



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SOLAR FOTOTÉRMICA

**Diseño de un concentrador solar compacto de plato parabólico
para aplicaciones de destilación de agua**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
CARLOS ERNESTO ARREOLA RAMOS

TUTOR PRINCIPAL
DR. VÍCTOR HUGO GOMEZ ESPINOZA
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

MÉXICO, D. F. JULIO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Best y Brown Roberto
Secretario: Dr. Gómez Espinoza Víctor Hugo
Vocal: Dr. Ortega Ávila Naghelli
1^{er} Suplente Dr. Andaverde Arredondo Jorge Alberto
2^{do} Suplente Dr. Rivera Blanco Carlos Octavio

Instituto de Energías Renovables-UNAM

Dr. Víctor Hugo Gómez Espinoza

FIRMA

RESUMEN

En México aproximadamente 10 millones de habitantes no tienen acceso al agua potable, la mayoría habitan en zonas rurales de difícil acceso, por lo que la instalación de plantas purificadoras de agua es complicado. En contraste, la irradiación solar global en México es en promedio de 5 kWh/día/m², y en algunas regiones del país se llega a valores de 6 kWh/día/m², por lo que hace factible el uso de tecnologías de concentración solar para purificar agua. Tomando en consideración los datos antes mencionados se diseñó y construyó en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México un concentrador solar parabólico que permitiera estudiar la destilación del agua con un flujo de radiación solar altamente concentrado. El dispositivo está constituido por una estructura giratoria, un mecanismo de seguimiento, una estructura de soporte, un receptor y un concentrador solar parabólico. El concentrador se diseñó a partir de una antena satelital ligera fabricada en aluminio. El diámetro de apertura del concentrador fue de 3.1m con una distancia focal de 1.20m. La superficie del concentrador está recubierta por una lámina de aluminio anodizado que alcanza una reflectancia de 0.89 en la región del visible del espectro solar y de 0.92 para longitudes de onda de hasta 3μm en la región infrarroja. El mecanismo de seguimiento solar corresponde a una montura altura solar-azimut, además cuenta con sensores y un sistema automático de control para el seguimiento del movimiento aparente del sol. El diseño del equipo de concentración se centró en un seguimiento preciso del Sol, que permitiera mantener la energía concentrada en el receptor en un lapso prolongado de tiempo, además, de considerarse la simplicidad mecánica de sus componentes. Las condiciones de diseño más importantes fueron: Una estructura totalmente desarmable, piezas mecánicas económicas, refacciones de fácil reposición y una operación simple del equipo. Dadas las características geométricas del concentrador la potencia generada por el área de apertura del concentrador fue de 4.42 kW, con esta energía y partiendo de un análisis térmico siguiendo la ley del enfriamiento de Newton se alcanzaron los 100 °C en 606 s (10 minutos), lográndose destilar 8 litros de agua en 5034 s (1.39 horas). El concentrador se diseñó para estudiar térmica y mecánicamente la energía concentrada en el receptor y la conversión de energía solar. Con el receptor se evaluó la precisión del mecanismo de seguimiento solar por perturbaciones climatológicas y de la radiación solar. A sí mismo, se determinó la potencia y temperatura teórica que puede alcanzar el receptor para diferentes áreas de apertura del concentrador. En el cálculo teórico el equipo alcanzó temperaturas de concentración promedio de hasta 686.42 °C con una relación de concentración geométrica de 102.44. Los

componentes desarmados del concentrador solar se diseñaron para tener menos de 1.55 m de longitud.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1

ENERGÍA SOLAR Y SUS CONSIDERACIONES TEÓRICAS 1

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE CONCENTRACION..... 27

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS 41

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES 66

APÉNDICE A

CÁLCULOS SOLARES PARA EL DÍA 21 DE DICIEMBRE 71

APÉNDICE B

CÁLCULOS SOLARES PARA EL DÍA 21 DE JUNIO 78

APÉNDICE C

ÁNGULOS SOLARES PARA UN AÑO 87

APÉNDICE D

COEFICIENTE DE CONCENTRACIÓN GEOMÉTRICA Y TEMPERATURA
MÁXIMA TEÓRICA EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN. 91

APÉNDICE E

TEOREMA DE RABL 96

APÉNDICE F

COEFICIENTE DE CONCENTRACIÓN GEOMÉTRICA COMO FUNCIÓN DE LA
TEMPERATURA DE OPERACIÓN 100

APÉNDICE G

DESTILACIÓN SOLAR TEÓRICA **104**

APÉNDICE H

CALCULO DE LA TRANSMISIÓN MECÁNICA AZIMUT Y ALTURA SOLAR..... **109**

APÉNDICE I

PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO..... **112**

APÉNDICE J

PRUEBAS EXPERIMENTALES..... **142**

NOMENCLATURA

A	Superficie de admisión de radiación para el teorema de Rabl	
A	Amperes	
A_{abs}	Área del absorbedor	
A_{apc}	Área de apertura del concentrador	7.54 m ²
$A_{aper-con}=A_{sec}$	Área de apertura del concentrador	m ²
A_{base}	Área de la base del receptor	m ²
A_{con}	Área del concentrador	8.28 m ²
AI	Ángulo de incidencia	
AI(hs)	Ángulo de incidencia solar por una hora solar específica	
A_{lados}	Área de los lados del receptor	m ²
A_{reC}	Altura del receptor	0.003175 m
$A_{receptor}$	Área del receptor	0.07307 m ²
c	Calor específico del agua	J/(kg °C)
CD	Corriente directa	
$CR_{geométrico}$	Coeficiente de concentración geométrica (concentración real)	
CR_{ideal}	Coeficiente de concentración geométrica ideal	
D	Diámetro del concentrador	3.1 m
D_f	Distancia focal	m
D_{min}	Sección de admisión de radiación solar	
D_{rec}	Diámetro del receptor	0.3 m
$D_{Tierra-sol}$	Distancia entre la Tierra y el Sol	9.3×10^7 m
$E_{abs \rightarrow s}$	Fracción de radiación que llega a la fuente proveniente del absorbedor, debe ser >1	
ET	Ecuación del tiempo	
F	Fuerza tangencial	
F_p	Factor de potencia del motor	Kg·m
hs	Hora solar	
I	Corriente del motoreductor	Ampere
in	Pulgada	
kq	Kiloohmios	
L	Latitud del lugar	19°
LD	Duración del día	(hh:mm:ss)
LI	Longitud del lugar	99.22°
LRD	Foto resistencias	
L_s	Meridiano estándar para la zona horaria local	105°
L_v	Calor de evaporación del agua	2.26×10^6 J/kg
m	Masa que contiene el recipiente original	kg
m_e	Masa de agua evaporada	kg
MT	Momento torcional	lb·in
n	Pérdidas debidas a la absorción, reflexión, etc.	

N	Factor de seguridad	
P	Profundidad del concentrador	0.5 m
P	Potencia suministrada por el concentrador en un intervalo de tiempo	
[Q] Q_{H_2O}	Calor asociado al incremento de temperatura del agua	
Q_{abs}	Cantidad de radiación absorbida en el absorbedor	kW
$Q_{abs \rightarrow s}$	Energía radiativa que llega del absorbedor a la fuente	kW
Q_{medio}	Ángulo medio del sol	0.2663°
$Q_{receptor-pérdidas}$	Pérdidas de radiación en el receptor	
Q_s	Energía radiante que emite el sol	kW
Q_{s-abs}	Potencia radiada desde la fuente de energía (S) al receptor	
Q_{sol}	Radiación emitida por el sol	4.467x10 ² kW
$Q_{sol-concentrador}$	Radiación incidente en el área de apertura del concentrador	11.98 kW
$Q_{sol-receptor}$	Radiación solar incidente en el receptor	kW
$Q_{sol-receptor}$	Balance de energía en el receptor (energía que llega al receptor y se pierde en él)	
$Q_{sol-tierra}$	Radiación incidente en el área de apertura y del concentrador	KW
r	Distancia al centro de giro	m
R_{ad}	Radianes	
RCG	Relación de concentración geométrica	
R_f	Radio de la esfera	
RPM	Revoluciones por minuto	
R_{sol}	Radio del sol	m
r_{sol}	Radio del sol	6.955x10 ⁸ m
SAZ	Seguimiento azimuthal	
T	Fracción de radiación incidente que llega a la apertura del receptor	0.5
T_{abs}	Temperatura del absorbedor (receptor)	°C
T_{amb}	Temperatura del medio ambiente	°C
TDMS	Tiempo desde el mediodía solar	(hh:mm:ss)
T_r	Temperatura del agua	°C
$T_{receptor}$	Temperatura máxima teórica en función de la concentración	°C
$T_{receptor}$	Temperatura teórica del receptor	°C
T_s	Temperatura de la fuente	
T_{sol}	Temperatura del sol	°C
V	Voltaje del motoreductor	Volt
V	Volts	
Z	Ángulo azimuth	
z(hs)	Ángulo azimuth para una hora solar específica	

Lista de símbolos griegos

α	Altura solar	
$\alpha(\text{hs})$	Altura solar para un área solar específica	
α_{receptor}	Absotividad del receptor (recubrimiento SOIKOTE-H/SORB-11, 0.91)	
$\alpha(A_{\text{receptor}})$	Coeficiente de pérdidas de calor	J/°C
α_w	Ángulo azimuth del concentrador	
β	Ángulo de inclinación del concentrador	
δ	Declinación	
ε	Emisividad del receptor en la región del infrarrojo (0.5)	
η	Día juliano	
ρ	Reflectancia	
σ	Constante de Stefan-Boltzman	$5.670041 \times 10^{-8} \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-4}$

CAPÍTULO 1

ENERGÍA SOLAR Y SUS CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Introducción

El hombre a lo largo de su historia, ha requerido de la energía para realizar sus actividades. Desde su aparición en la faz de la Tierra hasta el inicio de la industrialización en Europa, utilizó fuentes renovables de energía como la solar, la biomasa, la del viento y la del agua. Éstas le dieron a la humanidad el calor para cocinar y calentarse, la potencia para transportarse en ríos y mares, y la fuerza para la molienda de granos y el bombeo de agua. Hoy en día, los combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural, son las principales fuentes de energía del planeta ya que más del 80% de la demanda de energía se satisface con ellos [1].

El uso indiscriminado de los combustibles fósiles está causando un daño ecológico irreversible en muchas partes del planeta. Algunos estudios muestran que el cambio climático se debe a la acumulación de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, como son dióxidos de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, ozono y clorofluorocarbonos [2]. Por otro lado, no hay que olvidar que los combustibles fósiles no son renovables y se prevé el agotamiento del petróleo a mediados del presente siglo [3].

El deterioro ambiental se agudiza con el paso del tiempo; por ello es necesario aplicar políticas para la reducción y el control de las emisiones de contaminantes, así como garantizar las reservas de combustibles fósiles para las siguientes generaciones. Ante esta situación, toma especial importancia la alternativa de suplir dichas energías por fuentes renovables. No es posible realizar completamente esta sustitución en los siguientes años, sin embargo, sí de manera gradual, mediante la diversificación de las fuentes de energía, procurando que las renovables tengan un impacto favorable muy importante.

Se han realizado esfuerzos por parte de la comunidad internacional para la protección de medio ambiente, como son el protocolo de Montreal y el de Kioto. Bajo estos acuerdos internacionales es donde la tecnología relacionada con el aprovechamiento de la radiación solar se reconoce como una alternativa, ya que es la de mayor disponibilidad en el planeta [4]. Desde la década de los años setenta, del siglo pasado, se empieza a utilizar en varias partes del mundo, y se espera que en un futuro no mayor que 30 años pueda ser una de las fuentes básicas del suministro energético del planeta.

Para hacer posible el uso de las fuentes renovables a gran escala, se requieren tecnologías con altas eficiencias, disminuyendo los costos de producción, que en estos momentos la hacen en muchos casos poco competitivas frente a las tecnologías convencionales que emplean combustibles fósiles [5].

A pesar de que gran parte de nuestro país se encuentra en una de las franjas con mayor insolación del planeta, superior a 5.0 kWh/día/m² [6] en casi todo el territorio no se han desarrollado las tecnologías necesarias para su aprovechamiento. Por esto, es indispensable fomentar la investigación y el desarrollo de infraestructura para beneficiarnos de esta fuente de energía.

El agua dulce es un recurso básico para el desarrollo de comunidades humanas no sólo porque la requieren los ecosistemas que sustentan la vida, sino porque se emplea también para un sinnúmero de usos generados por nuestra civilización actual. Su distribución sobre la superficie continental es muy heterogénea y está sujeta en la mayoría de los casos a las condiciones climáticas locales. El agua que se obtiene de los mantos freáticos sin permitir su recarga suficiente no es sustentable. Históricamente la población humana se asentó principalmente en lugares donde el agua disponible era suficiente, mientras que las regiones semidesérticas o desérticas fueron pobladas solo marginalmente. Esta situación ha cambiado, y en la actualidad es notable la necesidad de agua dulce en regiones áridas [23].

En México existe un crecimiento permanente del grado de presión sobre el recurso hídrico (GPRH), por diversas causas, entre las que se encuentran el crecimiento de la población y el crecimiento de la demanda *per capita* debido a la diversificación de usos de agua y a su uso en procesos urbanos e industriales. El GPRH a escala nacional es de 17 %, lo cual es bajo, pero se debe a un efecto de la estadística: en ese parámetro se promedian la sobreabundancia de agua que existe en el sur del país con la escasez del norte. Los índices regionales expresan otro panorama: promediando las zonas centro, norte y noroeste, el GPRG es de 47 %, lo cual ya se considera como una presión “fuerte”. Dentro de este promedio, la península de Baja California muestra un GPRH de más de 75 % y la región noroeste (básicamente Sonora) de 87% [7]. Al hablar de que el GPRH en México es del 17 %, los habitantes de Sonora, Tabasco y el sur de Veracruz, las lluvias sean extraordinariamente abundantes respecto del promedio nacional.

Con todo lo anterior surge la idea de desarrollar un prototipo de concentrador solar parabólico que permita despertar el interés en el estudio y desarrollo tecnológico de las energías renovables. El prototipo permitirá estudiar la destilación del agua con un flujo de radiación solar altamente concentrado, para

desarrollar en un futuro aplicaciones viables de la energía solar térmica en destilación y purificación de agua.

1.1. Antecedentes

El principio básico de todos los sistemas solares térmicos es simple: la radiación solar es captada y el calor se transfiere a un medio portador, generalmente un fluido (agua o aire). El medio calentado se puede usar directa o indirectamente mediante un intercambiador de calor que transfiere la energía a su destino final.

Las primeras aplicaciones realizadas con energía solar implementaron concentradores solares, los cuales por su naturaleza de construcción y necesidad de seguir el sol, eran más difíciles de ocupar. Durante el siglo XVIII fueron construidos hornos solares capaces de fundir acero, cobre y otros metales. Su uso fue extendido en Europa y el Medio Oriente, destacándose un horno diseñado por el científico francés Antoine Lavoisier que alcanzó la temperatura de 1750°C.

Durante el siglo XIX August Monchot construyó y operó motores a vapor, generado por energía solar (1864 – 1878), además diseñó un colector con forma de cono truncado. Abel Pifre, contemporáneo de Monchot, diseñó un colector solar parabólico conformado por espejos pequeños.

En el año 1901, G. Eneas instaló un colector parabólico de 10 metros de diámetro, el cual generaba vapor en su foco y alimentaba un sistema de bombeo de agua en California. En 1912, Shuman en colaboración con C.V. Boys, construyó el mayor sistema de bombeo solar en el mundo hasta ese momento. El sistema fue puesto en operación en 1913 y se ocuparon colectores cilindro-parabólicos los cuales focalizaban la energía del sol en un tubo de absorción. Cada colector medía 62 metros de largo y tenía un área total de colección de 1200 m², con este sistema se obtenía una potencia de 40 kW.

Entre los años 1915 al 1950, el interés por el uso de energía solar en generación decayó; esto debido a los avances en motores de combustión interna y a los bajos precios de los combustibles fósiles. Sin embargo, después del uso de celdas solares en los programas espaciales y a los crecientes precios de los combustibles fósiles, la energía solar ha vuelto a ser una alternativa válida de generación eléctrica y de procesos.

Durante los últimos 50 años, muchas mejoras a estos sistemas de concentración solar fueron ideadas y construidas; en general, todas transfieren

calor al foco de un receptor y este a su vez la transfiere a un fluido de trabajo el cual alimenta un sistema mecánico.

1.2. Cálculos solares

El sol es una esfera 109 veces el diámetro de la tierra, que irradia una cantidad enorme de energía originada por reacciones nucleares en cadena. Gran parte de la energía que produce sirve para mantener su propia temperatura, y el resto la envía hacia el espacio. La temperatura aparente de la superficie solar es aproximadamente 5,000°C. La energía luminosa emitida por el sol, cuya emisión tiene lugar a través del fenómeno físico denominado radiación, se propaga en todas las direcciones del espacio sin soporte material [8].

Una pequeña parte de esa energía (1,350 W/m²) llega a la superficie terrestre; pero no llega, como originalmente se cree, en forma térmica, sino bajo la forma de ondas electromagnéticas. La radiación cumple la función de transportar energía, de una forma parecida a como lo hacen las ondas de radio, televisión o la propia luz. Todas ellas son ondas electromagnéticas, aunque las del sol son de longitudes de ondas más cortas [9].

Existen distintos tipos de ondas electromagnéticas y, las emitidas por el sol, es decir, los rayos solares, pueden clasificarse en tres tipos principales:

- I. Rayos infrarrojos
- II. Luz visible
- III. Rayos ultravioleta

En un haz de rayos solares, los que integran la luz blanca (y que vemos descompuesta cuando observamos el fenómeno del arco iris) son perceptibles por el ojo humano (luz visible) y van del rojo al violeta, pasando por el anaranjado, amarillo, verde, azul y violeta; pero por debajo del rojo existen otros denominados infrarrojos, y por encima del violeta los llamados ultravioletas, ambos invisibles para el ojo humano. Estos últimos son actínicos, es decir, que no producen calor, sino cambios químicos [10].

De la energía total transmitida por los rayos solares, los infrarrojos transportan aproximadamente un 46%; los de luz visible un 47%, y los ultravioleta el restante 7% esto se puede observar en la figura 1.1.

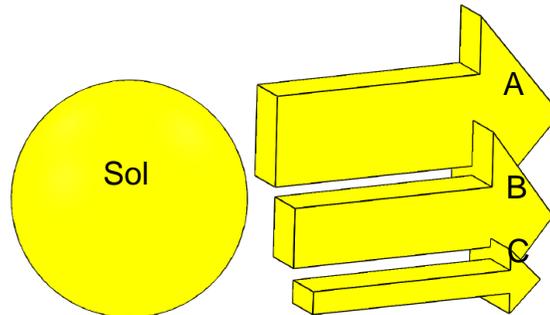


Figura 1.1: Descomposición de las ondas electromagnéticas: Infrarrojos 46% (A), luz visible 47%(B), ultravioleta 7%(C).

1.2. La constante solar

Para aprovechar la energía solar se debe investigar qué cantidad de energía llega al lugar donde se prevé realizar la captación, por unidad de tiempo o en promedio. Para ello es necesario comprender el movimiento relativo de la Tierra y el Sol. La Tierra gira alrededor del Sol describiendo una órbita elíptica. Al mismo tiempo, la Tierra gira sobre ella misma alrededor de un eje, tardando un día en hacer este giro. De toda la energía irradiada por el Sol, el sistema atmósfera–Tierra intercepta durante su viaje alrededor del mismo sólo una parte.

La intensidad de la radiación solar antes de entrar en la atmósfera, al llegar a los límites más altos de esta, muestra algunas variaciones, pero el valor medio es de 1.4 kW/m^2 . Este es el valor conocido como constante solar [11].

En realidad no es constante y varía según las estaciones de 1350 W/m^2 a 1450 W/m^2 . La absorción atmosférica reduce esta intensidad en una medida que depende parcialmente de la longitud del recorrido a través de la atmósfera y parcialmente del estado de la masa de aire (nubosidad, partículas suspendidas). Cuando el sol se encuentra en un ángulo de altitud bajo, la intensidad es menor. Con una posición Cenit, la intensidad media sobre un plano horizontal puede acercarse a 1 kW/m^2 (a nivel del mar) [10].

La constante solar es en realidad la cantidad de energía solar que llega por minuto al límite superior de nuestra atmósfera, por cm^2 de superficie. El valor medio de la constante solar extraterrestre actualmente admitido es de 1.354 kW/m^2 . En estos valores hay que contar, sin embargo, variaciones de (\pm) 1.5% ocasionadas por las oscilaciones o incertidumbres de las manchas solares.

En la actualidad se define a la constante solar como constante solar directa, término más actual, que equivale a la cantidad de energía que en un minuto se recibe por unidad de superficie en un determinado lugar de la superficie terrestre. Los valores de esta constante solar directa son inferiores en un 23% con relación a los citados anteriormente, debido a que en la atmósfera se pierde gran parte de la energía.

Si se tiene en cuenta que el sol irradia cada segundo en todas las direcciones una energía correspondiente a $4 \times 10^{26} \text{ J}$ y que la distancia que nos separa tiene un valor medio de 149.5 millones de km, por tanto la constante solar se obtiene a partir de la ecuación 1.1.

$$I = \frac{Q_{\text{sol}}}{4\pi D_{\text{Tierra-sol}}^2} \cong 1.35 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \dots \dots \dots (1.1)$$

1.3. Masa de aire y energía solar sobre la superficie.

La atmósfera que es bastante menos transparente de lo que parece a simple vista, modifica la calidad y cantidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre y con ello la cantidad de radiación aprovechada por el concentrador, hasta el punto de que, incluso en un día perfectamente claro, no llega a la superficie terrestre más que un 70% de la energía que recibirá si no se interpusiera el filtro atmosférico [10].

La mayor o menor transparencia de la atmósfera depende principalmente del grado de humedad. También influyen la presión, la altitud del lugar y la contaminación.

Como consecuencia de la suma de varios factores, la atmósfera disipa una gran parte de la energía que proviene del sol y esta acción la realiza de tres maneras:

- I. Por difusión molecular (para los rayos ultravioletas).
- II. Por reflexión difusa sobre los aerosoles (polvo, pequeñas gotas, etc.).
- III. Por absorción gaseosa.

El espesor de las capas de aire que tiene que atravesar la radiación, es decir, la altura del sol sobre el horizonte, variable a lo largo del día y del año, tiene un efecto equivalente al de una transparencia variable.

Cuando más bajo esta el sol sobre el horizonte, mayor es la capa de aire que han de atravesar los rayos y menor por tanto la energía que llega al suelo (figura1.2).

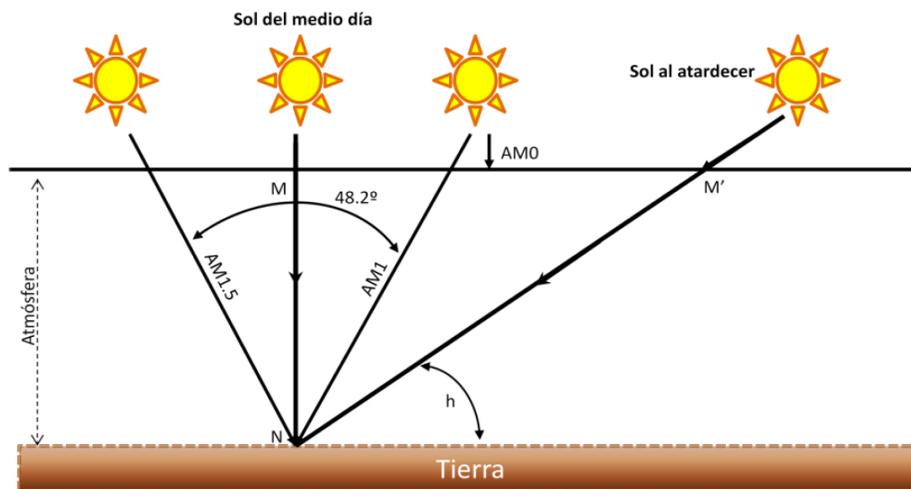


Figura 1.2. Trazado de los rayos solares que llegan a la superficie [10].

Cuando el ángulo que forma el plano horizontal del lugar con los rayos solares llega a ser inferior a 15° , es inútil pretender captar estos rayos. El espesor de aire que debe atravesar absorbe casi toda su energía. La constante solar (1.367 kW/m^2) se da fuera de la atmósfera, situación que es denominada masa de aire cero (AM0), pero con masa de aire uno, al nivel del mar, y en condiciones atmosféricas óptimas (AM1), con cielo totalmente despejado, el valor de referencia que se toma es de 1 kW/m^2 , sin embargo, se pueden presentar situaciones que corresponda a AM1.5, cuyo valor es de solo 800 W/m^2 [11].

1.4. Física de la captación térmica de la energía solar.

Como ya se mencionó anteriormente, al atravesar la capa atmosférica la radiación va a ser difundida y absorbida, incluso reflejada por las moléculas en suspensión dentro de la misma. Sin embargo, habrá una cierta cantidad de radiación solar que no encontrará obstáculo y otra cantidad que sí, por lo que se puede distinguir de diferentes maneras:

1.4.1. Radiación directa.

Es la radiación solar recibida en la superficie terrestre, sin que haya sufrido ningún cambio de dirección en su recorrido.

1.4.2. Radiación de albedo.

Es la componente de la radiación solar procedente de la reflexión del suelo.

1.5. Geometría solar

Los concentradores solares parabólicos tiene la característica de utilizar en mayor medida la energía solar directa, por ello es importante conocer conceptos como son: la latitud, la declinación, el ángulo azimutal, el ángulo horario, etc. Estos conceptos permiten establecer las bases del diseño estructural del equipo y a su vez da la pauta para el diseño del mecanismo de seguimiento solar.

La tierra se divide en paralelos de latitud, por ejemplo, en el hemisferio norte esta latitud se considera positiva y tiene una variación que oscila entre 0° y 90° . El paralelo de 0° grados y que es usado de referencia recibe el nombre de ecuador terrestre. Los meridianos son también usados para dividir la tierra, siendo el meridiano de Greenwich el patrón con un ángulo de referencia de 0° este tiene un desplazamiento que va de este a oeste en los que los meridianos aumentan de 0° a 180° respectivamente. En la figura 1.6 se muestra la distribución de cada uno [12].

La posición del sol en el cielo varía de día en día y de hora en hora. Los movimientos relativos de la tierra no son simples pero son sistemáticos y predecibles. La Tierra hace su recorrido alrededor del sol en un año y rota alrededor de su eje con un ángulo de $23^\circ 27.14$ minutos (23.45°), al plano de la elipse, que contiene el plano orbital de la tierra y el ecuador como se muestra en la figura 1.3.

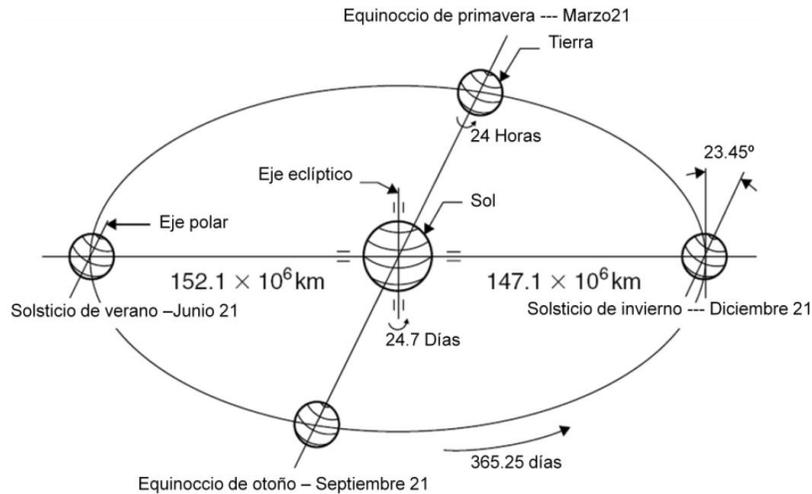


Figura 1.3. Movimiento anual de la tierra alrededor del sol [13].

El movimiento más notable del sol es el que hace en el transcurso del día, creando un arco a través del cielo y en el que alcanza su punto más alto al medio día. El 21 de junio el sol está en su posición más al norte, esto se conoce como solsticio de verano. Seis meses después el 21 de diciembre ocurre lo opuesto, el solsticio de invierno y en esta ocasión el sol se encuentra más al sur, este fenómeno se puede apreciar de mejor forma en la figura 1.3.

En los seis meses en que ocurren los solsticios ocurren dos fenómenos más, estos son, los equinoccios de primavera y otoño. El equinoccio de primavera tiene lugar el 21 de marzo y el de otoño el 21 de septiembre y en ambos, los días y las noches duran lo mismo.

Para el diseño de concentradores solares térmicos se deben tomar en consideración los efectos que la declinación tiene sobre el ángulo de incidencia de la radiación solar y con ello lograr interceptar esta radiación de la forma más perpendicularmente posible.

Para situar el concentrador solar se hace énfasis en los principales ángulos solares, por lo que a continuación se muestra una serie de consideraciones teóricas y matemáticas de los ángulos solares y sus características.

1.5.1. Latitud (L)

Es el ángulo que determina el lugar de interés sobre la Tierra. Este ángulo es positivo cuando se mide hacia el norte del ecuador, y negativo cuando es hacia el sur por lo que varía de $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ (figura 1.4).

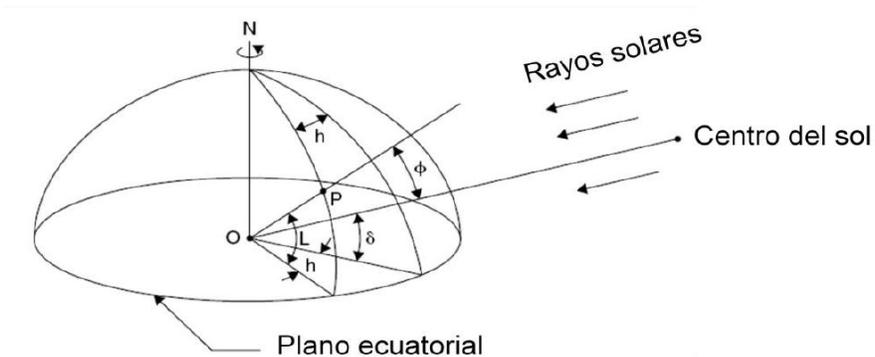


Figura 1.4. Latitud, ángulo horario y la declinación solar [13].

1.5.2. Declinación (δ)

La declinación es la posición angular del sol al medio día solar, en el momento en que alcanza su punto más alto en el cielo con respecto al eje del ecuador. La declinación norte que se cuenta por arriba se toma como positiva, mientras que la sur se toma como negativa ($-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$).

La figura 1.5 muestra la declinación durante los equinoccios y los solsticios. Como puede verse, la declinación varía de 0° en el equinoccio de primavera a 23.45° en el solsticio de verano, 0° en el equinoccio de otoño, y -23.45° en el solsticio de invierno.

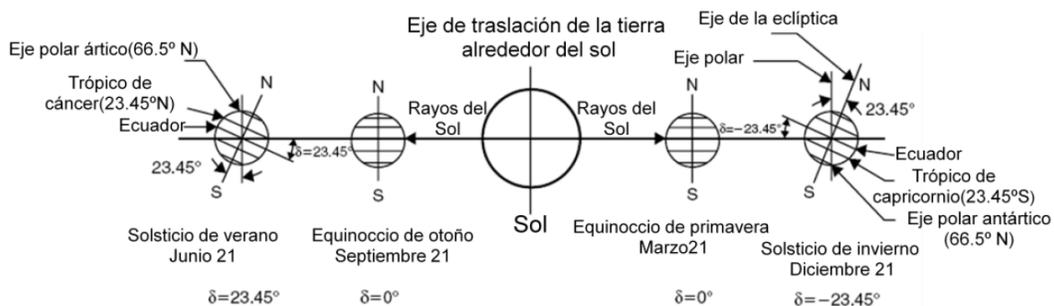


Figura 1.5. Variación anual de la declinación solar [13].

La declinación solar durante un día cualquiera se puede considerar constante en los cálculos de ingeniería solar según Kreith y Kreider (1978) [13] y Duffie y Beckman (1991) [14]. Estos autores señalan que el cálculo de la declinación se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \dots \dots \dots (1.1)$$

Dónde:

N= Es el día del año.

1.5.3. Ángulo horario (h, w)

Se define como el ángulo de desplazamiento de la Tierra, es igual al cero en el medio día solar y va adquiriendo un valor de 15° de longitud por cada hora siendo este valor positivo en la mañana y negativo en las tardes.

1.5.4. Altura solar (α)

Se define como el ángulo entre los rayos del sol y un plano horizontal, se relaciona con el ángulo cenital solar, Φ, que es el ángulo entre los rayos del sol y la vertical. Según Kreith y Kreider (1978) [13] y Duffie y Beckman (1991) [14] la expresión matemática para el ángulo de altura solar es:

$$\sin(\alpha) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h_s) \dots \dots \dots (1.2)$$

1.5.5. Ángulo azimut (z)

Es el ángulo formado por la proyección del plano horizontal del rayo solar. Este ángulo tiene valor cero cuando la proyección apunta al norte, valor positivo cuando apunta hacia el oeste y valor negativo cuando apunta al este. $-180^\circ \leq z \leq 180^\circ$.

Al medio día solar, por definición, el sol está exactamente en el meridiano, que contiene la línea norte-sur y en consecuencia, el azimut solar es de 0°. Por lo tanto la altitud del mediodía α (h_s) es:

$$z(h_s) = \sin^{-1} \left[\cos(\delta)(n) \frac{\sin(h_s)}{\cos(\alpha)(n)} \right] \dots \dots \dots (1.3)$$

En la figura 1.6 se puede observar la posición del ángulo azimut y los ángulos antes mencionados.

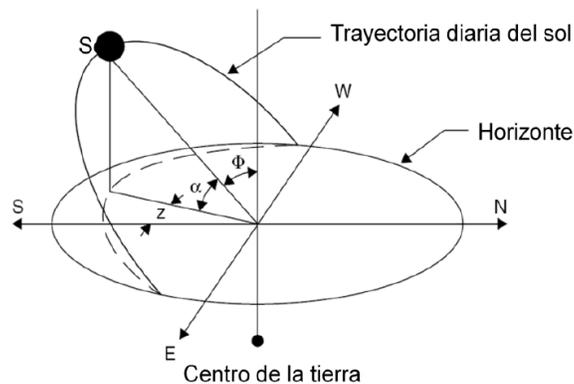


Figura 1.6. Trayectoria aparente del sol desde el amanecer hasta el atardecer [13].

1.5.6. Angulo de incidencia, (θ , AI)

El ángulo de incidencia solar, es el ángulo entre los rayos del sol y la normal en una superficie. Para un plano horizontal, el ángulo de incidencia, θ y el ángulo cenital, Φ , son los mismos. Los ángulos que se aprecian en la figura 1.7 están relacionados con los ángulos de base, que se muestra en la figura 1.4, con la siguiente expresión general para el ángulo de incidencia propuesta por Kreith y Kreider (1978)[13] y Duffie y Beckman (1991)[14].

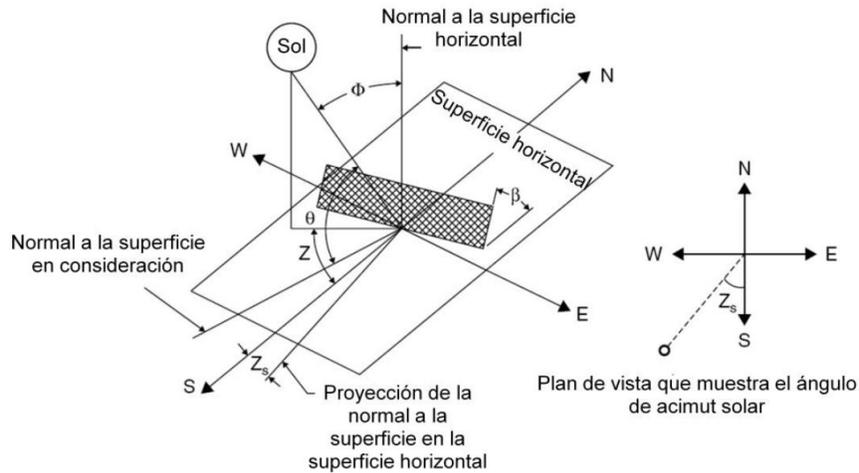


Figura 1.7. Diagrama del ángulo de incidencia [13].

$$AI = \arcsin(\cos(\alpha)\cos(z - \alpha_w)\sin(\alpha) + \sin(\alpha)\cos(\alpha)) \dots \dots \dots (1.4)$$

Dónde:

α_w = Es el ángulo de desviación de la proyección en el plano horizontal de la normal a la superficie con respecto al meridiano local. Este ángulo tiene valor cero cuando la proyección apunta hacia el norte, valor positivo cuando apunta hacia el oeste y valor negativo cuando apunta el este. $-180^\circ \leq z_s \leq 180^\circ$.

1.6. Propiedades de radiación de los materiales

Entre los factores específicos que se deben tener en cuenta en el diseño de equipos e instalaciones solares están las propiedades físicas de los materiales empleados, especialmente las ópticas y térmicas. También influyen las propiedades mecánicas y químicas, estas últimas principalmente en la durabilidad de los equipos.

Toda la radiación solar puede ser convertida en calor, por lo que los concentradores solares pueden aprovechar la radiación de cualquier longitud de onda, ya sea infrarroja, visible o ultravioleta.

Para ello es necesario conocer las propiedades físicas y químicas que influyen en el funcionamiento de los colectores solares y principalmente las propiedades ópticas. Cuando un rayo de luz llega a un cuerpo (figura 1.8), éste es reflejado, absorbido o transmitido.

La propiedad de un cuerpo de reflejar los rayos de luz está determinada por su reflexividad (ρ); la de absorción de la luz por su absorbancia (α), y la de transmitir o dejar pasar la luz, por su transmisividad (τ). La suma de la reflexividad, la absorbancia y la transmisividad de un cuerpo es la unidad, lo que puede expresarse según Bériz y Álvarez, (2008) [15] por la ecuación 1.5.

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \dots \dots \dots (1.5)$$

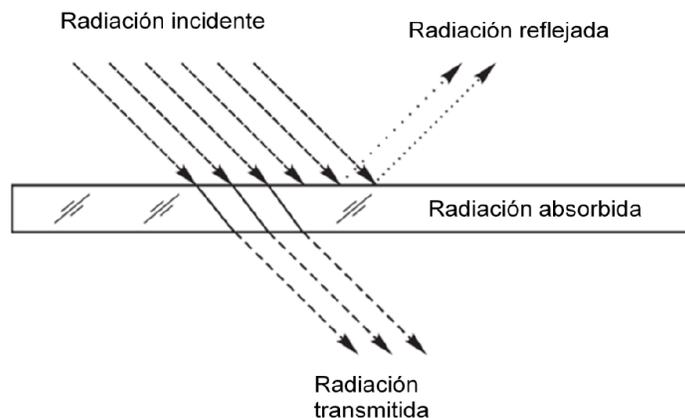


Figura 1.8. Reflexión, absorción y transmisión de la luz en una placa [15].

- I. Reflexividad (ρ): es la relación entre el flujo de radiación reflejada y el flujo de radiación recibida por la superficie del cuerpo.
- II. Absorbancia (α): es la relación entre el flujo de radiación absorbida y el flujo de radiación recibida por el cuerpo.
- III. Transmisividad (τ): es la relación entre el flujo de radiación transmitida y el flujo de radiación recibida por el cuerpo. Un cuerpo absolutamente transparente, deja pasar toda la radiación solar que recibe; o sea:

$$\rho = 0, \quad \alpha = 0, \quad \tau = 0 \dots \dots \dots 1.6$$

1.7. Usos y aplicaciones de energía solar térmica.

El principio básico común a todos los sistemas solares térmicos es simple; la radiación solar es captada y el calor se transfiere a un medio portador, generalmente un fluido térmico, agua o aire. El medio calentado se puede usar directamente, como el caso de las piscinas, o indirectamente, mediante un intercambiador de calor.

Las aplicaciones de la energía solar se pueden dividir básicamente en 2 apartados:

- I. Producción de calor.
- II. Producción directa de electricidad.

Respecto a la producción de calor, esta se divide en tres subgrupos de acuerdo con las temperaturas de trabajo:

- I. Baja temperatura (< 100° C)
- II. Media temperatura (de 100° a 400°C)
- III. Alta temperatura (> de 400° C)

El campo de las bajas temperaturas es el más sencillo y el más competitivo. La energía solar puede usarse eficientemente para calentar agua, tanto para usos domésticos como industriales, para calentar locales, para el secado de grano agrícola y para otras muchas aplicaciones.

En las temperaturas medias, la energía solar puede utilizarse para la obtención de vapor con finalidades industriales, para la producción de frío, etc.

Del mismo modo en altas temperaturas, la energía solar puede ser utilizada para la obtención de vapor con fines energéticos (producción de electricidad), para la fusión de metales y aleaciones de gran pureza y para ensayos de resistencia de materiales a altas temperaturas.

1.8. Clasificación de colectores según su razón de concentración.

Los colectores solares son un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la energía radiante procedente del sol en energía térmica. Los colectores se diferencian en varios aspectos de los intercambiadores de calor convencionales. En estos últimos se lleva acabo normalmente un intercambio de calor fluido a fluido, con altos valores de transferencia de calor, siendo la radiación un fenómeno poco importante. Los colectores solares presentan problemas muy particulares de flujos de energía bajos y su dependencia a la intensidad de radiación.

Por lo anterior mencionado la mayoría de los estudios sobre el aprovechamiento térmico de la radiación solar realizan su análisis partiendo de la clasificación tradicional que distingue entre colectores para aplicaciones de baja, media y alta temperatura.

En los sistemas de bajas temperaturas se utilizan concentradores solares sin concentración, esto quiere decir que la razón de concentración siempre es igual a 1 ($C=1$).

En las aplicaciones de temperaturas más elevadas, se logran distinguir dos elementos diferentes, estos son el receptor y el concentrador.

- I. El receptor, es el elemento del sistema donde la radiación se absorbe y se convierte en otro tipo distinto de energía, el receptor incluye el absorbedor, sus cubiertas y el aislante térmico.
- II. El concentrador, o también llamado sistema óptico es la parte del colector que dirige la radiación al receptor. La abertura del concentrador en el espacio abierto a través del cual la radiación solar entra en el colector.

La razón de concentración más habitual se expresa como razón de concentración superficial, es decir, la razón entre el área de la apertura del concentrador respecto al área del receptor [17]:

$$C = \frac{A_{\text{concentrador}}}{A_{\text{receptor}}} \dots \dots \dots (1.7)$$

En función de la razón de concentración podemos distinguir las siguientes tecnologías termosolares:

Tabla 1.1. Tecnologías termosolares en función de su razón de concentración.

