar la abertura del CCP

Tabla A. 1 Cálculo para la apertura de la parábola del CCP de 45°

Calculo para la apertura de la parábola del CCP de 45°								
<b>Entradas</b>		<b>Formulas</b>		<b>Variables de Calculo</b>		<b>Iteraciones</b>		
Apertura (D)	1187,00	$r = 2f / (1 + \cos\phi)$		Radio (r)	839,335749	x	y	
angulo de borde( $\phi$ )	45	$f = (r \times (1 + \cos\phi)) / 2$		Foco (f)	716,417875	-593,5	122,917875	
s	1220	$D = 4f \times \text{tg}(\phi/2)$		s	1220,11872	-592,5	122,50401	1,08225871
		$f = (D / (\text{tg}(\phi/2) \times 4))$				-591,5	122,090843	1,08199201
		<b>Ecuacion de la Parabola</b>				-590,5	121,678375	1,0817257
		$X^2 = 4fY$				-589,5	121,266604	1,08145977
						-588,5	120,855531	1,08119423
						-587,5	120,445156	1,08092907
						-586,5	120,035479	1,0806643
						-585,5	119,626499	1,08039991
						-584,5	119,218218	1,08013592
						-583,5	118,810635	1,0798723
						-582,5	118,403749	1,07960908
						-581,5	117,997562	1,07934624
						-580,5	117,592072	1,07908379
						-579,5	117,187281	1,07882172

## APÉNDICE B: Esfuerzo de Von Mises

El esfuerzo de Von Mises se usa como un criterio para determinar la aparición de una falla en materiales dúctiles. El criterio de falla establece que el esfuerzo de Von Mises  $\sigma_{VM}$  debe ser menor que el esfuerzo de fluencia  $\sigma_Y$  del material. En forma de desigualdad, el criterio puede escribirse como:

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_Y \quad (V.1)$$

El esfuerzo de Von Mises  $\sigma_{VM}$  está dada por:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{I_1^2 - 3I_2} \quad (V.2)$$

Donde  $I_1$  e  $I_2$  son las primeras dos invariantes del tensor de esfuerzo. Para el estado general de esfuerzo,  $I_1$  e  $I_2$  están dados por:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (V.3)$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 \quad (V.4)$$

En términos de esfuerzos principales  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , las dos invariantes pueden escribirse como:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (V.5)$$

$$I_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \quad (V.6)$$

Es fácil verificar que el esfuerzo de Von Mises dado en la ecuación V.2 puede expresarse en la forma:

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (V.7)$$

Para el estado de esfuerzo plano, tenemos:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y \quad (V.8)$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2 \quad (V.9)$$

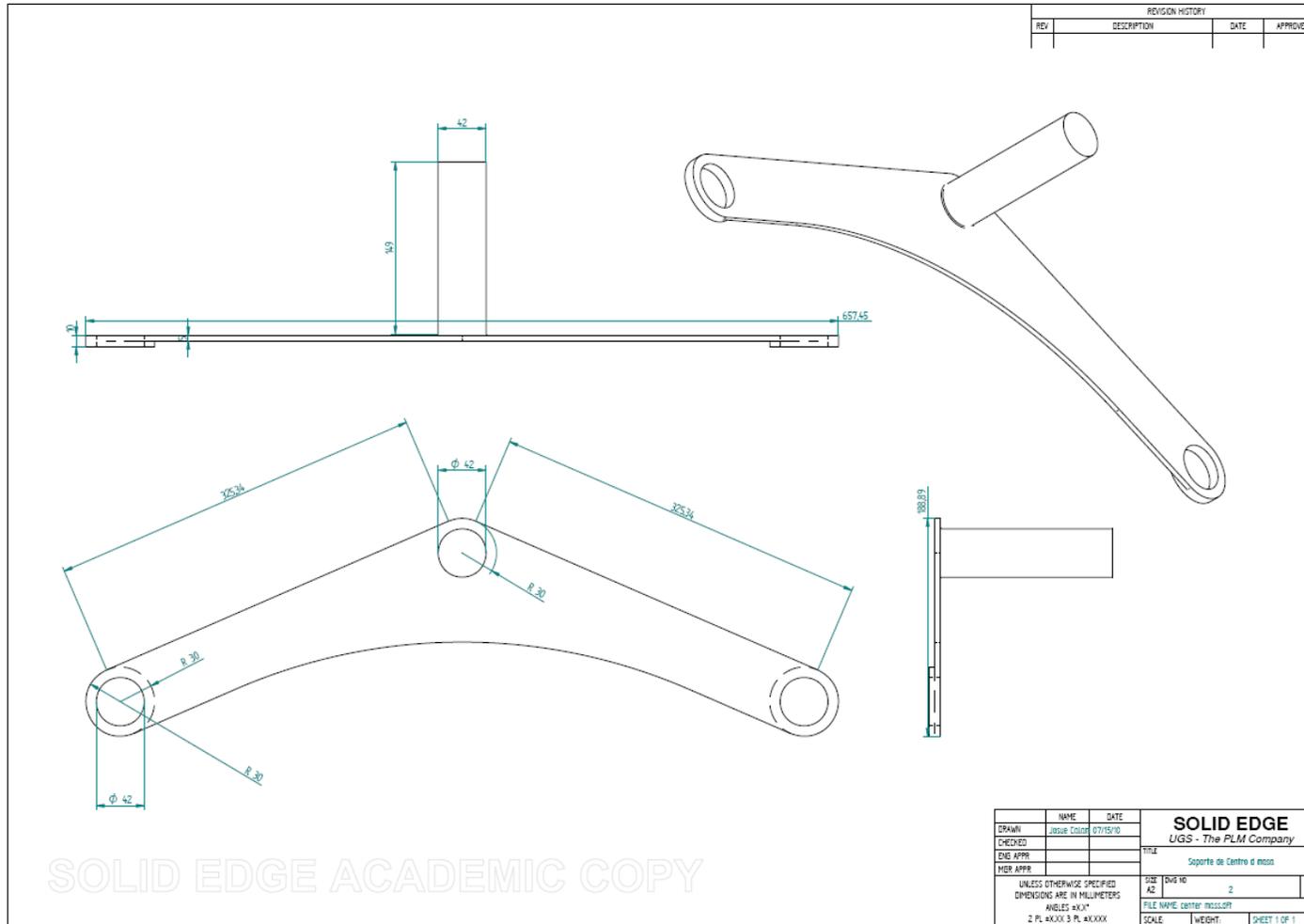
Y para la deformación unitaria plana:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (V.10)$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 \quad (V.11)$$