Tecnologías termosolares	
Sin concentración C=1	Con concentración C >1
Colectores no variados	Sistemas cilindro parabólicos, C=30-90
Colectores de placa plana	Sistemas de torre central, C=200-1000
Colectores avanzados	Discos Parabólicos, C=1000-5000

Los colectores sin concentración se diseñan para aplicaciones que demandan energía a una temperatura relativamente baja, en general hasta 100°C. De acuerdo con el último esquema, este tipo de colectores solares se subdivide a su vez en tres grupos, de menor a mayor complejidad técnica:

- I. Colectores no variados.
- II. Colectores de placa plana.

III. Colectores avanzados.

En cuanto a los colectores de concentración, de menor a mayor razón de concentración, se tiene:

- I. Sistema cilindro parabólicos.
- II. Sistemas de torre central.
- III. Discos parabólicos.

1.8.1. Sistemas cilindro parabólicos

Consisten en espejos cilíndricos cuya sección transversal es una parábola, de tal forma que la radiación solar se concentra en el eje central focal. Una característica importante de estos colectores es que pueden lograr temperaturas hasta de 400° C con una buena eficiencia termodinámica. Tienen aplicaciones tanto en generación de energía eléctrica como en calentamiento de agua, pudiendo para esta última aplicación ser construidos con materiales ligeros y económicos, lo que permite reducir costos en materiales y en el dispositivo de seguimiento solar. Estos colectores se construyen doblando una lámina de material reflectante con forma parabólica. A lo largo de la línea focal se coloca un tubo negro recubierto de un tubo de vidrio el cual disminuye las pérdidas de calor, este se debe colocar a lo largo de la línea focal como receptor (figura 1.9) [18].

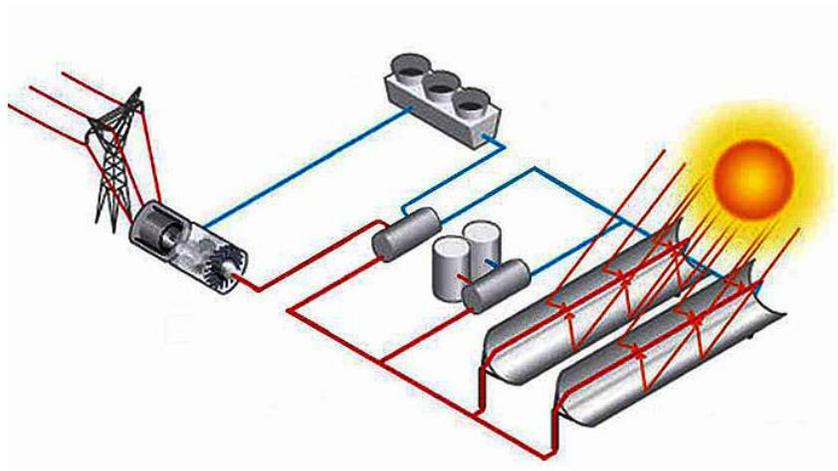


Figura 1.9. Concentrador cilindro parabólico [24].

Cuando la parábola es orientada hacia el sol, los rayos paralelos incidentes en el colector son reflejados hacia el foco lineal. Por lo anterior, solo es necesario hacer el seguimiento solar en un solo eje de rotación.

Este tipo de energía es de las más avanzadas dentro de las tecnologías solares, debido a la gran experimentación que se ha realizado con ellos y un grupo considerable de industrias que construyen y comercializan estos colectores. En estos dispositivos se consiguen razones de concentración entre 30 y 90.

Las mayores instalaciones de este tipo de sistemas se encuentran en el sur de California donde gracias al uso de turbinas de vapor se cuenta con una capacidad instalada de 354 MW de generación eléctrica, y en la plataforma solar de Almería en el sur de España donde principalmente se tiene con fines experimentales una capacidad instalada de 1,2 MW de generación eléctrica.

1.8.2. Sistemas de torre central.

Esta tecnología está formada por espejos planos o levemente convexos denominados heliostatos, distribuidos e inclinados de tal forma que reflejan la radiación solar hacia la parte superior de la torre, donde generalmente se coloca el receptor (figura 1.10) [18].

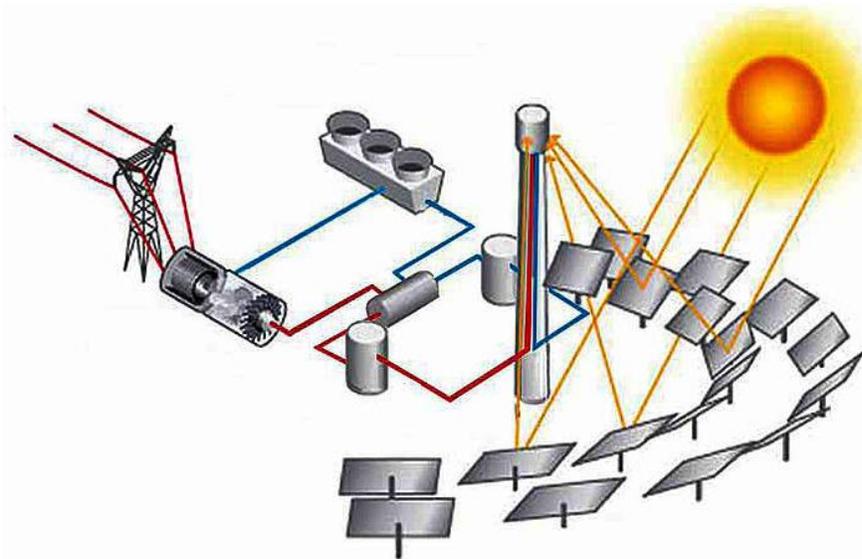


Figura 1.10. Sistema de concentración de torre central [24].

En el receptor se genera vapor de agua a alta presión y temperatura. Esta agua se lleva mediante ductos a un receptor central donde se puede almacenar y ocupar para generar energía eléctrica.

Se pueden obtener concentraciones entre 300 y 1500, teniendo el foco un flujo radiativo entre 200 y 1000 (kW/m^2), obteniéndose temperaturas superiores a los 1500°C .

1.8.3. Discos parabólicos

Son espejos paraboloides que se mueven de tal forma que siempre están orientados al sol. Cuando este colector enfrenta el sol, la radiación incidente se concentra en su foco. Por lo anterior, debe seguir al sol en sus dos grados de libertad (altitud y azimut).

El receptor colocado en el foco absorbe la radiación solar y la traspasa en forma de calor a un fluido circulante. La energía calórica presente en un fluido puede ser convertida a electricidad mediante el uso de un motor-generador dispuesto en un foco o puede ser transportada a través de unas cañerías a un receptor central y servir para diversos propósitos. La temperatura en el receptor puede sobrepasar los 1500°C (figura 1.11).

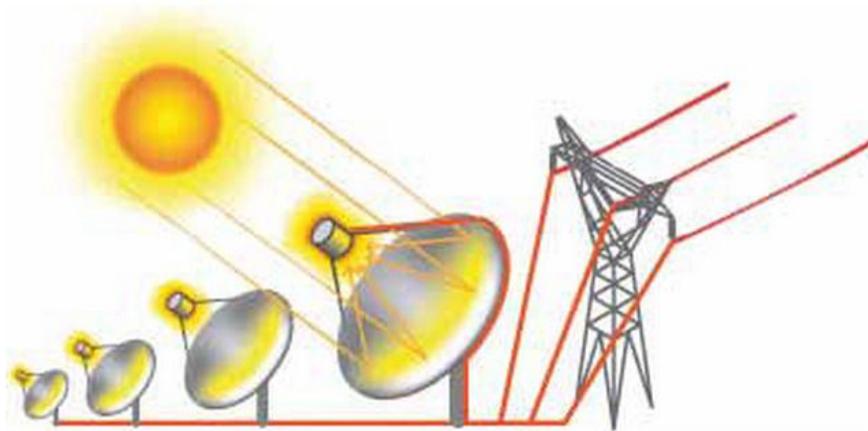


Figura 1.11. Concentrador parabólico [24].

Los concentradores parabólicos tienen ventajas importantes con respecto a otros concentradores:

- I. Debido a que siempre están apuntando al sol, son el sistema de concentración solar más eficiente.
- II. Tienen concentraciones entre 600- 2000.
- III. El colector como módulo se puede ocupar de manera independiente o ser parte de un campo de colectores.

En la actualidad la tecnología solar de discos parabólicos se ha orientado fundamentalmente hacia el acoplamiento con motores que funcionan según un ciclo Stirling. Debido a las altas temperaturas que se logran alcanzar se están empezando a utilizar en aplicaciones termoquímicas.

A diferencia de las otras tecnologías termosolares de concentración, estos sistemas pueden resultar competitivos desde los 10 kW. El rango de potencia de los diseños realizados hasta la fecha comprende desde los 3 kW hasta los 50 kW. Gracias a esta modularidad, los sistemas de disco parabólicos se pueden usar en aplicaciones aisladas de la red para la generación de electricidad. En este campo

tienen que competir con los sistemas de conversión fotovoltaica que, a pesar de tener un rendimiento mucho menor, presentan una mayor madurez técnica y comercial.

Las investigaciones en esta tecnología, al igual que el resto de las aplicaciones de concentración que se han descrito, se iniciaron a principios de la década de los 70, en Estados Unidos, después de que la crisis del petróleo promoviera la búsqueda de otras fuentes de energía.

1.9. Seguimiento solar.

Los seguidores solares tienen la finalidad de maximizar la energía que llega al receptor, es por ello que en el diseño del prototipo se tiene que tomar en consideración ya que el mayor aporte energético proviene de la energía solar directa. En un colector parabólico es de gran importancia ya que los rayos solares que inciden de manera paralela a la línea focal se concentran en el foco y por tanto es necesario estar apuntando al sol en todo momento.

Según las características de la aplicación y el costo se pueden utilizar seguidores de uno o dos ejes.

1.9.1. Seguidores de un eje

Algunos equipos sólo necesitan rotar en un eje, este se puede apreciar en la figura 1.12, donde el colector gira en el eje r , por lo que el rayo siempre incide en la línea focal, comprendida en el plano formado por la normal y el eje r .

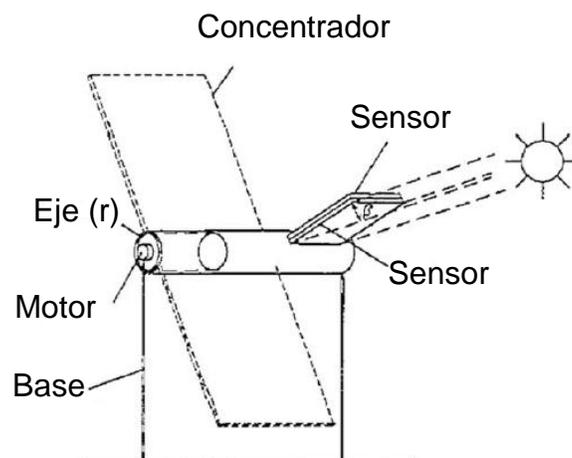


Figura 1.12 Seguimiento solar en un eje [19].

1.9.2. Seguimiento sobre un eje horizontal

Este tipo de seguimiento se presenta cuando las coordenadas u , b y r giran un ángulo (γ) a partir de las coordenadas z , e y n , como se muestra en la figura 1.13.



Figura 1.13. Seguimiento solar en un eje horizontal [19].

1.9.3. Seguimiento en un eje inclinado

Este se presenta cuando el colector tiene un ángulo de inclinación β (Figura.1.14).

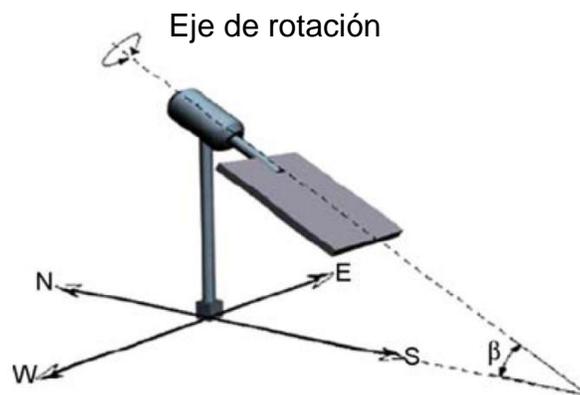


Figura 1.14. Seguimiento en un eje inclinado.

1.9.4. Seguimiento en eje vertical.

En este seguimiento el eje es colineal con el zenit.

1.9.5. Seguidor polar (ecuatorial).

En este seguidor el eje del colector se alinea de manera paralela al eje de rotación de la Tierra, con ello se logra una inclinación igual a la latitud del lugar. El segundo eje de rotación es perpendicular al eje polar (o ángulo de declinación), el ángulo de seguimiento es el ángulo de declinación de la Tierra. El rango de rotación de la Tierra alrededor del eje polar es constante a 15°/h, mientras que alrededor del ángulo de declinación es muy lento y depende del día del año por lo que este seguimiento suele ser innecesario para equipos manipulables manualmente.

1.9.6. Seguidor altura solar - azimut

En este colector se presenta una rotación alrededor del cenit (ángulo azimut) y a un eje que es paralelo a la superficie de la tierra (altitud solar). Los ángulos azimut y altitud no son constantes por lo que dependen de la latitud, hora del día y del año.

1.10. Transferencia de calor.

La energía que incide en el colector parabólico se transforma en calor útil, transfiriéndose mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación. Por lo que en este apartado se dará una breve explicación de cómo se interrelacionan estos fenómenos.

En los sistemas solares térmicos la energía solar se capta para transformarla en calor útil, sin embargo parte de la energía solar incidente se pierde a los alrededores en forma de calor, otra fracción se aprovecha calentando el medio de trabajo como agua, aire, aceite, entre otros, y una fracción es acumulada.

Es un hecho que la ingeniería tiene como finalidad optimizar y maximizar la eficiencia de cualquier diseño ingenieril; en procesos de transferencia de calor se busca siempre disminuir las pérdidas de calor a los alrededores. A continuación se describirán los tres mecanismos de transferencia de calor y se mencionaran el grado de interacción que tienen en este trabajo de investigación [16].

1.10.1. Conducción.

La conducción es el medio en el que la energía se propaga ya sea en un medio sólido, líquido o gaseoso mediante comunicación molecular directa cuando existe un gradiente de temperatura. En los gases y líquidos la conducción se presenta debido a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio, mientras que en los sólidos las moléculas pueden transmitirse de unas a otras sin cambio de lugar, de manera que al cabo de cierto tiempo todas las moléculas se encuentran en el mismo estado de agitación.

Al existir un gradiente de temperatura en el medio, la segunda ley de la termodinámica establece que la transferencia de calor se lleva a cabo desde la zona de mayor temperatura a la de menor temperatura [16].

El flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura:

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \dots \dots \dots (1.8)$$

Dónde:

q'' es el flujo de calor por unidad de área en la dirección x (W/m^2).

k es la conductividad térmica del material.

Esta ecuación recibe el nombre de ley de Fourier de la conducción de calor, el signo negativo es introducido a la ecuación debido a que el calor fluye de mayor a menor temperatura.

1.10.2. Convección.

En los líquidos y en los gases el calor se propaga por convección, mediante el flujo de las moléculas calentadas. La transferencia de calor por convección se clasifica en dos:

Convección forzada, en la que se hace pasar el fluido mediante la acción de un generador externo como un ventilador o una bomba.

Convección libre, esta resulta de las gradientes de densidad al estar en contacto con una superficie de mayor temperatura y en presencia de un campo gravitacional. El flujo de calor que se disipa por el sistema en términos de la diferencia total de temperaturas entre la superficie y el fluido se calcula mediante la ley del enfriamiento de Newton [16].

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \dots \dots \dots (1.9)$$

Donde h representa en coeficiente de transferencia de calor, (W/m² K).

1.10.3. Radiación

A diferencia de la conducción y convección, la radiación no requiere de un medio para propagar la energía esto quiere decir que puede ocurrir en el vacío. Los cuerpos calientes emiten energía térmica en todas las direcciones por medio de ondas (como la luz). Las ondas térmicas, al encontrar un cuerpo, son absorbidas por él y lo calientan [17].

Para entender de mejor manera, tenemos que recordar las propiedades del cuerpo negro que se plasmaron en el capítulo 1. Un cuerpo negro es el que emite la máxima cantidad de energía radiante desde su superficie a una razón proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia:

$$q'' = \sigma T^4 \dots \dots \dots (1.10)$$

Pero en la naturaleza los cuerpos negros totales no existen, solo en condiciones ideales se pueden encontrar, los cuerpos emiten menor cantidad de radiación, y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$q'' = \sigma \epsilon T^4 \dots \dots \dots (1.11)$$

Donde, ϵ es la emisividad, que resulta del cociente de la emisión de radiación del cuerpo en estudio con respecto a un cuerpo negro adquiriendo valores que van de 0 a 1.

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE CONCENTRACION

Introducción

El trabajo se centra en la construcción de un equipo de concentración solar que permita el estudio de la destilación del agua con un flujo de radiación solar altamente concentrado. Para lograr lo planteado, el diseño del equipo de concentración se centró en un seguimiento preciso del sol, que permitiera mantener la energía concentrada en el receptor en un lapso prolongado de tiempo, además, de considerarse la simplicidad mecánica de sus componentes. Este capítulo contiene una descripción de este equipo y una explicación detallada de sus componentes individuales. El diseño, construcción y las pruebas se realizaron en el Taller Mecánico del Instituto de Energías Renovables (IER), localizado en Temixco, Morelos.

2.1. Concentrador solar

El concentrador se diseñó a partir de una antena satelital reciclada de 3.1 m de diámetro, una profundidad 0.5 m y una distancia focal de 1.20 m. Su estructura está compuesta por cuatro partes desarmables que unidas forman 16 secciones (figura 2.1).

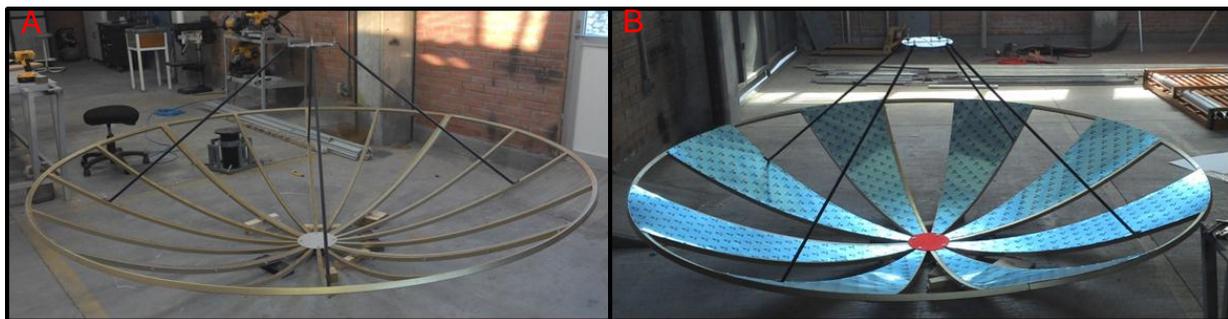


Figura 2.1: Estructura del concentrador (A), concentrador con la cubierta de alta reflectividad Alanod (Miro-Silver), (B).

Para reflejar y concentrar la radiación solar directa, cada una de las secciones del concentrador se recubrió con una lámina de aluminio anodizado de alta reflectividad (Alanod

(Miro-Silver), $\rho=0.89$). Por su diseño el concentrador permite intercambiar sus 4 secciones, logrando con esto variar el área de apertura del concentrador. En la Tabla 2.1 se observa la variación de la radiación solar incidente por área de apertura recubierta del concentrador.

Tabla 2.1: Variación de la radiación solar incidente en el concentrador por área de sección recubierta del concentrador.

Sección recubierta del concentrador	A_{sec} (m^2)	$Q_{sol-tierra}$ P (kW)
16	7.54	9.94
8	3.77	4.97
6	2.83	3.73
4	1.88	2.48
2	0.94	1.24

Por su geometría, el concentrador tiene un área de sección y apertura de $8.28 m^2$ y $7.54 m^2$, respectivamente. Por lo anterior, la energía incidente en el plato parabólico con sus 16 secciones es de $9.94 kW$.

2.2. Receptor

El receptor fue diseñado para evaluar la precisión del mecanismo de seguimiento solar y la variación de la temperatura de concentración teórica y experimental, lo anterior por perturbaciones climatológicas y de la radiación solar directa. El receptor está construido en una placa de acero inoxidable, tiene una geometría de $0.3 m$ de diámetro y $0.003175 m$ de espesor. Se instala al concentrador a su distancia focal mediante 4 brazos de soporte unidos a una estructura que permite acoplar distintos tipos de receptores (figura 2.2).

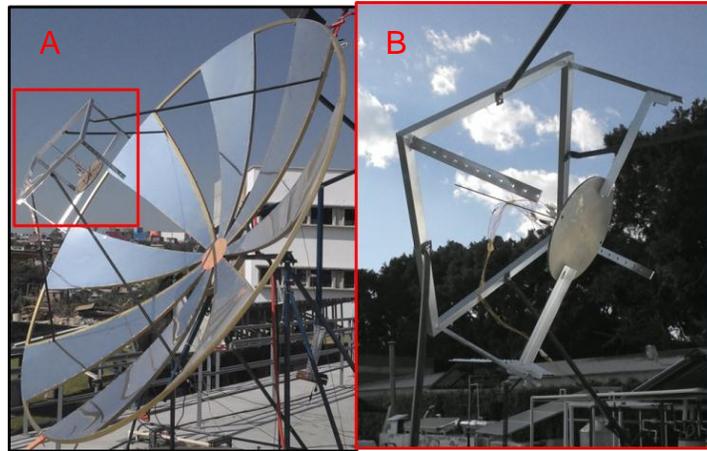


Figura 2.2: Receptor en el área focal (A), estructura de soporte del receptor (B).

Para mejorar la absorción de la radiación solar directa en el receptor, se recubrió con una pintura selectiva (SOLKOTE HI-PRO) que tiene una alta absorptancia ($\alpha=0.89$) del espectro electromagnético. Para obtener su temperatura se instalaron termopares tipo “K” en la parte inferior de la placa receptora (figura 2.3).

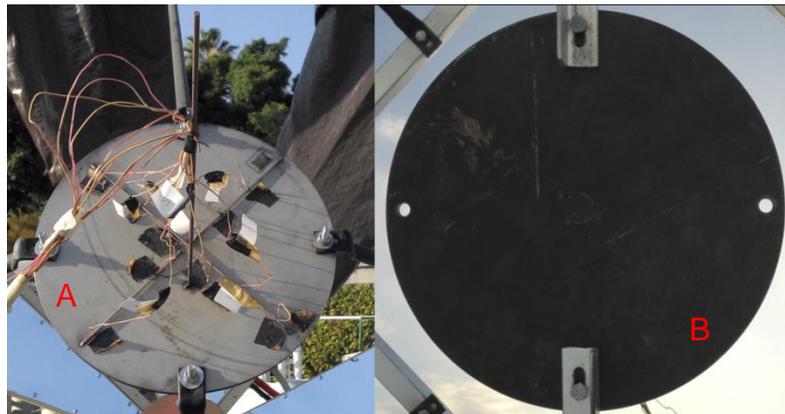


Figura 2.3: Receptor con soportes para termopar tipo “K” (A), película selectiva SOLKOTE HI/SORB-II, $\alpha=0.89$ (B).

Por las dimensiones del concentrador y receptor su relación de concentración geométrica (RCG) es de 102.44, lo anterior considerando las 16 secciones del concentrador cubiertas por la película ALANOD (Micro-Silver). Del cálculo anterior, la energía incidente entre el sol y el concentrador es de 9.94 kW.

Tomando en cuenta las pérdidas ópticas y selectivas de los materiales, la transferencia de calor por radiación del sol al receptor es de 4.42 kW, alcanzándose una temperatura teórica de concentración máxima de 686.42 °C. En la Tabla 2 se observa la variación de la

temperatura teórica en función de la RCG y la sección recubierta del concentrador.

Tabla 2.2: Variación de la temperatura teórica de concentración en función de la RCG.

Sección recubierta del concentrador (m ²)	RCG	Temperatura (°C)
16	102.44	686.42
8	51.22	533.75
6	38.41	477.75
4	25.61	405.37
2	12.80	297.41

2.3. Mecanismo de seguimiento solar

....2.3.1 Sensor

El control del mecanismo de seguimiento solar se diseñó mediante dos fotorresistencias (LDR) colocadas en una placa y separadas por un divisor central. El divisor sirve como un bloque de sombra, colocado de tal manera que puede sombrear a los sensores dependiendo de la posición del sol. Por lo anterior el sol puede estar en una de 3 posiciones: posición 1: al este del centro, posición 2: centrado, o posición 3: al oeste del centro.

La figura 2.4 muestra la trayectoria del sol en el sensor. Si el sol está en la posición 1 (al este del centro), entonces la fotorresistencia del este, estará recibiendo la luz brillante del Sol y la fotorresistencia del oeste estará sombreada. El sistema de rastreo enviará la señal "Moverse hacia el Este". De la misma forma, si el sol se encuentra en la posición 3 (al oeste del centro), la fotorresistencia del oeste estará recibiendo la luz brillante del sol y el rastreador enviará la señal "moverse hacia el oeste". Finalmente, si el Sol se encuentra en la posición 2 (centrado), ambas fotorresistencias estarán recibiendo el mismo brillo del sol y el

rastreador enviara la señal “No moverse”. Las señales obtenidas son procesadas en un circuito comparador.

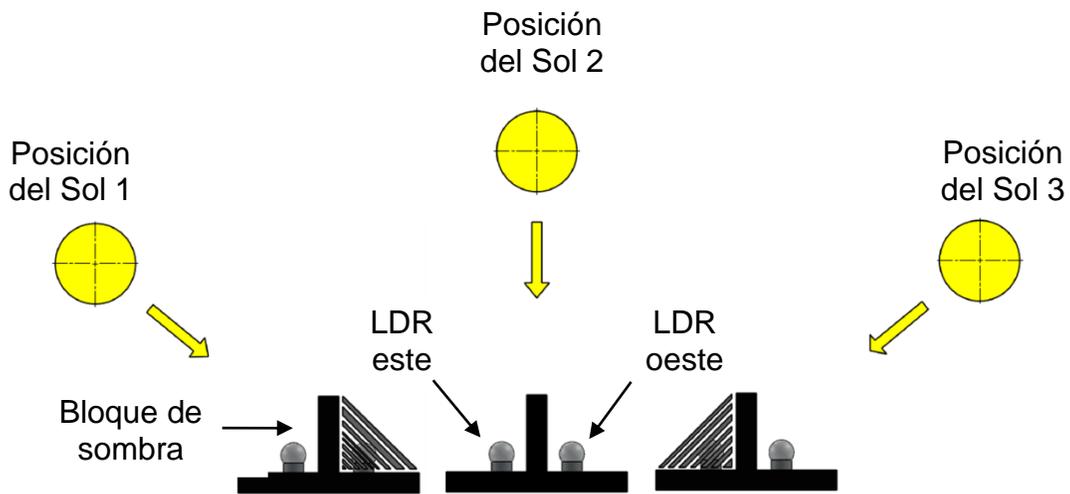


Figura 2.4: Trayectoria del sol en el sensor.

La precisión del sensor es controlada por la altura del bloque de sombra. Cuando el bloque es alto, la sombra que proyecta se mueve rápido y el control se accionara más seguido. Por lo anterior, una vez instalado el sensor en el concentrador, la altura del bloque de sombra se fue incrementando hasta que se obtuvo una respuesta óptima de seguimiento.

La estructura del sensor está construida en acrílico, se recubrió con pintura negra para disminuir errores por la transparencia del material o por reflejos. Las fotorresistencias se protegieron de la intemperie con una cúpula de cristal obtenida de un foco estándar de automóvil (figura 2.5).

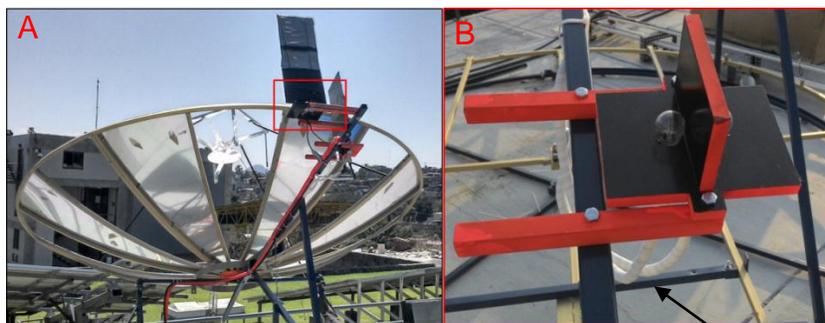


Figura 2.5: Sensor de altura solar acoplado al concentrador (A), cubierta del LDR (B).

2.3.2. Circuito comparador

El circuito comparador está construido con 9 resistores, 2 fotorresistencias, 5 diodos, 2 finales de carrera (Limit switches), 1 circuito integrado comparador y 2 relevadores de 7 V. En la operación, el circuito interpreta la señal proveniente del sensor cuando una de las fotorresistencias es expuesta a cambios de luz, subsecuentemente la señal del divisor de voltaje también cambia. El punto de accionamiento para cada comparador está colocado por un divisor de voltaje fijo, hecho con resistencias de 100 k Ω y 9.1 k Ω . El comparador IC LM339 detecta los voltajes de las fotorresistencias y con un umbral de referencia toma la decisión de accionar los relés, para así dar la corriente de accionamiento.

Los relés del circuito comparador funcionan a un máximo de 7 A de carga máxima, por lo que solo se pueden acoplar motores que trabajen por debajo de esa corriente de máxima carga. Otra de las características importantes del circuito comparador es que tiene la capacidad de reiniciar la posición de seguimiento solar hacia el este cada vez que termina el día o cuando se oscurece. Esta función monitorea al sensor de este y lo compara con el umbral del voltaje de oscuridad. Como medida de seguridad el sistema tiene finales de carrera (interruptores) en sus direcciones este y oeste para así limitar el rango de movimiento. El circuito comparador está diseñado para operar a 12 V-CD.

El punto de accionamiento para los sensores es fijado en el circuito con un resistor. Un valor de resistencia más alto ocasiona que el circuito sea más sensible a la luz, para lograr una sensibilidad regulable se colocó un resistor tipo potenciómetro de resistencia variable.

Para proteger los componentes electrónicos y el circuito comparador, se colocaron en una caja eléctrica a prueba de agua (figura 2.6).



Figura 2.6: Circuito comparador y caja hermética (el diagrama del circuito se encuentra en el apéndice J).

2.3.3. Finales de carrera

Una característica importante en la construcción de un mecanismo de seguimiento solar es el uso de finales de carrera. Su función es limitar el movimiento mecánico del seguidor en una distancia segura. Si por algún motivo el concentrador se mueve demasiado lejos en cualquiera de sus dos direcciones, el final de carrera se acciona y detiene el movimiento antes de que ocurra un daño al conjunto de piezas del seguidor solar.

Si el concentrador acciona un final de carrera, un diodo de control se activa y lo regresa en su dirección contraria. Entonces, el concentrador seguirá el sol durante el día hasta que un final de carrera opuesto (oeste) sea activado. Del mismo modo, cuando oscurece el seguidor se mueve hacia el este, hasta que el final de carrera sea activado. Desde el punto anterior, esperara el amanecer para accionarse nuevamente. Por la orientación en que queda el concentrador, captura el primer rayo de sol de la mañana. En la figura 2.7 se observan los finales de carrera utilizados y su instalación en el concentrador.

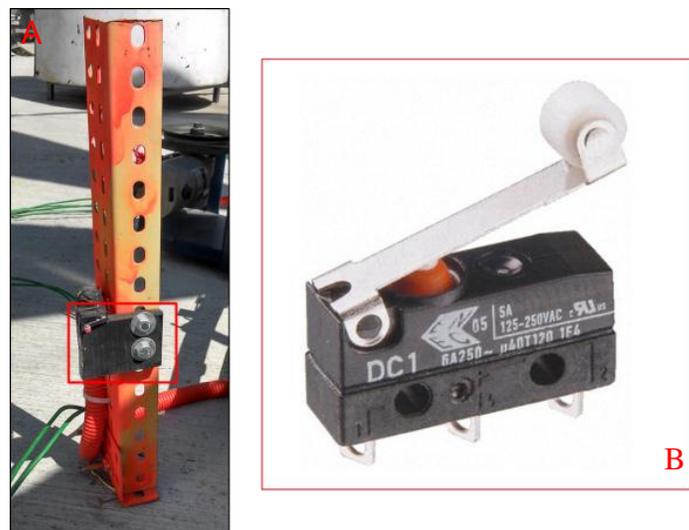


Figura 2.7: Estructura de soporte del mecanismo de seguimiento azimutal(A), interruptor o final de carrera (B).

2.4. Mecánica de seguimiento solar

El mecanismo de seguimiento solar corresponde a una montura altura solar-azimut. Por lo anterior, para que el concentrador siga la trayectoria del Sol, debe desplazarse en 2 ejes. En el primer eje el concentrador gira alrededor del zenit (ángulo azimut) y en el segundo gira alrededor de un eje paralelo a la superficie de la tierra (altitud solar). Los dos ángulos de seguimiento no son constantes y dependen de la latitud del lugar, la hora y día del año. Ambos seguimientos se accionan por señales provenientes del arreglo circuito comparador-

sensor.

2.4.1. Seguimiento azimuthal (SAZ)

Este mecanismo está compuesto por dos bases metálicas desarmables de 3 m de diámetro que se unen mediante un eje y dos rodamientos. Cada base es ensamblada en cuatro partes desarmables, en la figura 2.8 se muestra la estructura del mecanismo de seguimiento.

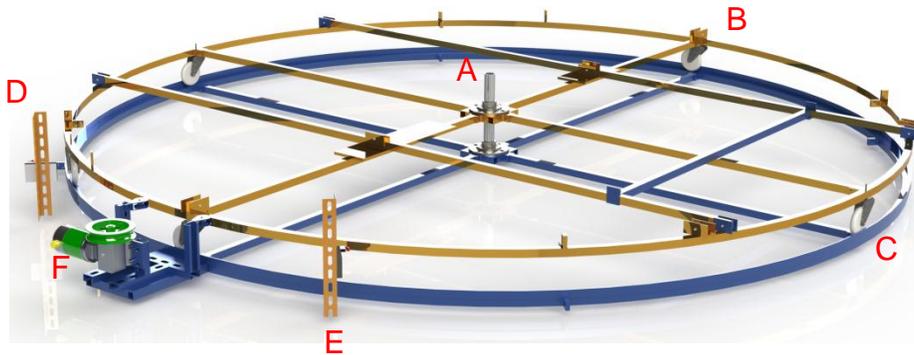


Figura 2.8. Componentes principales de la estructura de seguimiento azimuthal: Eje y rodamientos (A), base superior (B), base inferior(C), final de carrera este (D), final de carrera oeste (E), motor en CD (F).

La transmisión del movimiento se realiza mediante un arreglo de poleas entre el motor y la base superior de la estructura. La fuerza de torsión necesaria para mover el eje se calculó considerando el peso de todo el concentrador y sus componentes. Por lo anterior el torque necesario para mover la estructura es de 0.15 Hp por lo que se seleccionó un motorreductor estándar de 0.92 Hp en corriente directa.

La unión de la polea del motor y la base de seguimiento azimuth se realizó con un cable de 3.18×10^{-3} m (1/8 in), el cual se hace pasar por la parte exterior de la base superior, regresando al mismo tiempo a la polea del motor (figura 2.9), dicho arreglo permite transmitir el movimiento de forma precisa, simple sin necesidad de complejos sistemas de engranajes. Por el arreglo de la trasmisión la velocidad de rotación resultante en el eje es de 2 RPM.

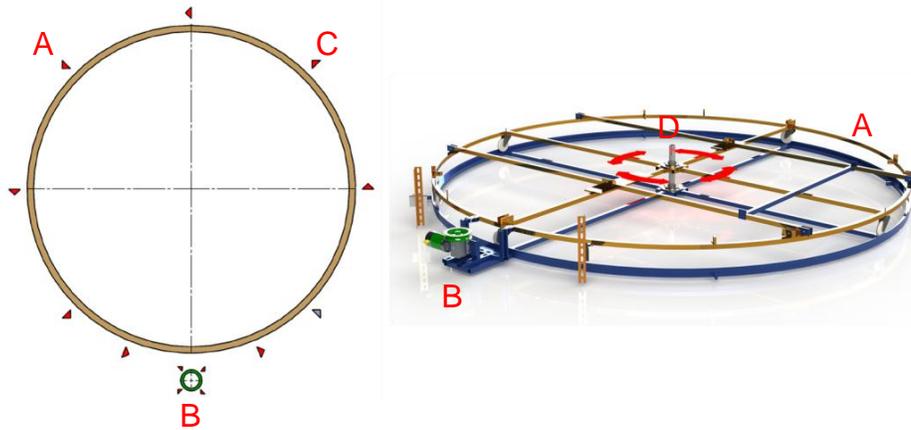


Figura 2.9: Base superior del SAZ (A), polea del motorreductor (B) , cable de unión de la polea y la base superior (C), dirección rotacional de seguimiento del SAZ (D).

Para limitar el desplazamiento del concentrador en el ángulo azimutal se instalaron finales de carrera en sus dos sentidos de rotación; para la dirección este y oeste se posiciono según el ángulo máximo azimut correspondiente al día 21 de junio (solsticio de verano) (figura 2.10).

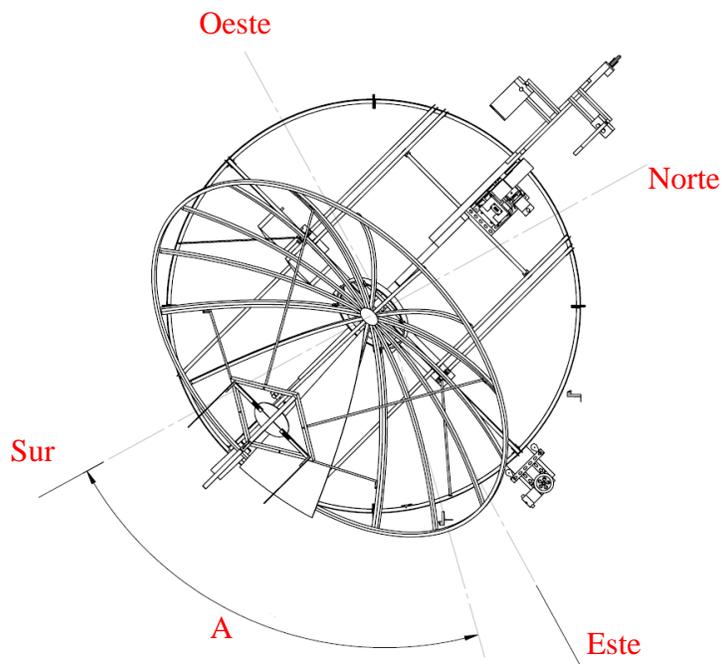


Figura 2.10: Vista superior de la orientación del final de carrera “este”, para el ángulo máximo azimut correspondiente al día 21 de junio.

2.4.2. Seguimiento de altura solar (SAS)

El eje del mecanismo de altura solar está compuesto por una barra metálica tubular y dos rodamientos en cada extremo (eje móvil). En su parte media se fija una barra transversal tubular de 4 m de longitud, en ella se une un soporte donde se ensambla el concentrador. En la parte superior de la barra transversal se fija una estructura como contrapeso, esto ayuda a mover el eje con menos esfuerzo.

El eje de altura solar se ensambla a la base superior de seguimiento azimutal mediante dos soportes. El SAS se aprecia en la figura 2.11.

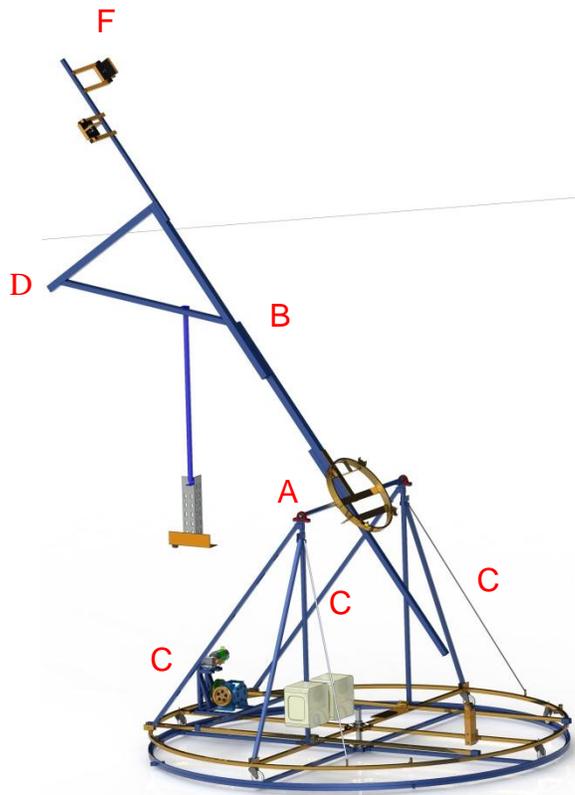


Figura 2.11: Eje móvil: barra metálica tubular con dos rodamientos en cada extremo (A), barra tubular transversal (B), soportes del mecanismo de altura solar (C), contrapeso (D), sensores (F).

La transmisión del SAS está conformada por un arreglo de poleas, un motorreductor y un reductor de velocidad. El torque de la transmisión se calculó considerando el peso de la estructura de seguimiento, del concentrador, del receptor y el peso ejercido por el contrapeso. Por lo anterior el cálculo de la fuerza necesaria para rotar el eje es de 0.18 Hp. Como factor de sobredimensionamiento por cargas de viento en el concentrador se seleccionó un motorreductor comercial de 0.92 Hp acoplado a un reductor de velocidad. La configuración dio un torque de 1.5 Hp y una velocidad de transmisión de 0.3 RPM.

Para transmitir el movimiento del reductor de velocidad al eje de altura solar se utilizó un cable de acero de 3.18×10^{-3} m (1/8 in) de diámetro. En cada extremo de la barra de 4 m de se sujetó el cable que posteriormente se hizo pasar por la polea del reductor. Los puntos de sujeción del cable en la barra son equidistantes considerando como punto cero la unión con el eje de altura solar (figura 2.12).