donde  $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$

**APÉNCICE C: Planos técnicos de los elementos componentes del Captador.**



**Figura A. 1** Plano Técnico del soporte del centro de masa del CCP

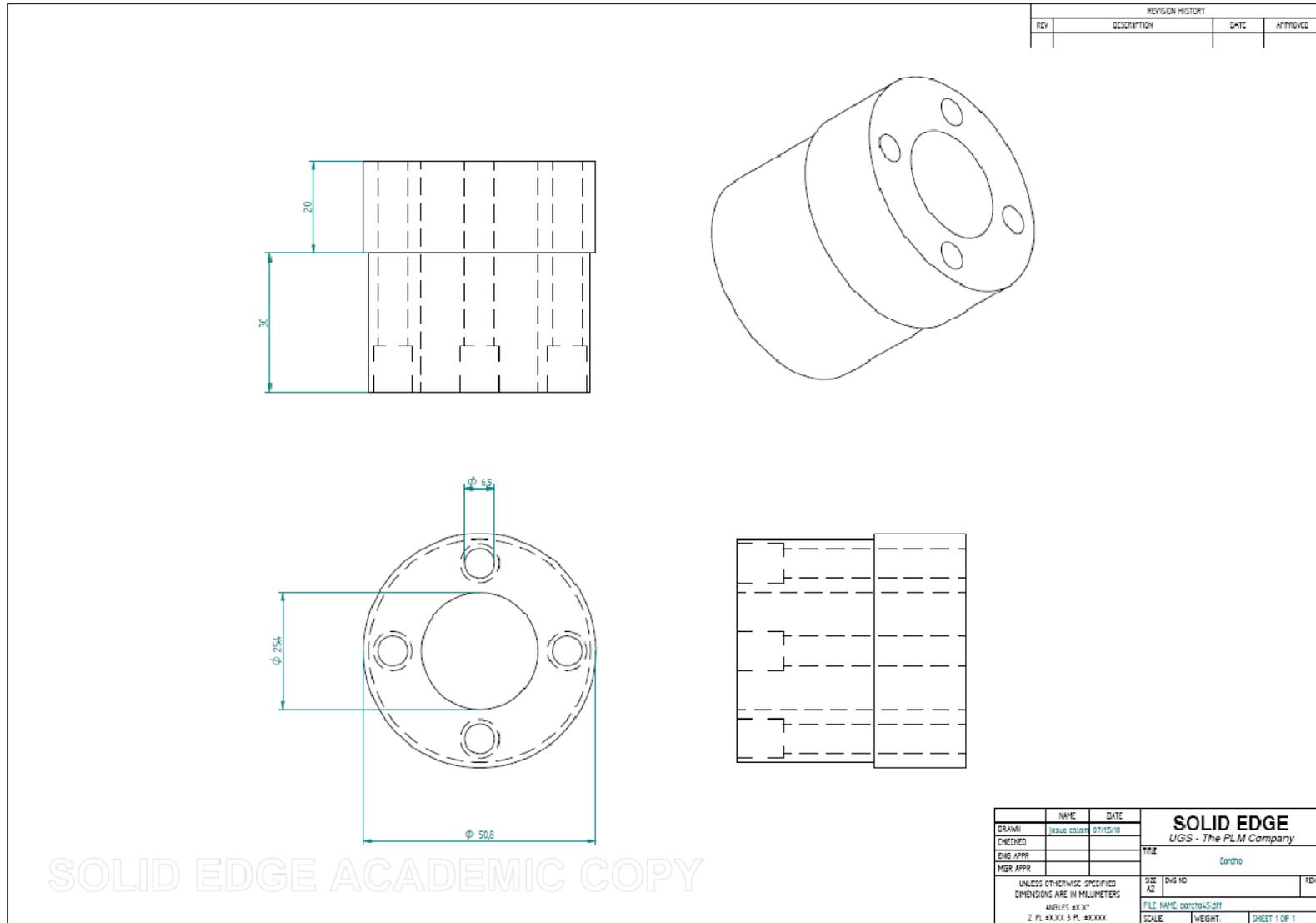


Figura A. 2 Plano técnico del corcho utilizado en el diseño del CCP

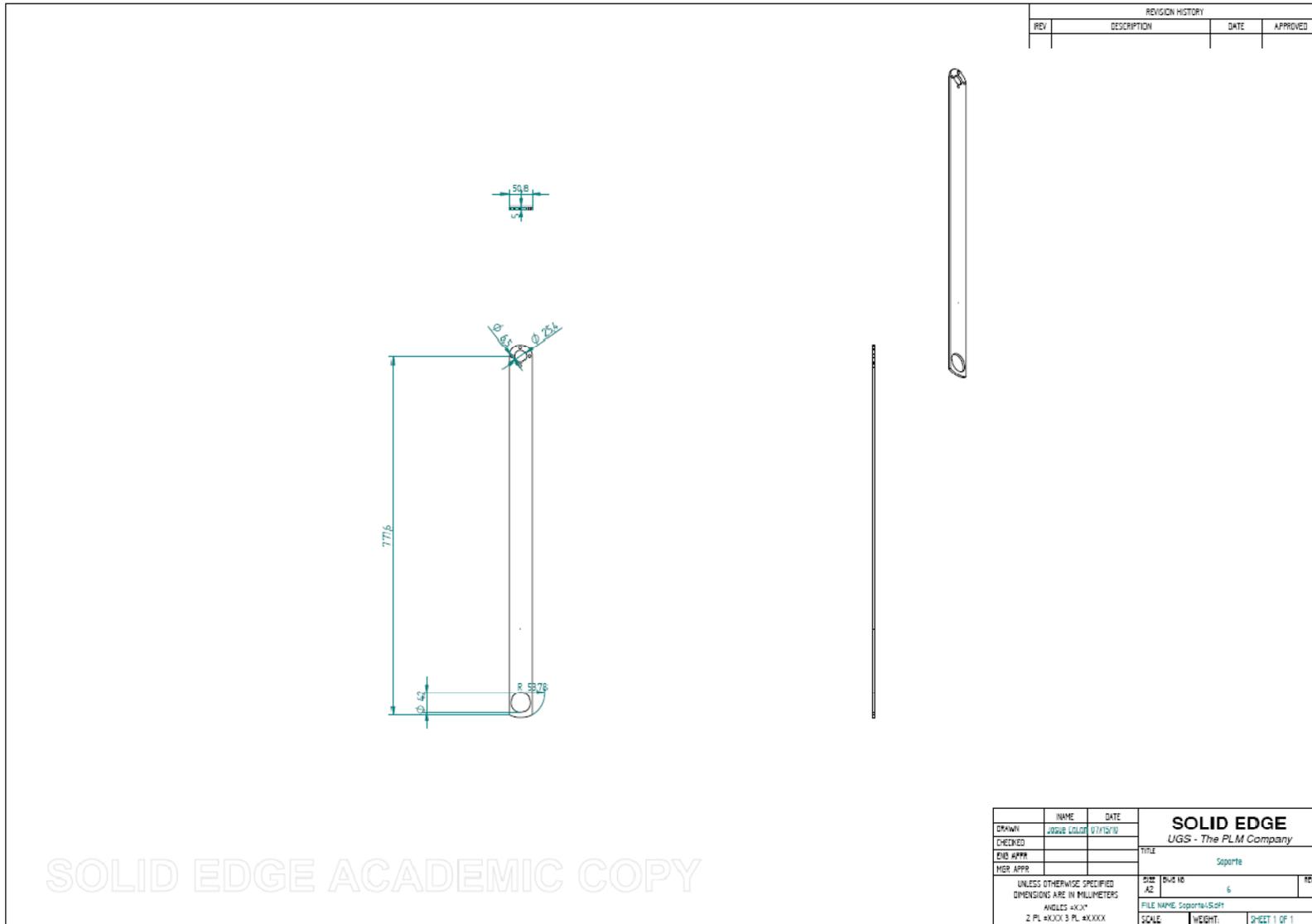


Figura A. 3 Plano técnico del brazo soporte del CCP

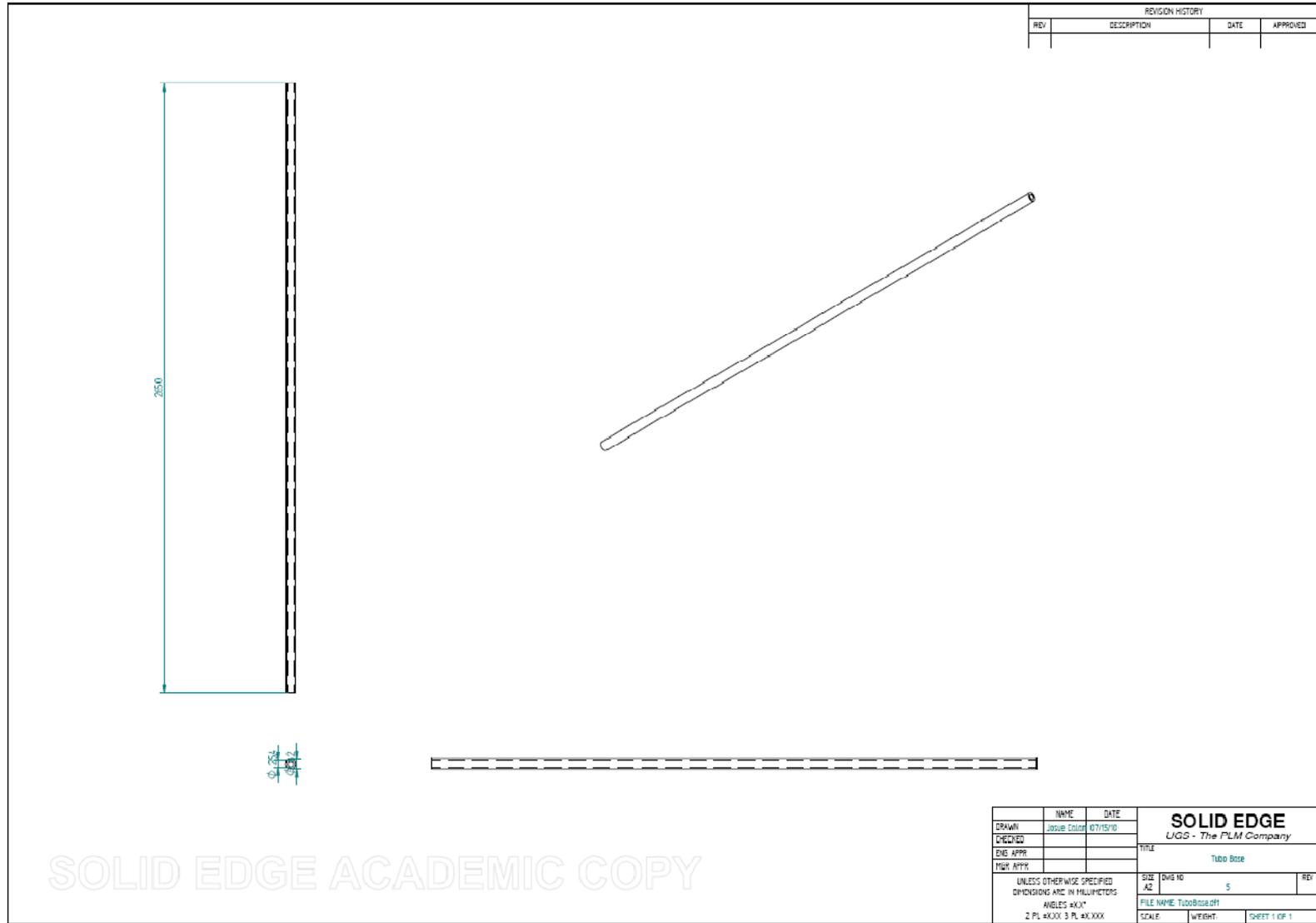


Figura A. 4 Plano técnico de los tubos que se utilizaron como base en el CCP

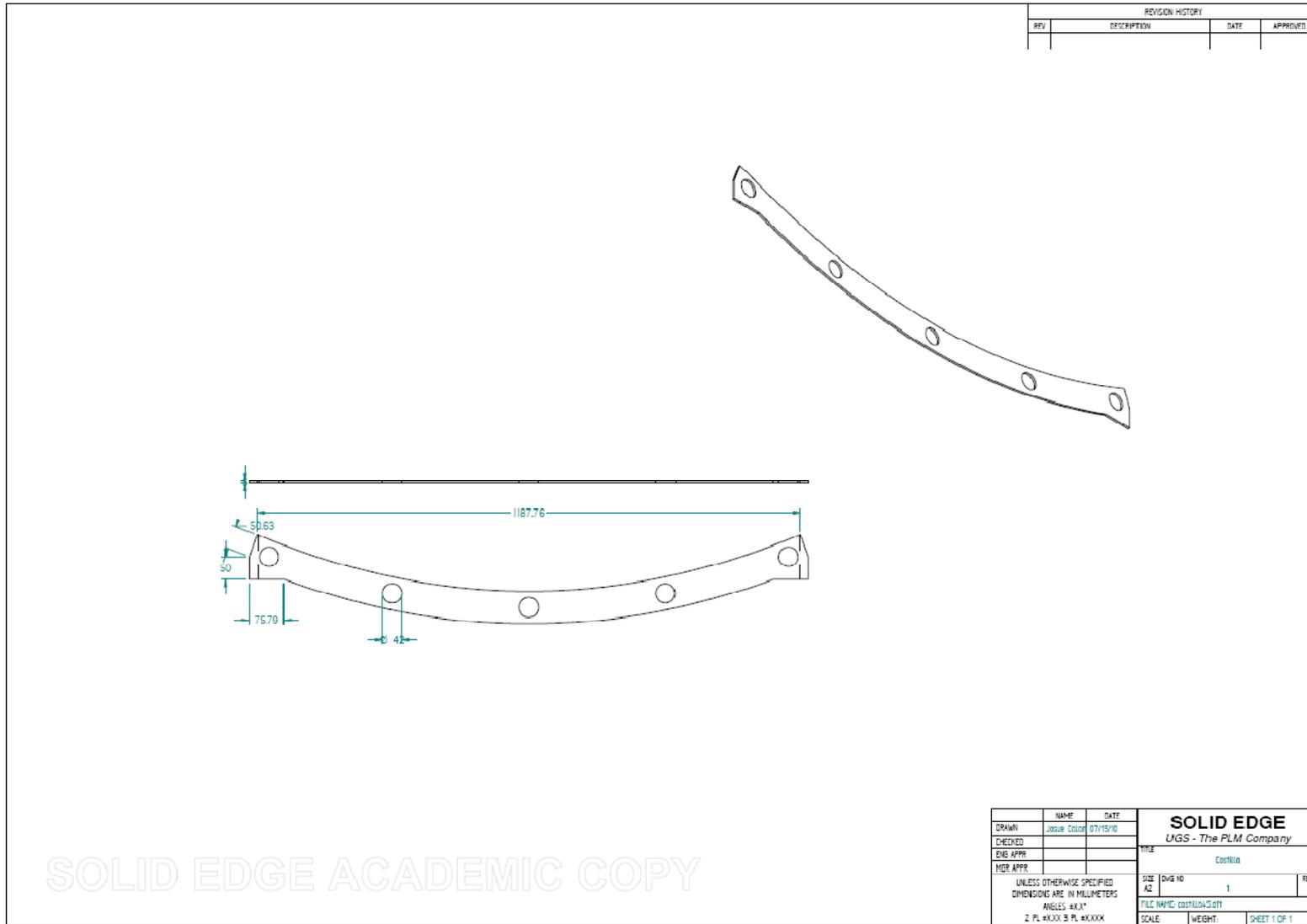


Figura A. 5 Plano técnico de la costilla del CCP

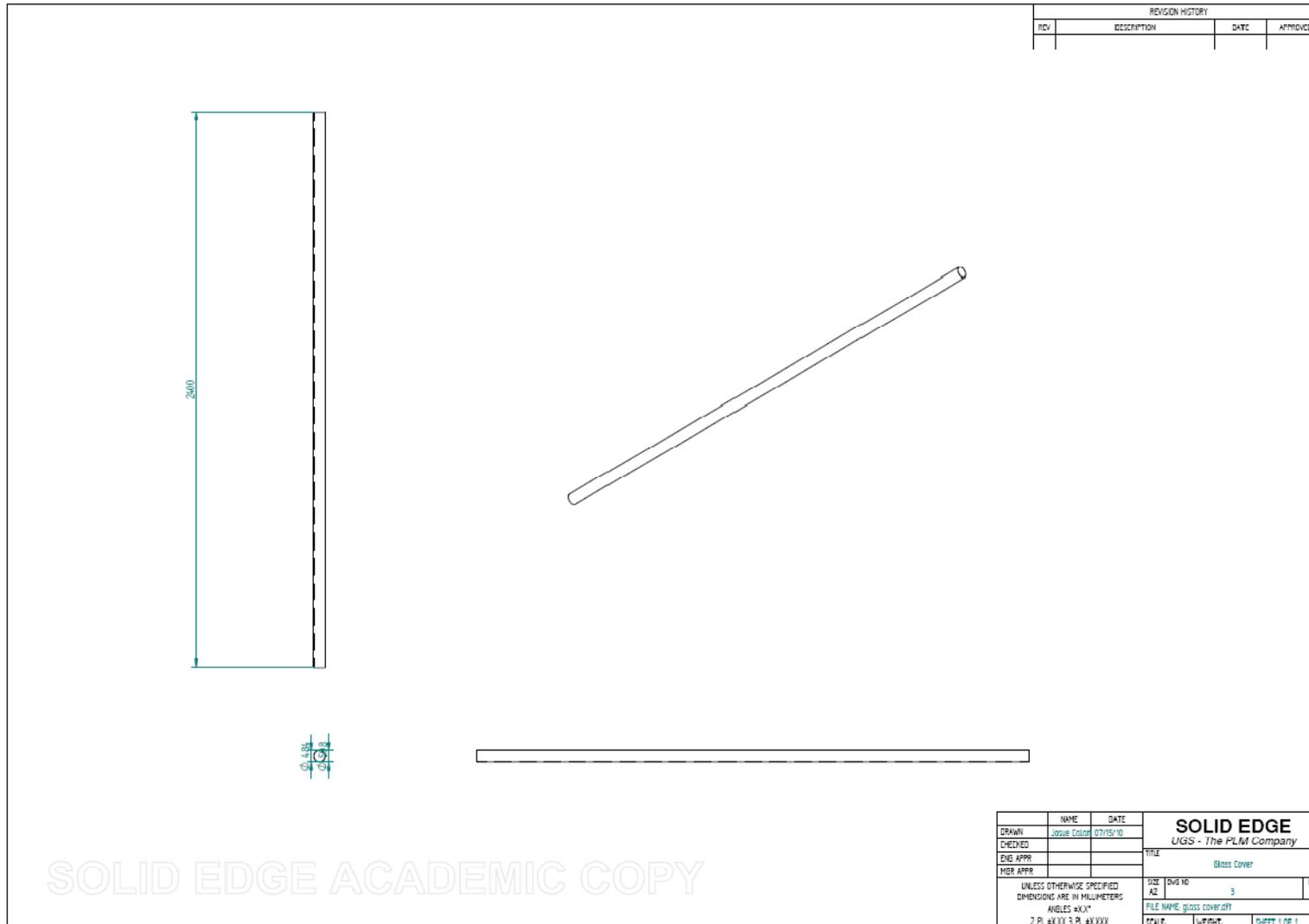


Figura A. 6 Plano técnico de la cubierta de vidrio del CCP

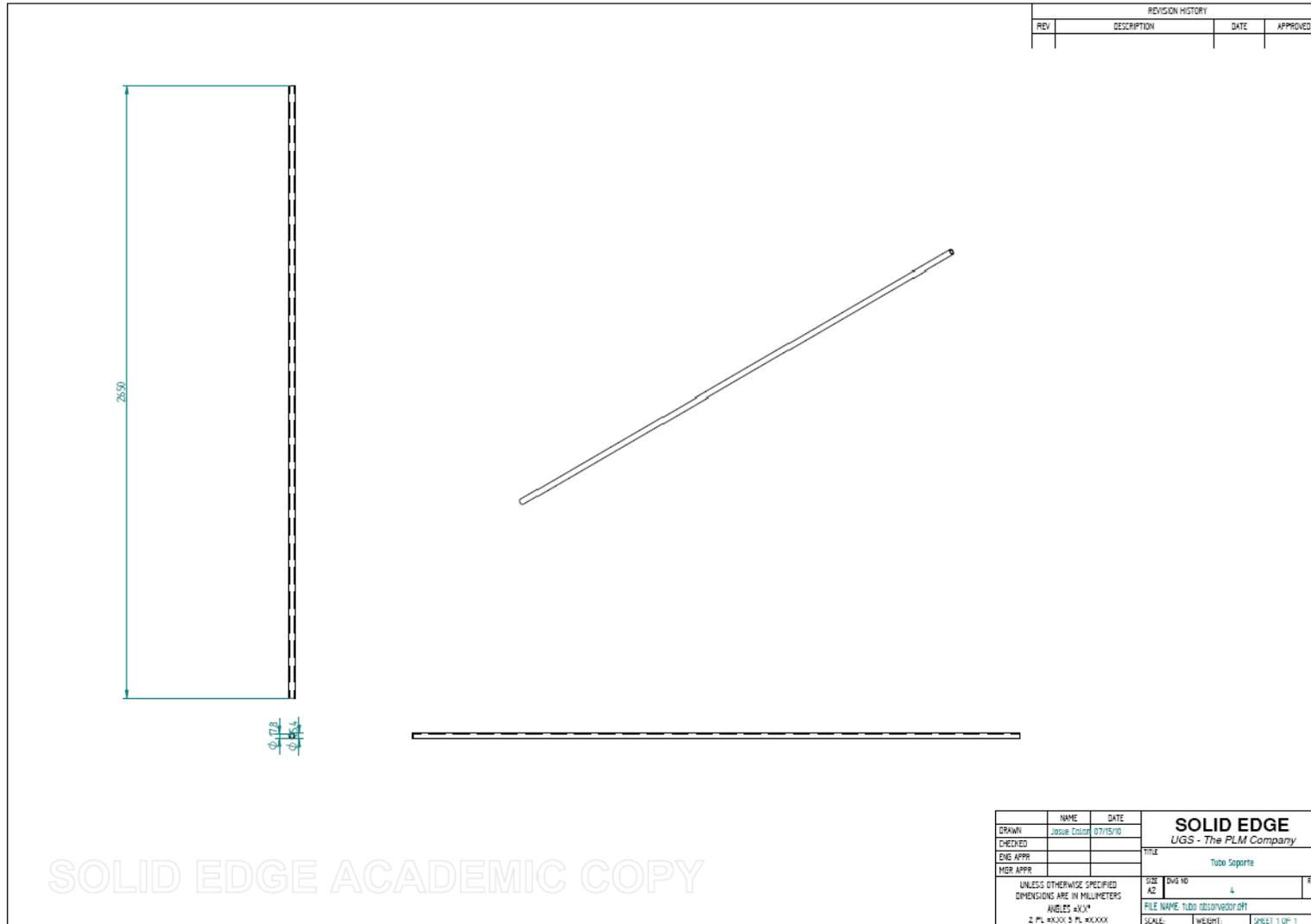


Figura A. 7 Plano técnico del tubo absorbedor

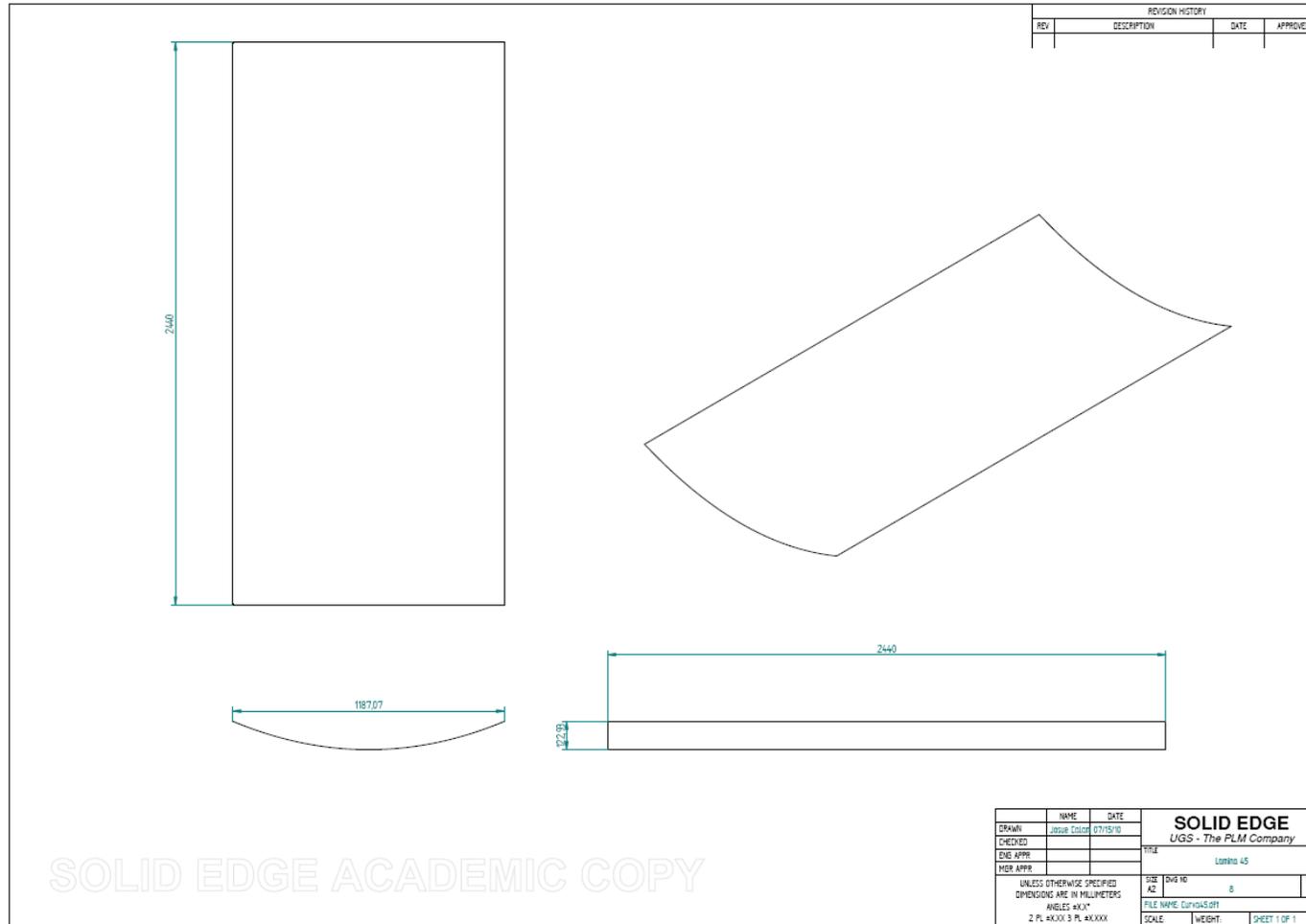


Figura A. 8 Plano técnico de la lámina

## APÉNDICE D: Imágenes de resultados en la simulación en ALGOR

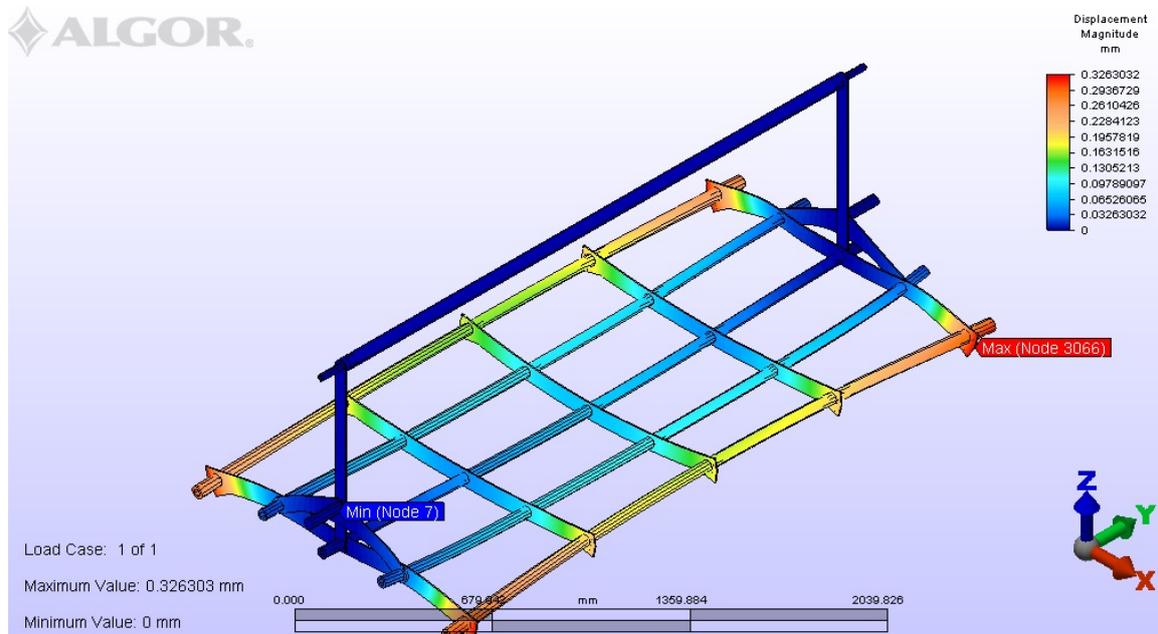


Figura A. 9 Resultado FEA del CCP sujeto a carga frontal

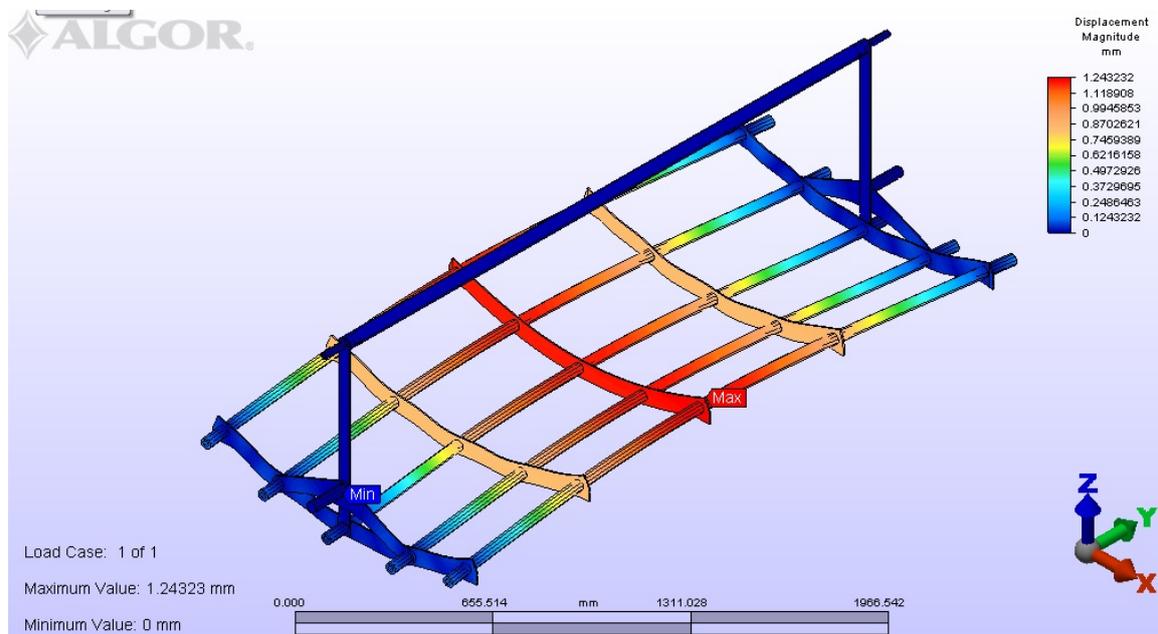
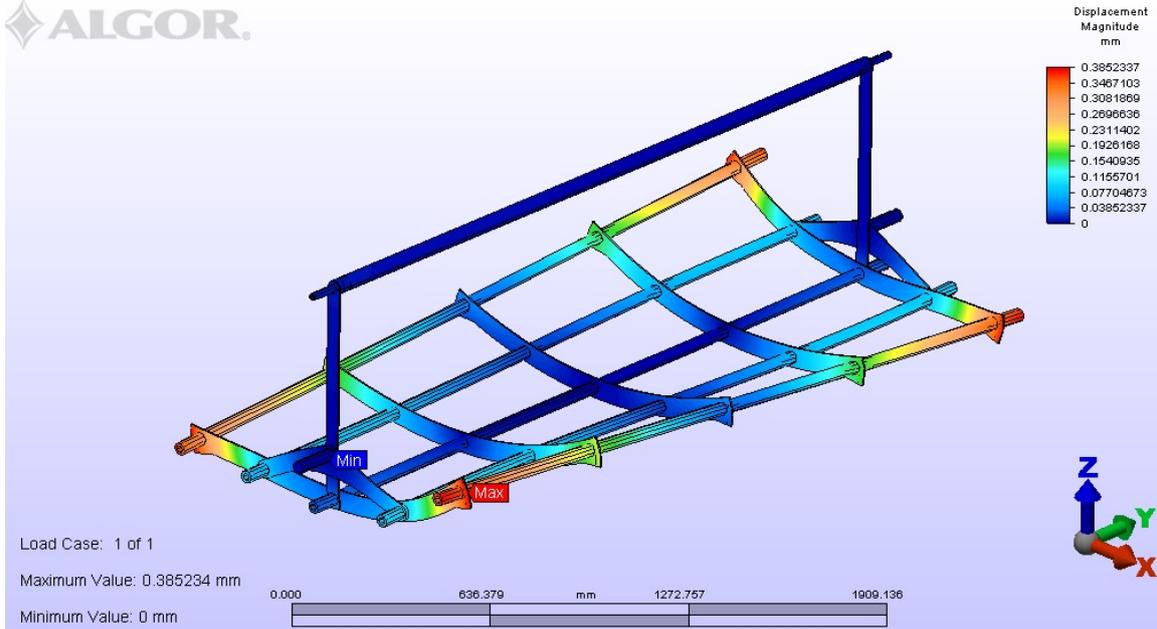


Figura A. 10 Resultados FEA del colector sujeto a cargas laterales



**Figura A. 11** Resultados FEA del CCP sujeto a cargas de torsión

## Calculo para la apertura de la para

Entradas	
Apertura (D)	1187.00
angulo de borde( $\phi$ )	45
s	1220

Formulas
$r = 2f / (1 + \cos\phi)$

$$f = (r \times (1 + \cos\phi)) / 2$$

$$D = 4f \times \text{tg}(\phi/2)$$

$$f = (D / (\text{tg}(\phi/2) \times 4))$$

Ecuacion de la Parabola

$$X^2 = 4fY$$

Variables de C
Radio (r)
Foco (f)
s

# Tabla del CCP de 45°

Calculo
839.335749
716.417875
1220.11872

Iteraciones		
x	y	
-593.5	122.917875	
-592.5	122.50401	1.08225871
-591.5	122.090843	1.08199201
-590.5	121.678375	1.0817257
-589.5	121.266604	1.08145977
-588.5	120.855531	1.08119423
-587.5	120.445156	1.08092907
-586.5	120.035479	1.0806643
-585.5	119.626499	1.08039991
-584.5	119.218218	1.08013592
-583.5	118.810635	1.0798723
-582.5	118.403749	1.07960908
-581.5	117.997562	1.07934624
-580.5	117.592072	1.07908379
-579.5	117.187281	1.07882172
-578.5	116.783187	1.07856005
-577.5	116.379791	1.07829876
-576.5	115.977093	1.07803786
-575.5	115.575093	1.07777735
-574.5	115.173791	1.07751723
-573.5	114.773187	1.0772575
-572.5	114.37328	1.07699815
-571.5	113.974072	1.0767392
-570.5	113.575562	1.07648064
-569.5	113.177749	1.07622247
-568.5	112.780635	1.07596469
-567.5	112.384218	1.0757073
-566.5	111.988499	1.0754503
-565.5	111.593478	1.07519369
-564.5	111.199155	1.07493748
-563.5	110.80553	1.07468165
-562.5	110.412603	1.07442622
-561.5	110.020374	1.07417118
-560.5	109.628843	1.07391654
-559.5	109.238009	1.07366229
-558.5	108.847874	1.07340843
-557.5	108.458436	1.07315497
-556.5	108.069697	1.0729019
-555.5	107.681655	1.07264922
-554.5	107.294311	1.07239694
-553.5	106.907666	1.07214505
-552.5	106.521718	1.07189356