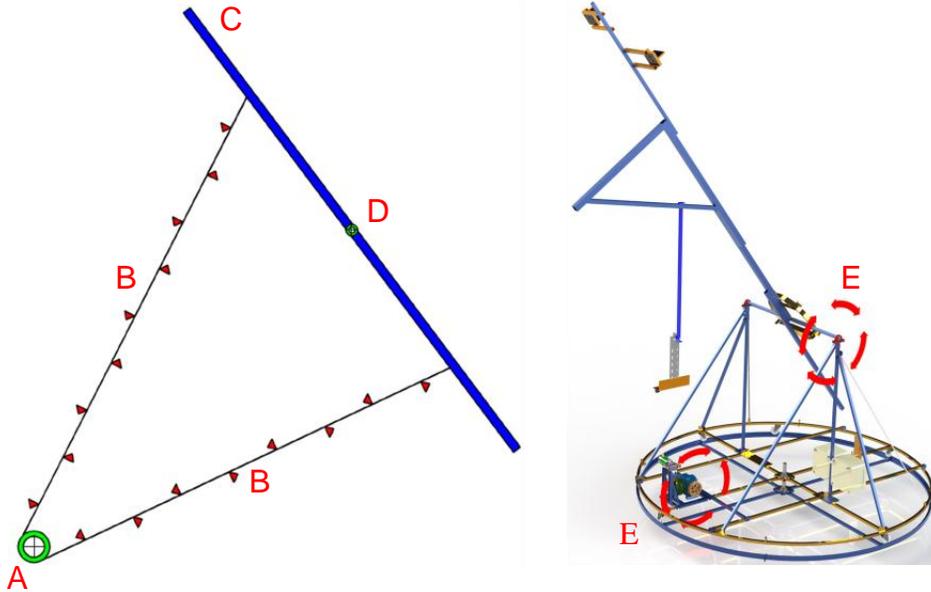


Figura 2.12. polea del reductor de velocidad (A), alambre de acero (B), barra de 4m (C), polea móvil (D), dirección rotacional del SAS (E).

Para proteger los componentes mecánicos del concentrador y conocer su desplazamiento máximo, se colocaron finales de carrera en su dirección este y oeste. Estos componentes se instalaron según el ángulo máximo de altura solar al medio día solar, para el solsticio de verano (figura 2.13).

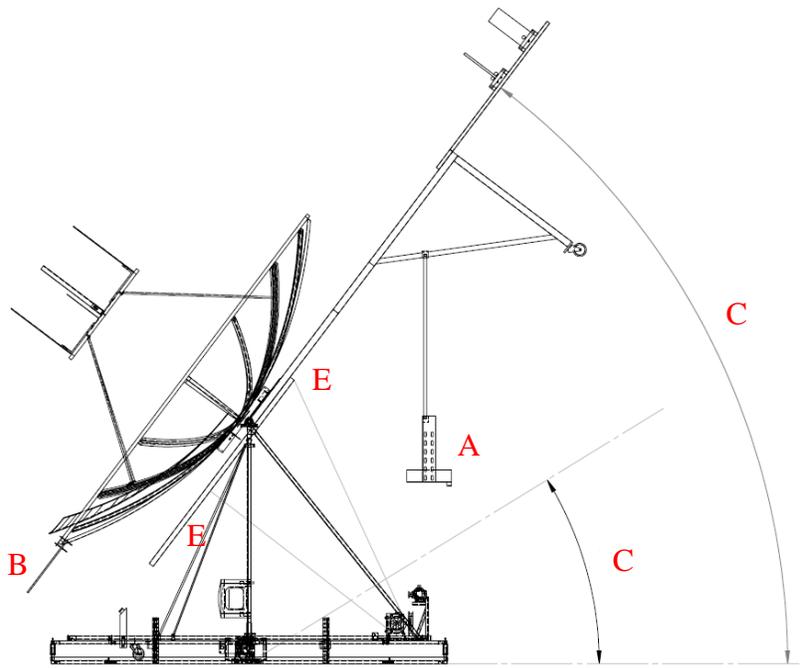


Figura 2.13. Final de carrera este (A), final de carrera oeste (B), ángulo máximo de altura solar al medio día solar, para el solsticio de verano (C), ángulo de altura solar variable a lo largo del año (D).

Los cálculos detallados de la transmisión SAS y SAZ se pueden consultar en el apéndice H.

2.6. Sistema de adquisición de datos

La temperatura en el receptor se monitorea de manera constante a lo largo de varios días para poder caracterizar el sistema de concentración. Los datos se almacenaron en una consola de adquisición de datos 34972A LXI y una tarjeta electrónica 34901A ambos instrumentos son de la marca Agilent technologies.

La tarjeta electrónica recibe los datos provenientes de los instrumentos de medición, la decodifica y la convierte en una señal electrónica que es extraída mediante una serie de comandos. Para interpretar las señales derivadas del adquisidor de datos se diseñó una interfaz lógica que permite el almacenamiento, programación, control y monitoreo en tiempo real de las temperaturas medidas. El sistema operativo utilizado fue "Windows 7". El programa lógico se realizó en el Software VEE Pro 9.3 de la compañía "Agilent Technologies", la variable de entrada que se programó fue la de temperatura.

El programa lógico muestra en pequeñas ventanas y gráficas las variables de entrada y su comportamiento en tiempo real. Del mismo modo cada dato medido se va almacenando en un tiempo ajustable de medición. El tipo de archivo generado es del tipo DAT por lo que

da la versatilidad de ser procesado en diferentes programas de cálculo y estadísticos. En la figura 2.14 se observa la interfaz gráfica del programa de adquisición.

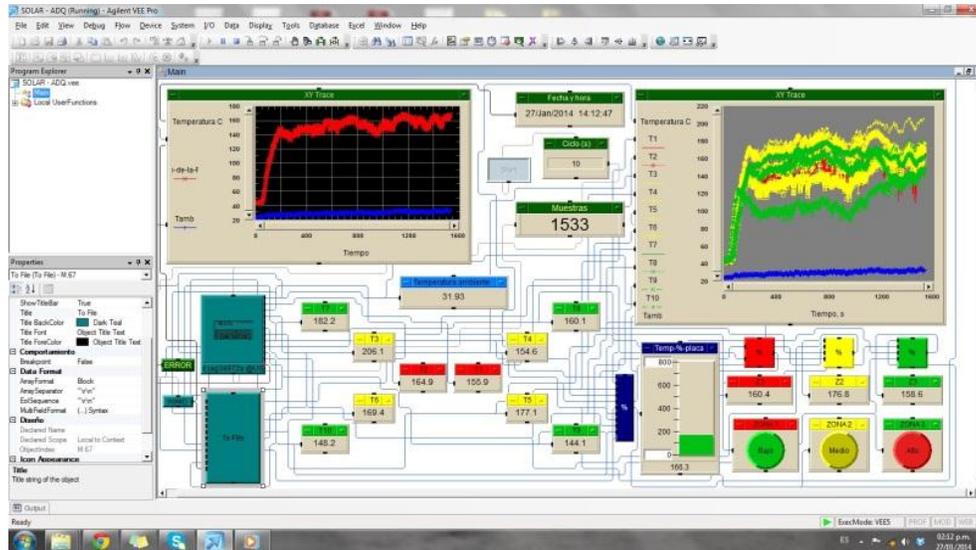


Figura 2.14: Programa de adquisición de datos.

2.6.1. Instrumentación

Para instrumentar el receptor se utilizaron 10 termopares tipo K de la marca Omega (CASS-18U-6-NHX) y un termopar tipo J. La señal generada por los instrumentos de medición se adquirieron con una tarjeta electrónica multiplexor de 20 canales, modelo 34901A. La conexión de los instrumentos se realizó según las indicaciones del fabricante.

Los termopares tipo K se distribuyeron en el receptor como lo muestra la figura 2.15, la distancia entre cada termopar es de 0.10 m con una distancia radial del 90 °. El termopar tipo J se instaló a un lado del concentrador para medir la temperatura ambiente.

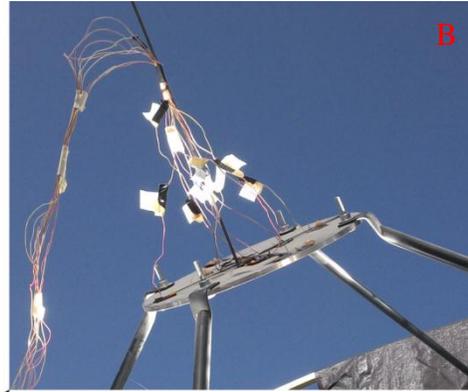
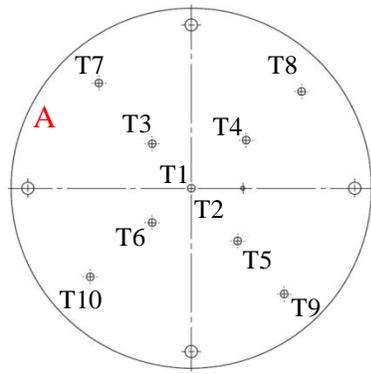


Figura 2.15: Distribución de los termopares tipo K(A), termopares en una prueba experimental (B).

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Introducción

En este capítulo se hace una descripción del análisis de los resultados obtenidos en cada componente del sistema de concentración solar. En el desarrollo, se presentan los cálculos solares que se consideraron como criterios de diseño para que el equipo se orientara y siguiera el Sol. Posteriormente se analizó el concentrador y el receptor mediante el cálculo de la temperatura teórica de concentración comparada con los valores experimentales. También se analizó la capacidad de destilado teórico que se podía obtener con la relación de concentración calculada. Seguido a esto se presenta un análisis del mecanismo de seguimiento solar. Por último, se analizan los demás componentes del sistema de concentración. El capítulo termina con la discusión del comportamiento global del equipo.

3.1 Cálculos solares

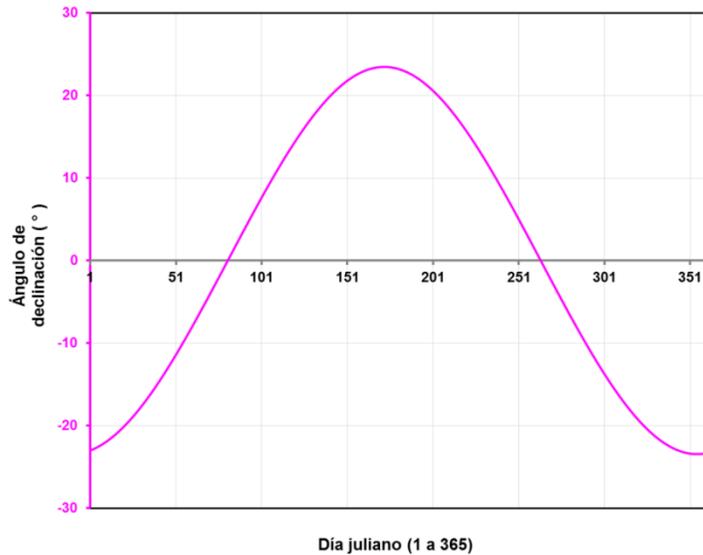
El concentrador solar parabólico funciona con la radiación solar directa que incide en su área de captación, por ello, y para que el concentrador tenga un óptimo desempeño, la cantidad de radiación incidente y su posición con respecto al Sol debe ser la más precisa posible.

El equipo se ubicó en Temixco, Morelos a una latitud de 19° Norte, una longitud 99.22 ° Oeste y está ubicado en el meridiano 105° Oeste.

Para los cálculos solares se fijaron como meses de diseño los valores correspondientes a los días 21 de Diciembre (solsticio de invierno) y 21 de Junio (solsticio de verano), estos cálculos se encuentran a detalle en los apéndices A, B y C.

El ángulo de declinación es muy importante para los cálculos solares, por ello se determinó su valor a lo largo del año mediante el uso de la ecuación 3.1. La trayectoria de dicho ángulo se puede ver en la gráfica 3.1.

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \dots \dots \dots (3.1)$$



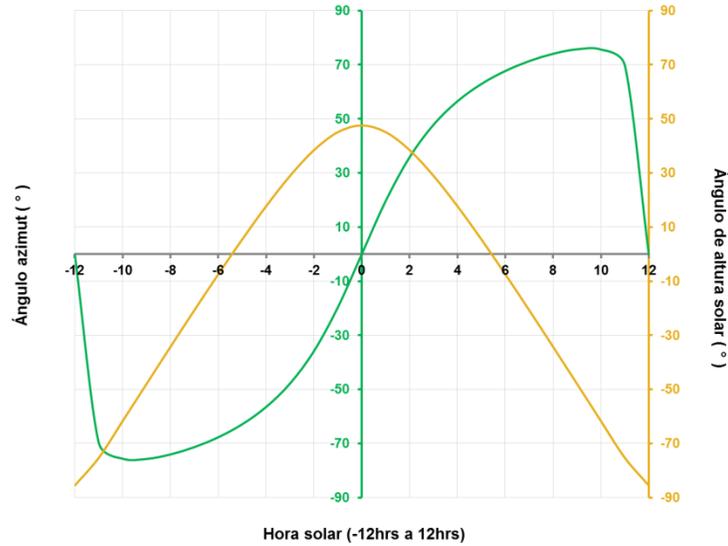
Gráfica 3.1. Variación de la declinación solar a lo largo del año.

El concentrador se diseñó para seguir al Sol en función de los ángulos de altura solar (α) y azimut (z). Para encontrar el ángulo azimut máximo que debe recorrer el concentrador al inicio de cada prueba (al amanecer) se hizo su cálculo para el solsticio de verano (21 de junio).

Con el cálculo anterior se pudo conocer el ángulo azimut máximo que puede recorrer el concentrador en el año, logrando con esto, la instalación de interruptores de seguridad y finales de carrera.

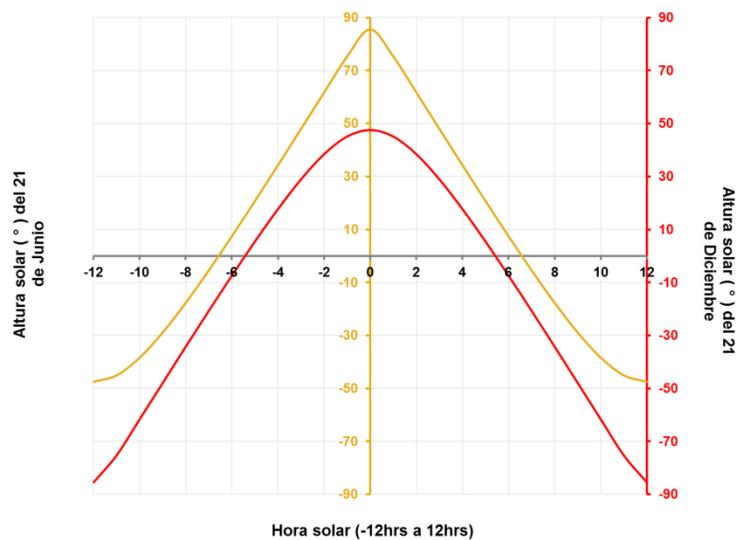
Para Temixco, el ángulo horario para el solsticio de verano es de ± 98.57 grados, negativo para la mañana y positivo para la noche. El tiempo en que el concentrador llegó al medio día solar fue de 6 horas 34 minutos y 19 segundos.

La tierra presenta irregularidades en su desplazamiento alrededor del Sol, aplicando la ecuación del tiempo se encuentre el factor de corrección, que es de -1.5 minutos para el solsticio de verano. Este factor se encuentra con la ecuación C7 o mediante el uso de la gráfica C.2 del apéndice B. Aplicando el factor de corrección de tiempo, el solsticio de verano dura 13 horas 8 minutos y 38 segundos. En la gráfica 3.2 se observa la comparación del ángulo azimut y de altura solar para ese día.



Gráfica 3.2. Comparación del ángulo azimut y de altura solar para el solsticio de verano.

Para la misma localidad, el solsticio de invierno (21 de diciembre) tiene un ángulo horario de ± 81.40 grados, por lo que tiempo en que el concentrador llega al medio día solar es de 5 horas 25 minutos y 36 segundos. El factor de corrección para esta fecha es de 1.02 minutos, por lo que el día duró 10 horas 51 minutos y 12 segundos. En la gráfica 3.3 se compara el ángulo de altura solar para el solsticio de verano y el de invierno.



Gráfica 3.3. Comparación del ángulo de altura solar de verano y de invierno.

3.2 Análisis del concentrador

El concentrador fue recuperado de una antena satelital en desuso. Su forma esta descrita por la siguiente ecuación:

$$f(x) = a x^2 + b \dots \dots \dots (3.2)$$

Dónde:

x= Es la distancia horizontal desde el centro.

a y b= Son constantes que describen la forma de la parábola.

La constante “b” se hace cero, ubicando la parte central del concentrador en el origen, de esta forma el valor de la función es igual a la profundidad cuando la distancia horizontal desde el centro es igual al radio del plato parabólico. De lo anterior resulta la siguiente ecuación:

$$a = \frac{P}{r^2} \dots \dots \dots (3.3)$$

La antena satelital tiene un diámetro de 3.1 m y una profundidad de 0.5 m. El área de la superficie del concentrador se calculó con la ecuación 3.4, donde “P” es el perímetro de la parábola.

$$A_{con} = \frac{2\pi}{3} \frac{D^2}{8P} \left[\sqrt{\left(\frac{D^2}{4} + \left(\frac{D^2}{8P}\right)^2\right)^3} - \left(\frac{D^2}{8P}\right)^3 \right] \dots \dots \dots (3.4)$$

Por lo tanto el área resultante del concentrador es (A_{con}): 8.28 m².

La distancia focal del concentrador se definió como la longitud desde la parte inferior de la parábola, hasta el punto donde se concentra toda la radiación solar, con la ecuación 3.5 se determinó el punto focal.

$$Df = \frac{1}{4(a)} \dots \dots \dots (3.5)$$

Para aprovechar al máximo la energía concentrada, fue necesario colocar al receptor un el punto focal (zona de mayor concentración), lo anterior se logró

mediante una base ajustable que garantizó una temperatura alta en el receptor y una disminución de pérdidas ópticas.

Dada la geometría del concentrador y receptor se calculó la temperatura teórica máxima alcanzable, para ello se determinó la relación de concentración geométrica.

Basándose en el teorema de Rabl [20] se consideró el receptor como una placa plana. El área del receptor y concentrador fue de 0.0736 m² y 7.5476 m² respectivamente, con estos valores la relación de concentración geométrica fue de 102.44.

En el cálculo, se consideraron las propiedades de los materiales, las cuales se adquirieron de datos técnicos y consideraciones que se describen en el apéndice D. Por lo anterior, se consideró una Absortividad del receptor ($\alpha_{receptor}$) de 0.91, una emisividad del receptor en la región del infrarrojo (ϵ) de 0.3 y una fracción de radiación incidente que llega al área de apertura del concentrador (τ) de 0.5. Considerando lo anterior la radiación solar que llegó al receptor se calculó con la ecuación 3.6.

$$Q_{sol-receptor} = \tau \alpha_{concentrador} \sin^2(\theta_{medio}) \sigma T_{sol}^4 \dots \dots \dots (3.6)$$

Se determinó el ángulo medio, ya que es necesario para el cálculo de la radiación que llega al receptor, este se determinó con la ecuación 3.7.

$$\theta_{medio} = \frac{r_{sol}}{R_{sol-tierra}} \dots \dots \dots (3.7)$$

Dónde:

r: Es el radio del sol.

R_{sol-tierra}= Es la distancia del Sol con la tierra.

Del mismo modo se determinó la relación de concentración ideal con la ecuación 3.8.

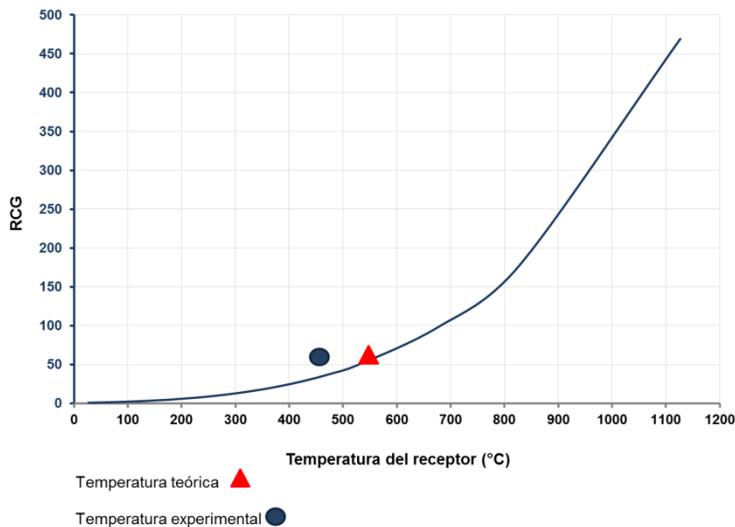
$$CR_{ideal} = \frac{1}{\sin^2(\theta_{medio})} \dots \dots \dots (3.8)$$

Posteriormente se calculó la temperatura máxima alcanzable del concentrador (ecuación 3.9) para una relación de concentración geométrica de 102.44. Los cálculos a detalle de la temperatura máxima teórica del concentrador se encuentran en el apéndice D.

$$T_{\text{receptor}} = T_{\text{sol}} \left[(1 - \eta) \tau \frac{\alpha CR_{\text{geometrico}}}{\varepsilon CR_{\text{ideal}}} \right]^{\frac{1}{4}} \dots \dots \dots (3.9)$$

Con las consideraciones anteriores la temperatura máxima alcanzable por el receptor que es 686.42 °C.

A manera de ejemplo, con una relación de concentración geométrica de 51.22, la temperatura teórica del receptor fue de 533 °C y la experimental de 456 °C, la diferencia de la temperatura teórica y experimental se debe a los valores asumidos de transmisividad, de absorción, de emitancia, por pérdidas convectivas, pérdidas ópticas, por el reajuste del mecanismo de seguimiento solar, por la degradación de la superficie reflectante y la intensidad solar del día. En la Gráfica 3.4, se compara la temperatura teórica y experimental del receptor, manteniendo constante la RCG. Los cálculos energéticos, del coeficiente de concentración geométrica y la temperatura teórica del receptor se pueden ver a detalle en los apéndices D y F.



Gráfica 3.4: Comparación de la relación de concentración geométrica y la temperatura teórica y experimental del receptor.

3.3 Mecanismo de seguimiento solar.

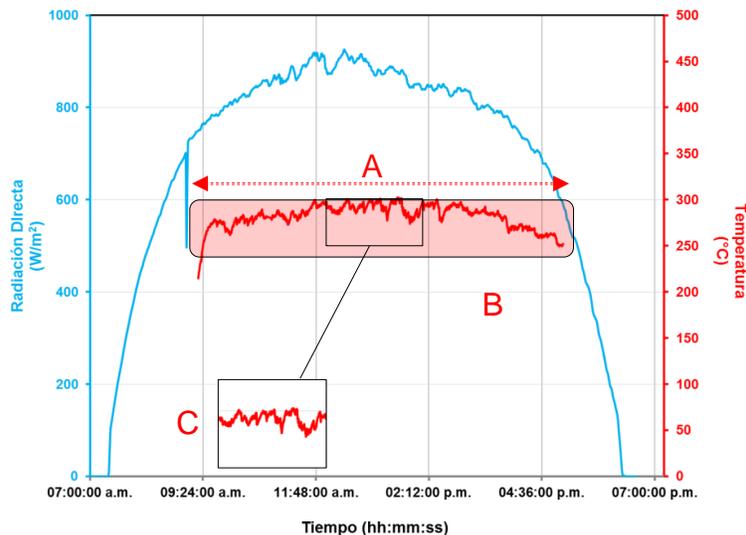
3.3.1 Sensor

El diseño del sensor se logró mediante dos fotorresistencias colocadas en una base de acrílico y separadas por un divisor central. La separación funcionó como un bloque de sombra, colocado de tal manera que pudo sombrear a los sensores dependiendo de la posición del Sol. Por lo anterior el Sol se orientó en una de tres posiciones:

Posición 1: Al Este del centro, posición 2: Centrado, posición 3: Al Oeste del centro.

Las señales obtenidas por los sensores fueron procesadas en un circuito comparador, para aumentar su precisión o sensibilidad de la radiación solar se incrementó la altura del bloque de sombra, hasta que se obtuvo una respuesta óptima de seguimiento.

El sensor detectó de forma precisa las variaciones de la radiación solar. En la gráfica 3.5 y tabla 3.1, se observa el comportamiento del sensor para un día soleado y con un área de sección de 0.94 m^2 . Los detalles de las pruebas experimentales se pueden ver en el apéndice J.



Gráfica 3.5: Comportamiento del sensor para un día soleado y con un área de sección de 0.94 m^2 .

Tabla 3.1: Comportamiento del sensor para un día soleado y con un área de sección de 0.94 m².

Punto en la gráfica	Explicación
A	Por las características del día se lograron temperaturas estables en el receptor durante 7.5 horas.
B	La temperatura en el receptor presento pocas oscilaciones, manteniéndose en un rango de 250°C a 300 °C.
C	Las pequeñas perturbaciones de la temperatura en el receptor se justificaron por el reajuste del mecanismo de seguimiento solar, por perdidas convectivas y por pequeñas variaciones de la radiación solar directa.

3.3.2 Mecánica de seguimiento solar

El mecanismo de seguimiento solar se diseñó para ser totalmente desarmable y portable, en su fabricación se utilizaron componentes económicos y de fácil reposición. La transmisión del mecanismo de altura solar (SAS) y de azimut (SAZ) se logró con un arreglos simples de motorreductores, reductores de velocidad y poleas, unidas mediante cables de acero de alta resistencia. Con la configuración anterior y acoplado a un sistema de censado solar sencillo, se logró un seguimiento económico, transportable y de fácil operación. Los cálculos mecánicos específicos de los motores y esfuerzos se pueden consultar en el apéndice H.

3.3.3 Seguimiento azimutal (SAZ)

El mecanismo está compuesto por dos bases metálicas desarmables de 3 m de diámetro, que se unieron mediante un eje y dos rodamientos. La transmisión fue mecánicamente simple, se realizó mediante un arreglo formado entre la polea del motor y la base superior de la estructura. Por el tipo de transmisión la fuerza de torsión necesaria para mover al concentrador fue de 0.15 Hp. Por lo antes mencionado, para el equipo se seleccionó un motorreductor estándar de 0.92 Hp y 12 RPM.

La unión de la polea del motor y la base de seguimiento azimut se realizó con

un cable de acero de 3.18×10^{-3} m (1/8 in) (figura 3.1). Con el arreglo mecánico se logro transmitir el movimiento de forma precisa, simple y sin necesidad de complejos sistemas de engranajes. Del arreglo mecánico se obtuvo de manera experimental una velocidad de rotación de 2 RPM.

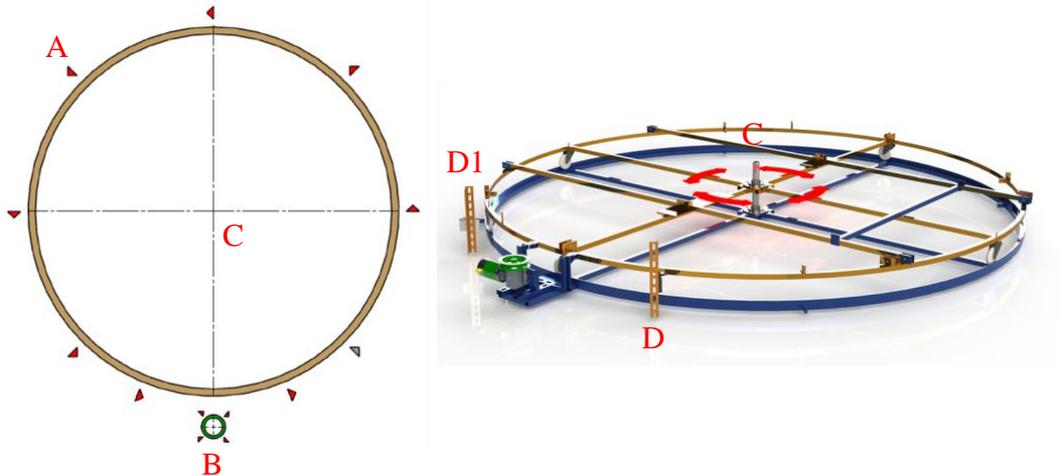


Figura 3.1. Base superior del SAZ (A), polea del motor del SAZ (B), desplazamiento rotacional del SAZ (C), final de carrera del amanecer (D1), final de carrera del atardecer (D).

Para proteger los componentes mecánicos del mecanismo de transmisión en azimut y para orientar el concentrador al inicio y final de cada prueba experimental se instalaron finales de carrera en el ángulo máximo azimut correspondiente al día 21 de junio (figura 3.2).

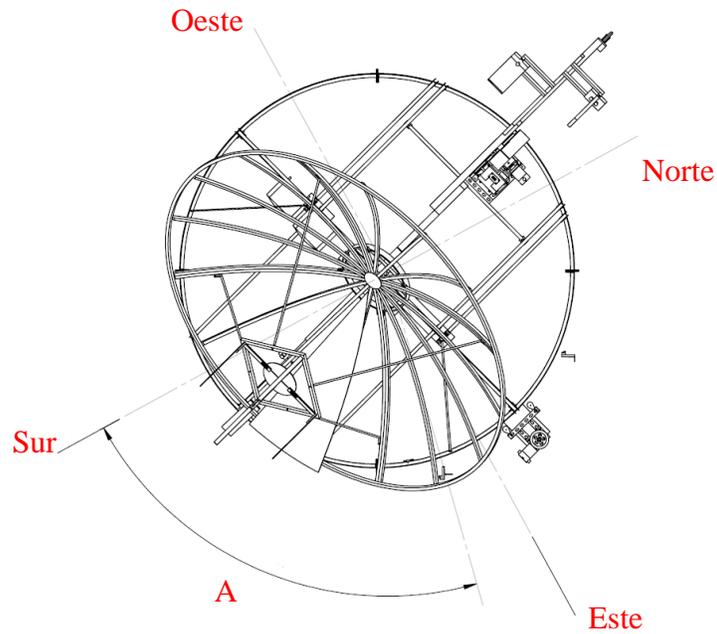


Figura 3.2. Vista superior de la orientación del final de carrera “este”, para el ángulo máximo azimut correspondiente al día 21 de junio (A).

3.3.4. Seguimiento de altura solar (SAS)

Los componentes básicos del mecanismo de altura solar son: un motorreductor, un reductor de velocidad, un eje móvil y un contrapeso. Para lograr bajas revoluciones en el seguimiento de altura solar, se ajustó un motorreductor y un reductor de velocidad mediante un arreglo polea-banda.

El eje móvil del mecanismo se montó en la base superior del mecanismo de seguimiento azimut, en este eje se unió el contrapeso y la estructura del concentrador solar. Para seguir el sol en el ángulo de altura solar se acoplo el reductor de velocidad al eje móvil (figura 3.3).

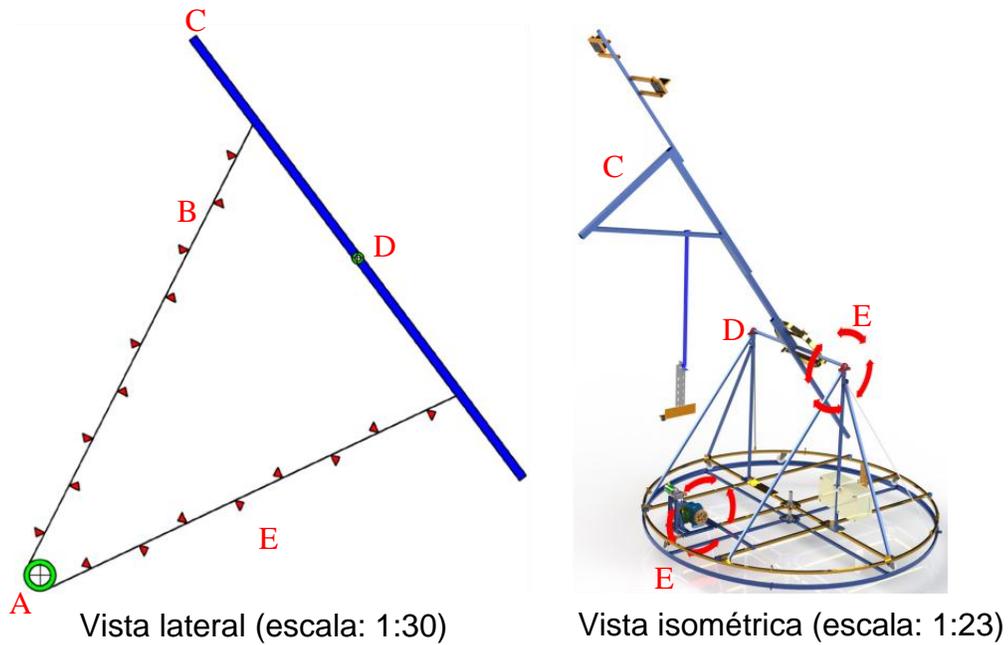


Figura 3.3. Polea del reductor de velocidad (A), cable de acero (B), contrapeso (C), rodamiento del eje móvil (D), desplazamiento rotacional del SAS (E).

La fuerza necesaria para rotar la estructura fue de 0.18 Hp. Como factor de sobredimensionamiento por cargas de viento en el concentrador se seleccionó un motorreductor comercial de 0.92 Hp acoplado a un reductor de velocidad. La configuración dio un torque de 1.5 Hp y una velocidad de trasmisión de 0.3 RPM.

La unión de la polea del reductor de velocidad y el contrapeso se realizó con un cable de acero de 3.18×10^{-3} m (1/8 in) de diámetro, los puntos de sujeción del cable y la transmisión se observan en la figura 3.4. Para proteger los componentes mecánicos del concentrador y conocer su desplazamiento máximo, se colocaron finales de carrera en su dirección este y oeste. Estos componentes se instalaron según el ángulo máximo de altura solar al medio día solar, para el solsticio de verano (figura 3.4).

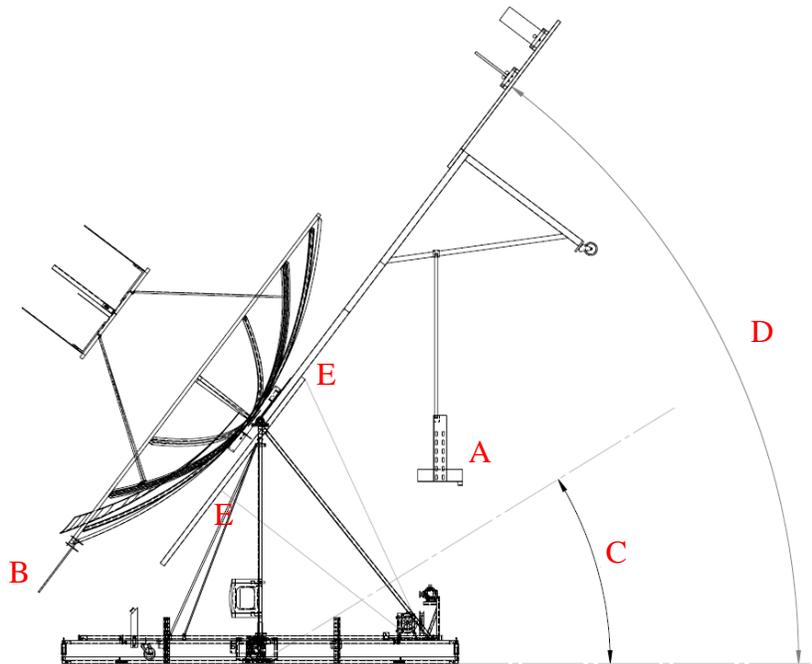


Figura 3.4. Final de carrera este (A), Final de carrera oeste (B), ángulo máximo de atura solar al medio día solar, para el solsticio de verano (C), ángulo de altura solar variable a lo largo del año (D).

Los cálculos detallados de la transmisión SAS y SAZ se pueden consultar en el apéndice H.

3.4. Estructura desarmable del concentrador

La estructura del equipo se diseñó para ser completamente desarmable, compacta y de fácil transporte. Se construyó por secciones, teniendo como límite de diseño el tamaño longitudinal de una sección desarmada del concentrador parabólico. Esta consideración se realizó debido a que el diseño del equipo de concentración partió de la geometría del concentrador (antena satelital), la cual ya tenía una forma preestablecida. El plato parabólico es armado en cuatro secciones de 1.55 m de longitud, estas ya ensambladas forman un diámetro de 3.10 m. Por las consideraciones anteriores, el tamaño de todos los componentes del sistema de concentración se ajustó a la longitud de una sección del concentrador.

En la figura 3.4 se hace una descripción de los componentes desarmables más importantes del sistema de concentración:

El concentrador se acopla al eje del mecanismo de altura solar mediante una prensa que une los componentes del plato parabólico en cuatro puntos de 90° (A).

El receptor y su estructura de soporte: Este componente se diseñó para poder variar la distancia focal de la placa receptora con respecto a la parábola. Dicha estructura se unió al concentrador mediante cuatro extensiones a 90° (B).

Base ajustable para sensores: Se diseñó para acoplar diferentes dispositivos de medición y diferentes configuraciones de sensores (C).

Eje unión de las bases del SAS y SAZ: La unión las dos bases se realizó con un eje compuesto por dos rodamientos y una barra cilíndrica sólida de aluminio, los dos rodamientos son concéntricos y están unidos a su respectiva base (D). Mediante una placa metálica el mecanismo de altura solar se acopló a la base superior del mecanismo de seguimiento azimut (I).

Base superior del SAZ: Está construida por cuatro secciones unidas mediante bridas y ejes tubulares internos (E, K). Para dar estabilidad a la estructura del mecanismo de seguimiento azimut se colocaron barras transversales tubulares unidas mediante coples y bridas (H).

El motor del mecanismo de altura solar se ajusta a una base metálica del mecanismo de seguimiento azimut. Todos los componentes que forman el arreglo motorreductor reductor de velocidad están unidos con piezas desarmables y tornillos (F).

Las bases superior e inferior del mecanismo de seguimiento azimut giran concéntricas. La primera es soportada por ocho ruedas con capacidad de carga de 450 Kg.

En la base inferior del mecanismo azimut se ajusta la transmisión, todos los componentes que forman el arreglo motorreductor-poleas, están compuestos con piezas desarmables y tornillos (J).

Para darle solides al eje móvil de la transmisión del mecanismo de altura solar, se colocaron barras tubulares metálicas y tensores (L).

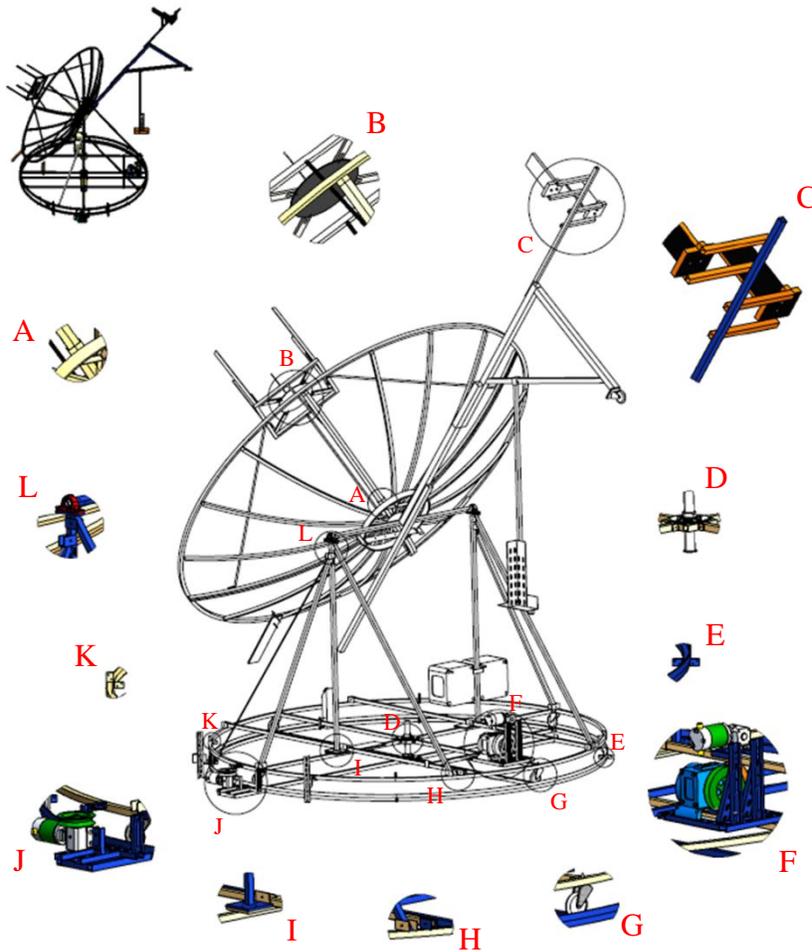


Figura 3.4. Componentes desarmables más importantes del sistema de concentración solar.

Los materiales de construcción y los detalles estructurales se pueden consultar en el apéndice I.

3.5. Análisis del receptor:

El receptor se construyó con una placa de acero la cual se recubrió de una película selectiva de alta absorbancia. Su diseño se realizó a partir de una simulación en el software TONATIUH (figura 3.5).

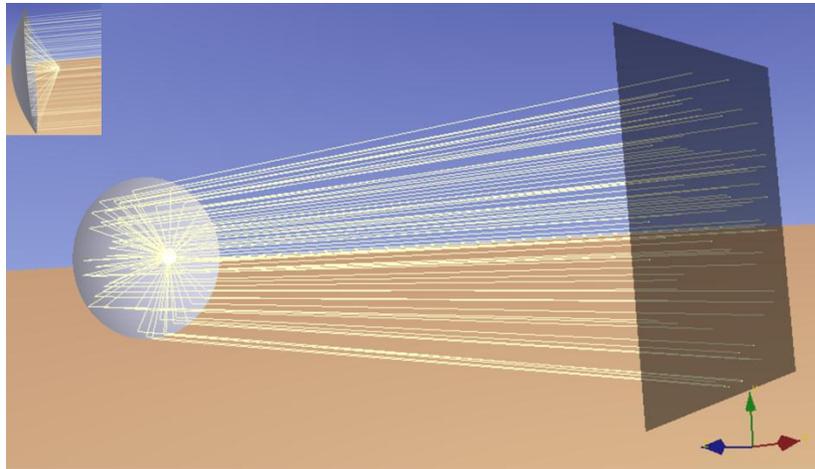


Figura 3.5. Simulación del trazado de rayos en el software TONATIUH.

Para la simulación se tomaron las medidas del concentrador, la distancia focal del receptor y las propiedades de los materiales. Se simularon 75000000 rayos considerando una radiación solar directa de 1000 W/m^2 . De los cálculos anteriores se obtuvo la distribución de la concentración de fotones en la placa y el tamaño de la mancha solar; lo anterior permitió variar el tamaño del receptor hasta encontrar un tamaño óptimo (figura 3.6).