-551.5	106.136468	1.07164247

-550.5	105.751915	1.07139177
-549.5	105.368061	1.07114146
-548.5	104.984905	1.07089156
-547.5	104.602447	1.07064205
-546.5	104.220686	1.07039293
-545.5	103.839624	1.07014422
-544.5	103.459259	1.0698959
-543.5	103.079592	1.06964798
-542.5	102.700624	1.06940045
-541.5	102.322353	1.06915333
-540.5	101.94478	1.0689066
-539.5	101.567905	1.06866027
-538.5	101.191728	1.06841434
-537.5	100.816249	1.06816882
-536.5	100.441467	1.06792369
-535.5	100.067384	1.06767896
-534.5	99.6939985	1.06743463
-533.5	99.321311	1.0671907
-532.5	98.9493214	1.06694717
-531.5	98.5780297	1.06670404
-530.5	98.2074359	1.06646132
-529.5	97.83754	1.06621899
-528.5	97.4683421	1.06597707
-527.5	97.0998421	1.06573555
-526.5	96.73204	1.06549443
-525.5	96.3649358	1.06525372
-524.5	95.9985295	1.06501341
-523.5	95.6328212	1.0647735
-522.5	95.2678108	1.06453399
-521.5	94.9034982	1.06429489
-520.5	94.5398836	1.06405619
-519.5	94.1769669	1.0638179
-518.5	93.8147482	1.06358001
-517.5	93.4532273	1.06334253
-516.5	93.0924044	1.06310545
-515.5	92.7322794	1.06286877
-514.5	92.3728523	1.06263251
-513.5	92.0141231	1.06239664
-512.5	91.6560918	1.06216119
-511.5	91.2987585	1.06192614
-510.5	90.942123	1.0616915
-509.5	90.5861855	1.06145726
-508.5	90.2309459	1.06122343
-507.5	89.8764042	1.06099001
-506.5	89.5225605	1.060757
-505.5	89.1694146	1.06052439
-504.5	88.8169667	1.0602922
-503.5	88.4652167	1.06006041
-502.5	88.1141646	1.05982903
-501.5	87.7638104	1.05959806