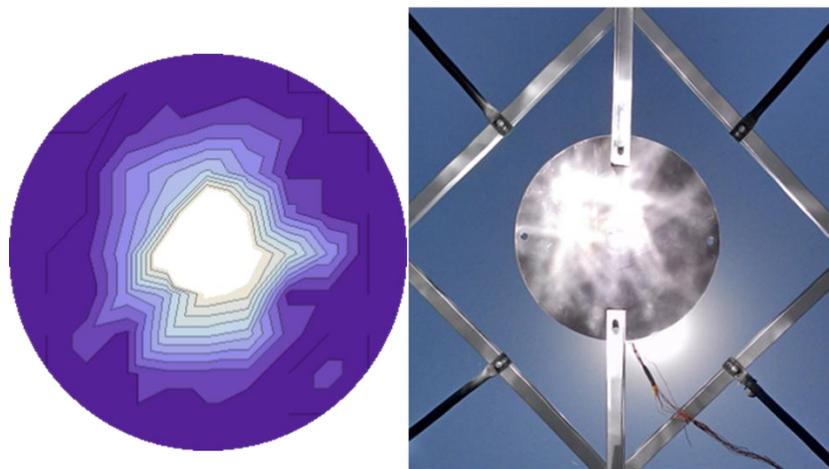


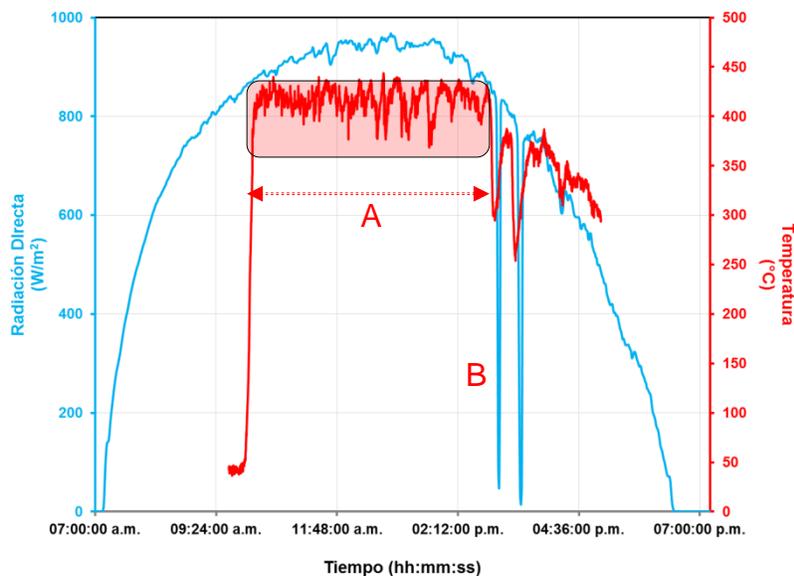
Figura 3.6. La figura de la izquierda muestra la distribución de fotones en la placa, en el lado derecho se muestra la mancha solar generada de manera experimental. El diámetro óptimo del receptor fue de 0.3 m.

El receptor fue diseñado para caracterizar el mecanismo de seguimiento solar, para lograrlo, la placa receptora se instrumentó con medidores de temperatura. Lo anterior permitió analizar el comportamiento de la temperatura del receptor por variaciones climatológicas, obteniéndose así, el tiempo de respuesta del mecanismo de seguimiento solar y los sensores.

El receptor se analizó comparando la radiación solar directa y la temperatura homogénea de la placa. Por la ausencia de aislantes térmicos el receptor estuvo sujeto a pérdidas convectivas, este factor, aunado a las propiedades ópticas de los materiales, ocasionó diferencias en la temperatura teórica y experimental.

En la gráfica 5.6 se observa la relación de la temperatura en el receptor y la radiación solar directa incidente. La prueba experimental se realizó con ocho secciones recubiertas del concentrador y con un área de sección de 3.77 m^2 , dio inicio a las 09:38:32 horas y finalizó a las 16:58:55 horas. Se graficaron 2661 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

La temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 5 horas en un rango de 350°C a 450°C , a partir de ese punto se presentaron dos caídas bruscas de la temperatura producto del paso de nubes.



Gráfica 5.6. Prueba con 8 secciones del concentrador para un día soleado.

Tabla 3.1: Prueba con 8 secciones del concentrador para un día soleado.

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 5 horas en un rango de 350 a 450 °C. Las pequeñas variaciones de la temperatura en el receptor son producto de variación de la radiación solar incidente, pérdidas convectivas y el ajuste continuo del seguimiento.
B	En este punto la intensidad de la radiación solar empezó a disminuir, se presentaron dos caídas bruscas de la temperatura producto del paso de nubes.

El receptor fue sometido a un flujo de energía solar continuo, esto permitió determinar de forma experimental la temperatura máxima que el receptor podría alcanzar.

3.6. Análisis global del equipo de concentración solar.

El equipo se diseñó considerando la capacidad de concentración del plato parabólico. Con la energía teórica concentrada en el receptor, se calculó la capacidad de destilado teórico de agua para un determinado periodo de tiempo y con seguimiento solar.

Para orientar el concentrador normal al Sol y así poder concentrar la energía en el receptor, se diseñó un mecanismo de seguimiento solar en dos ejes. El mecanismo fue evaluado mediante 22 pruebas experimentales, en ellas se determinó el tiempo en que el seguimiento solar podía mantener la energía solar concentrada en el receptor, bajo diferentes condiciones climatológicas.

El análisis del mecanismo se realizó de manera experimental, con el receptor instrumentado se obtuvo la temperatura a lo largo de un día, permitiendo así ver el comportamiento del mecanismo de seguimiento solar por variaciones de la radiación solar directa.

De las pruebas experimentales se obtuvieron las temperaturas promedio de la placa receptora por área de sección recubierta del concentrador, de esta forma se pudieron comparar con las obtenidas en el cálculo teórico.

En la tabla 3.2 se hace la comparación de las temperaturas teóricas y experimentales en función de la sección recubierta del concentrador.

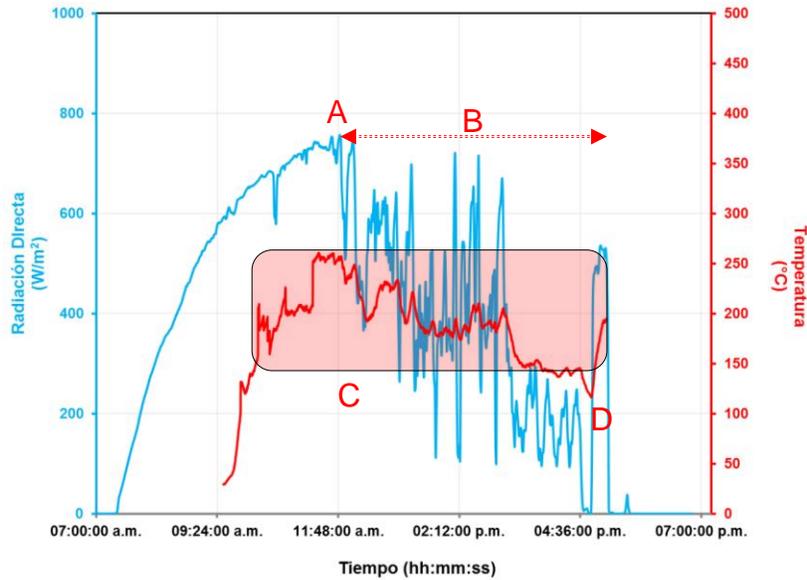
Tabla 3.2: Comparación de la temperatura experimental y teórica de la placa receptora.

Sección recubierta	Temperatura experimental (°C)	$T_{receptor}$ (°C)	A_{sec} (m ²)	RCG	$Q_{sol-receptor}$ (kW)
2	250-300	297.41	0.94	12.80	0.55
4	300-350	405.37	1.88	25.61	1.10
6	350-400	477.75	2.83	38.41	1.66
8	400-450	533.75	3.77	51.22	2.21

En las pruebas experimentales se utilizaron hasta 8 secciones del concentrador, esta consideración se realizó debido a que el cálculo teórico de la temperatura en la placa, estaba cerca de las máximas aceptables por los termopares.

En la gráfica 3.5 se muestra una prueba experimental con dos secciones recubiertas del concentrador ($A_{sec}=0.94$ m²), dio inicio a las 09:31:05 horas y terminó a las 17:06:38 horas. Se graficaron 2735 puntos experimentales, con un intervalo de 10 segundos entre cada uno. Al inicio de la prueba no se presentaron

nublados, fue a partir de las 11:48:23 horas que iniciaron de manera constante, debido a esto, la temperatura en el receptor se vio afectada oscilando en un rango de 150 °C a 250 °C. Para el área de sección seleccionada, la temperatura teórica del receptor fue de 297.45 °C.



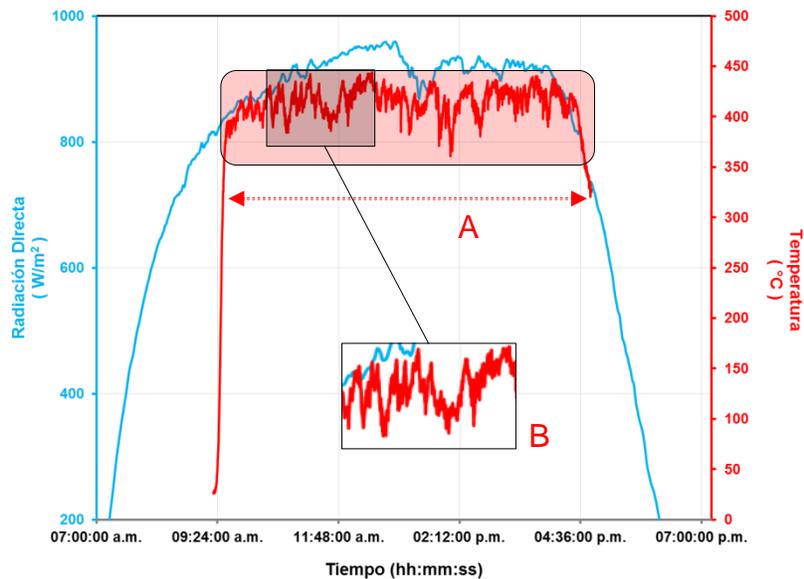
Gráfica 3.5. Prueba experimental del día 28-01-14, con 2 secciones del concentrador y el día nublado.

Tabla 3.3: Análisis de la prueba experimental del día 28-01-14, con 2 secciones del concentrador y el día nublado

Punto en la gráfica	Explicación
A	En este punto iniciaron los nublados, se observa como la temperatura en el receptor disminuye por variaciones de la radiación solar directa.
B,C	La temperatura del receptor se mantuvo en un rango de 150 °C a 250°C durante 6 horas. La radiación solar directa se mantuvo por debajo de los 500 W/m ² .
D	En este punto la radiación solar directa aumenta y con ello la temperatura del receptor.

Para un día soleado, las perturbaciones de la temperatura del receptor son producto del reajuste del seguimiento solar por el desplazamiento del Sol. En un día sin nubosidad las oscilaciones en la placa receptora oscilan en un rango de 50 °C.

En la prueba de la gráfica 3.6 la radiación solar directa no tuvo perturbaciones significativas, por lo que la temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 7 horas, oscilando en un rango de 350 °C a 450°C.



Gráfica 3.6. Prueba experimental del día 06-03-14, con 8 secciones y el día soleado.

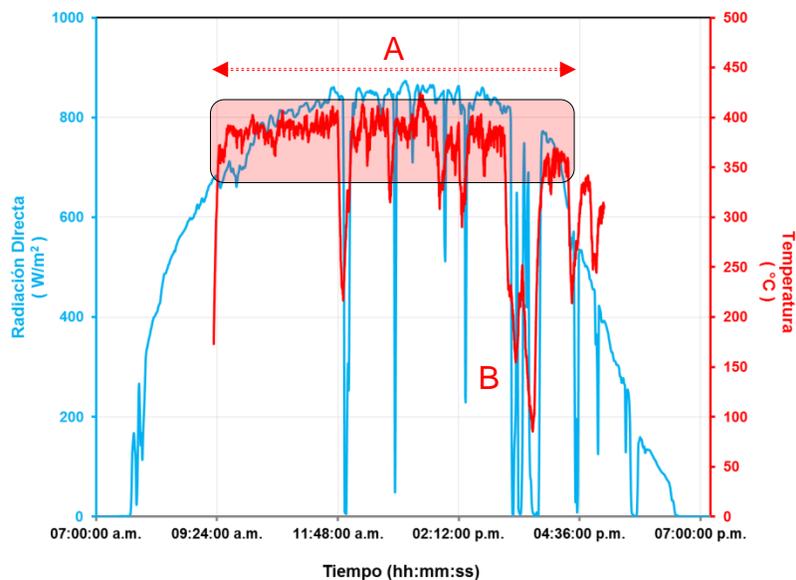
Tabla 3.4: Análisis de la prueba experimental del día 06-03-14, con 8 secciones del concentrador y el día nublado.

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 7 horas, oscilando en un rango de 350 °C a 450 °C.
B	Las perturbaciones de la temperatura en el receptor se justifican por el reajuste del mecanismo de seguimiento solar, por pérdidas

convectivas y por pequeñas variaciones de la radiación solar directa.

Con la energía concentrada, los 8 litros de agua teóricos contenidos en el receptor tardaron 1162 s (19m) en alcanzar los 100 °C y 5034 s (2.71 horas) en evaporarse todo el agua. El mecanismo de seguimiento solar dio un rango de estabilidad promedio de la temperatura en el receptor de 7 horas, obteniéndose con esto un destilado teórico de 20.66 litros de agua.

Para un día con nublados dispersos la temperatura del receptor se mantuvo estable durante 7.5 horas en un rango de 350 °C a 450 °C. A lo largo de la prueba se presentaron 8 caídas de la temperatura producto del paso de nubes. El tiempo en que la temperatura regresó al rango de los 50 °C fue en promedio de 10 minutos. Este periodo de tiempo estuvo en función de la densidad de la nube, la velocidad del viento y el tiempo en que se bloqueó la radiación del Sol (gráfica 3.7).



Gráfica 3.7. Prueba experimental del día 04-03-14, con 8 secciones y el día parcialmente nublado.

Tabla 3.5: Análisis de la prueba experimental del día 04-03-14, con 8 secciones del concentrador y el día parcialmente nublado.

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor presento oscilaciones, se mantuvo estable durante 7.5 horas en un rango de 350 °C a 450 °C.
B	En el punto “B”, la temperatura del receptor disminuyo considerablemente por la ausencia de radiación solar directa, el tiempo promedio que tarda en recuperarse la temperatura del receptor después del bloqueo de nubes es de 14 minutos.

El mecanismo de seguimiento solar dio un rango de estabilidad promedio de la temperatura en el receptor de 7.5 horas, obteniéndose con esto un destilado teórico de 22.14 litros de agua. El análisis de todas las pruebas experimentales se pueden consultar a detalle en el apéndice J.

3.7. Análisis del destilado solar teórico.

La destilación implica la separación de agua de una disolución mediante ebullición. Esta operación unitaria se lleva a cabo suministrando calor a una disolución para vaporizar al disolvente. La energía se suministra para proporcionar el calor latente de vaporización. Por la diferencia de temperatura entre el agua en ebullición y el medio ambiente las pérdidas de calor son grandes.

Para conocer el agua teórica que se puede destilar con la energía concentrada se realizó un análisis térmico siguiendo la ley del enfriamiento de Newton [22].

Se consideró el calor suministrado por el concentrador en un intervalo de tiempo:

$$dQ = Pdt \dots \dots \dots (3.1)$$

Se considera el calor que se trasfiere al ambiente; donde α es el coeficiente de intercambio de calor, A_{receptor} es el área del receptor, T_r es la temperatura del agua.

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha A_{\text{receptor}} (T_r - T_{\text{amb}}) \dots \dots \dots (3.2)$$

Del mismo modo se considera el calor asociado al incremento de la temperatura del agua con la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = (m)(c)(dT) \dots \dots \dots (3.3)$$

Considerando el incremento de la temperatura del agua y el calor suministrado por él concentrador se obtuvo el balance de energía por la ley del enfriamiento de Newton:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(\alpha A_{\text{receptor}} - P)(T_{\text{amb}} - T_r)}{mc} \dots \dots \dots (3.4)$$

Se despejo dt y se integró la ecuación diferencial considerando $T_{\text{amb}}=25^\circ\text{C}$ para el instante $t=0$.

$$t_1 = \frac{\ln\left(\frac{P}{\alpha A}\right) mc}{\alpha A} - \frac{\ln\left(\frac{-(P - \alpha A)(T_{\text{amb}} - T_r)}{mc}\right) mc}{\alpha A} \dots \dots \dots (3.5)$$

Considerando una potencia de concentración alta y que la temperatura del agua en su interior se incrementa desde la temperatura ambiente hasta que llega a la ebullición, se despeja el tiempo que tarda en llegar a esa condición.

T_r = Temperatura del agua contenida en el receptor.

$$T_r = 100^\circ\text{C}$$

$$t_1 = -\frac{mc}{\alpha A} \ln\left(1 - \frac{\alpha A}{P}(T_r - T_{\text{amb}})\right) \dots \dots \dots (3.6)$$

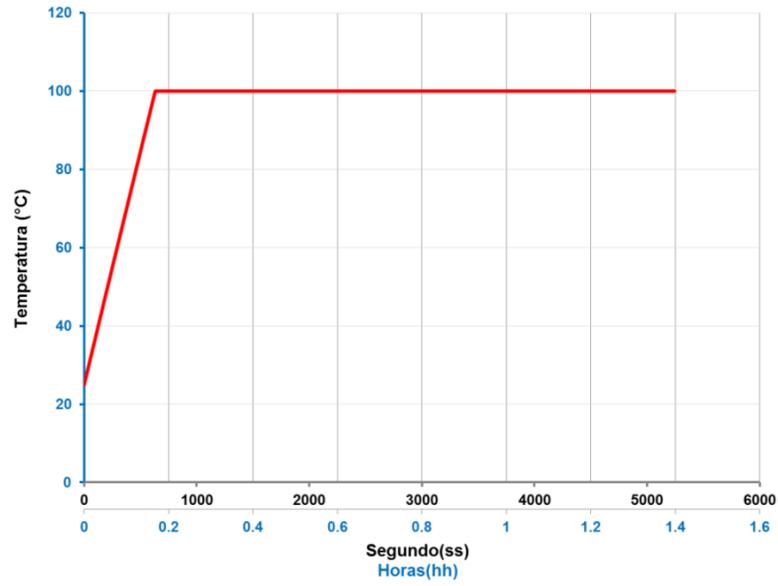
Como el agua al estar a 100°C se empieza a evaporar se ingresa al balance de energía el calor de evaporación del agua, la masa de agua a evaporar y el calor trasferido al ambiente por la ley del enfriamiento de Newton.

$$P dt = L_v dm_e + \alpha A(100 - T_{\text{amb}}) \dots \dots \dots (3.7)$$

Se despeja la masa destilada para un tiempo $t > t_1$, donde m_e es la masa de agua evaporada y m es la masa inicial:

$$m_e = \frac{(P + \alpha A(T_{\text{amb}} - 100))(t - t_1)}{L_v} \dots \dots \dots (3.8)$$

En la gráfica 3.8 se puede ver el cálculo del destilado teórico para 16 secciones del concentrador ($A_{\text{sec}}=7.54\text{m}^2$). La potencia teórica suministrada por el concentrador al receptor fue de 4.42 kW, considerando una temperatura ambiente inicial de 25 °C, se alcanzaron los 100 °C en 606 s (10 minutos), lográndose destilar los 8 litros de agua en 5034 s (1.39 horas). Los detalles del cálculo de destilado teórico se pueden consultar en el apéndice G.



Gráfica 3.8: Comportamiento de la temperatura teórica del agua para 16 secciones del concentrador.



Figura 3.7. Construcción final del equipo de concentración.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

Introducción

El objetivo principal del presente trabajo fue construir un equipo térmico de concentración solar que permitiera estudiar la destilación del agua con un flujo de radiación solar altamente concentrado. Para lograr lo planteado, el diseño del equipo de concentración se centró en un seguimiento preciso del sol, que permitiera mantener la energía concentrada en el receptor en un lapso prolongado de tiempo, además, de considerarse la simplicidad mecánica de sus componentes. Las condiciones de diseño más importantes fueron: Una estructura totalmente desarmable, piezas mecánicas económicas, con refacciones de fácil reposición y una operación simple del equipo. A continuación se presenta un breve resumen de los resultados obtenidos en el trabajo, junto con recomendaciones para proyectos futuros.

4.1 Cálculos solares

- I. Para diseñar el equipo de concentración se realizaron los cálculos solares que describen la trayectoria del Sol con respecto al concentrador. De lo anterior se encontró que su desplazamiento a lo largo del ángulo azimut se describe a una velocidad de 15 grados por hora.
- II. Por las características del mecanismo de seguimiento solar, se estudiaron de manera precisa los ángulos de altura solar y azimut. Ambos cálculos se realizaron para los meses de diseño correspondientes a los días 21 de diciembre (solsticio de invierno) y 21 de junio (solsticio de verano).
- III. Considerando las irregularidades del desplazamiento de la tierra alrededor del Sol, se determinó el tiempo en que el sol llega al medio día y la duración de este para el solsticio de verano e invierno.

3.2 Concentrador

- I. El concentrador fue recuperado de una antena satelital desarmable en desuso.

- II. El área de apertura total del concentrador fue de 7.54 m^2 y el área del receptor de 0.0736 m^2 , con estos valores se obtuvo una relación de concentración geométrica de 102.44.
- III. Se determinaron diferentes valores de concentración geométrica en función de la variación del área de apertura del concentrador. Los resultados no mostraron una linealidad por el incremento o decremento de la relación de concentración.
- IV. Por el área de captación del concentrador se determinó la temperatura máxima alcanzable en el receptor, considerando sus propiedades selectivas y pérdidas en por el ambiente. La temperatura teórica fue de $686.42 \text{ }^\circ\text{C}$.
- V. Se determinaron diferentes valores de temperatura teórica en función de la variación del área de apertura del concentrador.
- VI. Se determinó la relación de concentración óptima entre el concentrador y receptor con la temperatura del receptor.
- VII. Con el área de apertura total del concentrador y con una energía ideal de 1365 W/m^2 , potencia teórica suministrada por el concentrador al receptor es de 4.42 kW.
- VIII. Para diferentes secciones recubiertas del plato parabólico se determinó la potencia teórica concentrada en el receptor. El cálculo anterior, permitió hacer un análisis de la cantidad de destilado que se puede obtener con el equipo.

3.3 Receptor

- I. Con la temperatura de la placa receptora se evaluó la precisión del mecanismo de seguimiento solar, se observaron las variaciones en el seguimiento por perturbaciones climatológicas y de la radiación solar directa.
- II. Con la ayuda del receptor se avaluó sensibilidad y tiempo de respuesta del arreglo sensor- circuito comparador.
- III. Las dimensiones del receptor se realizaron a partir de la simulación en el software TONATIUH.
- IV. Se simularon 75000000 millones de rayos y se consideró una radiación solar directa de 1000 W/m^2 .
- V. De la simulación se obtuvo la distribución de la concentración de fotones en el receptor y el tamaño de la mancha solar generada, obteniéndose así las dimensiones óptimas del concentrador.
- VI. Para aumentar la absorción de la radiación solar el receptor se recubrió de una pintura selectiva HI-PRO

- VII. Se la potencia teórica concentrada en el receptor para diferentes áreas de apertura del concentrador ($7.54 \text{ m}^2 = 4.42 \text{ kW}$, $3.77 \text{ m}^2 = 2.21 \text{ kW}$, $2.83 \text{ m}^2 = 1.66 \text{ kW}$, $1.88 \text{ m}^2 = 1.10 \text{ kW}$, $0.94 \text{ m}^2 = 0.55 \text{ kW}$).
- VIII. Se determinó la temperatura de operación del receptor para diferentes áreas de apertura del concentrador ($7.54 \text{ m}^2 = 686.42 \text{ °C}$, $3.77 \text{ m}^2 = 533.75 \text{ °C}$, $2.83 \text{ m}^2 = 477.75 \text{ °C}$, $1.88 \text{ m}^2 = 405 \text{ °C}$, $0.94 \text{ m}^2 = 297.41 \text{ °C}$).

3.3 Seguimiento solar

- I. El control de la posición del concentrador con respecto al Sol, se diseñó mediante sensores con fotorresistencias. Las señales obtenidas se procesaron con un circuito comparador analógico.
- II. El seguimiento solar fue eficiente, mantuvo al concentrador normal al Sol durante todo el día, sin embargo, la presencia de nubosidad por largos periodos de tiempo causaron problemas para mantener el concentrador orientado correctamente.
- III. Las señales obtenidas por los sensores fueron procesadas en un circuito comparador. Los sensores se diseñaron para aumentar su precisión o sensibilidad de la radiación solar.
- IV. Los sensores son desarmables y portables, en su fabricación se utilizaron componentes económicos y de fácil reposición.
- V. La transmisión del mecanismo de altura solar (SAS) y de azimut (SAZ) se logró con un arreglo simple de motorreductores, reductores de velocidad y poleas, unidas mediante cables de acero de alta resistencia.
- VI. la configuración de la transmisión de los mecanismos de seguimiento, acoplados a los sensores, se lograron un seguimiento económico, transportable y de fácil operación.
- VII. Se realizaron los cálculos mecánicos de los motores y esfuerzos en los seguimientos.
- VIII. La fuerza de torsión necesaria para mover el mecanismo de seguimiento azimutal fue de 0.15 Hp. Se seleccionó un motorreductor estándar de 0.92 Hp de 12 RPM. Del arreglo mecánico se obtuvo una velocidad de rotación de 2 RPM.
- IX. Para lograr bajas revoluciones en el seguimiento de altura solar, se ajustó un motorreductor y un reductor de velocidad mediante un arreglo polea-

banda. La fuerza necesaria para rotar la estructura fue de 0.18 Hp. El arreglo mecánico dio un torque de 1.5 Hp y una velocidad de transmisión de 0.3 RPM.

3.4 Estructura del concentrador

- I. La componentes estructurales son completamente desarmables, compactos y de fácil transporte. Se construyeron por secciones, teniendo como límite de diseño el tamaño longitudinal de una sección desarmada del concentrador parabólico.
- II. Los componentes del sistema de concentración se ajustaron a la longitud de una las secciones desarmada del concentrador.

3.5 Equipo de concentración solar.

- I. Con la energía teórica concentrada en el receptor, se calculó la capacidad de destilado teórico de agua para un determinado periodo de tiempo y con seguimiento solar.
- II. Se determinó el tiempo en que el seguimiento solar podía mantener la energía solar concentrada en el receptor, bajo diferentes condiciones climatológicas.
- III. El análisis del mecanismo se realizó de manera experimental, con el receptor instrumentado se obtuvo la temperatura a lo largo de un día, permitiendo así ver el comportamiento del mecanismo de seguimiento solar por variaciones de la radiación solar directa.
- IV. De las pruebas experimentales se obtuvieron las temperaturas promedio de la placa receptora por área de sección recubierta del concentrador, de esta forma se pudo validar el modelo teórico. La diferencia promedio del cálculo de la temperatura teórica y experimental fue de 60 °C.
- V. En días nublados, soleados o con nublados dispersos, la temperatura de la placa se mantuvo estable oscilando en un rango de 50 °C aproximadamente., estas variaciones se justifican por las pérdidas térmicas del receptor, por el seguimiento solar y por pérdidas ópticas del equipo.
- VI. El mecanismo de seguimiento solar mantiene la temperatura estable en el receptor en un periodo promedio de 7 horas.

3.6 Destilado solar teórico.

- I. Con la energía teórica concentrada en el receptor se determinó el agua teórica destilada a partir de un análisis térmico siguiendo la ley del enfriamiento de Newton.
- II. Para el área de apertura del concentrador ($A_{sec}=7.54m^2$), la potencia teórica suministrada por el concentrador al receptor es de 4.42 kW, con esta energía se alcanzaron los 100 °C en 606 s (10 minutos), lográndose destilar los 8 litros de agua en 5034 s (1.39 horas).
- III. Se determinó el tiempo en que se destilan 8 litros de agua, considerando diferentes áreas de apertura del concentrador ($7.54 m^2 =1.39 hr$, $3.77 m^2=2.71 hr$, $2.83 m^2= 3.67 hr$, $1.88 m^2=5.71 hr$, $0.94 m^2=12.75 hr$).

APÉNDICE A

Cálculos solares para el día 21 de Diciembre

Los cálculos se realizaron para Temixco, Morelos, se eligió el día 21 de diciembre (solsticio de invierno) como mes de diseño. Las consideraciones específicas de los cálculos se pueden verificar en el capítulo 2.

Variables de Geo-localización.

L (Latitud del lugar)= 19°

LI (Longitud del lugar)= 99.22°

Ls (Meridiano estándar para la zona horaria local)=105°

n= (Día juliano)=355

Cálculo de la declinación:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \dots \dots \dots (A1)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + (355)) \right]$$

$$\delta = -23.45^\circ$$

La hora solar (h_s) se define como el intervalo de tiempo entre dos regresos sucesivos del sol al meridiano local, dicho ángulo es igual a cero incrementándose a partir de ese punto 360/24 o 15 grados por hora.

$$h_s = (-180^\circ \text{ a } 180^\circ) \dots \dots \dots (A2)$$

Tabla A.1: Conversión de la hora solar.

h_s (Grados)	h_s (Radianes)	h_s (Hora solar)
-180.00	-3.14	-12.00
-165.00	-2.88	-11.00
-150.00	-2.62	-10.00
-135.00	-2.36	-9.00
-120.00	-2.09	-8.00
-105.00	-1.83	-7.00
-90.00	-1.57	-6.00
-75.00	-1.31	-5.00
-60.00	-1.05	-4.00
-45.00	-0.79	-3.00
-30.00	-0.52	-2.00
-15.00	-0.26	-1.00
0.00	0.00	0.00 (Medio día solar)
15.00	0.26	1.00
30.00	0.52	2.00
45.00	0.79	3.00
60.00	1.05	4.00
75.00	1.31	5.00
90.00	1.57	6.00
105.00	1.83	7.00
120.00	2.09	8.00
135.00	2.36	9.00
150.00	2.62	10.00
165.00	2.88	11.00
180.00	3.14	12.00

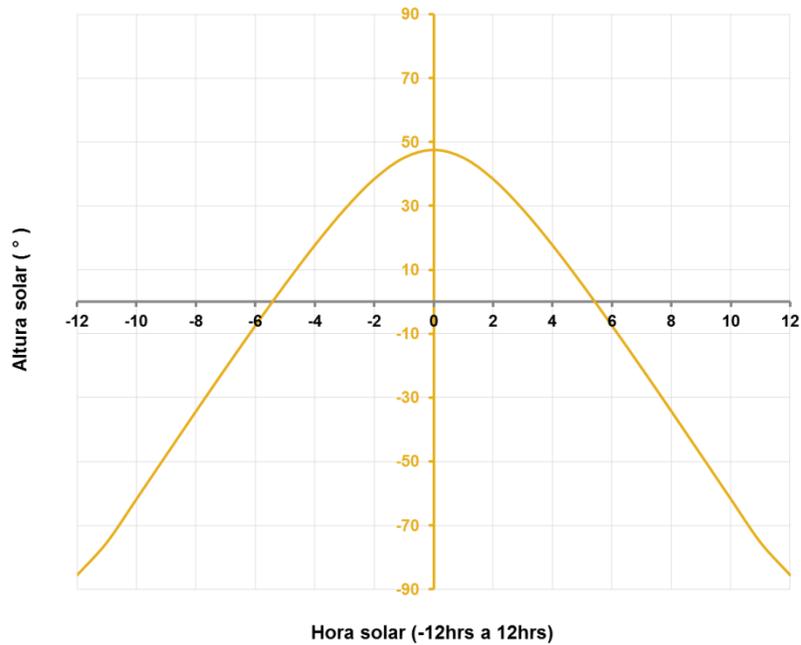
Cálculo de la altura solar:

$$\sin(\alpha) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h_s) \dots \dots \dots (A3)$$

$$\alpha(h_s) = \arcsin(\cos(L) \cos(\delta) \cos(h_s) + \sin(L) \sin(\delta))$$

Tabla A.2: Cálculo de la altura solar en función de la hora solar.

h_s (hora solar)	Altura solar (Grados)
-12	-85.54137044
-11	-75.32876171
-10	-61.72944758
-9	-47.9761028
-8	-34.2789522
-7	-20.73410712
-6	-7.443381662
-5	5.44771822
-4	17.7054641
-3	28.93118684
-2	38.43311043
-1	45.0930124
0	47.54520356
1	45.0930124
2	38.43311043
3	28.93118684
4	17.7054641
5	5.44771822
6	-7.443381662
7	-20.73410712
8	-34.2789522
9	-47.9761028
10	-61.72944758
11	-75.32876171
12	-85.54137044



Gráfica A.1: Variación de la altura solar para el día 21 de Diciembre.

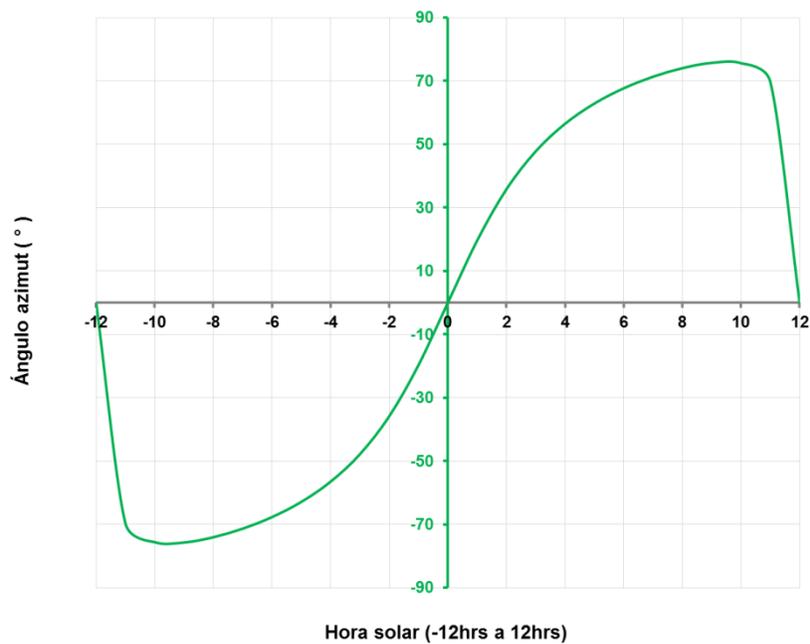
Cálculo del ángulo azimut:

$$z(h_s) = \sin^{-1} \left[\cos(\delta)(n) \frac{\sin(h_s)}{\cos(\alpha)(n)} \right] \dots \dots \dots (A4)$$

Tabla A.3: Cálculo del ángulo azimut en función de la hora solar.

h_s (hora solar)	Ángulo azimut (Grados)
-12	-8.29907E-14
-11	-69.70705394
-10	-75.6123743
-9	-75.71581947
-8	-74.05187271
-7	-71.34969505
-6	-67.692556
-5	-62.88818194

-4	-56.50733017
-3	-47.83127628
-2	-35.84248325
-1	-19.65374995
0	0
1	19.65374995
2	35.84248325
3	47.83127628
4	56.50733017
5	62.88818194
6	67.692556
7	71.34969505
8	74.05187271
9	75.71581947
10	75.6123743
11	69.70705394
12	8.29907E-14



Gráfica A.2: Variación del ángulo azimut para el día 21 de Diciembre.

Cálculo del ángulo de incidencia:

Se considera que el ángulo de inclinación del concentrador es el mismo que el de altura solar ($\beta=\alpha$). Del mismo modo el ángulo azimut del concentrador se considera igual al de altura solar ($\alpha_w=z$).

Por lo tanto:

$$\cos(AI) = \cos(\alpha) \cos(z - \alpha_w) \sin(\alpha) + \sin(\alpha) \cos(\alpha) \dots \dots \dots (A5)$$

$$AI = \arcsin(\cos(\alpha) \cos(z - \alpha_w) \sin(\alpha) + \sin(\alpha) \cos(\alpha))$$

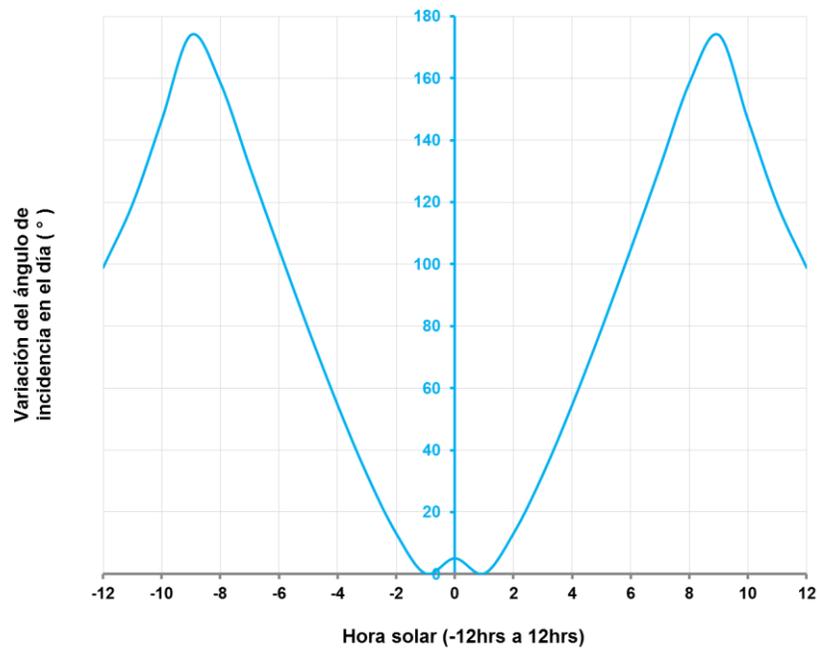
A lo largo del día 21 de Diciembre:

$$AI(h_s) = \arcsin(\cos(\alpha) \cos(z - \alpha_w) \sin(\alpha) + \sin(\alpha) \cos(\alpha))$$

Tabla A.4: Cálculo del ángulo de incidencia en función de la hora.

h_s (hora solar)	Ángulo de incidencia (Grados)
-12	98.89002381
-11	119.3152413
-10	146.5138695
-9	174.0205591
-8	158.548826
-7	131.4591358
-6	104.8776849
-5	79.09548512
-4	54.57999336
-3	32.12854788
-2	13.1247007
-1	0.19510323
0	5.099485555
1	0.19510323
2	13.1247007

3	32.12854788
4	54.57999336
5	79.09548512
6	104.8776849
7	131.4591358
8	158.548826
9	174.0205591
10	146.5138695
11	119.3152413
12	98.89002381



Gráfica A.3: Variación del ángulo de incidencia para el día 21 de Diciembre.

APÉNDICE B

Cálculos solares para el día 21 de Junio

Los cálculos se realizaron para Temixco, Morelos, se eligió el día 21 de Junio (solsticio de verano) como mes de diseño. Las consideraciones específicas de los cálculos se pueden verificar en el capítulo 2.

Variables de Geo-localización.

L (Latitud del lugar)= 19°

LI (Longitud del lugar)= 99.22°

Ls (Meridiano estándar para la zona horaria local)=105°

n= (Día juliano)=172

Cálculo de la declinación:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \dots \dots \dots (B1)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + (172)) \right]$$

$$\delta = 23.45^\circ$$

La hora solar (h_s) se define como intervalo de tiempo entre dos regresos sucesivos del sol al meridiano local, dicho ángulo es igual a cero incrementándose a partir de ese punto 360/24 o 15 grados por.

$$h_s = (-180^\circ \text{ a } 180^\circ) \dots \dots \dots (B2)$$

Tabla B.1: Conversión de hora solar.

h_s (Grados)	h_s (Radianes)	h_s (Hora solar)
-180.00	-3.14	-12.00
-165.00	-2.88	-11.00
-150.00	-2.62	-10.00
-135.00	-2.36	-9.00
-120.00	-2.09	-8.00
-105.00	-1.83	-7.00
-90.00	-1.57	-6.00
-75.00	-1.31	-5.00
-60.00	-1.05	-4.00
-45.00	-0.79	-3.00
-30.00	-0.52	-2.00
-15.00	-0.26	-1.00
0.00	0.00	0.00 (Medio día solar)
15.00	0.26	1.00
30.00	0.52	2.00
45.00	0.79	3.00

60.00	1.05	4.00
75.00	1.31	5.00
90.00	1.57	6.00
105.00	1.83	7.00
120.00	2.09	8.00
135.00	2.36	9.00
150.00	2.62	10.00
165.00	2.88	11.00
180.00	3.14	12.00

Cálculo de la altura solar:

$$\sin(\alpha) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \dots \dots \dots (B3)$$

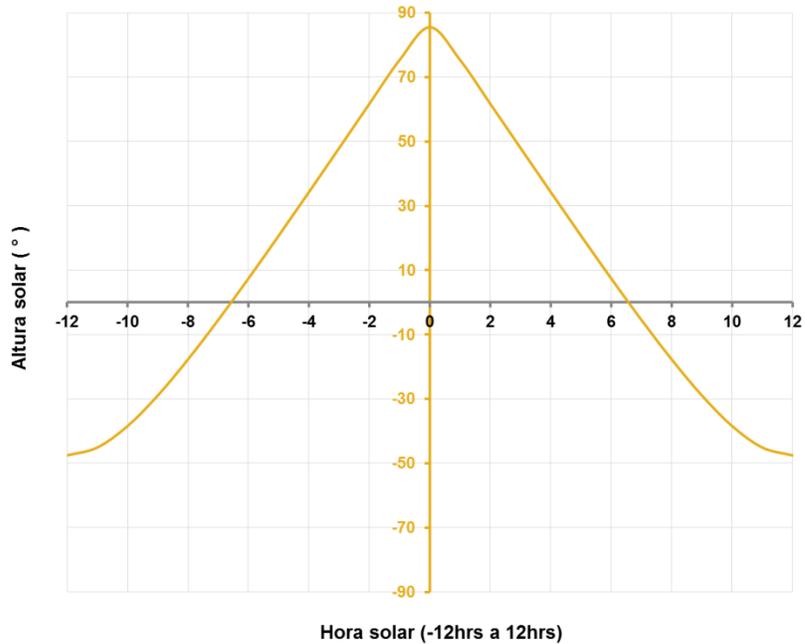
$$\alpha(h_s) = \text{asin}(\cos(L) \cos(\delta) \cos(h_s) + \sin(L) \sin(\delta))$$

Tabla B.2: Cálculo de la altura solar en función de la hora.

h_s (hora solar)	Altura solar (Grados)
-12	-47.54612406

-11	-45.09387581
-10	-38.43384436
-9	-28.93178083
-8	-17.7059345
-7	-5.44808445
-6	7.44310439
-5	20.73390899
-4	34.27882905
-3	47.97605794
-2	61.7295004
-1	75.3289972
0	85.54229094
1	75.3289972
2	61.7295004
3	47.97605794
4	34.27882905
5	20.73390899
6	7.44310439
7	-5.44808445
8	-17.7059345
9	-28.93178083
10	-38.43384436

11	-45.09387581
12	-47.54612406



Gráfica B.1: Variación de la altura solar para el día 21 de Junio.

Cálculo del ángulo azimut:

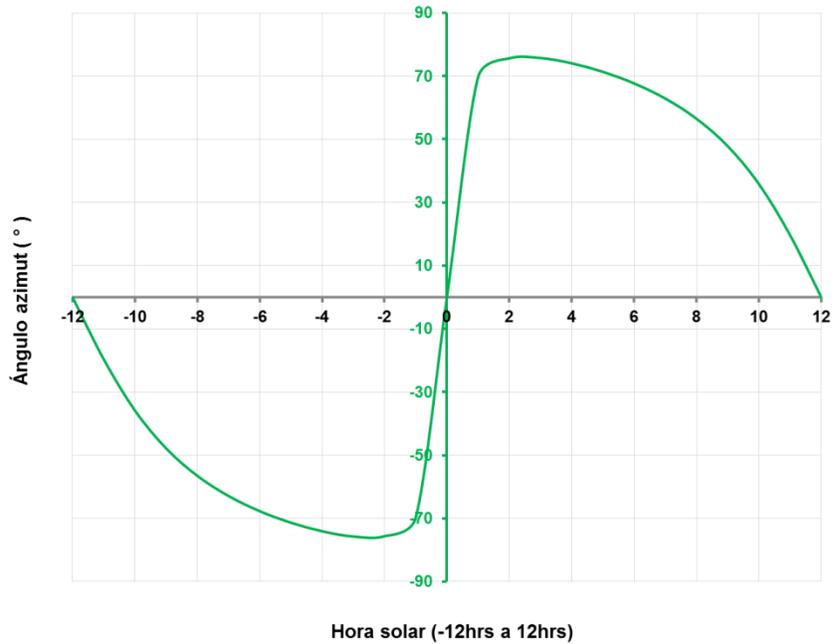
$$z(h_s) = \sin^{-1} \left[\cos(\delta)(n) \frac{\sin(h_s)}{\cos(\alpha)(n)} \right] \dots \dots \dots (B4)$$

Tabla B.3: Cálculo del ángulo azimut en función de la hora.

h_s(hora solar)	Ángulo azimut (Grados)
-------------------------------------	-------------------------------

-12	-9.5405E-15
-11	-19.65420202
-10	-35.84319254
-9	-47.83207979
-8	-56.50816076
-7	-62.88903028
-6	-67.69344121
-5	-71.35065624
-4	-74.05297673
-3	-75.71719299
-2	-75.61431497
-1	-69.71056922
0	0
1	69.71056922
2	75.61431497
3	75.71719299
4	74.05297673
5	71.35065624
6	67.69344121
7	62.88903028
8	56.50816076

9	47.83207979
10	35.84319254
11	19.65420202
12	9.5405E-15



Gráfica B.2: Variación del ángulo azimut para el día 21 de Junio.

Cálculo del ángulo de incidencia:

Se considera que el de inclinación del concentrador es el mismo que el de altura solar ($\beta=\alpha$) y el ángulo azimut del concentrador es el mismo que el solar ($\alpha_w=z$):

Por lo tanto:

$$\cos(AI) = \cos(\alpha) \cos(z - \alpha_w) \sin(\alpha) + \sin(\alpha) \cos(\alpha) \dots \dots \dots (B5)$$

$$AI = \arcsin(\cos(\alpha) \cos(z - \alpha_w) \sin(\alpha) + \sin(\alpha) \cos(\alpha))$$

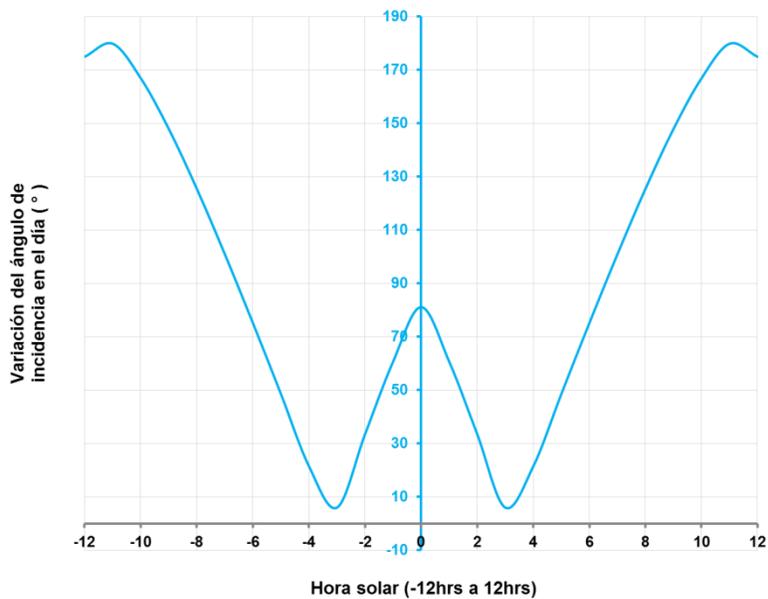
A lo largo del 21 de Junio:

$$AI(h_s) = \arcsin(\cos(\alpha) \cos(z - \alpha_w) \sin(\alpha) + \sin(\alpha) \cos(\alpha))$$

Tabla B.4: Cálculo del ángulo de incidencia en función de la hora.

h_s (hora solar)	Ángulo de incidencia (Grados)
-12	174.8805166
-11	179.7850131
-10	166.8586103
-9	147.8544832
-8	125.4027906
-7	100.8870905
-6	75.10471278
-5	48.52310357
-4	21.43326347
-3	5.96119431
-2	33.46807924
-1	60.66707284
0	81.09366032

1	60.66707284
2	33.46807924
3	5.96119431
4	21.43326347
5	48.52310357
6	75.10471278
7	100.8870905
8	125.4027906
9	147.8544832
10	166.8586103
11	179.7850131
12	174.8805166



Gráfica B.3: Variación del ángulo de incidencia para el día 21 de Junio.

APÉNDICE C

Ángulos solares para un año

Los cálculos se efectuaron para la localidad de Temixco, Morelos. En ellos se aprecia la variación de los ángulos solares en a lo largo de un año Las consideraciones de los cálculos se pueden verificar en el capítulo 2.

Variables de Geo-localización:

L (Latitud del lugar)= 19°

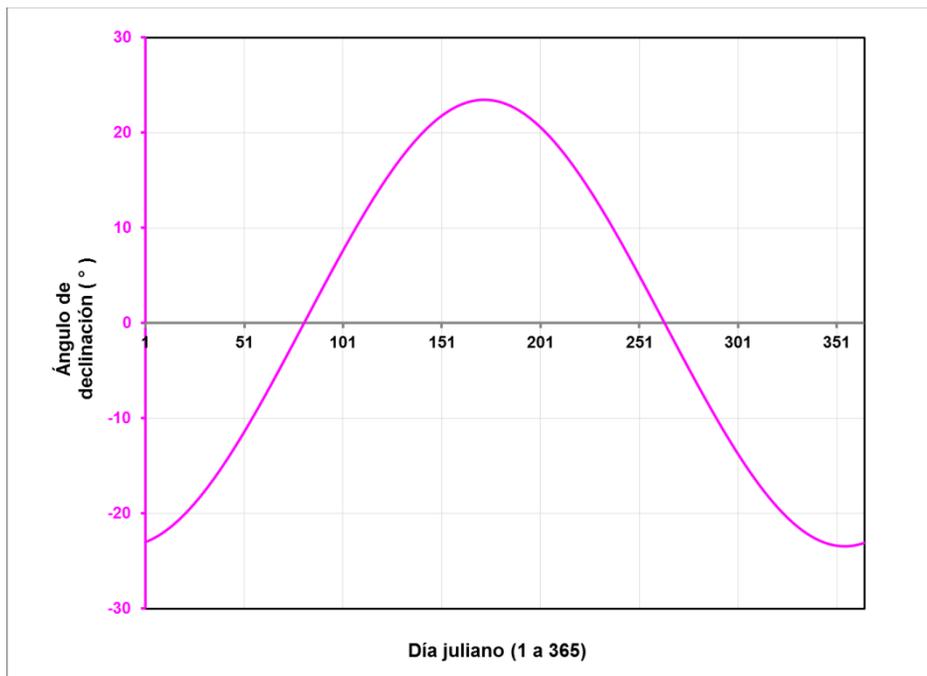
LI (Longitud del lugar)= 99.22°

Ls (Meridiano estándar para la zona horaria local)= 105°

n= Día juliano

Cálculo de la declinación:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \dots \dots \dots (C1)$$



Gráfica C.1: Variación de la declinación solar a lo largo del año.

Cálculo de la altura solar:

Para los cálculos se considera la hora solar al medio día solar.

$$h_s = 0$$

$$\sin(\alpha) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \dots \dots \dots (C2)$$

$$\alpha(n) = 47.54^\circ$$

Cálculo del ángulo azimut:

$$z(n) = \sin^{-1} \left[\cos(\delta)(n) \frac{\sin(h_s)}{\cos(\alpha)(n)} \right] \dots \dots \dots (C3)$$

Angulo de amanecer y atardecer del sol:

Este ángulo es negativo al amanecer y positivo al atardecer:

$$\sin(\alpha) = \sin(0) = 0 = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h_s) \dots \dots \dots (C4)$$

$$\cos(h_s) = - \frac{\sin(L) \sin(\delta)}{\cos(L) \cos(\delta)}$$

$$\cos(h_s) = - \tan(L) \tan(\delta)$$

$$h_s = 81.40^\circ$$

Tiempo desde el mediodía solar:

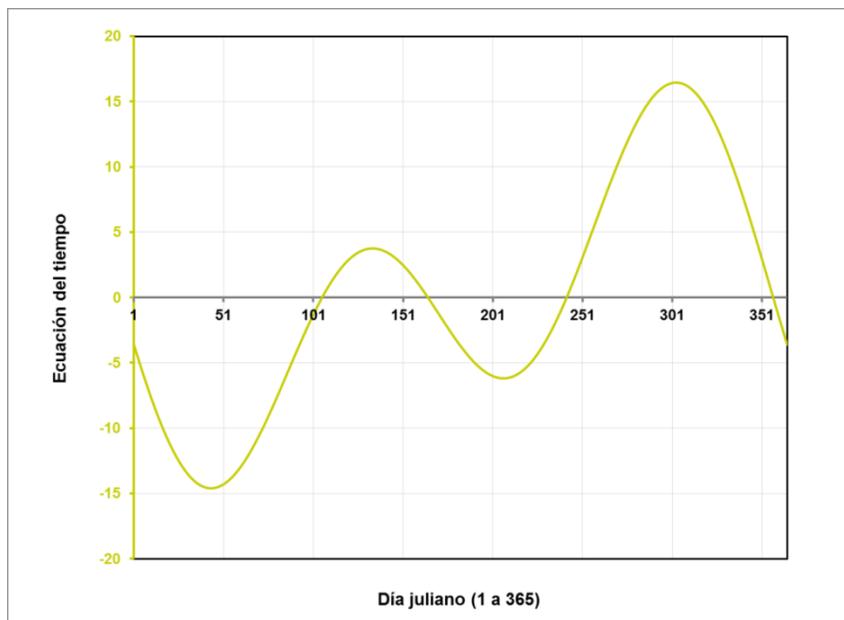
$$TDMS = h_s \left(4 \frac{\text{min}}{\text{grados}} \right) \dots \dots \dots (C5)$$

$$TDMS = 5:25:36.45 \text{ hhmss}$$

Por los cálculos el amanecer será a las 12:00 del mediodía solar, menos el TDMS para el día juliano seleccionado y el atardecer será a las 12:00 del mediodía solar más el TDMS del mismo día. **Se utilizó la ecuación del tiempo para convertir la hora solar del amanecer y atardecer en hora local.**

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \dots \dots \dots (C6)$$

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) [m] \dots \dots \dots (C7)$$



Gráfica C.2: Ecuación del tiempo a lo largo del año

Duración del día:

$$LD = \frac{2(h_s)}{15 \frac{\text{grados}}{\text{hr}}} \dots \dots \dots (C8)$$

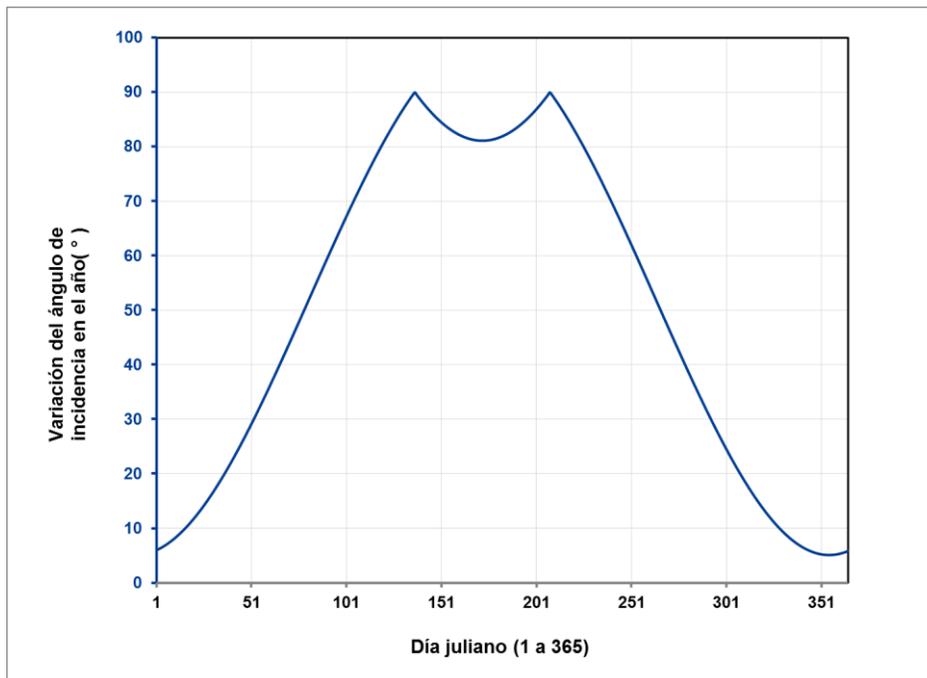
$$LD = 10:51:12.9 \text{ hhhmmss}$$

Ángulo de incidencia en el concentrador a lo largo del año:

Se considera que el de inclinación del concentrador es el mismo que el de altura solar ($\beta=\alpha$) y el ángulo azimut del concentrador es el mismo que el solar ($\alpha_w=z$):

Por lo tanto:

$$\cos(AI) = \cos(\alpha) \cos(z - \alpha_w) \sin(\alpha) + \sin(\alpha) \cos(\alpha) \dots \dots \dots (C9)$$



Gráfica C.3: Variación del ángulo de incidencia en función del día.

APÉNDICE D

Coeficiente de concentración geométrica y temperatura máxima teórica en función de la concentración.

Consideraciones de cálculo:

1. Se considera la temperatura de la superficie del sol.
2. Los alrededores del volumen de control están a temperatura ambiente.

Se definen las variables y constantes para el cálculo:

$$T_{\text{sol}} = 5726.85 \text{ °C}$$

$$k = 10^3$$

$$\text{Radio del sol } (r_{\text{sol}}) = 695500 \text{ km } (695500000 \text{ m})$$

$$\text{Constante de Stefan-Boltzmann } (\sigma) = 5.670410^{-8} \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-4}$$

$$\text{Distancia entre la tierra y el sol } (D_{\text{Tierra-Sol}}) = 93000 \text{ km } (93000000 \text{ m})$$

Radiación emitida por el sol:

$$Q_{\text{sol}} = 4\pi(Q_{\text{sol}})^2\sigma(T_{\text{sol}})^4 \dots \dots \dots (D1)$$

$$Q_{\text{sol}} = 4.467 \times 10^{23} \text{ kW}$$

Radiación que llega en el área de apertura del concentrador:

Dimensiones del concentrador parabólico:

$$D \text{ (Diámetro)} = 3.1 \text{ m}$$

$$P \text{ (Profundidad)} = 0.5 \text{ m}$$

Área del concentrador:

$$A_{\text{con}} = \frac{2\pi}{3} \frac{D^2}{8P} \left[\sqrt{\left(\frac{D^2}{4} + \left(\frac{D^2}{8P} \right)^2 \right)^3} - \left(\frac{D^2}{8P} \right)^3 \right] \dots \dots \dots (D2)$$

$$A_{\text{con}} = 8.28 \text{ m}^2$$

Área de apertura del concentrador:

$$A_{\text{apc}} = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

$$A_{\text{apc}} = 7.54 \text{ m}^2$$

Radiación incidente en el área de apertura del concentrador:

$$Q_{\text{Sol-Concentrador}} = \frac{A_{\text{con}}}{4\pi(D_{\text{Tierra-Sol}})^2} (Q_{\text{sol}}) \dots \dots \dots (D3)$$

$$Q_{\text{Sol-Concentrador}} = 11.98 \text{ kW}$$

Radiación solar incidente en el receptor:

Ángulo medio del sol:

$$\theta_{\text{medio}} = \frac{r_{\text{sol}}}{D_{\text{Tierra-Sol}}} \dots \dots \dots (D4)$$

$$\theta_{\text{medio}} = 0.2663^\circ$$

Consideraciones y propiedades físicas del receptor:

η = Pérdidas debidas a la absorción, reflexión, etc.

τ = Fracción de la radiación incidente que llega a la apertura del receptor (0.5).

α_{receptor} = Absortividad del receptor (Recubrimiento SOLKOTE HI/SORB-II, 0.91).

ε = La emisividad del receptor en la región del infrarrojo (0.3).

$$\tau = (1 - \eta) = 0.5$$

$$Q_{\text{Sol-Receptor}} = \tau \alpha_{\text{receptor}} A_{\text{apc}} \sin(\theta_{\text{medio}})^2 \sigma T_{\text{sol}}^4 \dots \dots \dots (D5)$$

$$Q_{\text{Sol-Receptor}} = 5.45 \text{ kW}$$

Dimensiones del receptor:

Altura del receptor (A_{rec})= 0.003175 m

Diámetro del receptor (D_{rec})= 0.3 m

$$A_{\text{base}} = \pi \left(\frac{D_{\text{rec}}}{2} \right)^2 \dots \dots \dots (D6)$$

$$A_{\text{lad os}} = D_{\text{rec}} \pi A_{\text{rec}} \dots \dots \dots (D7)$$

$$A_{\text{receptor}} = A_{\text{base}} + A_{\text{lad os}} = 0.07367 \text{ m}^2$$

Perdidas de radiación en el receptor:

$$Q_{\text{receptor-perdidas}} = \varepsilon A_{\text{receptor}} \sigma T_{\text{receptor}}^4 \dots \dots \dots (D8)$$

Una fracción de la radiación solar que llega al receptor se extrae en forma de calor útil o se pierde por convección o conducción, el balance de energía en el receptor queda de la siguiente forma:

$$Q_{\text{sol-receptor}} = Q_{\text{receptor-perdidas}} + \eta Q_{\text{sol-receptor}} \dots \dots \dots (D9)$$

Como la temperatura ambiente es diferente de cero, la ecuación para obtener la temperatura teórica del receptor queda de la siguiente forma:

$$(1 - \eta) \tau \alpha_{\text{receptor}} A_{\text{apc}} \sin(\theta_{\text{medio}})^2 T_{\text{sol}}^4 = \varepsilon A_{\text{receptor}} T_{\text{receptor}}^4 \dots \dots \dots (D10)$$

Se asume $\eta=0.5$

Coefficiente de concentración geométrica:

Concentración real:

$$CR_{\text{geométrico}} = \frac{A_{\text{apc}}}{A_{\text{receptor}}} \dots \dots \dots (D11)$$

$$CR_{\text{geométrico}} = 102.44$$

Concentración ideal:

$$CR_{\text{ideal}} = \frac{1}{\sin(\theta_{\text{medio}})^2} \dots \dots \dots (D12)$$

$$CR_{\text{ideal}} = 4.631 \times 10^4$$

Temperatura teórica en el receptor:

$$T_{\text{receptor}} = T_{\text{sol}} \left[(1 - \eta) \tau \frac{\alpha_{\text{receptor}} CR_{\text{geométrico}}}{\varepsilon CR_{\text{ideal}}} \right]^{\frac{1}{4}} \dots \dots \dots (D13)$$

$$T_{\text{receptor}} = 941.40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como la T_{receptor} se acerca a la T_{sol} la temperatura más alta en el receptor es igual a T_{sol} , que es aproximadamente 6000K. Esta temperatura es sólo teórica y sólo podría ser alcanzada si no hay pérdidas de calor y la relación de concentración geométrica es igual a la ideal.

APÉNDICE E

Teorema de Rabl

El Teorema de Rabl (23) se entiende mediante una representación gráfica que se observa en la figura E.1. El experimento inicia imaginándose al sol como una esfera con radiación homogénea en toda su superficie (isótropa) de radio r_{sol} rodeada por una esfera de radio R que tiene una abertura de zona A y que admite la radiación a una superficie de atrás nombrada como A .

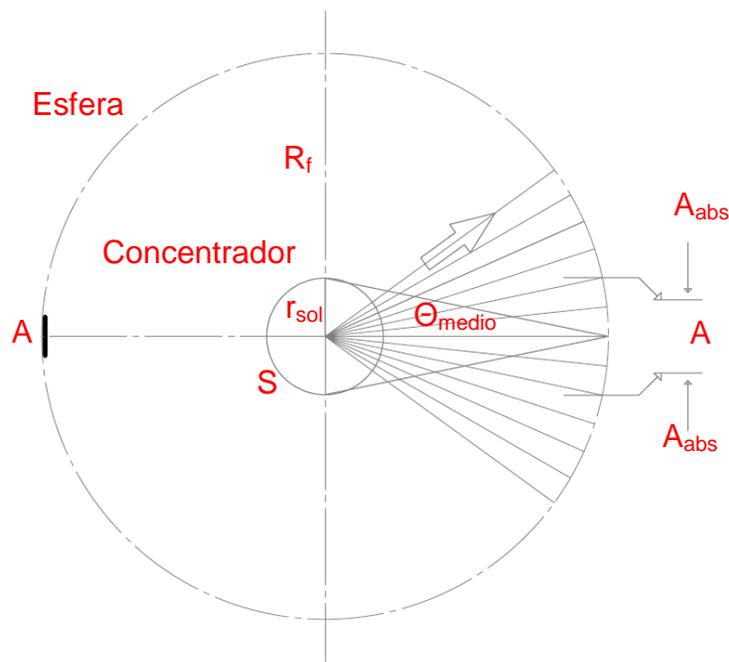


Figura E.1. Transferencia de la radiación solar del sol (S) a través de la abertura A del concentrador al absorbedor o receptor (A_{abs}).

El concentrador enfoca la luz que entra a través de A sobre un área más pequeña A_{abs} , dando como resultado una concentración teórica de:

$$CR_{teorica} = \frac{A}{A_{absorbedor}} \dots \dots \dots (E1)$$

Por lo anterior se asume que el concentrador centra toda la radiación que entra a A dentro del ángulo medio, (θ_{medio}), de la normal a A.

Como A/R^2 es pequeña, la radiación de la fuente S, que incide sobre A, se distribuye uniformemente en todos los ángulos entre 0 y θ_{medio} , y por lo tanto no hay radiación de la fuente S que quede fuera de θ_{medio} .

La radiación dispersada se elimina al asumir paredes negras a la temperatura del cero absoluto.

Para calcular la emisión de energía emitida por la fuente S y el absorbedor, se verifica la transferencia radiativa entre ambas, que deben ser iguales si están a la misma temperatura.

La potencia de energía radiante que emite la fuente S es entonces:

$$Q_s = 4\pi r^2 \sigma T_s^4 \dots \dots \dots (E2)$$

De la cual una fracción es:

$$F_{s-A} = \frac{A}{4\pi R^2} \dots \dots \dots (E3)$$

Para la radiación concentrada se asume que la óptica de concentración es perfecta, por lo tanto la radiación no se pierde entre la apertura y el receptor. Considerando lo anterior, la potencia radiada desde la fuente hasta el receptor está dada por la siguiente ecuación:

$$Q_{s-abs} = Q_s F_{s-A} = A \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \dots \dots \dots (E4)$$

Por lo que la cantidad de radiación absorbida es:

$$Q_{\text{abs}} = A_{\text{abs}} \sigma T_{\text{abs}}^4 \dots \dots \dots (E5)$$

La fracción de radiación que llega a la fuente ($E_{\text{abs-s}}$) no puede exceder a la unidad. Por lo tanto, la transferencia de energía radiativa desde el absorbedor a la fuente es:

$$Q_{\text{abs-s}} = E_{\text{abs-s}} A_{\text{abs}} \sigma T_{\text{abs}}^4 \dots \dots \dots (E6)$$

Con la consideración:

$$E_{\text{abs-s}} \leq 1 \dots \dots \dots (E7)$$

Si la fuente y el absorbedor (receptor) están a la misma temperatura, la segunda ley de la termodinámica establece que no puede haber ninguna transferencia neta de calor entre estos cuerpos. Por lo tanto, considerando $T_{\text{abs}}=T_s$, se deduce que:

$$Q_{s-\text{abs}} = Q_{\text{abs-s}} \dots \dots \dots (E8)$$

Por lo tanto:

$$A \frac{r^2}{R^2} = E_{\text{abs-s}} A_{\text{abs}} \dots \dots \dots (E9)$$

Por lo que se satisface la deducción de la concentración teórica:

$$CR_{teórica} = \frac{A}{A_{abs}} = \frac{R^2}{r^2} E_{abs-s} = \frac{E_{abs-s}}{\sin^2(\theta)} \dots \dots \dots (E10)$$

Como el máximo valor de E_{abs-s} es la unidad, la concentración debe satisfacer:

$$CR_{teorico} \leq \frac{1}{\sin^2(\theta)} \dots \dots \dots (E11)$$

Los colectores ideales tienen signo igual en la ecuación anterior.

APÉNDICE F

Coeficiente de concentración geométrica como función de la temperatura de operación

Consideraciones de cálculo:

1. Se considera la temperatura de la superficie del sol.
2. Los alrededores del volumen de control están a temperatura ambiente.

Se definen las variables y constantes para el cálculo:

$T_{\text{sol}} = 5726.85 \text{ } ^\circ\text{C}$

$k = 10^3$

Radio del sol (r_{sol}) = 695500 km (695500000 m)

Constante de Stefan-Boltzmann (σ) = $5.670410^{-8} \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-4}$

Distancia entre la tierra y el sol ($D_{\text{Tierra-Sol}}$) = 93000 km (93000000 m)

Radiación emitida por el sol:

$$Q_{\text{sol}} = 4\pi(Q_{\text{sol}})^2\sigma(T_{\text{sol}})^4 \dots \dots \dots (F1)$$

$$Q_{\text{sol}} = 4.467 \times 10^{23} \text{ kW}$$

Radiación que llega en el área de apertura del concentrador:

Dimensiones del concentrador parabólico:

D (Diámetro)= 3.1 m

P (Profundidad)= 0.5 m

Área del concentrador:

$$A_{\text{con}} = \frac{2\pi}{3} \frac{D^2}{8P} \left[\sqrt{\left(\frac{D^2}{4} + \left(\frac{D^2}{8P}\right)^2\right)^3} - \left(\frac{D^2}{8P}\right)^3 \right] \dots \dots \dots (F2)$$

$$A_{\text{con}} = 8.28 \text{ m}^2$$

Área de apertura del concentrador:

$$A_{\text{apc}} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \dots \dots \dots (F3)$$

$$A_{\text{apc}} = 7.54 \text{ m}^2$$

Radiación incidente en el área de apertura del concentrador:

$$Q_{\text{Sol-Concentrador}} = \frac{A_{\text{con}}}{4\pi(D_{\text{Tierra-Sol}})^2} (Q_{\text{sol}}) \dots \dots \dots (F4)$$

$$Q_{\text{Sol-Concentrador}} = 11.98 \text{ kW}$$

Radiación solar incidente en el receptor:

Ángulo medio del sol:

$$\theta_{\text{medio}} = \frac{r_{\text{sol}}}{D_{\text{Tierra-Sol}}} \dots \dots \dots (F5)$$

$$\theta_{\text{medio}} = 0.2663^\circ$$

Consideraciones y propiedades físicas del receptor:

η = Pérdidas debidas a la absorción, reflexión, etc.

τ = Fracción de la radiación incidente que llega a la apertura del receptor (0.5).

α_{receptor} = Absortividad del receptor (Recubrimiento SOLKOTE HI/SORB-II ,0.91).

ϵ = La emisividad del receptor en la región del infrarrojo (0.3).

$$\tau = (1 - \eta) = 0.5$$

$$Q_{\text{Sol-Receptor}} = \tau \alpha_{\text{receptor}} A_{\text{apc}} \sin(\theta_{\text{medio}})^2 \sigma T_{\text{sol}}^4 \dots \dots \dots (F6)$$

$$Q_{\text{Sol-Receptor}} = 5.45 \text{ kW}$$

Coeficiente de concentración geométrica:

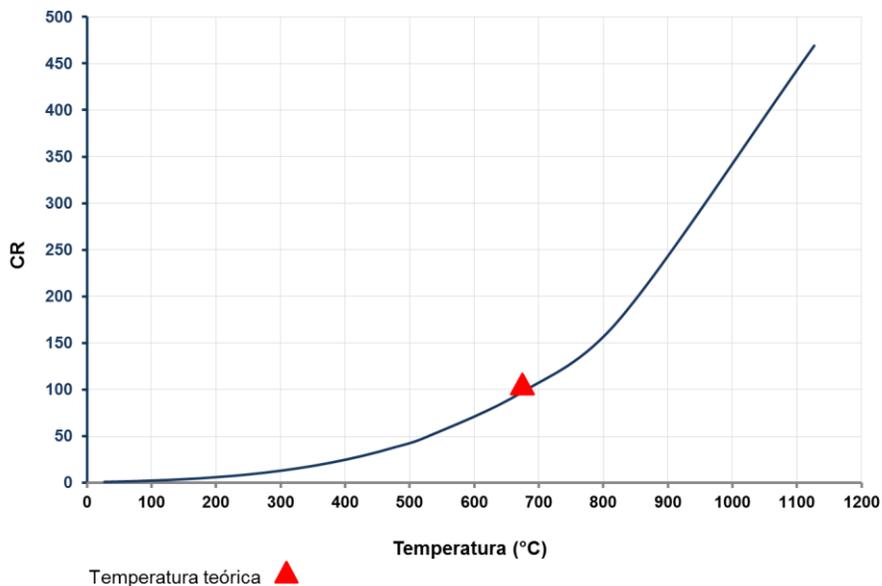
Concentración ideal:

$$CR_{ideal} = \frac{1}{\sin(\theta_{medio})^2} \dots \dots \dots (F7)$$

$$CR_{ideal} = 4.631 \times 10^4$$

Temperatura teórica en el receptor: Intervalo de relaciones de concentración (CR): 0, 1,2....500

$$T_{receptor}(CR) = T_{sol} \left[(1 - \eta) \tau \frac{\alpha_{receptor}}{\varepsilon} \frac{CR}{CR_{ideal}} \right]^{\frac{1}{4}} \dots \dots \dots (F8)$$



Gráfica F.1: Concentración como función de la temperatura de operación; el punto rojo marca la temperatura máxima que puede alcanzar el concentrador (686.42 °C) con una relación de concentración geométrica de 102.44.

APÉNDICE G

Destilación solar teórico

La destilación es uno de los principales métodos utilizados en la industria química para la concentración de disoluciones acuosas. Normalmente implica la separación de agua de una disolución mediante ebullición en un recipiente adecuado. Esta operación unitaria se lleva a cabo suministrando calor a una disolución para vaporizar al disolvente. El calor se suministra para proporcionar el calor latente de vaporización. Por la diferencia de temperatura entre el agua en ebullición y el medio ambiente las pérdidas de calor son grandes.

Para conocer el agua que se puede destilar con la energía concentrada se presenta un análisis térmico siguiendo la ley del enfriamiento de Newton.

Se considera el calor suministrado por el concentrador en un intervalo de tiempo:

$$dQ = Pdt \dots \dots \dots (G1)$$

La ley del enfriamiento de Newton enuncia, que cuando la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente no es demasiado grande, el calor que se trasfiere por unidad de tiempo hacia el cuerpo o desde el cuerpo es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y su medio externo.

El calor que se trasfiere al ambiente se expresa por la siguiente ecuación; donde α es el coeficiente de intercambio de calor, A_{receptor} es el área del receptor, T_r es la temperatura del agua y T_{amb} es la temperatura ambiente.

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha A_{\text{receptor}} (T_r - T_{\text{amb}}) \dots \dots \dots (G2)$$

Si la temperatura del receptor es mayor a la del medio ambiente, el cuerpo pierde calor en un tiempo definido, por lo que disminuye la temperatura del receptor.

El calor asociado al incremento de la temperatura del agua se expresa con la siguiente ecuación:

$$Q_{H_2O} = (m)(c)(dT) \dots \dots \dots (G3)$$

Considerando el incremento de la temperatura del agua (G3) y el calor suministrado en un intervalo de tiempo (G1), el balance de energía de acuerdo a la ley del enfriamiento de Newton (G2) es:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(\alpha A_{receptor} - P)(T_{amb} - T_r)}{mc} \dots \dots \dots (G4)$$

Despejando dt con las condiciones iniciales $t=0$ y la temperatura ambiente a 25 °C, se integra la ecuación diferencial.

$$\frac{dT}{\frac{(\alpha A_{receptor} - P)(T_{amb} - T_r)}{mc}} = dt \dots \dots \dots (G5)$$

$$\int_{T_{amb}}^{T_r} \frac{dT}{\frac{(\alpha A_{receptor} - P)(T_{amb} - T_r)}{mc}} = \int_0^t dt \dots \dots \dots (G6)$$

$$t = -\frac{mc}{\alpha A} \ln \left(\frac{P - \alpha A}{mc} (T_r - T_{amb}) \right) + \frac{mc}{\alpha A} \ln \left(\frac{P}{mc} \right) \dots \dots \dots (G7)$$

$$t = \frac{\ln \left(\frac{P}{mc} \right) mc}{\alpha A} - \frac{\ln \left(\frac{-(P - \alpha A)(T_{amb} - T_r)}{mc} \right) mc}{\alpha A} \dots \dots \dots (G8)$$

Se despeja la temperatura del agua (T_r) contenida en el receptor:

$$T_r = T_a + \frac{P}{\alpha A} \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha A}{mc}(t)\right) \right) \dots \dots \dots (G9)$$

Considerando que la potencia concentrada en el receptor es alta y que la temperatura del agua en su interior se incrementa desde la temperatura ambiente hasta que llega a la ebullición, se despeja el tiempo que tarda en llegar a esa condición:

$$T_r = 100^\circ\text{C}$$

$$t_1 = -\frac{mc}{\alpha A} \ln\left(1 - \frac{\alpha A}{P}(T_r - T_{\text{amb}})\right) \dots \dots \dots (G10)$$

La temperatura ambiente se incrementa hasta los 100 °C y se mantiene constante. Como el agua al estar a 100°C se empieza a evaporar se ingresa en el balance de energía el calor de evaporación del agua, la masa de agua a evaporar y el calor trasferido al ambiente por la ley del enfriamiento de Newton.

$$P dt = L_v dm_e + \alpha A(100 - T_{\text{amb}}) \dots \dots \dots (G11)$$

Se despeja la masa destilada para un tiempo $t > t_1$, donde m_e es la masa de agua evaporada y m es la masa inicial:

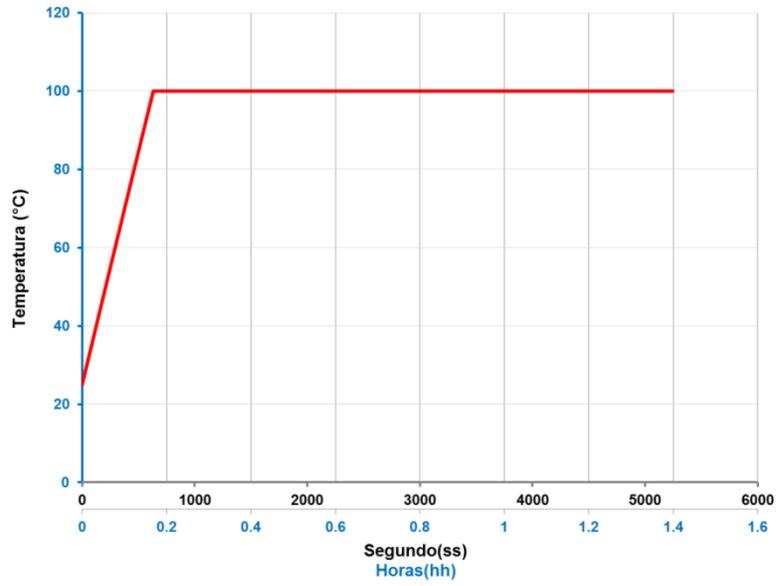
$$m_e = \frac{(P + \alpha A(T_{amb} - 100))(t - t_1)}{L_v} \dots \dots \dots (G12)$$

El receptor se diseñó para contener un volumen de 8 litros de agua. En la tabla G.1 se presentan los cálculos de destilado teórico para diferentes secciones y relaciones de concentración del equipo.

Tabla G.1: Cálculos de destilado teórico para diferentes secciones recubiertas del concentrador.

Sección recubierta del concentrador	A _{sec} (m ²)	Potencia del concentrador, P (kW).	Tiempo en que se llega a los 100 °C, t ₁ =s.	Tiempo en que se evaporan los 8 litros de agua(s).
16	7.54	4.42	606 (10.11 m)	5034 (1.39 hr)
8	3.77	2.21	1162 (19.11 m)	9759 (2.71 hr)
6	2.83	1.66	1564 (26.07 m)	13247 (3.67 hr)
4	1.88	1.10	2389 (39.82 m)	20569 (5.71 hr)
2	0.94	0.55	5054.14 (1.40 hr)	45909 (12.75 hr)

En la gráfica G.1 se puede ver el cálculo del destilado teórico para 16 secciones del concentrador (A_{sec}=7.54 m²). La potencia teórica suministrada por el concentrador al receptor es de 4.42 kW, con una temperatura ambiente inicial de 25 °C. Con la energía concentrada en el receptor se alcanzan los 100 °C en 606 s (10 minutos) y se logran destilar los 8 litros de agua en 5034 s (1.39 horas).



Gráfica G.1: Incremento de la temperatura del agua en el recipiente.

APÉNDICE H

Calculo de la transmisión mecánica azimut y altura solar

Eje azimutal

Para el eje azimutal, el par máximo que tiene que dar el motor está dado por la suma del momento necesario para que el concentrador gire en la base inferior de del mecanismo de seguimiento y a su vez pueda contener el momento máximo que provoca el viento sobre el concentrador.

La estructura en el eje azimutal tiene un radio de 1.5 m y un peso de 60 kg. Con esta información se calcula el momento torsional del eje:

$$M_t = F(r) \dots \dots \dots (H1)$$

Para un seguimiento preciso del sol en el eje azimutal, se requieren bajas velocidades de seguimiento. Considerando que los motores comerciales tienen velocidades de transmisión estandarizadas y que el sol se mueve 15° cada hora, se calculan las HP del motor considerando 1.25 rad/segundo.

$$Hp = \frac{(M_t)(R. P. M)}{9.55} \dots \dots \dots (H2)$$

Conociendo las HP y considerando un motor de 127 v se calcula la corriente necesaria del motor:

$$I = \frac{(Hp)(746)}{(V)(N)(Fp)} \dots \dots \dots (H3)$$

Despreciando las pérdidas por rozamiento en la transmisión y de rendimiento del motor por disipación de calor, el momento de torsión o par de torsión fue de 882 N m, 0.15 Hp y una corriente de 1.26 A.

Por los cálculos anteriores, se seleccionó un motorreductor comercial de la compañía GEARMOTOR de 12 RPM, 0.92 Hp, 3.6 A y una potencia de 691.290 W.

Eje de altura solar

Para el eje de altura solar, el par máximo que tiene que dar el motor, está dado por la suma del momento necesario para que el concentrador gire en el eje de altura solar, considerando el peso del receptor, el contrapeso, los sensores, y el momento máximo que provoca el viento sobre el concentrador.

Los puntos de sujeción de la transmisión del mecanismo de altura solar al eje de transmisión, tienen una distancia media de 1.5 m. Con esta información y considerando los 70 Kg que debe soportar el eje de altura solar se calcula el momento torsional:

$$M_t = F(r) \dots \dots \dots (H1)$$

Para evitar movimientos bruscos en el seguimiento el equipo se diseñó con bajas velocidades de seguimiento, para el cálculo de las HP del motor, se consideraron 12 RPM o 1.25 rad/segundo.

$$Hp = \frac{(M_t)(R. P. M)}{9.55} \dots \dots \dots (H2)$$

Con las HP obtenidas y considerando un motor de 127 v se calculó la corriente necesaria del motor:

$$I = \frac{(Hp)(746)}{(V)(N)(Fp)} \dots \dots \dots (H3)$$

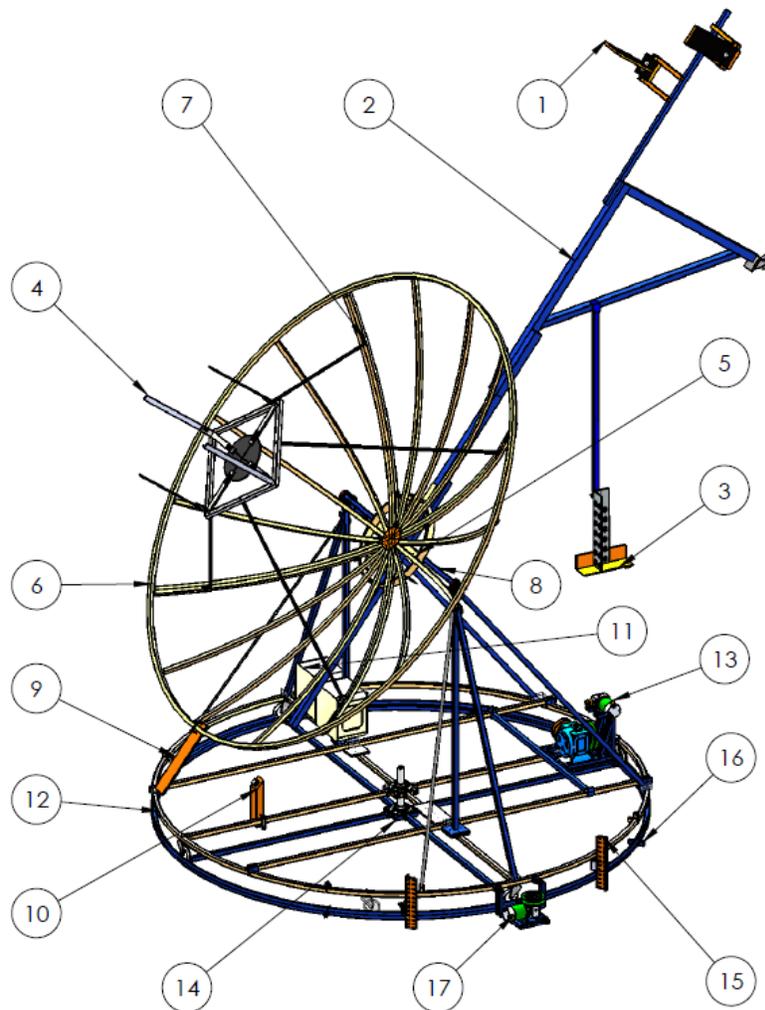
Los valores de diseño del motor del seguimiento azimut son: 1029 Nm, 0,15 Hp y 1.48 A. Por lo anterior se seleccionó un motorreductor con las mismas características que el de seguimiento azimut.