-500.5	87.4141541	1.0593675
-499.5	87.0651958	1.05913735
-498.5	86.7169353	1.05890761
-497.5	86.3693728	1.05867828
-496.5	86.0225082	1.05844936
-495.5	85.6763415	1.05822085
-494.5	85.3308728	1.05799275
-493.5	84.9861019	1.05776507
-492.5	84.642029	1.05753779
-491.5	84.298654	1.05731093
-490.5	83.9559769	1.05708448
-489.5	83.6139977	1.05685844
-488.5	83.2727164	1.05663281
-487.5	82.9321331	1.0564076
-486.5	82.5922476	1.0561828
-485.5	82.2530601	1.05595841
-484.5	81.9145705	1.05573444
-483.5	81.5767788	1.05551088
-482.5	81.2396851	1.05528774
-481.5	80.9032892	1.05506501
-480.5	80.5675913	1.05484269
-479.5	80.2325913	1.05462079
-478.5	79.8982892	1.0543993
-477.5	79.564685	1.05417823
-476.5	79.2317787	1.05395758
-475.5	78.8995704	1.05373734
-474.5	78.5680599	1.05351752
-473.5	78.2372474	1.05329812
-472.5	77.9071328	1.05307913
-471.5	77.5777161	1.05286056
-470.5	77.2489974	1.0526424
-469.5	76.9209765	1.05242467
-468.5	76.5936536	1.05220735
-467.5	76.2670286	1.05199045
-466.5	75.9411015	1.05177397
-465.5	75.6158723	1.0515579
-464.5	75.291341	1.05134226
-463.5	74.9675077	1.05112703
-462.5	74.6443722	1.05091223
-461.5	74.3219347	1.05069784
-460.5	74.0001951	1.05048387
-459.5	73.6791534	1.05027033
-458.5	73.3588097	1.0500572
-457.5	73.0391638	1.0498445
-456.5	72.7202159	1.04963221
-455.5	72.4019659	1.04942035
-454.5	72.0844138	1.04920891
-453.5	71.7675596	1.04899789
-452.5	71.4514033	1.04878729
-451.5	71.135945	1.04857712

-450.5	70.8211845	1.04836736
-449.5	70.507122	1.04815803
-448.5	70.1937574	1.04794913
-447.5	69.8810907	1.04774064
-446.5	69.569122	1.04753258
-445.5	69.2578511	1.04732495
-444.5	68.9472782	1.04711773
-443.5	68.6374032	1.04691094
-442.5	68.3282261	1.04670458
-441.5	68.0197469	1.04649864
-440.5	67.7119656	1.04629313
-439.5	67.4048823	1.04608804
-438.5	67.0984968	1.04588337
-437.5	66.7928093	1.04567914
-436.5	66.4878197	1.04547533
-435.5	66.183528	1.04527194
-434.5	65.8799343	1.04506898
-433.5	65.5770384	1.04486645
-432.5	65.2748405	1.04466434
-431.5	64.9733405	1.04446267
-430.5	64.6725384	1.04426141
-429.5	64.3724342	1.04406059
-428.5	64.0730279	1.0438602
-427.5	63.7743196	1.04366023
-426.5	63.4763092	1.04346069
-425.5	63.1789966	1.04326158
-424.5	62.882382	1.0430629
-423.5	62.5864654	1.04286465
-422.5	62.2912466	1.04266683
-421.5	61.9967258	1.04246944
-420.5	61.7029028	1.04227248
-419.5	61.4097778	1.04207594
-418.5	61.1173507	1.04187984
-417.5	60.8256215	1.04168417
-416.5	60.5345903	1.04148893
-415.5	60.2442569	1.04129412
-414.5	59.9546215	1.04109975
-413.5	59.665684	1.0409058
-412.5	59.3774444	1.04071229
-411.5	59.0899027	1.04051921
-410.5	58.8030589	1.04032656
-409.5	58.5169131	1.04013434
-408.5	58.2314652	1.03994256
-407.5	57.9467151	1.03975121
-406.5	57.662663	1.03956029
-405.5	57.3793089	1.03936981
-404.5	57.0966526	1.03917976
-403.5	56.8146942	1.03899014
-402.5	56.5334338	1.03880096
-401.5	56.2528713	1.03861221

-400.5	55.9730067	1.0384239
-399.5	55.69384	1.03823602
-398.5	55.4153713	1.03804858
-397.5	55.1376004	1.03786157
-396.5	54.8605275	1.037675
-395.5	54.5841525	1.03748887
-394.5	54.3084754	1.03730317
-393.5	54.0334962	1.03711791
-392.5	53.7592149	1.03693308
-391.5	53.4856316	1.03674869
-390.5	53.2127461	1.03656474
-389.5	52.9405586	1.03638122
-388.5	52.669069	1.03619815
-387.5	52.3982774	1.03601551
-386.5	52.1281836	1.03583331
-385.5	51.8587877	1.03565154
-384.5	51.5900898	1.03547022
-383.5	51.3220898	1.03528934
-382.5	51.0547877	1.03510889
-381.5	50.7881835	1.03492888
-380.5	50.5222773	1.03474931
-379.5	50.2570689	1.03457018
-378.5	49.9925585	1.0343915
-377.5	49.728746	1.03421325
-376.5	49.4656314	1.03403544
-375.5	49.2032147	1.03385807
-374.5	48.9414959	1.03368115
-373.5	48.6804751	1.03350466
-372.5	48.4201522	1.03332862
-371.5	48.1605271	1.03315301
-370.5	47.9016001	1.03297785
-369.5	47.6433709	1.03280313
-368.5	47.3858396	1.03262885
-367.5	47.1290063	1.03245502
-366.5	46.8728708	1.03228163
-365.5	46.6174333	1.03210868
-364.5	46.3626937	1.03193617
-363.5	46.108652	1.03176411
-362.5	45.8553083	1.03159249
-361.5	45.6026624	1.03142131
-360.5	45.3507145	1.03125058
-359.5	45.0994645	1.03108029
-358.5	44.8489124	1.03091045
-357.5	44.5990582	1.03074105
-356.5	44.349902	1.0305721
-355.5	44.1014436	1.03040359
-354.5	43.8536832	1.03023552
-353.5	43.6066207	1.0300679
-352.5	43.3602561	1.02990073
-351.5	43.1145894	1.029734

-350.5	42.8696206	1.02956772
-349.5	42.6253498	1.02940189
-348.5	42.3817769	1.0292365
-347.5	42.1389018	1.02907156
-346.5	41.8967248	1.02890706
-345.5	41.6552456	1.02874302
-344.5	41.4144643	1.02857942
-343.5	41.174381	1.02841626
-342.5	40.9349955	1.02825356
-341.5	40.696308	1.0280913
-340.5	40.4583184	1.0279295
-339.5	40.2210268	1.02776814
-338.5	39.984433	1.02760722
-337.5	39.7485371	1.02744676
-336.5	39.5133392	1.02728675
-335.5	39.2788392	1.02712719
-334.5	39.0450371	1.02696807
-333.5	38.8119329	1.02680941
-332.5	38.5795267	1.02665119
-331.5	38.3478183	1.02649343
-330.5	38.1168079	1.02633611
-329.5	37.8864954	1.02617925
-328.5	37.6568808	1.02602284
-327.5	37.4279641	1.02586688
-326.5	37.1997453	1.02571136
-325.5	36.9722245	1.02555631
-324.5	36.7454016	1.0254017
-323.5	36.5192766	1.02524754
-322.5	36.2938495	1.02509384
-321.5	36.0691203	1.02494059
-320.5	35.845089	1.02478779
-319.5	35.6217557	1.02463544
-318.5	35.3991203	1.02448354
-317.5	35.1771827	1.0243321
-316.5	34.9559432	1.02418112
-315.5	34.7354015	1.02403058
-314.5	34.5155577	1.0238805
-313.5	34.2964119	1.02373087
-312.5	34.0779639	1.0235817
-311.5	33.8602139	1.02343298
-310.5	33.6431618	1.02328472
-309.5	33.4268077	1.02313691
-308.5	33.2111514	1.02298955
-307.5	32.9961931	1.02284265
-306.5	32.7819326	1.02269621
-305.5	32.5683701	1.02255022
-304.5	32.3555055	1.02240468
-303.5	32.1433388	1.0222596
-302.5	31.9318701	1.02211498
-301.5	31.7210992	1.02197082

-300.5	31.5110263	1.02182711
-299.5	31.3016513	1.02168385
-298.5	31.0929742	1.02154106
-297.5	30.884995	1.02139872
-296.5	30.6777138	1.02125683
-295.5	30.4711304	1.02111541
-294.5	30.265245	1.02097444
-293.5	30.0600575	1.02083393
-292.5	29.8555679	1.02069388
-291.5	29.6517762	1.02055428
-290.5	29.4486825	1.02041515
-289.5	29.2462866	1.02027647
-288.5	29.0445887	1.02013825
-287.5	28.8435887	1.02000049
-286.5	28.6432866	1.01986319
-285.5	28.4436824	1.01972635
-284.5	28.2447762	1.01958997
-283.5	28.0465678	1.01945404
-282.5	27.8490574	1.01931858
-281.5	27.6522449	1.01918358
-280.5	27.4561303	1.01904903
-279.5	27.2607136	1.01891495
-278.5	27.0659948	1.01878133
-277.5	26.871974	1.01864817
-276.5	26.6786511	1.01851547
-275.5	26.4860261	1.01838323
-274.5	26.294099	1.01825145
-273.5	26.1028698	1.01812013
-272.5	25.9123385	1.01798927
-271.5	25.7225052	1.01785888
-270.5	25.5333698	1.01772895
-269.5	25.3449323	1.01759948
-268.5	25.1571927	1.01747047
-267.5	24.970151	1.01734192
-266.5	24.7838072	1.01721384
-265.5	24.5981614	1.01708622
-264.5	24.4132135	1.01695906
-263.5	24.2289635	1.01683237
-262.5	24.0454114	1.01670614
-261.5	23.8625572	1.01658037
-260.5	23.6804009	1.01645507
-259.5	23.4989426	1.01633023
-258.5	23.3181822	1.01620585
-257.5	23.1381196	1.01608194
-256.5	22.9587551	1.01595849
-255.5	22.7800884	1.01583551
-254.5	22.6021196	1.01571299
-253.5	22.4248488	1.01559094
-252.5	22.2482759	1.01546935
-251.5	22.0724008	1.01534823

-250.5	21.8972238	1.01522757
-249.5	21.7227446	1.01510737
-248.5	21.5489633	1.01498765
-247.5	21.37588	1.01486839
-246.5	21.2034945	1.01474959
-245.5	21.031807	1.01463126
-244.5	20.8608174	1.0145134
-243.5	20.6905258	1.014396
-242.5	20.520932	1.01427908
-241.5	20.3520362	1.01416261
-240.5	20.1838382	1.01404662
-239.5	20.0163382	1.01393109
-238.5	19.8495361	1.01381603
-237.5	19.683432	1.01370143
-236.5	19.5180257	1.01358731
-235.5	19.3533174	1.01347365
-234.5	19.1893069	1.01336046
-233.5	19.0259944	1.01324774
-232.5	18.8633798	1.01313548
-231.5	18.7014632	1.0130237
-230.5	18.5402444	1.01291238
-229.5	18.3797236	1.01280153
-228.5	18.2199007	1.01269115
-227.5	18.0607756	1.01258124
-226.5	17.9023486	1.0124718
-225.5	17.7446194	1.01236283
-224.5	17.5875881	1.01225432
-223.5	17.4312548	1.01214629
-222.5	17.2756194	1.01203873
-221.5	17.1206818	1.01193163
-220.5	16.9664423	1.01182501
-219.5	16.8129006	1.01171886
-218.5	16.6600568	1.01161317
-217.5	16.507911	1.01150796
-216.5	16.3564631	1.01140322
-215.5	16.205713	1.01129895
-214.5	16.055661	1.01119515
-213.5	15.9063068	1.01109182
-212.5	15.7576505	1.01098896
-211.5	15.6096922	1.01088658
-210.5	15.4624318	1.01078466
-209.5	15.3158693	1.01068322
-208.5	15.1700047	1.01058225
-207.5	15.024838	1.01048175
-206.5	14.8803692	1.01038172
-205.5	14.7365984	1.01028217
-204.5	14.5935255	1.01018308
-203.5	14.4511505	1.01008447
-202.5	14.3094734	1.00998634
-201.5	14.1684942	1.00988867

-200.5	14.0282129	1.00979148
-199.5	13.8886296	1.00969476
-198.5	13.7497442	1.00959851
-197.5	13.6115567	1.00950274
-196.5	13.4740671	1.00940744
-195.5	13.3372754	1.00931262
-194.5	13.2011816	1.00921827
-193.5	13.0657858	1.00912439
-192.5	12.9310879	1.00903099
-191.5	12.7970879	1.00893806
-190.5	12.6637858	1.0088456
-189.5	12.5311816	1.00875362
-188.5	12.3992754	1.00866211
-187.5	12.268067	1.00857108
-186.5	12.1375566	1.00848053
-185.5	12.0077441	1.00839044
-184.5	11.8786295	1.00830084
-183.5	11.7502128	1.0082117
-182.5	11.6224941	1.00812305
-181.5	11.4954732	1.00803487
-180.5	11.3691503	1.00794716
-179.5	11.2435253	1.00785993
-178.5	11.1185982	1.00777318
-177.5	10.994369	1.0076869
-176.5	10.8708378	1.0076011
-175.5	10.7480044	1.00751577
-174.5	10.625869	1.00743092
-173.5	10.5044315	1.00734655
-172.5	10.3836919	1.00726265
-171.5	10.2636503	1.00717923
-170.5	10.1443065	1.00709629
-169.5	10.0256607	1.00701382
-168.5	9.90771273	1.00693183
-167.5	9.79046273	1.00685032
-166.5	9.67391064	1.00676928
-165.5	9.55805647	1.00668873
-164.5	9.44290021	1.00660864
-163.5	9.32844187	1.00652904
-162.5	9.21468145	1.00644992
-161.5	9.10161894	1.00637127
-160.5	8.98925436	1.0062931
-159.5	8.87758768	1.00621541
-158.5	8.76661893	1.00613819
-157.5	8.65634809	1.00606146
-156.5	8.54677517	1.0059852
-155.5	8.43790016	1.00590942
-154.5	8.32972307	1.00583412
-153.5	8.2222439	1.0057593
-152.5	8.11546265	1.00568496
-151.5	8.00937931	1.0056111

-150.5	7.90399388	1.00553771
-149.5	7.79930638	1.0054648
-148.5	7.69531679	1.00539238
-147.5	7.59202512	1.00532043
-146.5	7.48943136	1.00524896
-145.5	7.38753553	1.00517798
-144.5	7.2863376	1.00510747
-143.5	7.1858376	1.00503744
-142.5	7.08603551	1.00496789
-141.5	6.98693134	1.00489882
-140.5	6.88852508	1.00483023
-139.5	6.79081675	1.00476212
-138.5	6.69380632	1.00469449
-137.5	6.59749382	1.00462734
-136.5	6.50187923	1.00456067
-135.5	6.40696256	1.00449449
-134.5	6.31274381	1.00442878
-133.5	6.21922297	1.00436355
-132.5	6.12640005	1.00429881
-131.5	6.03427504	1.00423454
-130.5	5.94284795	1.00417076
-129.5	5.85211878	1.00410746
-128.5	5.76208753	1.00404463
-127.5	5.67275419	1.00398229
-126.5	5.58411877	1.00392043
-125.5	5.49618126	1.00385906
-124.5	5.40894168	1.00379816
-123.5	5.32240001	1.00373775
-122.5	5.23655625	1.00367781
-121.5	5.15141041	1.00361836
-120.5	5.06696249	1.00355939
-119.5	4.98321249	1.0035009
-118.5	4.9001604	1.0034429
-117.5	4.81780623	1.00338537
-116.5	4.73614998	1.00332833
-115.5	4.65519164	1.00327177
-114.5	4.57493122	1.0032157
-113.5	4.49536871	1.0031601
-112.5	4.41650413	1.00310499
-111.5	4.33833746	1.00305036
-110.5	4.2608687	1.00299622
-109.5	4.18409787	1.00294255
-108.5	4.10802494	1.00288937
-107.5	4.03264994	1.00283667
-106.5	3.95797285	1.00278446
-105.5	3.88399368	1.00273272
-104.5	3.81071243	1.00268148
-103.5	3.73812909	1.00263071
-102.5	3.66624367	1.00258043
-101.5	3.59505617	1.00253063

-100.5	3.52456658	1.00248131
-99.5	3.45477491	1.00243248
-98.5	3.38568116	1.00238413
-97.5	3.31728532	1.00233627
-96.5	3.2495874	1.00228888
-95.5	3.1825874	1.00224199
-94.5	3.11628531	1.00219557
-93.5	3.05068114	1.00214964
-92.5	2.98577489	1.0021042
-91.5	2.92156655	1.00205924
-90.5	2.85805613	1.00201476
-89.5	2.79524363	1.00197076
-88.5	2.73312904	1.00192725
-87.5	2.67171237	1.00188423
-86.5	2.61099362	1.00184169
-85.5	2.55097278	1.00179963
-84.5	2.49164986	1.00175806
-83.5	2.43302486	1.00171697
-82.5	2.37509777	1.00167637
-81.5	2.31786861	1.00163625
-80.5	2.26133735	1.00159662
-79.5	2.20550402	1.00155747
-78.5	2.1503686	1.0015188
-77.5	2.09593109	1.00148062
-76.5	2.04219151	1.00144293
-75.5	1.98914984	1.00140572
-74.5	1.93680609	1.001369
-73.5	1.88516025	1.00133276
-72.5	1.83421233	1.001297
-71.5	1.78396233	1.00126174
-70.5	1.73441024	1.00122695
-69.5	1.68555607	1.00119265
-68.5	1.63739982	1.00115884
-67.5	1.58994149	1.00112551
-66.5	1.54318107	1.00109267
-65.5	1.49711856	1.00106031
-64.5	1.45175398	1.00102844
-63.5	1.40708731	1.00099706
-62.5	1.36311856	1.00096616
-61.5	1.31984772	1.00093574
-60.5	1.2772748	1.00090582
-59.5	1.2353998	1.00087637
-58.5	1.19422272	1.00084742
-57.5	1.15374355	1.00081895
-56.5	1.1139623	1.00079096
-55.5	1.07487896	1.00076346
-54.5	1.03649354	1.00073645
-53.5	0.99880604	1.00070992
-52.5	0.96181645	1.00068388
-51.5	0.92552479	1.00065833

-50.5	0.88993103	1.00063326
-49.5	0.8550352	1.00060867
-48.5	0.82083728	1.00058458
-47.5	0.78733728	1.00056097
-46.5	0.75453519	1.00053784
-45.5	0.72243103	1.00051521
-44.5	0.69102477	1.00049305
-43.5	0.66031644	1.00047139
-42.5	0.63030602	1.00045021
-41.5	0.60099352	1.00042952
-40.5	0.57237893	1.00040931
-39.5	0.54446227	1.00038959
-38.5	0.51724352	1.00037036
-37.5	0.49072268	1.00035162
-36.5	0.46489976	1.00033336
-35.5	0.43977476	1.00031558
-34.5	0.41534768	1.0002983
-33.5	0.39161851	1.0002815
-32.5	0.36858726	1.00026518
-31.5	0.34625392	1.00024936
-30.5	0.32461851	1.00023402
-29.5	0.303681	1.00021917
-28.5	0.28344142	1.0002048
-27.5	0.26389975	1.00019092
-26.5	0.245056	1.00017753
-25.5	0.22691017	1.00016462
-24.5	0.20946225	1.0001522
-23.5	0.19271225	1.00014027
-22.5	0.17666017	1.00012883
-21.5	0.161306	1.00011787
-20.5	0.14664975	1.0001074
-19.5	0.13269141	1.00009741
-18.5	0.119431	1.00008792
-17.5	0.10686849	1.00007891
-16.5	0.09500391	1.00007038
-15.5	0.08383724	1.00006235
-14.5	0.07336849	1.0000548
-13.5	0.06359766	1.00004773
-12.5	0.05452474	1.00004116
-11.5	0.04614974	1.00003507
-10.5	0.03847266	1.00002947
-9.5	0.03149349	1.00002435
-8.5	0.02521224	1.00001973
-7.5	0.01962891	1.00001559
-6.5	0.01474349	1.00001193
-5.5	0.01055599	1.00000877
-4.5	0.00706641	1.00000609
-3.5	0.00427474	1.0000039
-2.5	0.00218099	1.00000219
-1.5	0.00078516	1.00000097