Para garantizar la precisión en el seguimiento de altura solar y para proteger al motorreductor de sobrecargas de viento en el concentrador, se acoplo a la transmisión un reductor de velocidad de 1HP. Con lo anterior se logró mayor estabilidad en el seguimiento de altura solar.

APÉNDICE I

Planos de construcción del equipo

A continuación se presentan las dimensiones y materiales utilizados en la construcción del sistema térmico de concentración. Los planos de diseño y construcción se realizaron en 3D.



Vista isométrica (escala: 1:30)

Figura I.1: Descripción de los componentes principales del sistema de concentración solar.

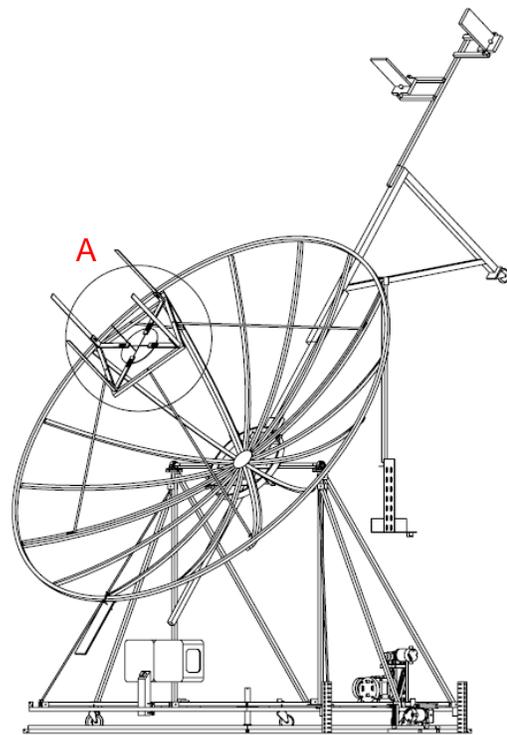
Tabla I.1: Lista de componentes del sistema de concentración.

Número de componente	Descripción
1	Sensores del mecanismo de altura solar (SAS)
2	Contrapeso y transmisión del mecanismo de SAS
3	Final de carrera “Este” del mecanismo de SAS
4	Receptor y su estructura de soporte
5	Prensa unión del concentrador
6	Concentrador solar parabólico
7	Brazos de ajuste del receptor al concentrador
8	Eje de transmisión del mecanismo de altura solar
9	Final de carrera “Oeste” del SAS
10	Interruptor de seguridad del SAS
11	Circuito comparador
12	Base superior del mecanismo de seguimiento azimut (SAZ)
13	Arreglo motorreductor-reductor del SAS
14	Eje unión de las bases del SAS Y SAZ
15	Final de carrera Este y Oeste del SAZ
16	Base inferior del mecanismo de seguimiento azimut
17	Motorreductor del SAZ

Receptor y su estructura de soporte



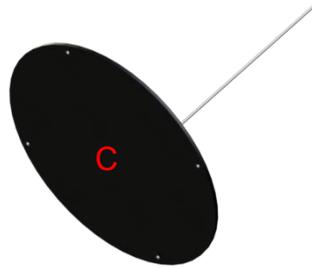
Vista a detalle
(escala: 1:20)



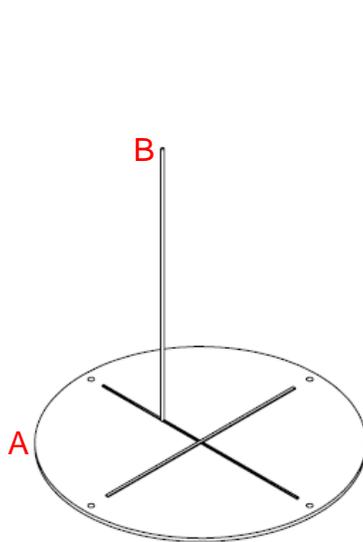
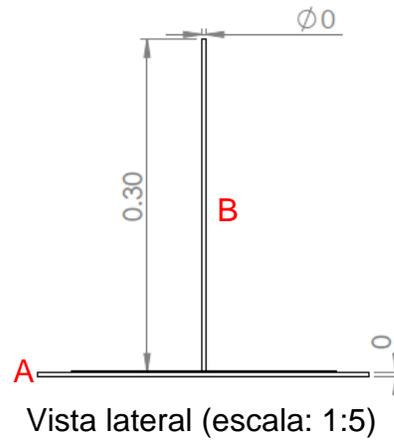
Escala: 1:10

Figura I.2: Vista a detalle del receptor en el concentrador.

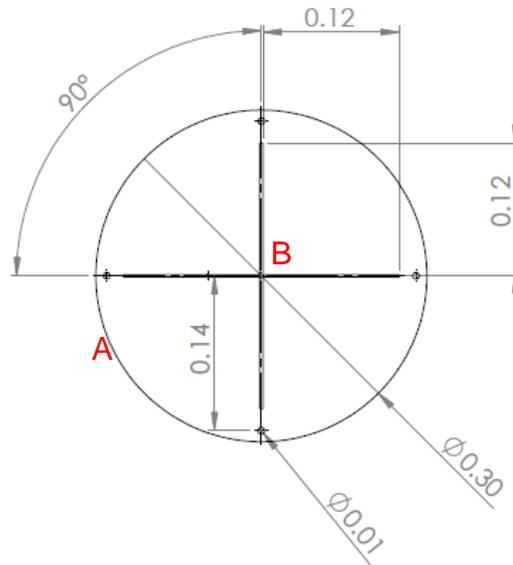
Receptor



Escala: 1:8



Vista isométrica (escala: 1:5)



Plano I.1: Dimensiones del receptor (cotas en metros).

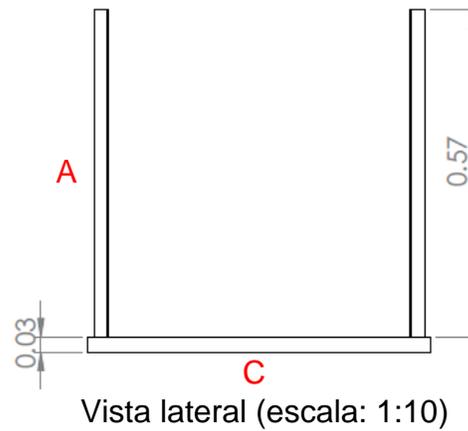
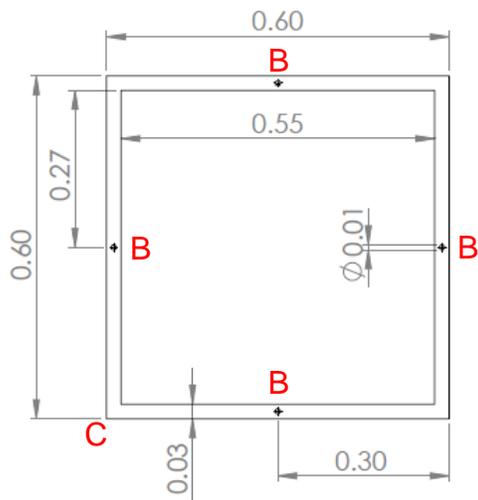
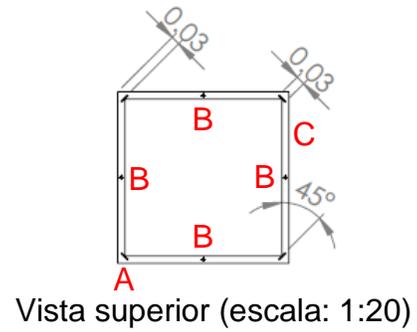
Tabla I.2: Componentes estructurales del receptor.

Placa de acero inoxidable de 0.003175 m de espesor	A
Solera redonda con diámetro de 0.003175 m	B
Película selectiva SOLKOTE HI/SORB-II	C

Estructura de soporte del receptor



Escala: 1:20

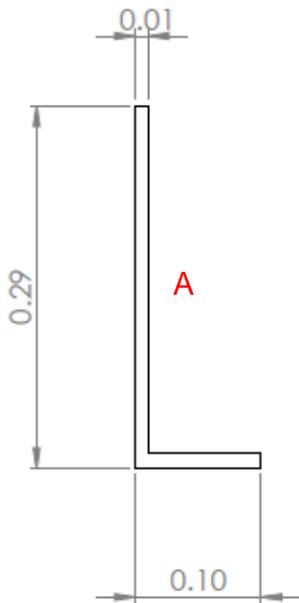


Plano I.2: Dimensiones de la estructura de soporte del receptor (cotas en metros).

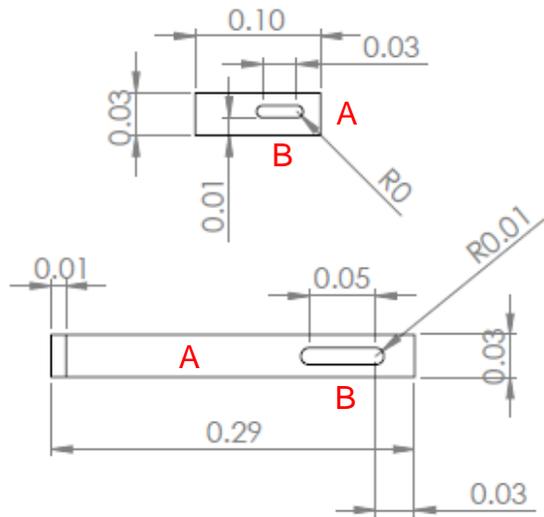
Tabla I.3: Componentes de la estructura de soporte del receptor.

Solera de acero	A
Tornillos galvanizados de 0.01m x 0.03m	B
Tubular cuadrado de acero	C

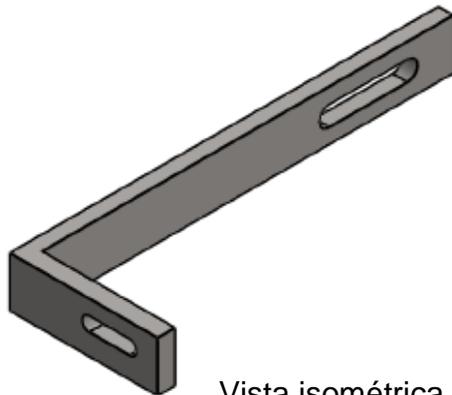
Soportes ajustables de la distancia focal del receptor.



Vista lateral (escala: 1:5)



Vista inferior y superior (escala: 1:5)



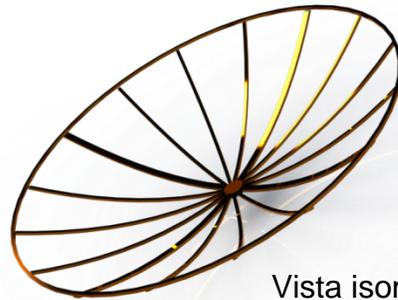
Vista isométrica (escala: 1:3)

Plano I.3: Dimensiones del soporte ajustable de la distancia focal del receptor (cotas en metros).

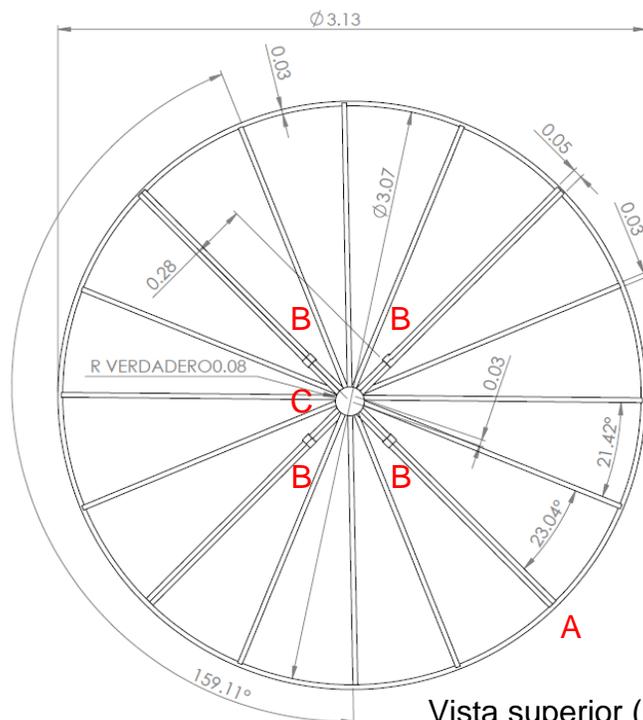
Tabla I.4: componentes de los soportes ajustables de la distancia focal del receptor

Solera de acero	A
Tornillos galvanizados de 0.00635m x 0.03m	B

Concentrador solar parabólico.



Vista isométrica
(escala: 1:35)



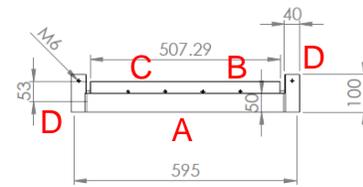
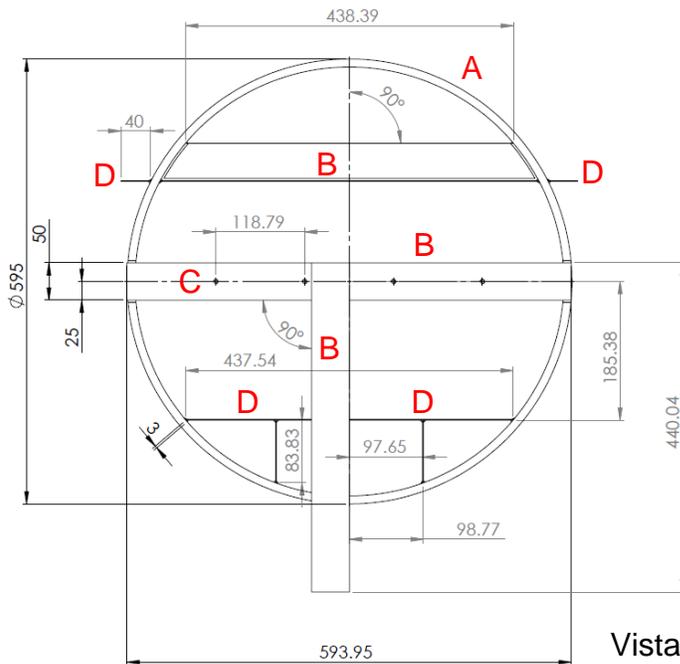
Vista superior (escala: 1:50)

Plano I.4: Dimensiones del concentrador (cotas en metros).

Tabla I.5: Componentes del concentrador.

Antena satelital reciclada fabricada en aluminio	A
Tornillos galvanizados de 0.0079375m x 0.031175m	B
Placa de acero de 0.003175 m de espesor	C

Prensa unión del concentrador.



Vista lateral (escala: 1:20)

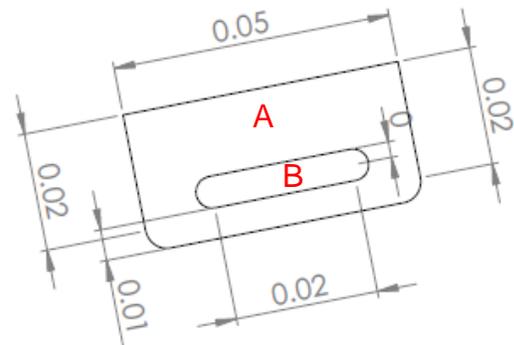
Vista superior (escala: 1:10)

Plano I.5: Dimensiones de la prensa unión del concentrador (cotas en milímetros).

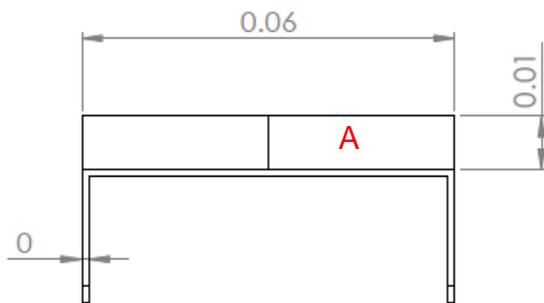
Tabla I.6: Componentes de la prensa unión del concentrador.

Rolado de solera de acero (0.0079375m de espesor)	A	Tornillos galvanizados de 0.0079375 m x 0.0508m	C
Solera de acero inoxidable (0.0079375m de espesor)	B	Solera de acero inoxidable (0.003175 m de espesor)	D

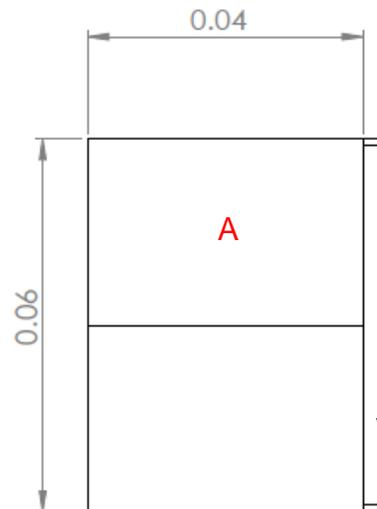
Conexión de la prensa unión y el concentrador.



Vista lateral (escala: 1:1)



Vista frontal (escala: 1:1)



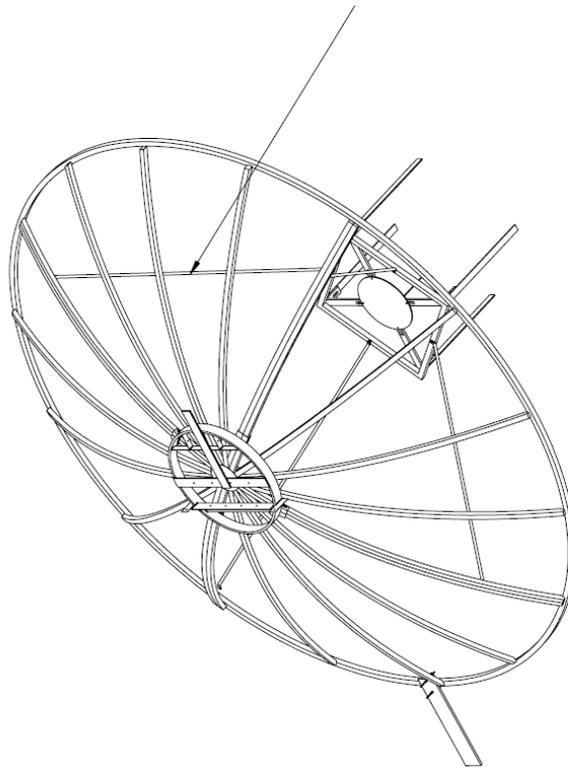
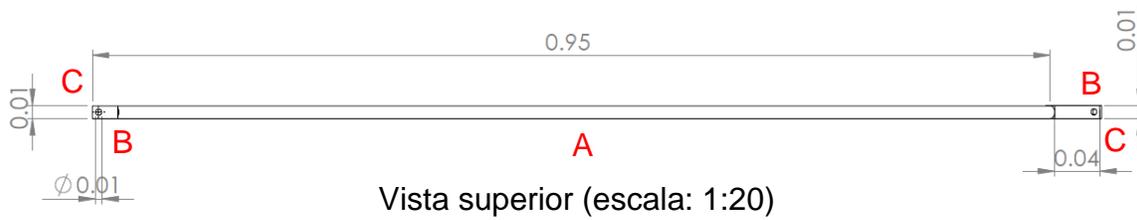
Vista superior (escala: 1:1)

Plano I.6: Dimensiones de las conexiones de la prensa unión y el concentrador (cotas en metros).

Tabla I.7: Componentes de construcción de las conexiones de la prensa unión y el concentrador.

Placa metálica de 0.0015875 m de espesor	A
Tornillos galvanizados de 0.0079375 m x 0.0635 m	B

Brazos de ajuste del receptor al concentrador.

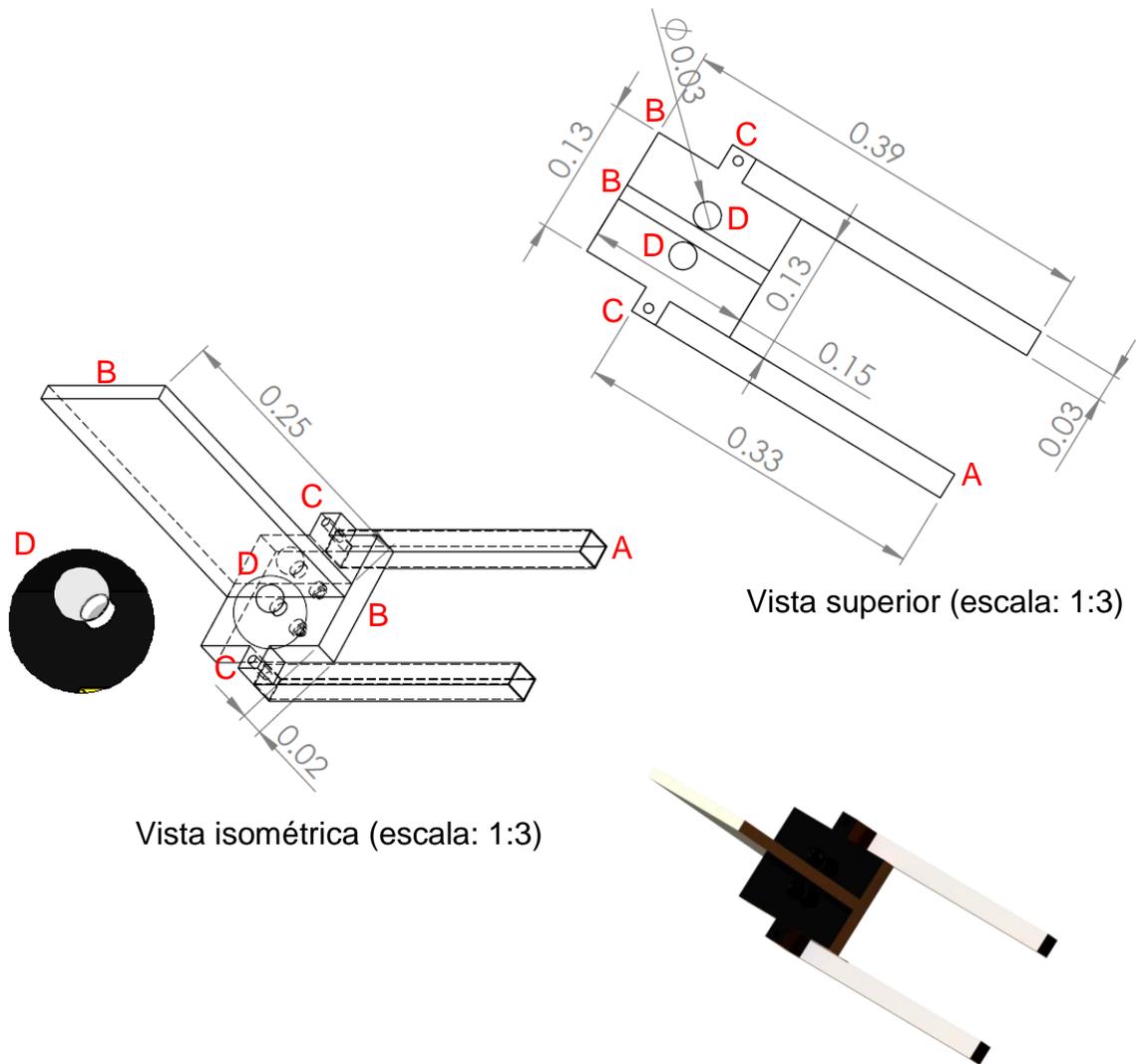


Plano I.7: Dimensiones de los brazos de ajuste del receptor al concentrador (cotas en metros)

Tabla I.8: Componentes estructurales de los brazos de ajuste del receptor al concentrador.

Tubo de aluminio de 0.0127 m de diámetro	A
Tornillos galvanizados de 0.00635m x 0.03175m	B
Solera de 0.00635 m de espesor	C

Sensor horizontal

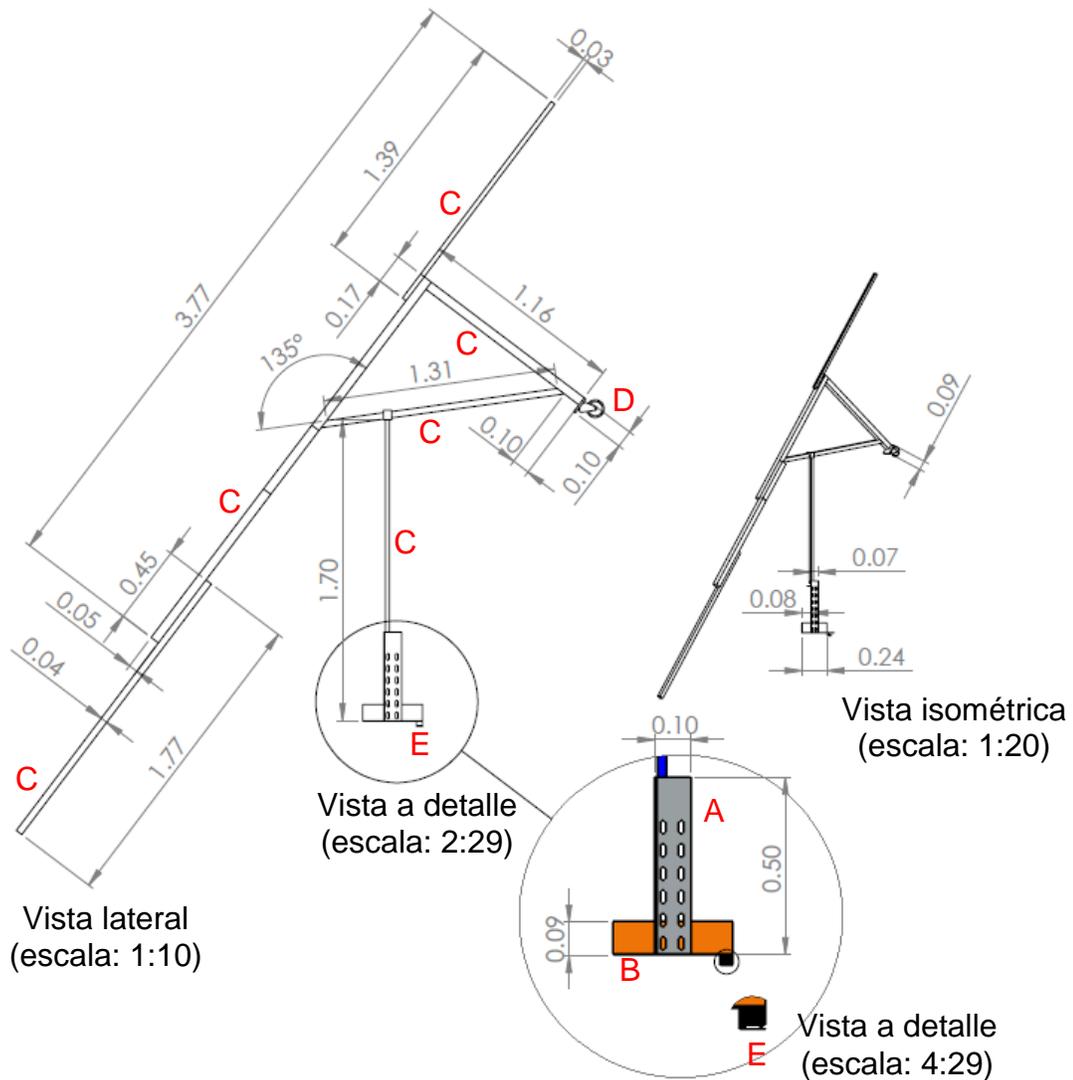


Plano I.8: Dimensiones del sensor horizontal (cotas en metros)

Tabla I.9: Componentes estructurales del sensor horizontal.

Tubular cuadrado de acero	A	Tornillos galvanizados de 0.00635m x 0.03175m	C
Acrílico transparente con recubrimiento negro	B	Sensores (fotorresistencias)	D

Contrapeso y transmisión del mecanismo de SAS

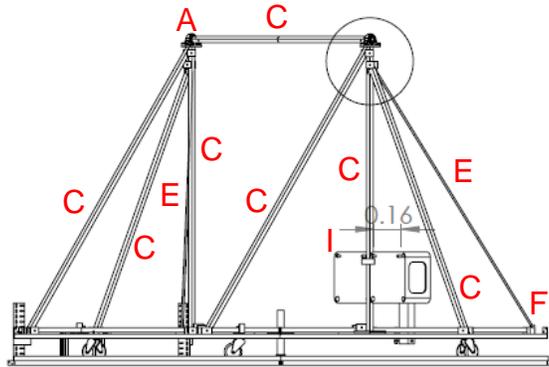


Plano I.10: Dimensiones del contrapeso y transmisión del mecanismo de SAS.

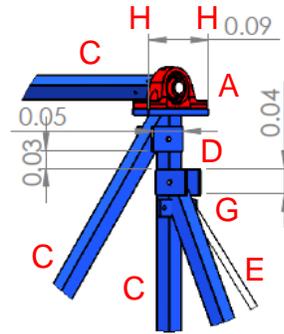
Tabla I.11: Componentes estructurales del contrapeso y transmisión mecánica del mecanismo de SAS.

Ángulo estructural	A
Ángulo de acero (0.00635 m de espesor)	B
Tubular cuadrado	C
llanta soporte	D
Interruptor	E

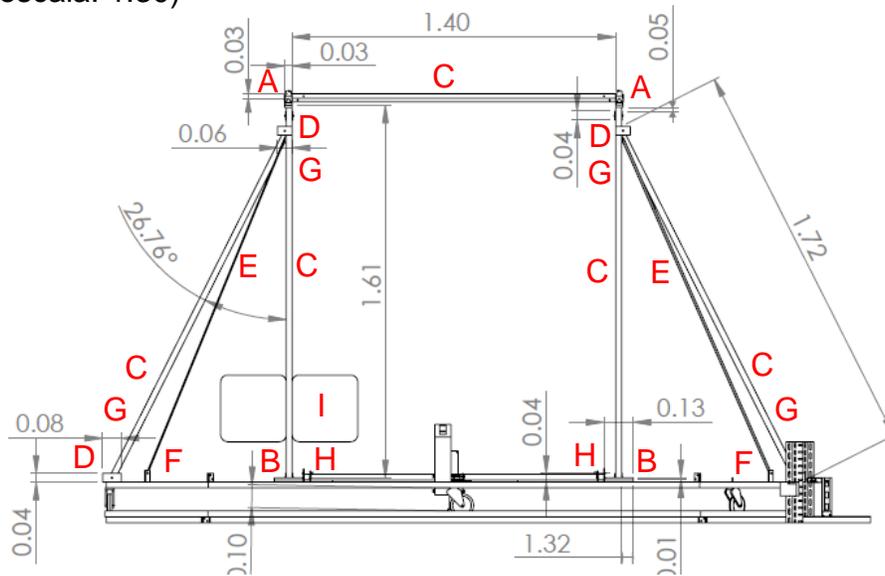
Eje de transmisión del mecanismo de altura solar (vista frontal)



Isométrica (escala: 1:30)



Vista a detalle (escala: 1:8)



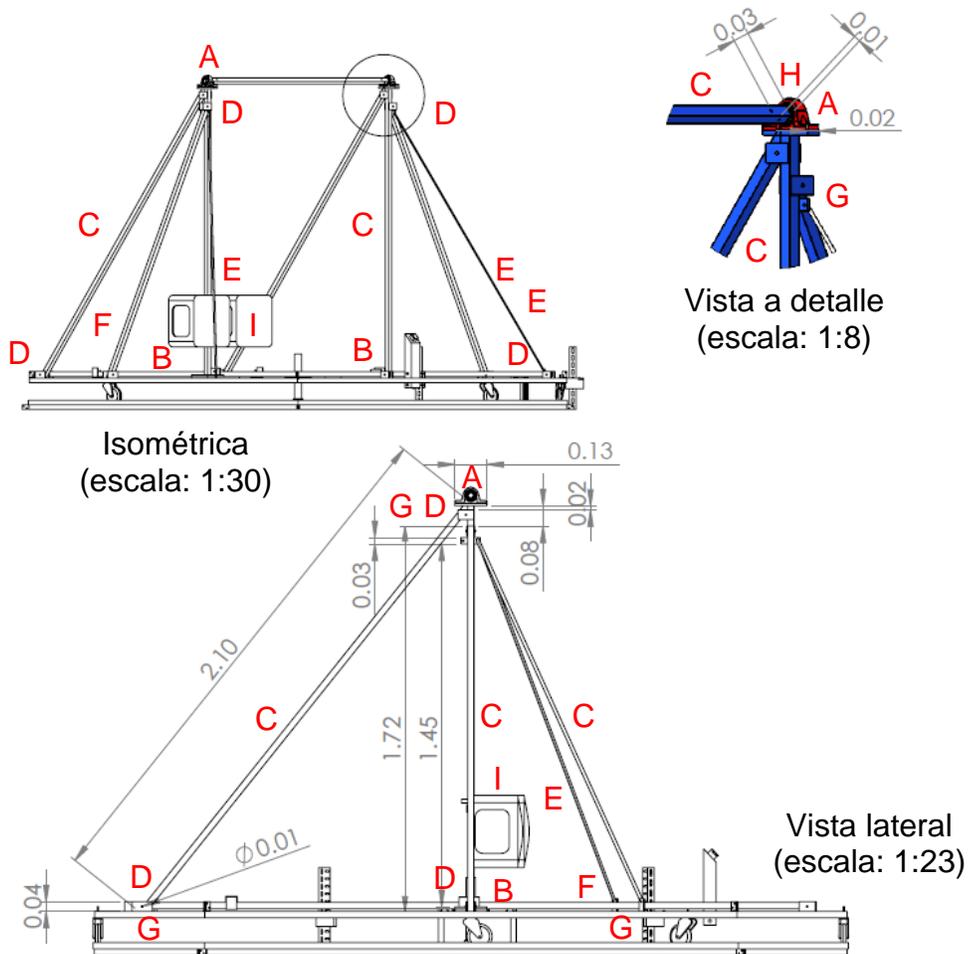
Vista frontal (escala: 1:23)

Plano I.11: Dimensiones del SAS (cota en metros, vista frontal).

Tabla I.12: Componentes estructurales del SAS (vista frontal).

Rodamiento con chumacera	A	Tensores de 0.0079375m	F
Placa de acero	B	Tornillos galvanizados de 0.00635 m x 0.03175 m	G
Tubular cuadrado	C	Tornillos galvanizados de 0.0079375 m x 0.03175 m	H
Solera de acero	D	Circuito comparador	I
Alambre de acero de 0.0031 m de diámetro	E		

Eje de transmisión del mecanismo de altura solar (vista lateral)

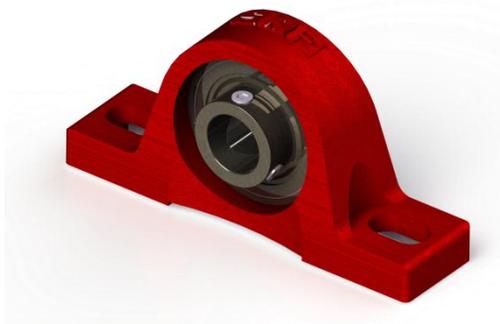


Plano I.12: Dimensiones del SAS (cota en metros, vista lateral).

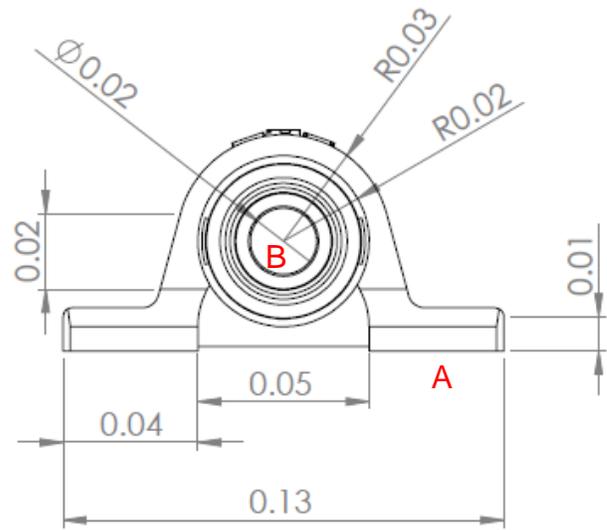
Tabla I.13: Componentes estructurales del SAS (vista lateral).

Rodamiento con chumacera	A	Tensores de 0.0079375m	F
Placa de acero	B	Tornillos galvanizados de 0.00635 m x 0.03175 m	G
Tubular cuadrado	C	Tornillos galvanizados de 0.0079375 m x 0.03175 m	H
Solera de acero	D	Circuito comparador	I
Alambre de acero de 0.0031 m de diámetro	E		

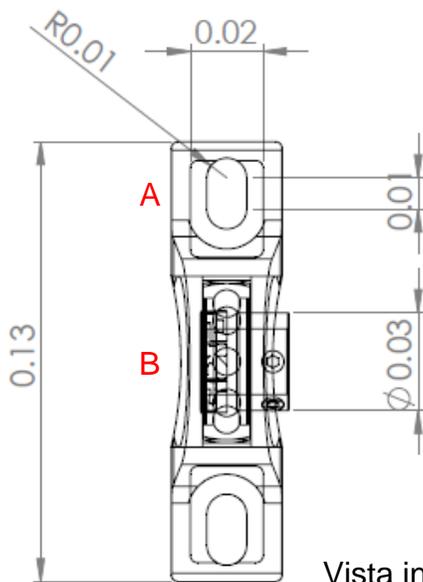
Rodamientos del mecanismo de altura solar



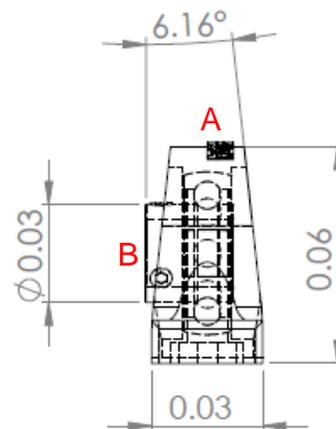
Isométrica
(escala: 1:2)



Vista frontal (escala: 1:2)



Vista inferior
(escala: 1:2)



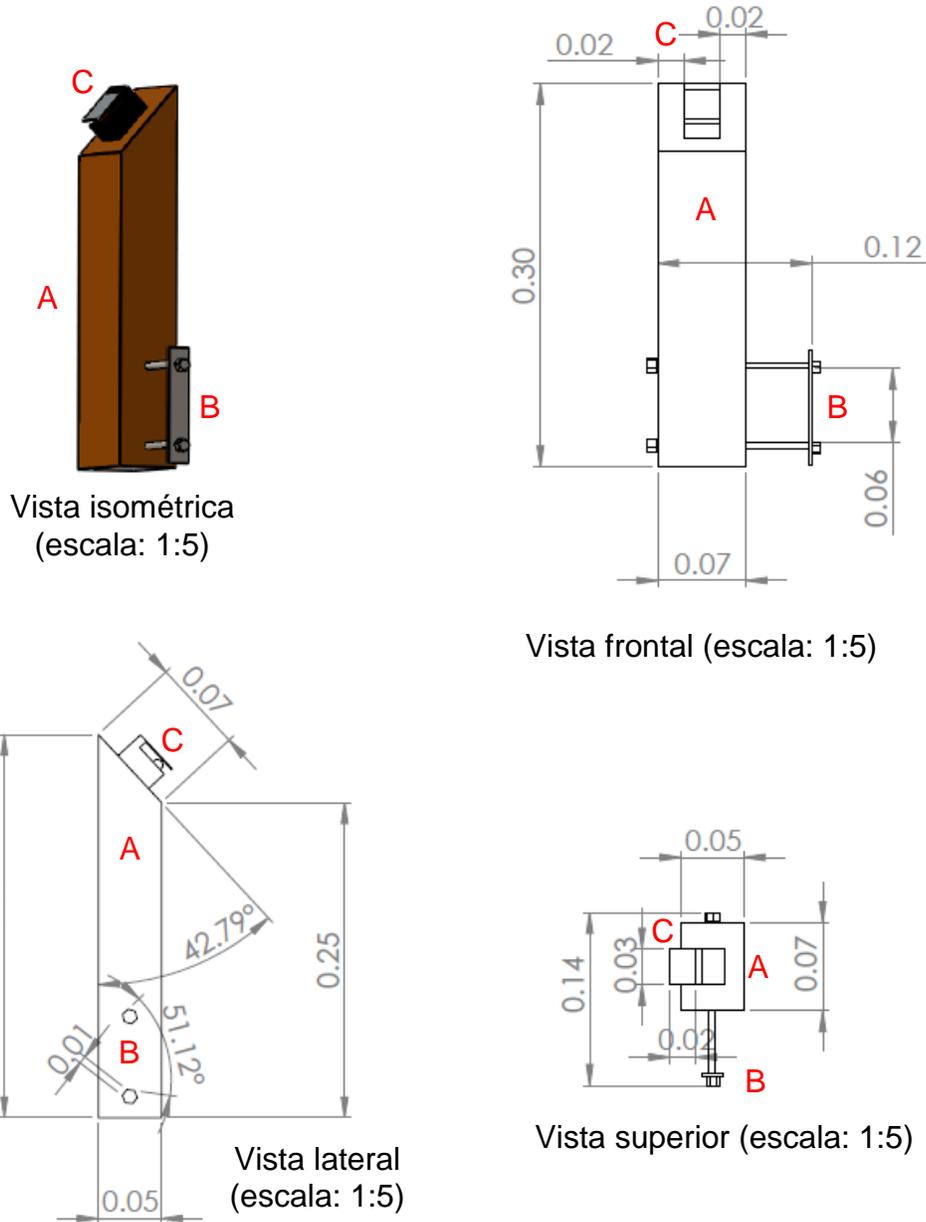
Vista lateral (escala: 1:2)

**Plano I.13: Dimensiones del rodamiento utilizado en el eje de altura solar
(cotas en metros)**

Tabla I.14: Componentes del rodamiento utilizado en el eje de altura solar.