-0.5	8.724E-05	1.00000024
0.5	8.724E-05	1
1.5	0.00078516	1.00000024
2.5	0.00218099	1.00000097
3.5	0.00427474	1.00000219
4.5	0.00706641	1.0000039
5.5	0.01055599	1.00000609
6.5	0.01474349	1.00000877
7.5	0.01962891	1.00001193
8.5	0.02521224	1.00001559
9.5	0.03149349	1.00001973
10.5	0.03847266	1.00002435
11.5	0.04614974	1.00002947
12.5	0.05452474	1.00003507
13.5	0.06359766	1.00004116
14.5	0.07336849	1.00004773
15.5	0.08383724	1.0000548
16.5	0.09500391	1.00006235
17.5	0.10686849	1.00007038
18.5	0.119431	1.00007891
19.5	0.13269141	1.00008792
20.5	0.14664975	1.00009741
21.5	0.161306	1.0001074
22.5	0.17666017	1.00011787
23.5	0.19271225	1.00012883
24.5	0.20946225	1.00014027
25.5	0.22691017	1.0001522
26.5	0.245056	1.00016462
27.5	0.26389975	1.00017753
28.5	0.28344142	1.00019092
29.5	0.303681	1.0002048
30.5	0.32461851	1.00021917
31.5	0.34625392	1.00023402
32.5	0.36858726	1.00024936
33.5	0.39161851	1.00026518
34.5	0.41534768	1.0002815
35.5	0.43977476	1.0002983
36.5	0.46489976	1.00031558
37.5	0.49072268	1.00033336
38.5	0.51724352	1.00035162
39.5	0.54446227	1.00037036
40.5	0.57237893	1.00038959
41.5	0.60099352	1.00040931
42.5	0.63030602	1.00042952
43.5	0.66031644	1.00045021
44.5	0.69102477	1.00047139
45.5	0.72243103	1.00049305
46.5	0.75453519	1.00051521
47.5	0.78733728	1.00053784
48.5	0.82083728	1.00056097

49.5	0.8550352	1.00058458
50.5	0.88993103	1.00060867
51.5	0.92552479	1.00063326
52.5	0.96181645	1.00065833
53.5	0.99880604	1.00068388
54.5	1.03649354	1.00070992
55.5	1.07487896	1.00073645
56.5	1.1139623	1.00076346
57.5	1.15374355	1.00079096
58.5	1.19422272	1.00081895
59.5	1.2353998	1.00084742
60.5	1.2772748	1.00087637
61.5	1.31984772	1.00090582
62.5	1.36311856	1.00093574
63.5	1.40708731	1.00096616
64.5	1.45175398	1.00099706
65.5	1.49711856	1.00102844
66.5	1.54318107	1.00106031
67.5	1.58994149	1.00109267
68.5	1.63739982	1.00112551
69.5	1.68555607	1.00115884
70.5	1.73441024	1.00119265
71.5	1.78396233	1.00122695
72.5	1.83421233	1.00126174
73.5	1.88516025	1.001297
74.5	1.93680609	1.00133276
75.5	1.98914984	1.001369
76.5	2.04219151	1.00140572
77.5	2.09593109	1.00144293
78.5	2.1503686	1.00148062
79.5	2.20550402	1.0015188
80.5	2.26133735	1.00155747
81.5	2.31786861	1.00159662
82.5	2.37509777	1.00163625
83.5	2.43302486	1.00167637
84.5	2.49164986	1.00171697
85.5	2.55097278	1.00175806
86.5	2.61099362	1.00179963
87.5	2.67171237	1.00184169
88.5	2.73312904	1.00188423
89.5	2.79524363	1.00192725
90.5	2.85805613	1.00197076
91.5	2.92156655	1.00201476
92.5	2.98577489	1.00205924
93.5	3.05068114	1.0021042
94.5	3.11628531	1.00214964
95.5	3.1825874	1.00219557
96.5	3.2495874	1.00224199
97.5	3.31728532	1.00228888
98.5	3.38568116	1.00233627

99.5	3.45477491	1.00238413
100.5	3.52456658	1.00243248
101.5	3.59505617	1.00248131
102.5	3.66624367	1.00253063
103.5	3.73812909	1.00258043
104.5	3.81071243	1.00263071
105.5	3.88399368	1.00268148
106.5	3.95797285	1.00273272
107.5	4.03264994	1.00278446
108.5	4.10802494	1.00283667
109.5	4.18409787	1.00288937
110.5	4.2608687	1.00294255
111.5	4.33833746	1.00299622
112.5	4.41650413	1.00305036
113.5	4.49536871	1.00310499
114.5	4.57493122	1.0031601
115.5	4.65519164	1.0032157
116.5	4.73614998	1.00327177
117.5	4.81780623	1.00332833
118.5	4.9001604	1.00338537
119.5	4.98321249	1.0034429
120.5	5.06696249	1.0035009
121.5	5.15141041	1.00355939
122.5	5.23655625	1.00361836
123.5	5.32240001	1.00367781
124.5	5.40894168	1.00373775
125.5	5.49618126	1.00379816
126.5	5.58411877	1.00385906
127.5	5.67275419	1.00392043
128.5	5.76208753	1.00398229
129.5	5.85211878	1.00404463
130.5	5.94284795	1.00410746
131.5	6.03427504	1.00417076
132.5	6.12640005	1.00423454
133.5	6.21922297	1.00429881
134.5	6.31274381	1.00436355
135.5	6.40696256	1.00442878
136.5	6.50187923	1.00449449
137.5	6.59749382	1.00456067
138.5	6.69380632	1.00462734
139.5	6.79081675	1.00469449
140.5	6.88852508	1.00476212
141.5	6.98693134	1.00483023
142.5	7.08603551	1.00489882
143.5	7.1858376	1.00496789
144.5	7.2863376	1.00503744
145.5	7.38753553	1.00510747
146.5	7.48943136	1.00517798
147.5	7.59202512	1.00524896
148.5	7.69531679	1.00532043

149.5	7.79930638	1.00539238
150.5	7.90399388	1.0054648
151.5	8.00937931	1.00553771
152.5	8.11546265	1.0056111
153.5	8.2222439	1.00568496
154.5	8.32972307	1.0057593
155.5	8.43790016	1.00583412
156.5	8.54677517	1.00590942
157.5	8.65634809	1.0059852
158.5	8.76661893	1.00606146
159.5	8.87758768	1.00613819
160.5	8.98925436	1.00621541
161.5	9.10161894	1.0062931
162.5	9.21468145	1.00637127
163.5	9.32844187	1.00644992
164.5	9.44290021	1.00652904
165.5	9.55805647	1.00660864
166.5	9.67391064	1.00668873
167.5	9.79046273	1.00676928
168.5	9.90771273	1.00685032
169.5	10.0256607	1.00693183
170.5	10.1443065	1.00701382
171.5	10.2636503	1.00709629
172.5	10.3836919	1.00717923
173.5	10.5044315	1.00726265
174.5	10.625869	1.00734655
175.5	10.7480044	1.00743092
176.5	10.8708378	1.00751577
177.5	10.994369	1.0076011
178.5	11.1185982	1.0076869
179.5	11.2435253	1.00777318
180.5	11.3691503	1.00785993
181.5	11.4954732	1.00794716
182.5	11.6224941	1.00803487
183.5	11.7502128	1.00812305
184.5	11.8786295	1.0082117
185.5	12.0077441	1.00830084
186.5	12.1375566	1.00839044
187.5	12.268067	1.00848053
188.5	12.3992754	1.00857108
189.5	12.5311816	1.00866211
190.5	12.6637858	1.00875362
191.5	12.7970879	1.0088456
192.5	12.9310879	1.00893806
193.5	13.0657858	1.00903099
194.5	13.2011816	1.00912439
195.5	13.3372754	1.00921827
196.5	13.4740671	1.00931262
197.5	13.6115567	1.00940744
198.5	13.7497442	1.00950274

199.5	13.8886296	1.00959851
200.5	14.0282129	1.00969476
201.5	14.1684942	1.00979148
202.5	14.3094734	1.00988867
203.5	14.4511505	1.00998634
204.5	14.5935255	1.01008447
205.5	14.7365984	1.01018308
206.5	14.8803692	1.01028217
207.5	15.024838	1.01038172
208.5	15.1700047	1.01048175
209.5	15.3158693	1.01058225
210.5	15.4624318	1.01068322
211.5	15.6096922	1.01078466
212.5	15.7576505	1.01088658
213.5	15.9063068	1.01098896
214.5	16.055661	1.01109182
215.5	16.205713	1.01119515
216.5	16.3564631	1.01129895
217.5	16.507911	1.01140322
218.5	16.6600568	1.01150796
219.5	16.8129006	1.01161317
220.5	16.9664423	1.01171886
221.5	17.1206818	1.01182501
222.5	17.2756194	1.01193163
223.5	17.4312548	1.01203873
224.5	17.5875881	1.01214629
225.5	17.7446194	1.01225432
226.5	17.9023486	1.01236283
227.5	18.0607756	1.0124718
228.5	18.2199007	1.01258124
229.5	18.3797236	1.01269115
230.5	18.5402444	1.01280153
231.5	18.7014632	1.01291238
232.5	18.8633798	1.0130237
233.5	19.0259944	1.01313548
234.5	19.1893069	1.01324774
235.5	19.3533174	1.01336046
236.5	19.5180257	1.01347365
237.5	19.683432	1.01358731
238.5	19.8495361	1.01370143
239.5	20.0163382	1.01381603
240.5	20.1838382	1.01393109
241.5	20.3520362	1.01404662
242.5	20.520932	1.01416261
243.5	20.6905258	1.01427908
244.5	20.8608174	1.014396
245.5	21.031807	1.0145134
246.5	21.2034945	1.01463126
247.5	21.37588	1.01474959
248.5	21.5489633	1.01486839

249.5	21.7227446	1.01498765
250.5	21.8972238	1.01510737
251.5	22.0724008	1.01522757
252.5	22.2482759	1.01534823
253.5	22.4248488	1.01546935
254.5	22.6021196	1.01559094
255.5	22.7800884	1.01571299
256.5	22.9587551	1.01583551
257.5	23.1381196	1.01595849
258.5	23.3181822	1.01608194
259.5	23.4989426	1.01620585
260.5	23.6804009	1.01633023
261.5	23.8625572	1.01645507
262.5	24.0454114	1.01658037
263.5	24.2289635	1.01670614
264.5	24.4132135	1.01683237
265.5	24.5981614	1.01695906
266.5	24.7838072	1.01708622
267.5	24.970151	1.01721384
268.5	25.1571927	1.01734192
269.5	25.3449323	1.01747047
270.5	25.5333698	1.01759948
271.5	25.7225052	1.01772895
272.5	25.9123385	1.01785888
273.5	26.1028698	1.01798927
274.5	26.294099	1.01812013
275.5	26.4860261	1.01825145
276.5	26.6786511	1.01838323
277.5	26.871974	1.01851547
278.5	27.0659948	1.01864817
279.5	27.2607136	1.01878133
280.5	27.4561303	1.01891495
281.5	27.6522449	1.01904903
282.5	27.8490574	1.01918358
283.5	28.0465678	1.01931858
284.5	28.2447762	1.01945404
285.5	28.4436824	1.01958997
286.5	28.6432866	1.01972635
287.5	28.8435887	1.01986319
288.5	29.0445887	1.02000049
289.5	29.2462866	1.02013825
290.5	29.4486825	1.02027647
291.5	29.6517762	1.02041515
292.5	29.8555679	1.02055428
293.5	30.0600575	1.02069388
294.5	30.265245	1.02083393
295.5	30.4711304	1.02097444
296.5	30.6777138	1.02111541
297.5	30.884995	1.02125683
298.5	31.0929742	1.02139872