Chumacera de acero	A
Rodamiento de alta resistencia	B

Interruptor de seguridad del SAS

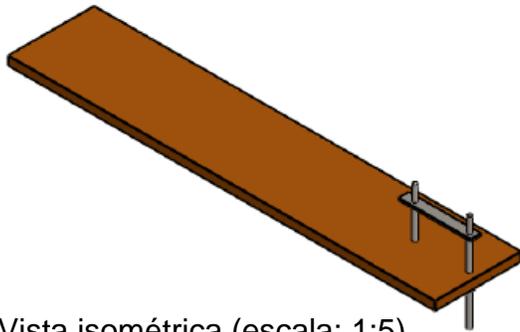


Plano I.14: Dimensiones del interruptor de seguridad del SAS (cotas en metros).

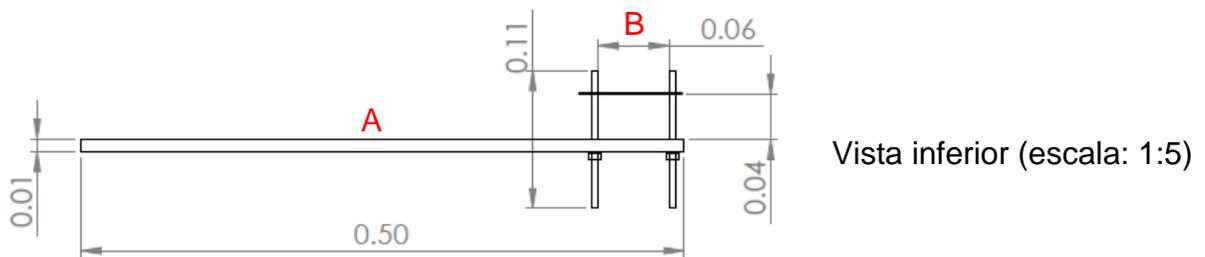
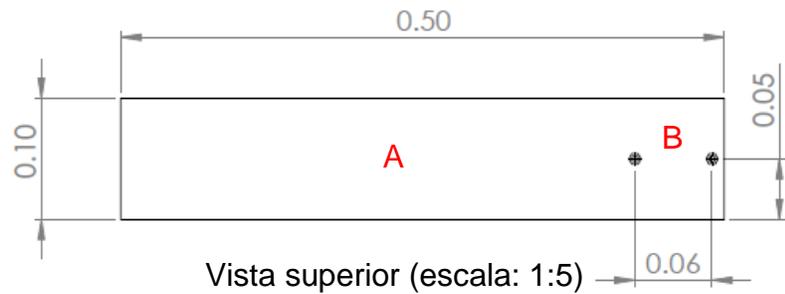
Tabla I.15: Componentes del interruptor de seguridad del SAS.

Barra de acrílico	A
Abrazadera ajustable en "U"	B
Interruptor de corriente del SAS	C

Interruptor de altura solar Este



Vista isométrica (escala: 1:5)

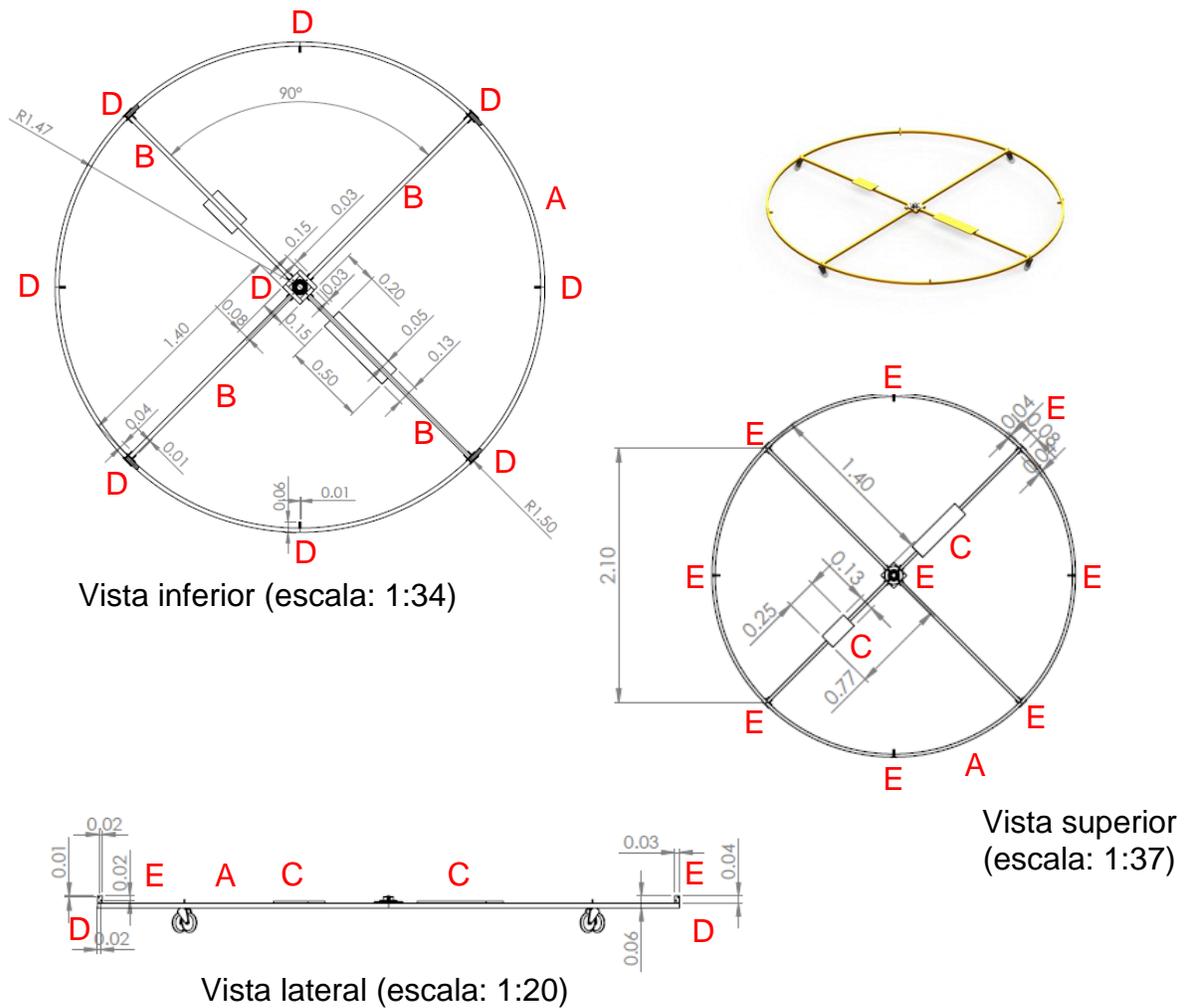


Plano I.15: Dimensiones del interruptor de altura solar este (cotas en metros).

Tabla I.16: Componentes del interruptor de altura solar Este.

Barra de aluminio	A
Abrazadera ajustable en "U"	B

Base superior del mecanismo de seguimiento azimut (SAZ)

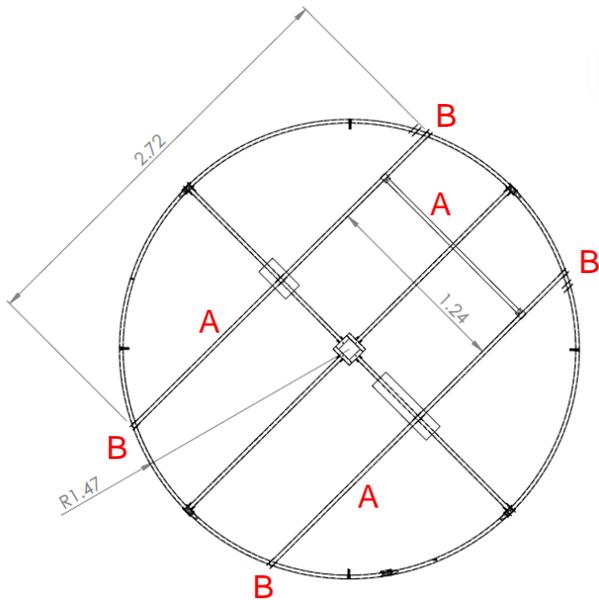


Plano I.16: Dimensiones de la base superior del mecanismo de seguimiento azimut (cotas en metros).

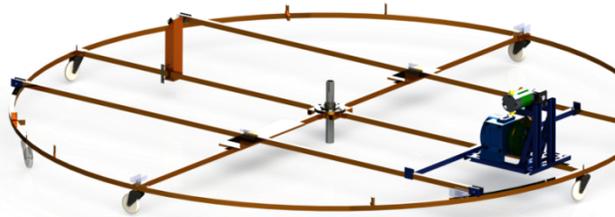
Tabla I.17: Componentes de la base superior del mecanismo de seguimiento azimut.

Tubular rolado de acero	A
Tubular de acero	B
Placa de acero inoxidable	C
Solera de acero inoxidable	D
Tornillos de 0.00635 m x 0.03175m	E

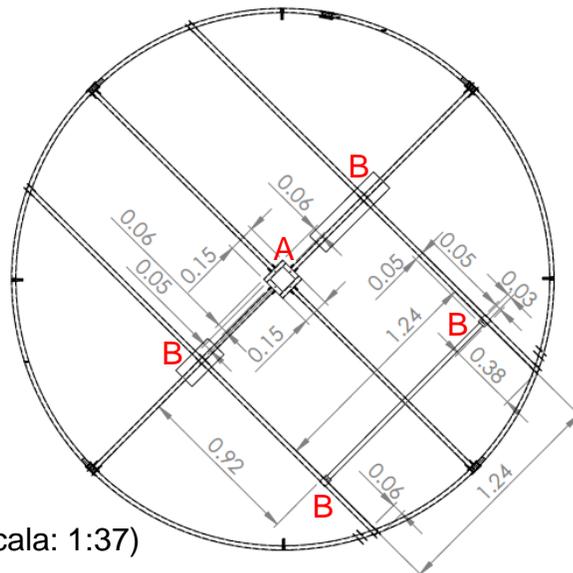
Base superior del SAZ con soportes estructurales



Vista inferior (escala: 1:34)



Vista isométrica
(escala: 1:37)



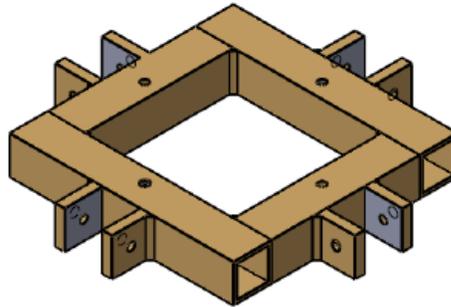
Vista superior (escala: 1:37)

Plano I.17: Dimensiones de los componentes estructurales del mecanismo SAZ (cotas en metros).

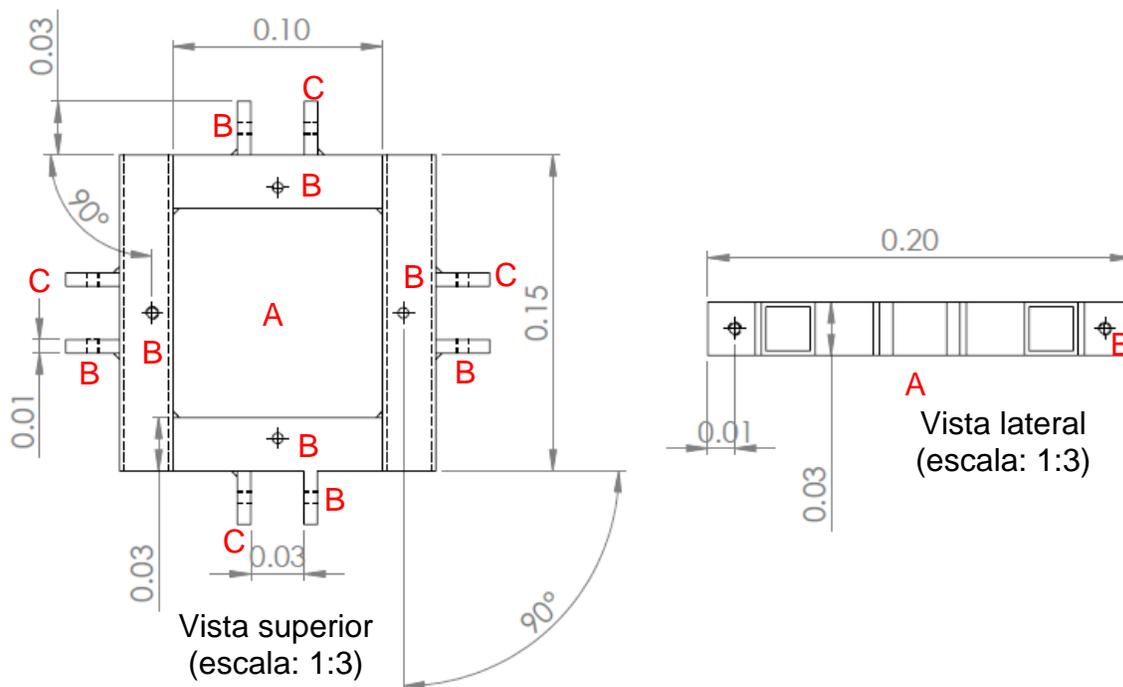
Tabla I.18: Componentes estructurales del mecanismo SAZ.

Tubular	A
Tornillos galvanizados de 0.007937 m x 0.03175 m	B

Base cuadrada del mecanismo SAZ



Vista isométrica
(escala: 1:3)

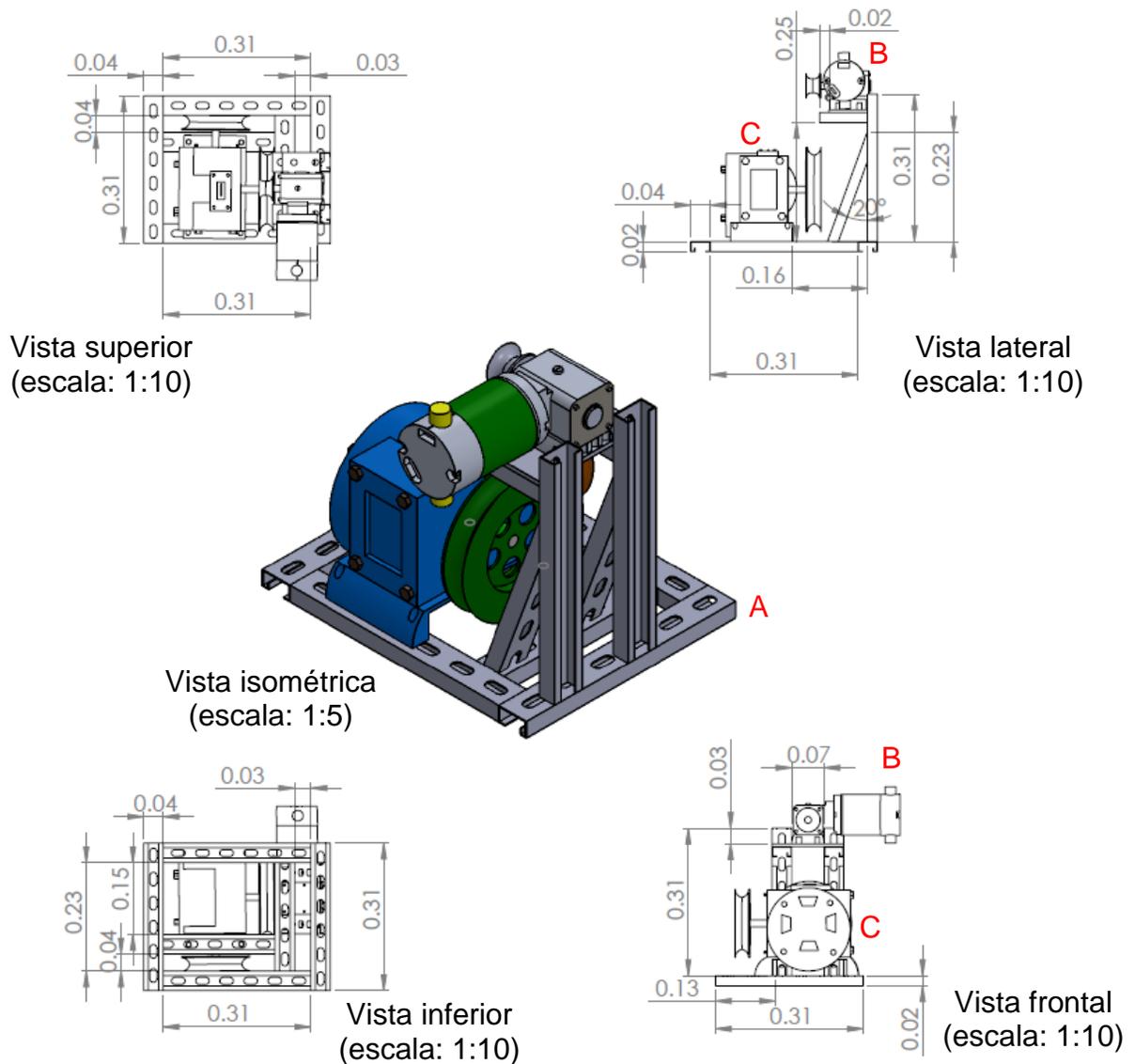


Plano I.18: Dimensiones de la base cuadrada del mecanismo de seguimiento azimut (cotas en metros).

Tabla I.19: Componentes estructurales de la base cuadrada del mecanismo de seguimiento azimut.

Tubular cuadrado de acero	A
Tornillos galvanizados de 0.007937 m x 0.0317 m	B
Tornillos galvanizados de 0.00635 m x 0.0317 m	C

Arreglo motorreductor-reductor del SAS

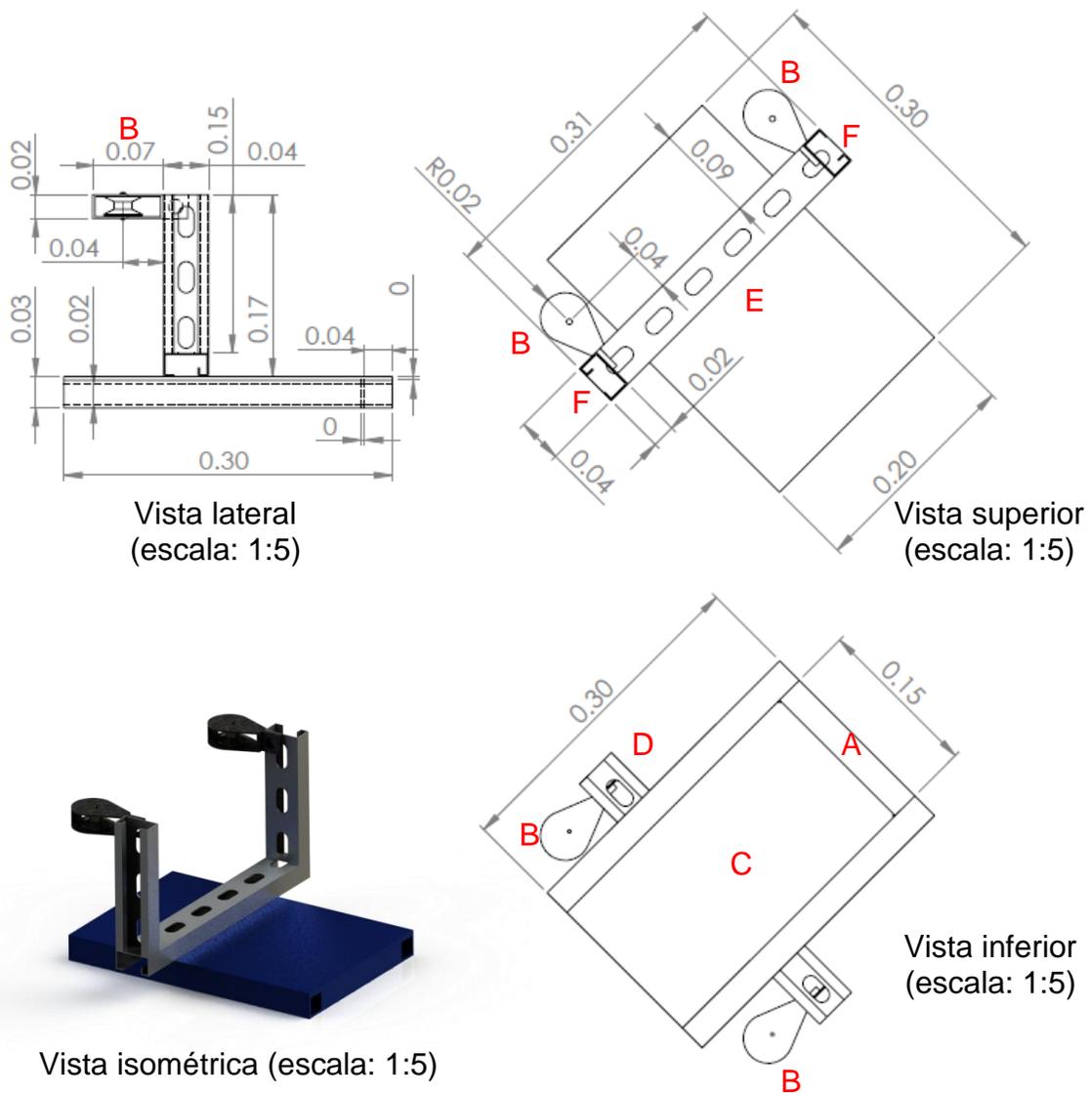


Plano I.19: Dimensiones del arreglo del motorreductor-reductor del SAS (cotas en metros).

Tabla I.20: Componentes del arreglo motorreductor-reductor del SAS.

Perfil estructural galvanizado	A
Motorreductor	B
Reductor de velocidad	C

Poleas de ajuste de la transmisión del eje azimut

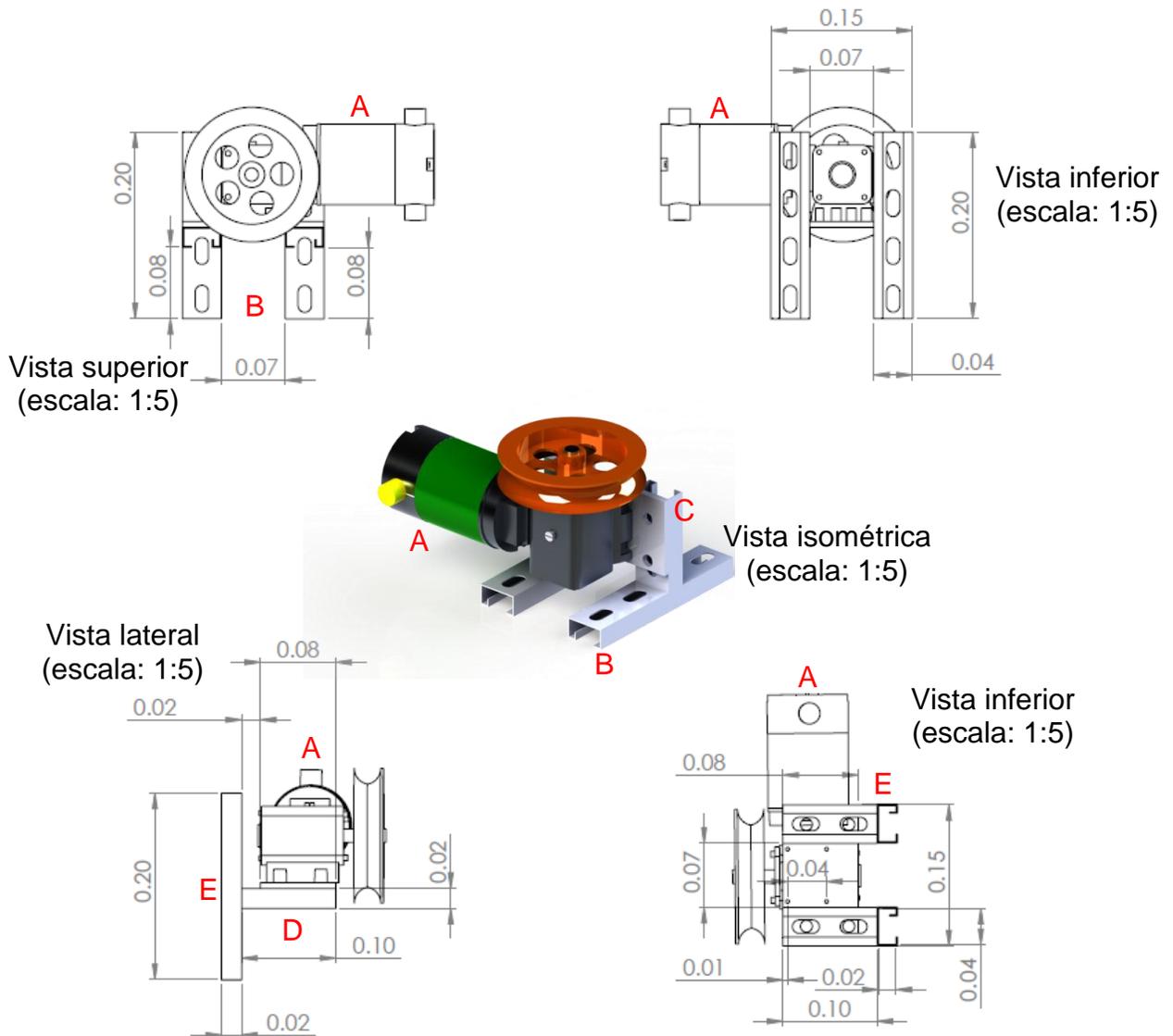


Plano I.21: Dimensiones de las poleas de ajuste de la transmisión del eje azimut (cota en metros).

Tabla I.22: Componentes de las poleas de ajuste de la transmisión del eje azimut.

Tubular cuadrado de acero	A	Perfil estructural galvanizado	D
Polea con diámetro de 0.0508 m	B	Tornillos galvanizados de 0.007937 m x 0.0317 m	E
Placa de acero inoxidable	C	Tornillos galvanizados de 0.00635 m x 0.0317 m	F

Motorreductor del SAZ

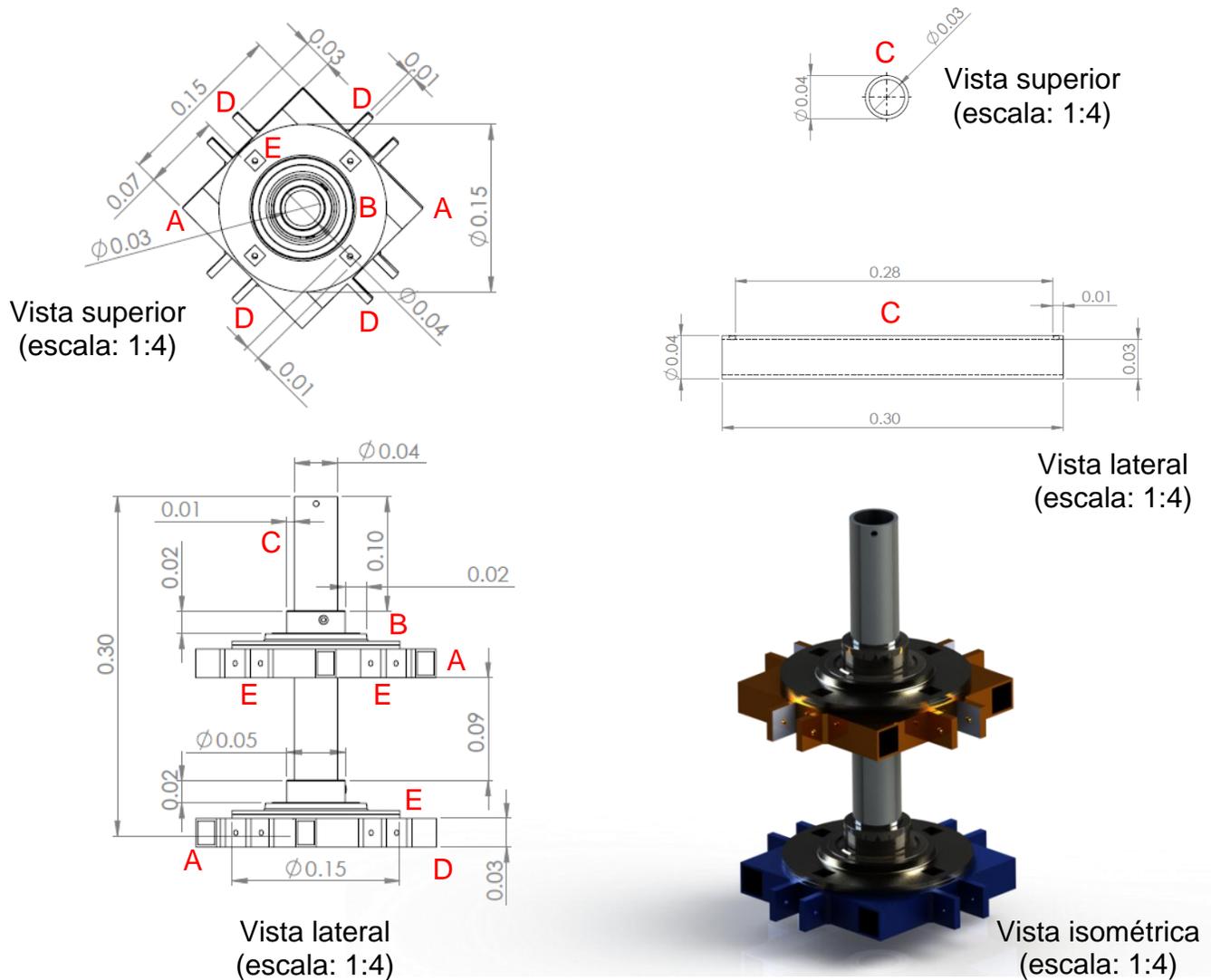


Plano I.22: Dimensiones del motorreductor del SAZ (cotas en metros).

Tabla I.23: Componentes del motorreductor del SAZ.

Motorreductor	A
Perfil estructural galvanizado	B
Placa de acero	C
Tornillos galvanizados de 0.0031175 m x 0.00635 m	D
Tornillos galvanizados de 0.0127 m x 0.00635 m	E

Eje unión de las bases del SAS y SAZ

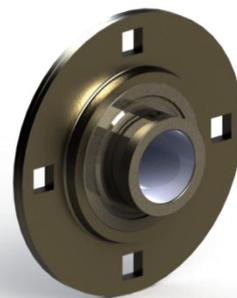
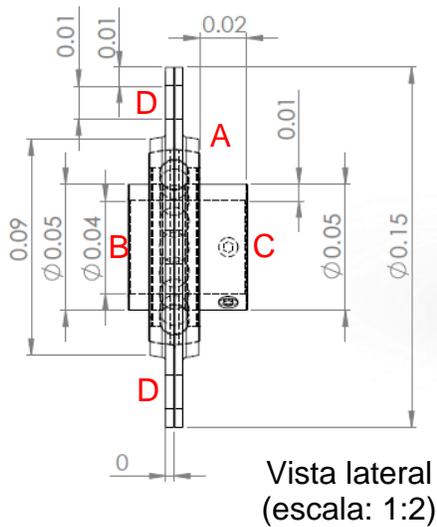
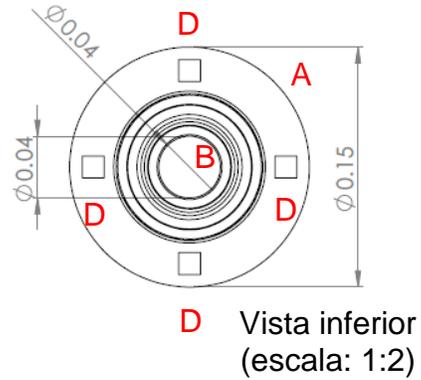
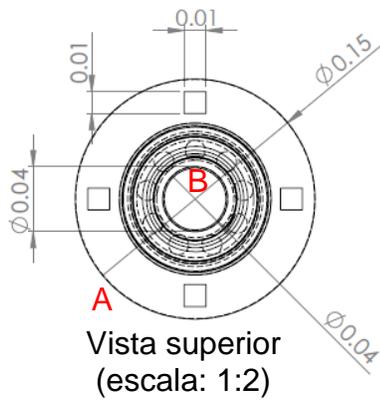


Plano I.23: Dimensiones del eje unión de las bases SAS y SAZ (cotas en metros).

Tabla I.24: Componentes del eje unión de las bases del SAS y SAZ.

Tubular cuadrado de acero	A
Chumacera y balero	B
Tubo de aluminio	C
Solera de acero inoxidable	D
Tornillos galvanizados de 0.0031175 m x 0.00635 m	E

Balero del eje de seguimiento azimut.



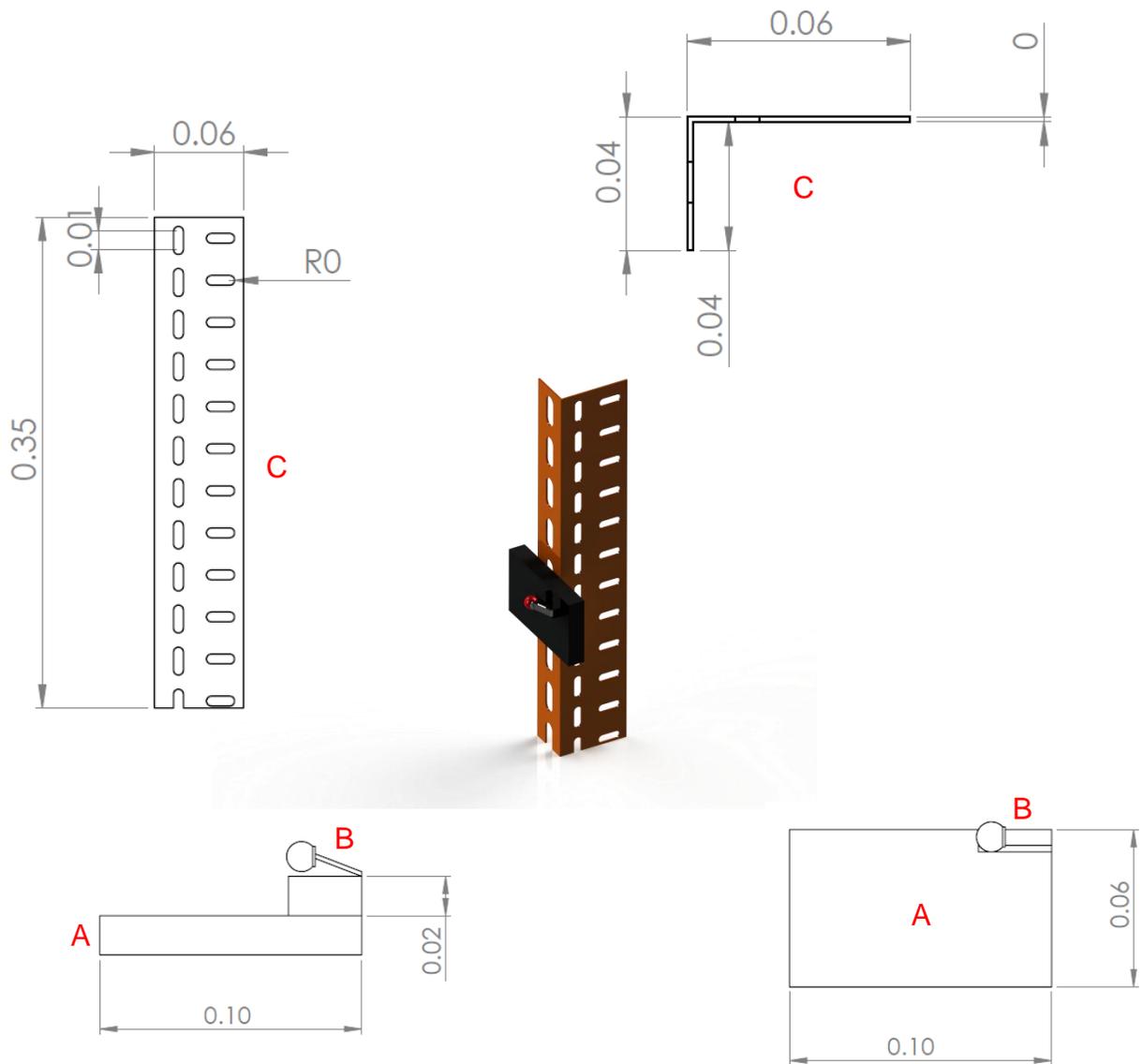
Vista isométrica
(escala: 1:2)

Plano I.24: Dimensiones de la chumacera y rodamiento del eje de seguimiento azimut (cotas en metros).

Tabla I.25: Componentes de la chumacera y rodamiento del eje azimut.

Chumacera	A
Balero o rodamiento	B
Perno de sujeción y seguridad	C
Tornillos galvanizados de 0.0079375 m x 0.03175 m	D

Final de carrera azimuth

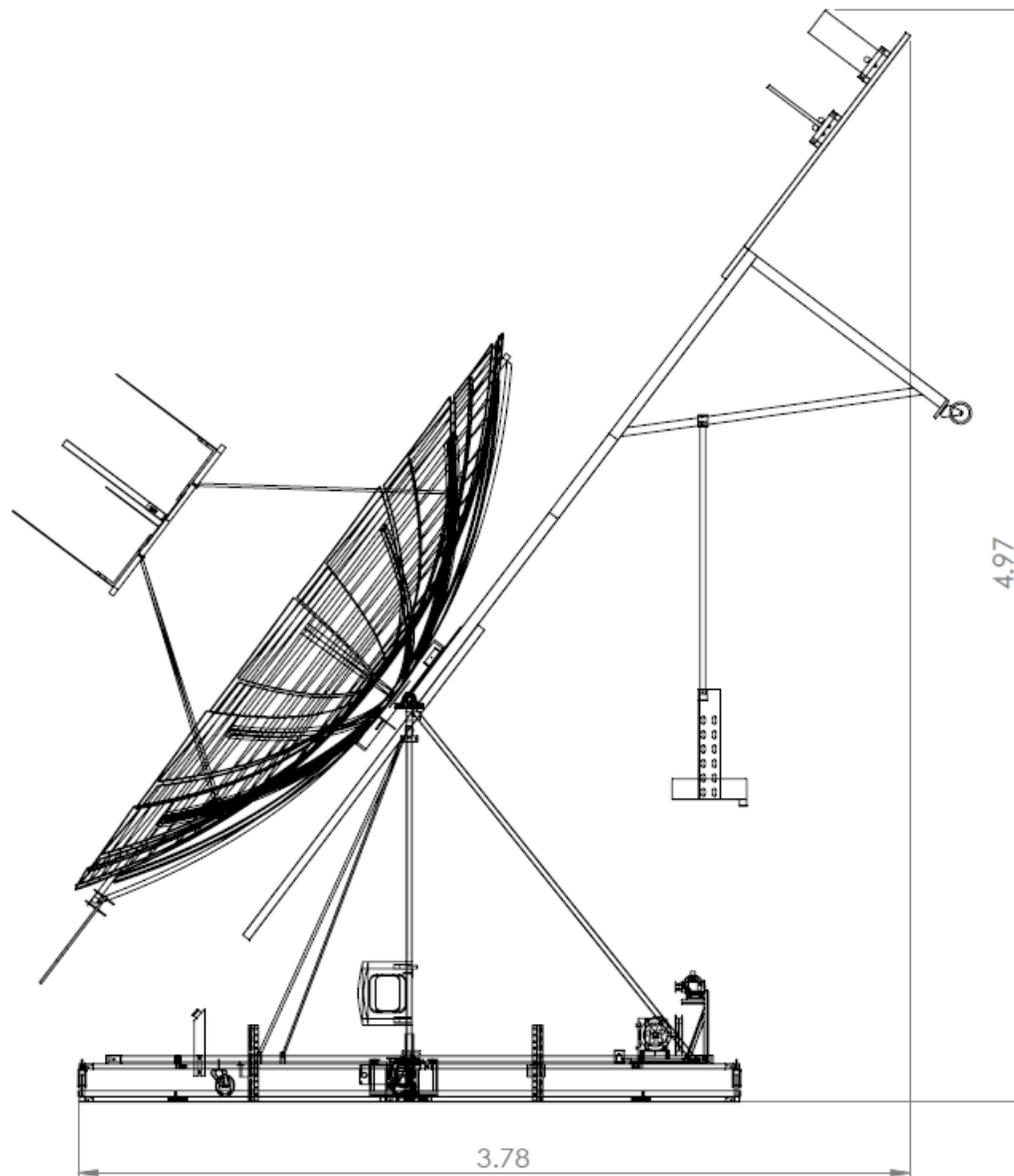


Plano I.25: Dimensiones del final de carrera azimuth.

Tabla I.26: Componentes del final de carrera azimuth.

Acrílico de 0.00635 m de espesor	A
Interruptor de corriente	B
Ángulo estructural	C

Altura del equipo de concentración



Plano I.26: Alto y ancho del equipo del concentrador solar parabólico.

APÉNDICE J

Pruebas experimentales

Las pruebas experimentales se diseñaron con la finalidad de evaluar el mecanismo de seguimiento solar, se verificó el tiempo y la precisión con la que el equipo mantenía la energía solar concentrada en el punto focal, con ello se pudo observar el comportamiento de la temperatura en el receptor por variaciones de la radiación solar directa.

El receptor se diseñó con una placa metálica, la cual se instrumentó con termopares y se recubrió con una película selectiva de alta absorción. Mediante un adquisidor de datos, se obtuvo la temperatura homogénea de la placa a lo largo del día.

Los valores experimentales de la temperatura en el receptor se compararon con los cálculos teóricos. Para validar el modelo anterior, se realizaron pruebas experimentales modificando el área de captación del concentrador, con ello se obtuvieron las temperaturas promedio en la placa por área de sección recubierta del concentrador.

En días nublados, soleados o con nublados dispersos, la temperatura de la placa se mantuvo estable oscilando en un rango de 50 °C aproximadamente, estas variaciones se justifican por las pérdidas térmicas del receptor, por el seguimiento solar y por pérdidas ópticas del equipo. Los resultados de las pruebas experimentales y su comparación con el modelo teórico se observan en la tabla J.1.

Tabla J.1: Comparación de las temperaturas experimentales y teóricas del receptor.

Sección recubierta	Temperatura experimental (°C)	T_{receptor} (°C)	A_{sec} (m ²)	RCG	$Q_{\text{sol-receptor}}$ (kW)
2	250-300	297.41	0.94	12.80	0.55
4	300-350	405.37	1.88	25.61	1.10
6	350-400	477.75	2.83	38.41	1.66
8	400-450	533.75	3.77	51.22	2.21

Las pruebas experimentales se realizaron hasta con 8 secciones del concentrador, lo anterior se realizó debido a que la temperatura en la placa con más de 8 secciones, rebasan los rangos de medición de los termopares.

Se realizaron 22 pruebas experimentales, en ellas se pudieron observar las variaciones de la temperatura en el receptor y por lo tanto, la precisión del seguimiento solar con diferentes condiciones climáticas. Los resultados de las pruebas experimentales mostraron que el mecanismo de seguimiento solar mantiene la temperatura estable en el receptor en un periodo promedio de 7 horas.