299.5	31.3016513	1.02154106
300.5	31.5110263	1.02168385
301.5	31.7210992	1.02182711
302.5	31.9318701	1.02197082
303.5	32.1433388	1.02211498
304.5	32.3555055	1.0222596
305.5	32.5683701	1.02240468
306.5	32.7819326	1.02255022
307.5	32.9961931	1.02269621
308.5	33.2111514	1.02284265
309.5	33.4268077	1.02298955
310.5	33.6431618	1.02313691
311.5	33.8602139	1.02328472
312.5	34.0779639	1.02343298
313.5	34.2964119	1.0235817
314.5	34.5155577	1.02373087
315.5	34.7354015	1.0238805
316.5	34.9559432	1.02403058
317.5	35.1771827	1.02418112
318.5	35.3991203	1.0243321
319.5	35.6217557	1.02448354
320.5	35.845089	1.02463544
321.5	36.0691203	1.02478779
322.5	36.2938495	1.02494059
323.5	36.5192766	1.02509384
324.5	36.7454016	1.02524754
325.5	36.9722245	1.0254017
326.5	37.1997453	1.02555631
327.5	37.4279641	1.02571136
328.5	37.6568808	1.02586688
329.5	37.8864954	1.02602284
330.5	38.1168079	1.02617925
331.5	38.3478183	1.02633611
332.5	38.5795267	1.02649343
333.5	38.8119329	1.02665119
334.5	39.0450371	1.02680941
335.5	39.2788392	1.02696807
336.5	39.5133392	1.02712719
337.5	39.7485371	1.02728675
338.5	39.984433	1.02744676
339.5	40.2210268	1.02760722
340.5	40.4583184	1.02776814
341.5	40.696308	1.0279295
342.5	40.9349955	1.0280913
343.5	41.174381	1.02825356
344.5	41.4144643	1.02841626
345.5	41.6552456	1.02857942
346.5	41.8967248	1.02874302
347.5	42.1389018	1.02890706
348.5	42.3817769	1.02907156

349.5	42.6253498	1.0292365
350.5	42.8696206	1.02940189
351.5	43.1145894	1.02956772
352.5	43.3602561	1.029734
353.5	43.6066207	1.02990073
354.5	43.8536832	1.0300679
355.5	44.1014436	1.03023552
356.5	44.349902	1.03040359
357.5	44.5990582	1.0305721
358.5	44.8489124	1.03074105
359.5	45.0994645	1.03091045
360.5	45.3507145	1.03108029
361.5	45.6026624	1.03125058
362.5	45.8553083	1.03142131
363.5	46.108652	1.03159249
364.5	46.3626937	1.03176411
365.5	46.6174333	1.03193617
366.5	46.8728708	1.03210868
367.5	47.1290063	1.03228163
368.5	47.3858396	1.03245502
369.5	47.6433709	1.03262885
370.5	47.9016001	1.03280313
371.5	48.1605271	1.03297785
372.5	48.4201522	1.03315301
373.5	48.6804751	1.03332862
374.5	48.9414959	1.03350466
375.5	49.2032147	1.03368115
376.5	49.4656314	1.03385807
377.5	49.728746	1.03403544
378.5	49.9925585	1.03421325
379.5	50.2570689	1.0343915
380.5	50.5222773	1.03457018
381.5	50.7881835	1.03474931
382.5	51.0547877	1.03492888
383.5	51.3220898	1.03510889
384.5	51.5900898	1.03528934
385.5	51.8587877	1.03547022
386.5	52.1281836	1.03565154
387.5	52.3982774	1.03583331
388.5	52.669069	1.03601551
389.5	52.9405586	1.03619815
390.5	53.2127461	1.03638122
391.5	53.4856316	1.03656474
392.5	53.7592149	1.03674869
393.5	54.0334962	1.03693308
394.5	54.3084754	1.03711791
395.5	54.5841525	1.03730317
396.5	54.8605275	1.03748887
397.5	55.1376004	1.037675
398.5	55.4153713	1.03786157

399.5	55.69384	1.03804858
400.5	55.9730067	1.03823602
401.5	56.2528713	1.0384239
402.5	56.5334338	1.03861221
403.5	56.8146942	1.03880096
404.5	57.0966526	1.03899014
405.5	57.3793089	1.03917976
406.5	57.662663	1.03936981
407.5	57.9467151	1.03956029
408.5	58.2314652	1.03975121
409.5	58.5169131	1.03994256
410.5	58.8030589	1.04013434
411.5	59.0899027	1.04032656
412.5	59.3774444	1.04051921
413.5	59.665684	1.04071229
414.5	59.9546215	1.0409058
415.5	60.2442569	1.04109975
416.5	60.5345903	1.04129412
417.5	60.8256215	1.04148893
418.5	61.1173507	1.04168417
419.5	61.4097778	1.04187984
420.5	61.7029028	1.04207594
421.5	61.9967258	1.04227248
422.5	62.2912466	1.04246944
423.5	62.5864654	1.04266683
424.5	62.882382	1.04286465
425.5	63.1789966	1.0430629
426.5	63.4763092	1.04326158
427.5	63.7743196	1.04346069
428.5	64.0730279	1.04366023
429.5	64.3724342	1.0438602
430.5	64.6725384	1.04406059
431.5	64.9733405	1.04426141
432.5	65.2748405	1.04446267
433.5	65.5770384	1.04466434
434.5	65.8799343	1.04486645
435.5	66.183528	1.04506898
436.5	66.4878197	1.04527194
437.5	66.7928093	1.04547533
438.5	67.0984968	1.04567914
439.5	67.4048823	1.04588337
440.5	67.7119656	1.04608804
441.5	68.0197469	1.04629313
442.5	68.3282261	1.04649864
443.5	68.6374032	1.04670458
444.5	68.9472782	1.04691094
445.5	69.2578511	1.04711773
446.5	69.569122	1.04732495
447.5	69.8810907	1.04753258
448.5	70.1937574	1.04774064

449.5	70.507122	1.04794913
450.5	70.8211845	1.04815803
451.5	71.135945	1.04836736
452.5	71.4514033	1.04857712
453.5	71.7675596	1.04878729
454.5	72.0844138	1.04899789
455.5	72.4019659	1.04920891
456.5	72.7202159	1.04942035
457.5	73.0391638	1.04963221
458.5	73.3588097	1.0498445
459.5	73.6791534	1.0500572
460.5	74.0001951	1.05027033
461.5	74.3219347	1.05048387
462.5	74.6443722	1.05069784
463.5	74.9675077	1.05091223
464.5	75.291341	1.05112703
465.5	75.6158723	1.05134226
466.5	75.9411015	1.0515579
467.5	76.2670286	1.05177397
468.5	76.5936536	1.05199045
469.5	76.9209765	1.05220735
470.5	77.2489974	1.05242467
471.5	77.5777161	1.0526424
472.5	77.9071328	1.05286056
473.5	78.2372474	1.05307913
474.5	78.5680599	1.05329812
475.5	78.8995704	1.05351752
476.5	79.2317787	1.05373734
477.5	79.564685	1.05395758
478.5	79.8982892	1.05417823
479.5	80.2325913	1.0543993
480.5	80.5675913	1.05462079
481.5	80.9032892	1.05484269
482.5	81.2396851	1.05506501
483.5	81.5767788	1.05528774
484.5	81.9145705	1.05551088
485.5	82.2530601	1.05573444
486.5	82.5922476	1.05595841
487.5	82.9321331	1.0561828
488.5	83.2727164	1.0564076
489.5	83.6139977	1.05663281
490.5	83.9559769	1.05685844
491.5	84.298654	1.05708448
492.5	84.642029	1.05731093
493.5	84.9861019	1.05753779
494.5	85.3308728	1.05776507
495.5	85.6763415	1.05799275
496.5	86.0225082	1.05822085
497.5	86.3693728	1.05844936
498.5	86.7169353	1.05867828

499.5	87.0651958	1.05890761
500.5	87.4141541	1.05913735
501.5	87.7638104	1.0593675
502.5	88.1141646	1.05959806
503.5	88.4652167	1.05982903
504.5	88.8169667	1.06006041
505.5	89.1694146	1.0602922
506.5	89.5225605	1.06052439
507.5	89.8764042	1.060757
508.5	90.2309459	1.06099001
509.5	90.5861855	1.06122343
510.5	90.942123	1.06145726
511.5	91.2987585	1.0616915
512.5	91.6560918	1.06192614
513.5	92.0141231	1.06216119
514.5	92.3728523	1.06239664
515.5	92.7322794	1.06263251
516.5	93.0924044	1.06286877
517.5	93.4532273	1.06310545
518.5	93.8147482	1.06334253
519.5	94.1769669	1.06358001
520.5	94.5398836	1.0638179
521.5	94.9034982	1.06405619
522.5	95.2678108	1.06429489
523.5	95.6328212	1.06453399
524.5	95.9985295	1.0647735
525.5	96.3649358	1.06501341
526.5	96.73204	1.06525372
527.5	97.0998421	1.06549443
528.5	97.4683421	1.06573555
529.5	97.83754	1.06597707
530.5	98.2074359	1.06621899
531.5	98.5780297	1.06646132
532.5	98.9493214	1.06670404
533.5	99.321311	1.06694717
534.5	99.6939985	1.0671907
535.5	100.067384	1.06743463
536.5	100.441467	1.06767896
537.5	100.816249	1.06792369
538.5	101.191728	1.06816882
539.5	101.567905	1.06841434
540.5	101.94478	1.06866027
541.5	102.322353	1.0689066
542.5	102.700624	1.06915333
543.5	103.079592	1.06940045
544.5	103.459259	1.06964798
545.5	103.839624	1.0698959
546.5	104.220686	1.07014422
547.5	104.602447	1.07039293
548.5	104.984905	1.07064205

549.5	105.368061	1.07089156
550.5	105.751915	1.07114146
551.5	106.136468	1.07139177
552.5	106.521718	1.07164247
553.5	106.907666	1.07189356
554.5	107.294311	1.07214505
555.5	107.681655	1.07239694
556.5	108.069697	1.07264922
557.5	108.458436	1.0729019
558.5	108.847874	1.07315497
559.5	109.238009	1.07340843
560.5	109.628843	1.07366229
561.5	110.020374	1.07391654
562.5	110.412603	1.07417118
563.5	110.80553	1.07442622
564.5	111.199155	1.07468165
565.5	111.593478	1.07493748
566.5	111.988499	1.07519369
567.5	112.384218	1.0754503
568.5	112.780635	1.0757073
569.5	113.177749	1.07596469
570.5	113.575562	1.07622247
571.5	113.974072	1.07648064
572.5	114.37328	1.0767392
573.5	114.773187	1.07699815
574.5	115.173791	1.0772575
575.5	115.575093	1.07751723
576.5	115.977093	1.07777735
577.5	116.379791	1.07803786
578.5	116.783187	1.07829876
579.5	117.187281	1.07856005
580.5	117.592072	1.07882172
581.5	117.997562	1.07908379
582.5	118.403749	1.07934624
583.5	118.810635	1.07960908
584.5	119.218218	1.0798723
585.5	119.626499	1.08013592
586.5	120.035479	1.08039991
587.5	120.445156	1.0806643
588.5	120.855531	1.08092907
589.5	121.266604	1.08119423
590.5	121.678375	1.08145977
591.5	122.090843	1.0817257
592.5	122.50401	1.08199201
593.5	122.917875	1.08225871