En días nublados, la temperatura experimental del receptor se mantuvo por debajo de la temperatura teórica, por el contrario, en días soleados, la temperatura en el receptor fue cercana a la teórica, presentando o diferencias en un rango de 50 °C.

Cuando la radiación solar directa es interrumpida de manera esporádica por el paso de nubes, la temperatura en el receptor disminuye de manera inmediata, una vez que pasa el bloqueo de la radiación solar directa, la temperatura en el receptor se recupera, el tiempo en que se estabiliza la temperatura del receptor es variable y está en función de la velocidad de desplazamiento de la nube, de su densidad y del tamaño de la misma. En promedio, la temperatura se recupera en un rango que va de los 10 a 15 minutos.

A continuación se presenta la metodología experimental y se analizan las 22 pruebas experimentales:

Metodología de las pruebas experimentales:

- I. Orientación: Se verifica la correcta orientación del equipo. Por su diseño, el mecanismo de seguimiento solar orienta de manera automática al concentrador al este, para así recibir los primeros rayos del sol por la mañana. Del mismo modo, llegada la noche, interrumpe el seguimiento y regresa a la posición de inicio.
- II. Adquisición de datos: El adquisidor de datos se instaló en la estructura del equipo de concentración, por lo que se debe verificar las interconexiones entre el adquisidor y el computador, dichos componentes se conectan mediante cables de transferencia de datos, que están instalados de tal forma que permiten el libre desplazamiento del concentrador.
- III. Área de sección recubierta: Según el tipo de prueba que se va a realizar, se varía el área de sección de concentración, por lo que dependiendo de la

característica de la experimentación, se cubre el área seleccionada con un cubierta plástica.

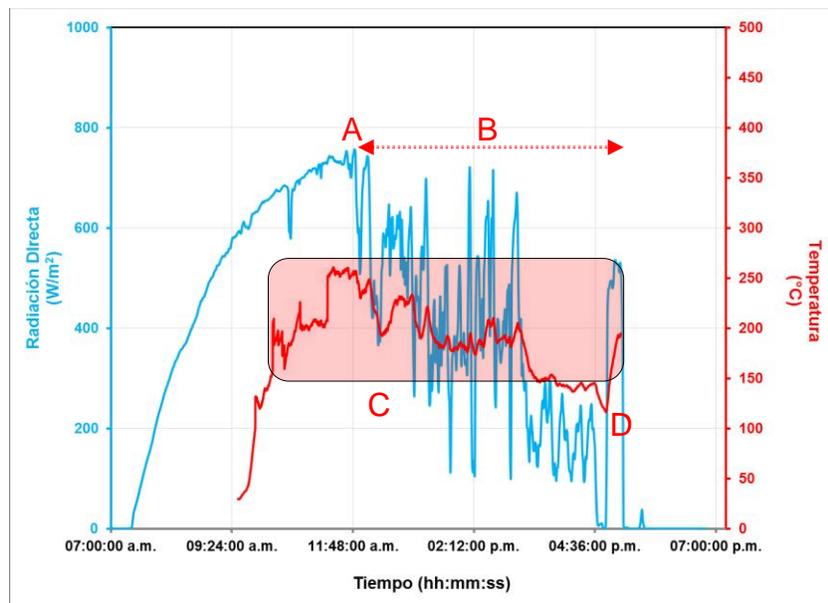
- IV. Radiación solar: Al finalizar cada prueba experimental se adquieren los datos de radiación solar directa en la estación solarimétrica del IER-UNAM.

Prueba del 28-01-14 (Día nublado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$):

La prueba experimental se realizó con dos secciones recubiertas del concentrador ($A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$), dio inicio a las 09:31:05 horas y terminó a las 17:06:38 horas. Se graficaron 2735 puntos experimentales, con un intervalo de 10 segundos entre cada uno.

Al inicio de la prueba no se presentaron nublados, fue a partir de las 11:48:23 horas que iniciaron de manera constante, debido a esto, la temperatura en el receptor se vio afectada oscilando en un rango de 150°C a 250°C .

Para el área de sección seleccionada, la temperatura teórica del receptor fue de 297.45°C . En la gráfica J.1 se explican las variaciones importantes de la prueba experimental.



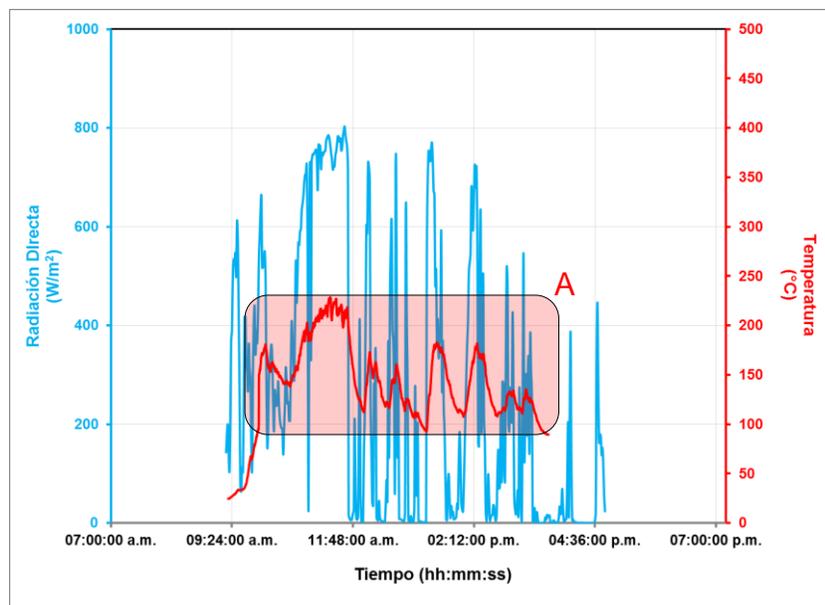
Gráfica J.1: Prueba del 28-01-14 (Día nublado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$)

Tabla J.2: Prueba del 28-01-14(Día nublado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	En el punto A (11:48:23 horas), inician los nublados, se observa como la temperatura en la placa disminuye por las variaciones de la radiación solar directa.
B,C	La temperatura del receptor se mantuvo en un rango de $150 \text{ }^\circ\text{C}$ a $250 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 6 horas. La radiación solar directa se mantuvo por debajo de los 500 W/m^2 .
D	En este punto la radiación solar directa aumenta y con ello la temperatura del receptor.

Prueba del 29-01-14 (Día nublado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$):

La prueba dio inicio a las 09:19:18 horas y terminó a las 15:40:48 horas. Se graficaron 2291 puntos experimentales, con un intervalo de 10 segundos cada uno. Durante toda la prueba experimental se presentaron nublados, paulatinamente se fueron incrementando hasta que no hubo más radiación solar directa, con estas condiciones se obtuvieron temperaturas que oscilaron en un rango de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ a $250 \text{ }^\circ\text{C}$. La prueba se dio por terminada a las 15:40:48 horas, debido a que la radiación solar directa fue escasa a partir de ese periodo de tiempo (Gráfica J.2).



Gráfica J.2: Prueba del 29-01-14 (Día nublado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$)

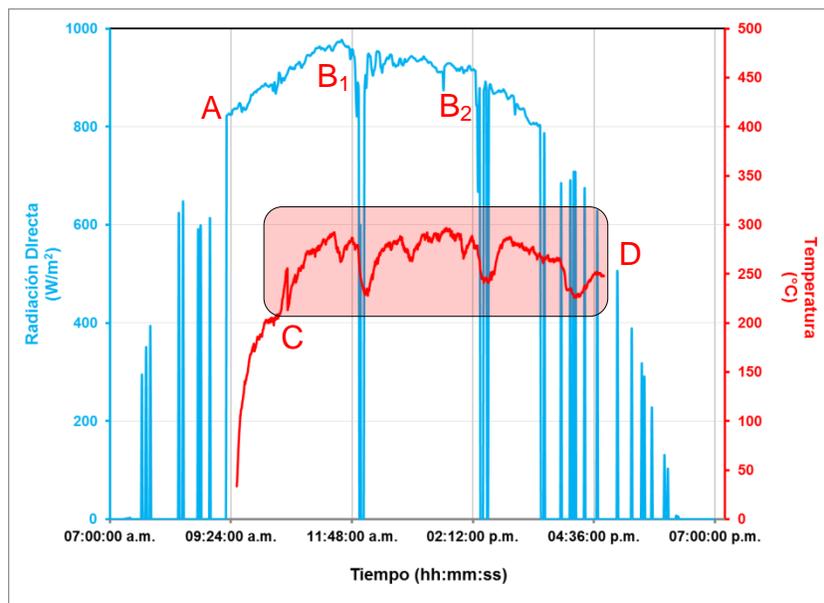
Tabla J.3: Prueba del 29-01-14(Día nublado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	A pesar de que el día estuvo totalmente nublado y que se presentaron algunos picos en la radiación solar directa, la temperatura se mantuvo durante 6.5 horas en un rango de 100 °C a 250 °C. La radiación solar directa fue muy variable, teniendo picos que llegaron a los 800 W/m ² .

Prueba del 30-01-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$):

La prueba experimental dio inicio a las 09:30:50 horas y terminó a las 16:47:56 horas. Se graficaron 2625 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno. Se presentó nubosidad constante al inicio y al final de la prueba, al amanecer, la nubosidad se disipo a partir de las 09:29:23 horas, seguido a ese instante la radiación solar directa se mantuvo estable con dos perturbaciones producto del paso esporádico de nubes. Ya por la tarde, los nublados intensos se hicieron presentes a partir de las 04:30:24 horas.

Con la radiación solar incidente y con el cielo despejado, la temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 7 horas, oscilando en un rango de 200 °C a 300 °C. La prueba se dio por concluida a las 16:47:56 horas, debido al sombreadamiento producido por edificaciones (Gráfica J.3).



Gráfica J.3: Prueba del 30-01-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$)

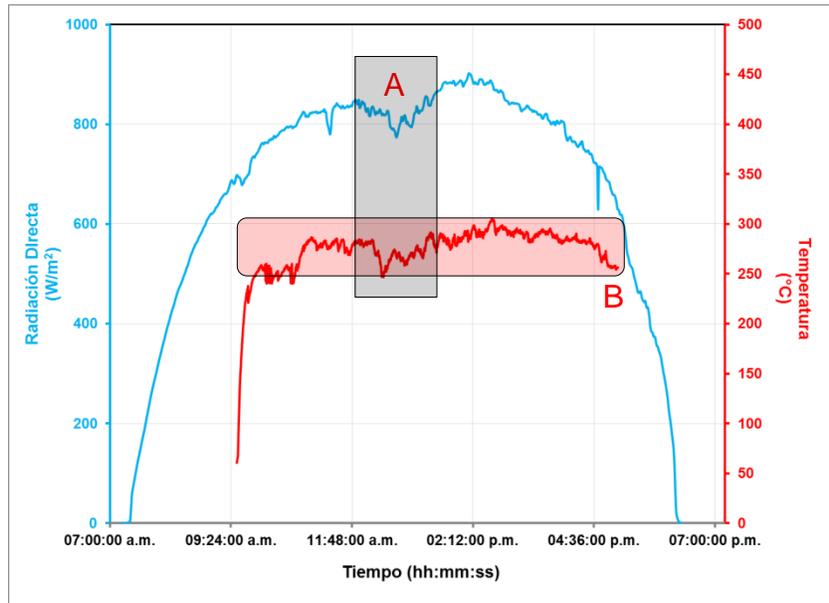
Tabla J.4: Prueba del 30-01-14(Día con nublados dispersos, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La nubosidad se disipo a partir de las 09:29:23 horas (A=09:26:00 horas).
B ₁ ,B ₂	Se presentaron dos caídas de la temperatura producto del paso de nubes (B ₁ =11:46:00 horas, B ₂ =02:12:00 horas).Una vez que paso la perturbación, la temperatura en el receptor se recuperó en un lapso aproximado de 10 minutos.
C	La temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 6 horas oscilando en un rango de 200°C a 300 °C.
D	La prueba se dio por concluida a las 16:47:56 horas debido al sombreadamiento producido por edificios aledaños.

Prueba del 03-02-14 (Día soleado, $A_{sec} =0.94 \text{ m}^2$):

La prueba dio inicio a las 09:30:50 horas y terminó a las 17:04:34 horas. Se graficaron 2725 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

En la prueba el cielo estuvo totalmente despejado, la temperatura del receptor se mantuvo estable durante 7 horas, se presentaron pocas variaciones en la temperatura del receptor, oscilando en un rango de 250 °C a 300 °C (Gráfica J.4).



Gráfica J.4: Prueba del 03-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$)

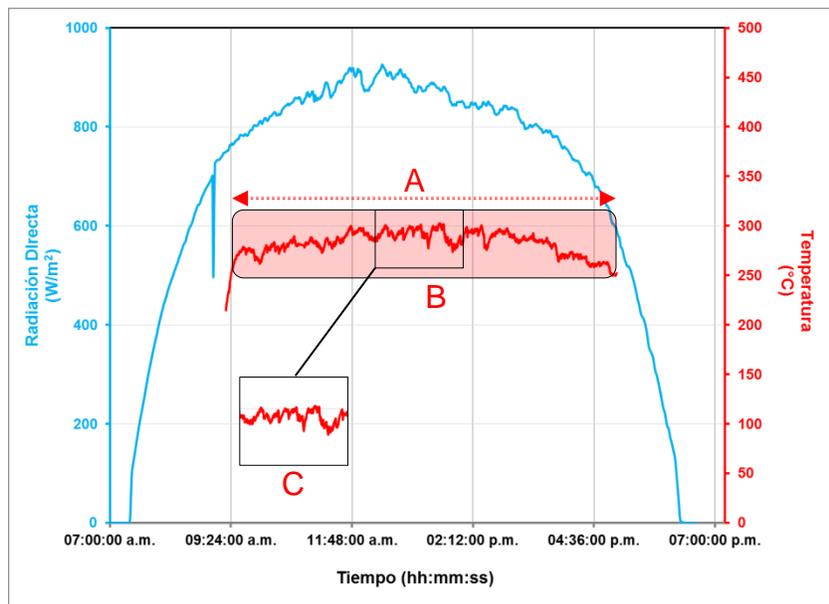
Tabla J.5: Prueba del 03-02-14(Día soleado, $A_{sec} = 0.94 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	En el punto "A", se observa la variación de la temperatura del receptor en función de la radiación solar (A=12:40:00).
B	La temperatura de la placa se mantuvo estable durante 7 horas, se presentaron pocas oscilaciones en la temperatura, oscilando en un rango de 250 °C a 300 °C.

Prueba del 04-02-14 (Día soleado, $A_{sec} = 0.94 \text{ m}^2$):

La prueba dio inicio a las 09:30:50 horas y terminó a las 17:04:34 horas. Se graficaron 2759 puntos con un intervalo de 10 segundos cada uno.

El cielo estuvo totalmente despejado, se obtuvieron temperaturas estables durante 7.5 horas, la temperatura en el receptor varió en un rango de 250°C a 300 °C (Gráfica J.5).



Gráfica J.5: Prueba del 04-02-14 (Día soleado, $A_{sec} = 0.94 \text{ m}^2$)

Tabla J.6: Prueba del 04-02-14(Día soleado, $A_{sec} = 0.94 \text{ m}^2$)

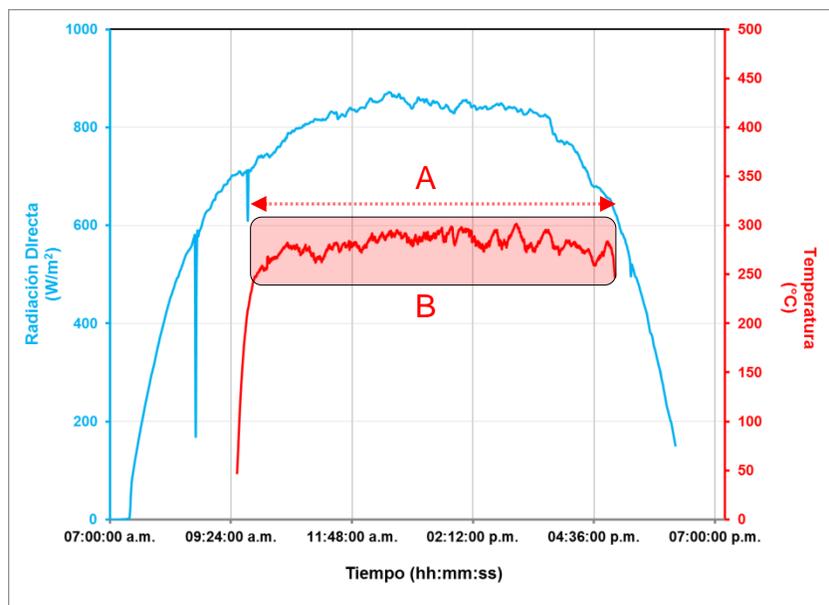
Punto en la gráfica	Explicación
A	Por las características del día se mantuvieron temperaturas estables

	en el receptor durante 7.5 horas.
B	La temperatura en el receptor presento pocas oscilaciones, que estuvieron en un rango de 250°C a 300 °C.
C	Las pequeñas perturbaciones de la temperatura en el receptor se justifican por el reajuste del mecanismo de seguimiento solar, por perdidas convectivas y por pequeñas variaciones de la radiación solar directa.

Prueba del 05-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$):

La prueba dio inicio a las 09:31:05 horas y terminó a las 17:01:05 horas. Se graficaron 2703 puntos con un intervalo de 10 segundos cada uno.

En la prueba el cielo estuvo totalmente despejado, se obtuvieron temperaturas estables durante 7.2 horas. La temperatura en el receptor presento pocas oscilaciones, que se estuvieron en un rango de 250°C a 300 °C (Gráfica J.6).



Gráfica J.6: Prueba del 05-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$)

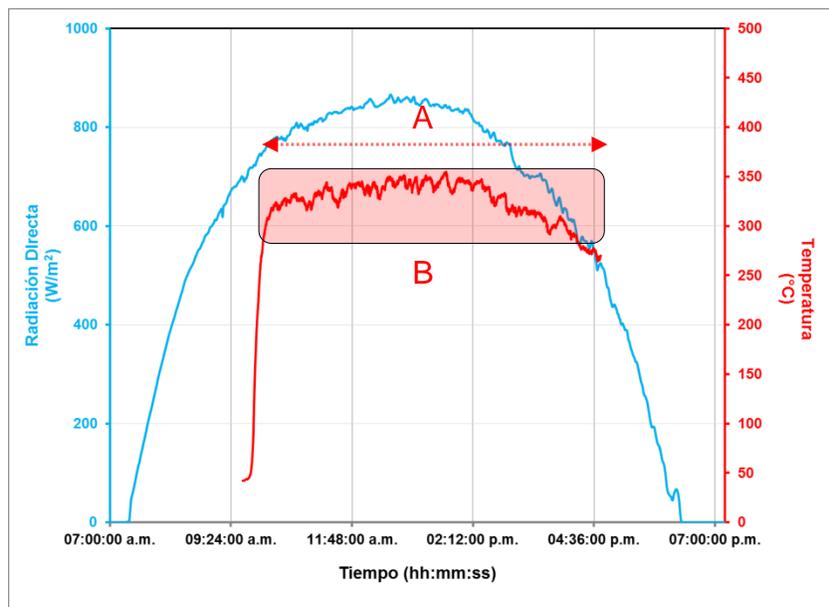
Tabla J.7: Prueba del 05-02-14(Día soleado, $A_{sec}=0.94 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 7.5 horas.
B	Se presentaron pocas oscilaciones de la temperatura del receptor manteniéndose en un rango de 250 a 300 °C.

Prueba del 06-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$):

La prueba experimental se realizó con cuatro secciones recubiertas del concentrador ($A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$), dio inicio a las 09:37:56 horas y terminó a las 16:44:06 horas. Se graficaron 2559 puntos con un intervalo de 10 segundos cada uno.

En la prueba el cielo estuvo totalmente despejado, se obtuvieron temperaturas estables durante 7 horas. La temperatura del receptor fue disminuyendo pasado el mediodía solar y posteriormente se mantuvo en un rango de 300°C a 350°C (Gráfica J.7).



Gráfica J.7: Prueba del 06-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$)

Tabla J.8: Prueba del 06-02-14(Día soleado, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$)

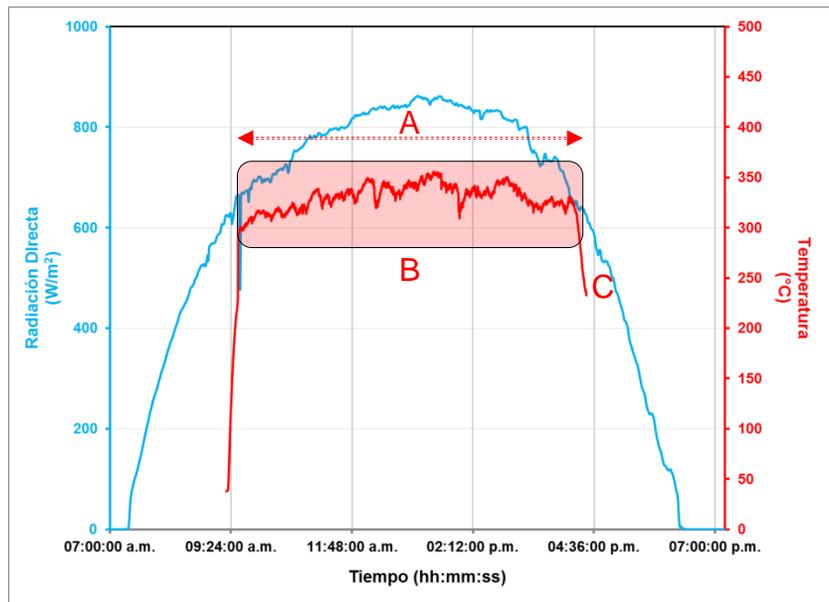
Punto en la gráfica	Explicación
A	En la prueba el cielo estuvo totalmente despejado, se obtuvieron temperaturas estables durante 7 horas
B	. La temperatura del receptor fue disminuyendo pasado el mediodía solar manteniéndose en un rango de 300°C a 350°C

Prueba del 07-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$):

La prueba dio inicio a las 09:18:26 horas y terminó a las 16:26:58 horas. Se graficaron 2574 puntos con un intervalo de 10 segundos cada uno.

Al igual que en la prueba anterior, el cielo se mantuvo sin nubosidad, por lo que se obtuvieron temperaturas estables durante 7.5 horas. La temperatura en el receptor presento pocas oscilaciones y se mantuvo en un rango de 300°C a 350 °C.

El equipo presento sombreado por edificaciones, lo que provocó la caída brusca de la temperatura en el receptor (Gráfica J.8).



Gráfica J.8: Prueba del 07-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$)

Tabla J.9: Prueba del 07-02-14(Día soleado, $A_{c_{sec}}=1.88 \text{ m}^2$)

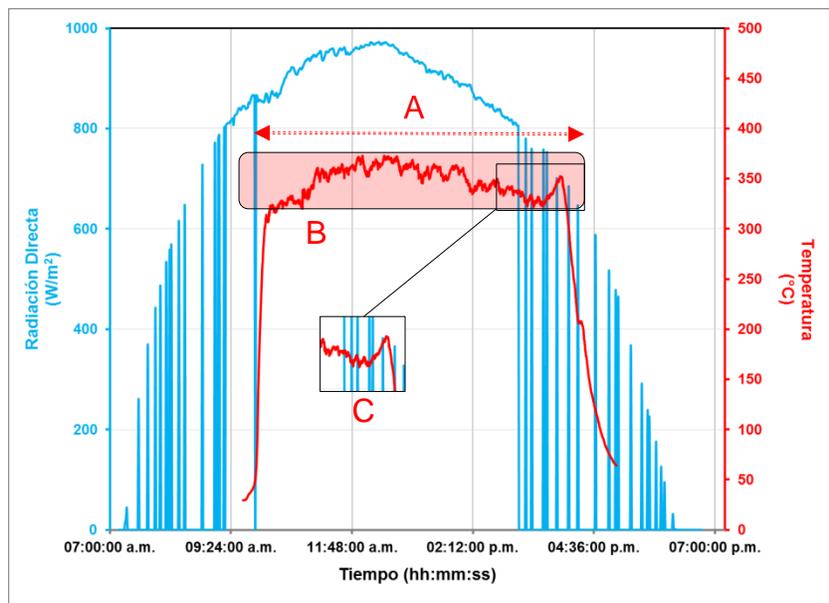
Punto en la gráfica	Explicación
A	El cielo estuvo sin nubosidad, por lo que se obtuvieron temperaturas estables durante 7.5 horas.
B	La temperatura en el receptor presento pocas oscilaciones y se mantuvo en un rango de 300°C a 350 °C
C	El equipo presento sombreado por edificaciones, lo que provocó la caída brusca de la temperatura en el receptor.

Prueba del 10-02-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$):

La prueba experimental dio inicio a las 09:38:16 horas y finalizó a las 17:02:42 horas. Se graficaron 2669 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

Al inicio de la prueba se presentó nubosidad constante que se dispersó a las 09:16:23 horas, a partir de ese punto la temperatura del receptor aumento de manera significativa.

Con la radiación solar incidente, la temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 6 horas, oscilando en un rango de 350 °C a 400 °C, a partir de las 15:01:12 horas la nubosidad se presentó de manera constante (Gráfica J.9).



Gráfica J.9: Prueba del 10-02-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$)

Tabla J.10: Prueba del 10-02-14(Día con nublados dispersos, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$)

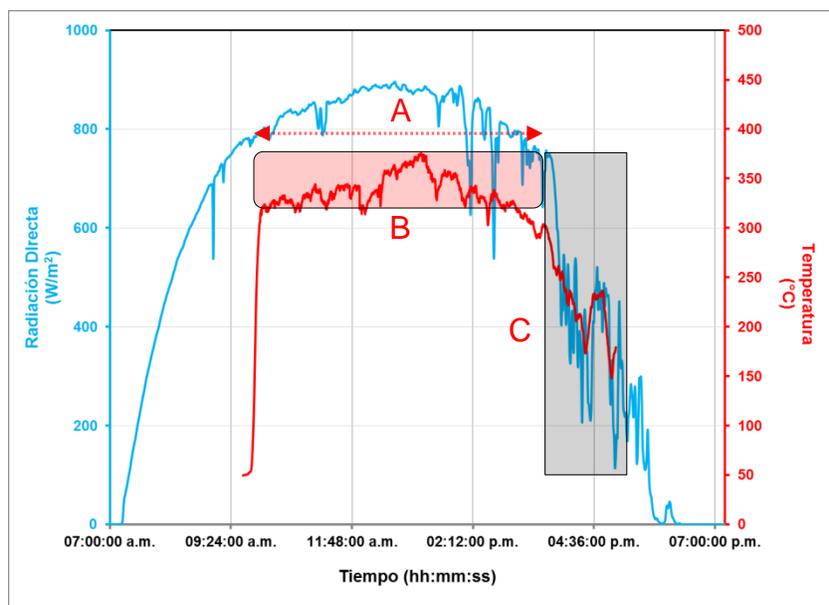
Punto en la gráfica	Explicación
A	Con la radiación solar incidente, la temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 6 horas.
B	La temperatura en el receptor se mantuvo en un rango de 350°C a 400°C.
C	Los picos y caídas de la radiación solar directa, no afecto de forma significativa la temperatura del receptor.

Prueba 19-02-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$):

La prueba experimental dio inicio a las 09:39:16 horas y finalizó a las 17:02:06 horas. Se graficaron 2665 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

Después del mediodía solar se presentaron nublados dispersos que afectaron la temperatura en la placa.

El receptor mantuvo la temperatura estable en un periodo de 5.2 horas, en un rango de 350°C a 400 °C, alrededor de las 15:39:00 horas la nubosidad se intensifico, provocando que la temperatura del concentrador disminuyera considerablemente en un lapso de 1.5 horas (Gráfica J.10).



Gráfica J.10: Prueba del 19-02-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$)

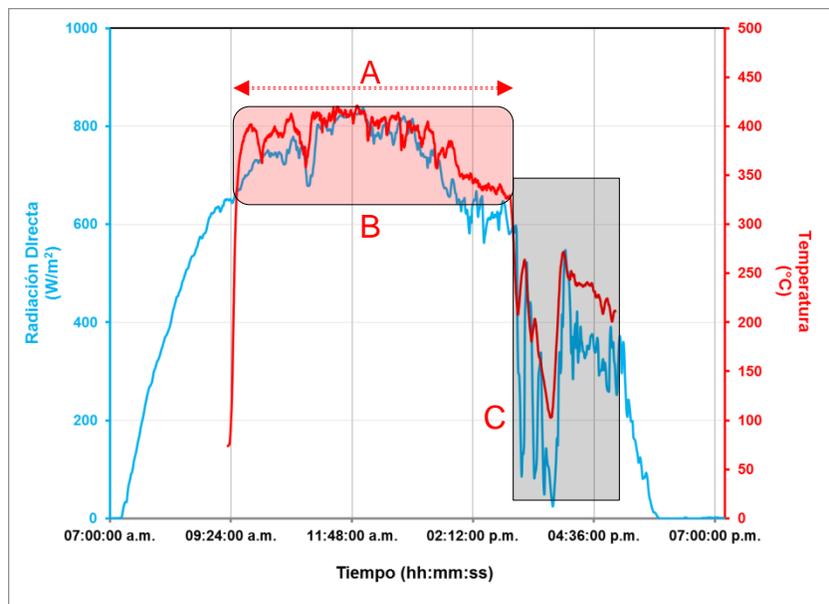
Tabla J.11: Prueba del 19-02-14(Día con nublados dispersos, $A_{sec}=1.88 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	El receptor mantuvo la temperatura estable en un periodo de 5.2 horas.
B	El rango de temperaturas que se mantuvo en el receptor fue de 350°C a 400 °C.
C	A partir de las 15:39:00 horas la nubosidad se intensifico provocando que la temperatura del concentrador disminuyera en un lapso de 1.5 horas.

Prueba del 21-02-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$):

La prueba experimental se realizó con seis secciones recubiertas del concentrador ($A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$), dio inicio a las 09:20:09 horas y finalizó a las 17:01:39 horas. Se graficaron 2674 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno. A lo largo de la prueba se presentaron perturbaciones en la radiación solar que afectaron la temperatura del receptor.

El receptor mantuvo una estabilidad de la temperatura en un lapso de 5.5 horas, manteniéndose en un rango de 350 a 400 °C, después de ese periodo, se presentaron nublados intensos, que provocaron la caída de la temperatura del receptor (Gráfica J.11).



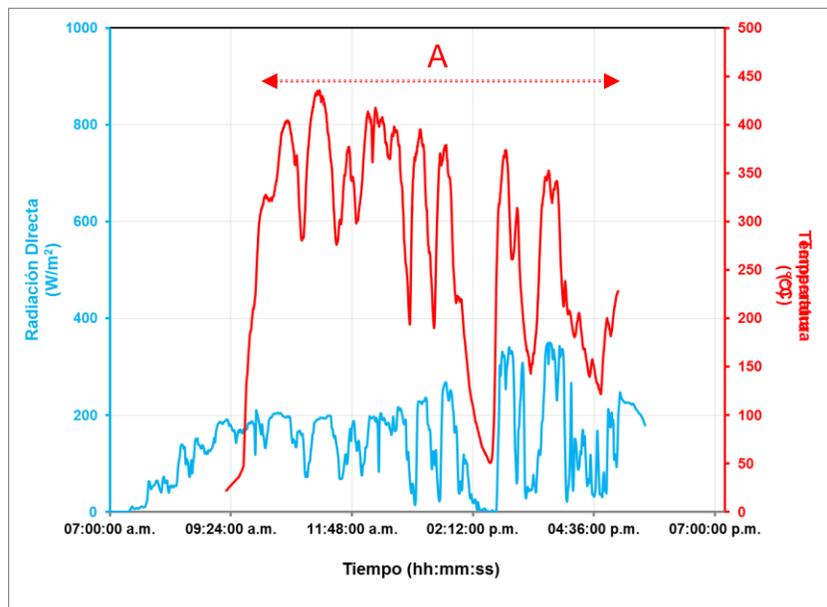
Gráfica J.11: Prueba del 21-02-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

Tabla J.12: Prueba del 21-02-14(Día con nublados dispersos, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	Ocurrieron variaciones en la radiación solar directa, con estas condiciones, la temperatura en el receptor se mantuvo durante 5.5 horas.
B	El receptor mantuvo una estabilidad en un rango de 350 a 400 °C.
C	A partir de las 14:53:29 horas, la nubosidad se intensificó, provocando que la temperatura en el receptor cambiara con la radiación solar, en un rango de 100°C a 250 °C.

Prueba del 23-02-14(Día nublado, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$):

La prueba dio inicio a las 09:18:10 horas y finalizó a las 17:04:50 horas. Se graficaron 2802 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno. Durante toda la prueba se presentaron nublados, la radiación solar directa se mantuvo por debajo de los 400 W/m², la temperatura en el receptor osciló en un rango de 50 °C a 400 °C durante 7 horas, se presentaron picos de temperatura que llegaron a 430 °C (Gráfica J.12).



Gráfica J.12: Prueba del 23-02-14 (Día nublado, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

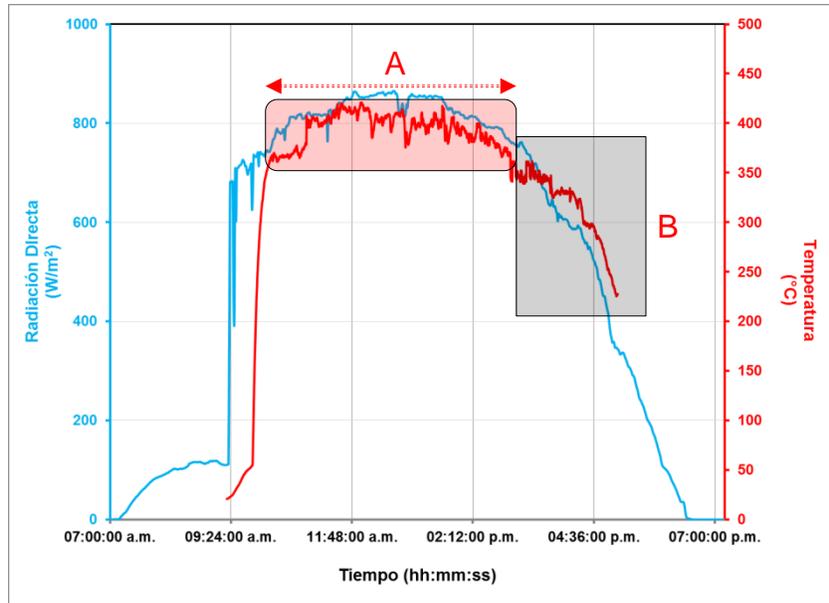
Tabla J.13: Prueba del 23-02-14(Día nublado, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	Se presentaron nublados a lo largo del día, la radiación solar directa no pasó de los 400 W/m ² , La temperatura en el receptor se mantuvo oscilando en un rango de 50 °C a 400 °C durante 7 horas.

Prueba del 24-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$):

La prueba dio inicio a las 09:18:57 horas y terminó a las 17:04:17 horas. Se graficaron 2794 puntos con un intervalo de 10 segundos cada uno.

La prueba se mantuvo sin nubosidad, se obtuvieron temperaturas estables durante 5 horas en un rango 350 °C a 400 °C, pasado ese tiempo la temperatura empezó a caer en función de la radiación solar directa (Gráfica J.13).



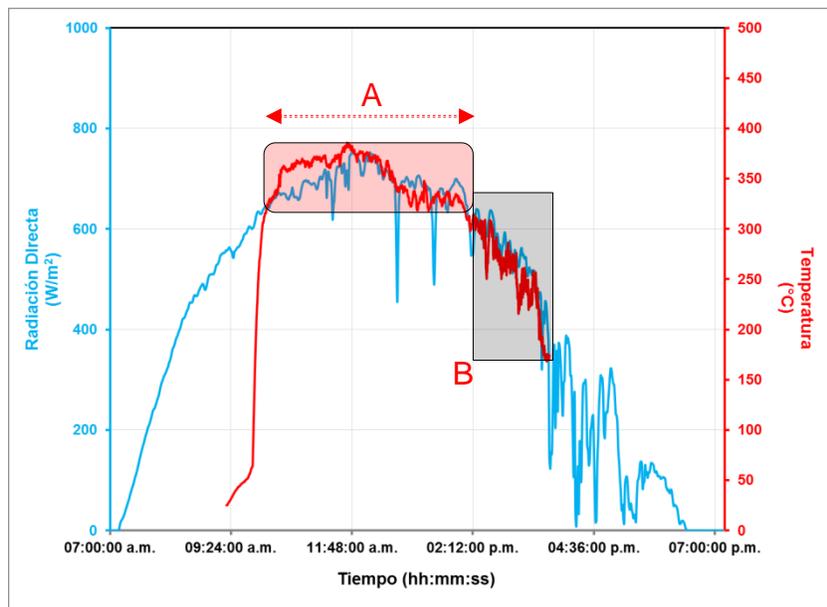
Gráfica J.13: Prueba del 24-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

Tabla J.14: Prueba del 24-02-14(Día soleado, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	En este lapso de tiempo la prueba se mantuvo sin nubosidad, se obtuvieron temperaturas estables durante 5 horas, en un rango 350 °C a 450 °C.
B	En el punto "B", la temperatura empezó a caer en función de la radiación solar directa

Prueba del 25-02-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$):

La prueba dio inicio a las 09:18:36 horas y finalizó a las 15:42:56 horas. Se graficaron 2307 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno. A lo largo de la prueba se presentaron nublados dispersos, la temperatura en la placa se mantuvo estable en un lapso 3 horas y con un rango de 350 °C a 400 °C. Después de ese punto la radiación solar directa empezó a disminuir y con ello la temperatura del receptor (Gráfica J.14).



Gráfica J.14: Prueba del 25-02-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

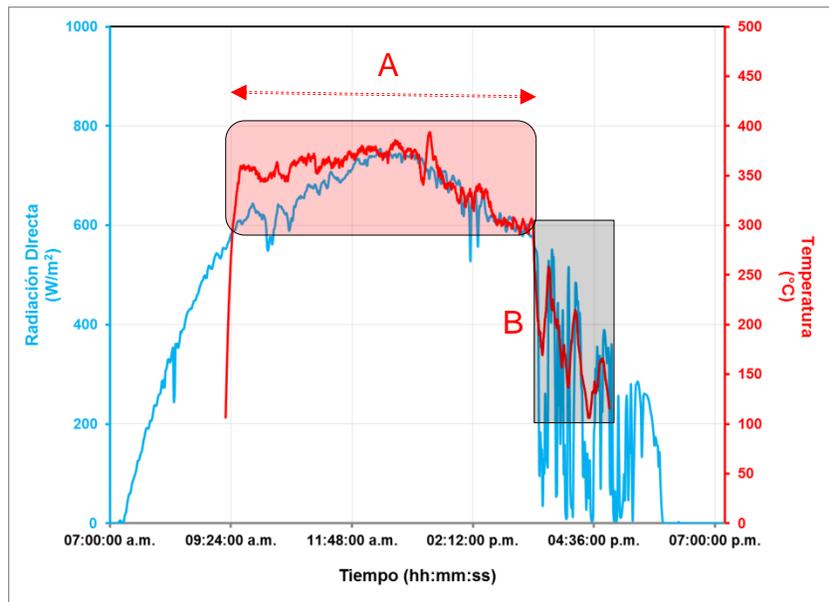
Tabla J.15: Prueba del 25-02-14(Día con nublados dispersos, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor se mantuvo estable 3 horas, en un rango de 350 °C a 400 °C.
B	En el punto "B" se aprecia como disminuye la temperatura del receptor en función a la radiación solar directa.

Prueba del 26-02-14(Día con nublados dispersos, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$):

La prueba experimental dio inicio a las 09:17:35 horas y finalizó a las 16:54:25 horas. Se graficaron 2743 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

El receptor mantuvo una estabilidad de la temperatura en un lapso de 6.5 horas y en un rango de 300 °C a 400 °C, después de ese periodo se presentó nubosidad intensa, por lo que la temperatura en el receptor se vio disminuida en función de la radiación solar directa, en un rango de 100 a 300 °C (Gráfica J.15).



Gráfica J.15: Prueba del 26-02-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

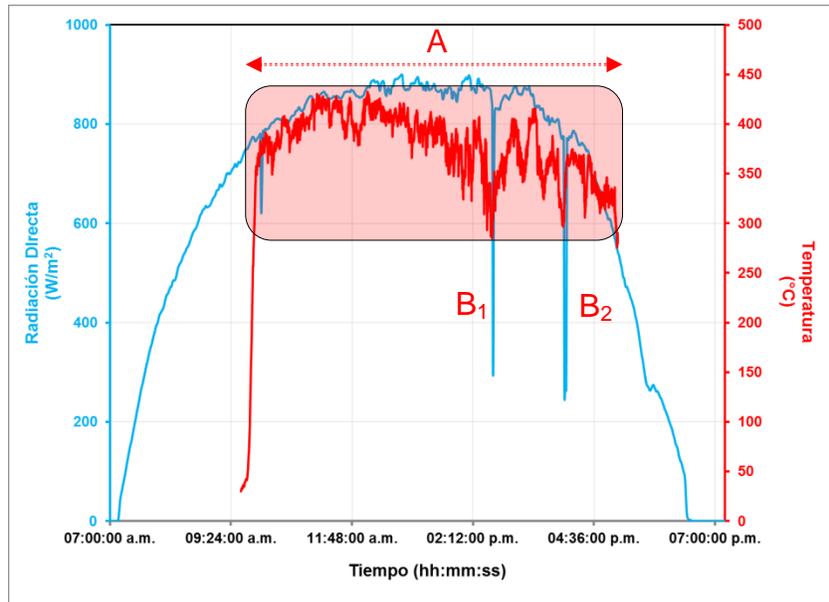
Tabla J.16: Prueba del 26-02-14(Día con nublados dispersos, $A_{sec}=2.83 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor se mantuvo estable en lapso de 6.5 horas y en de 300 °C a 400 °C.
B	En el punto “B” se presentó nubosidad intensa, por lo que la temperatura en el receptor se vio disminuida en función de la radiación solar directa, en un rango de 100 °C a 300 °C.

Prueba del 27-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

La prueba experimental se realizó con ocho secciones recubiertas del concentrador ($A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$), dio inicio a las 09:35:10 horas y finalizó a las 17:04:23 horas. Se graficaron 2691 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

La temperatura en el receptor presento pocas oscilaciones, se mantuvo estable durante 7.2 horas en un rango de 300 °C a 450 °C. Se presentaron dos caídas bruscas de la temperatura, producto del paso de nubes (Gráfica J.16).



Gráfica J.16: Prueba del 27-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

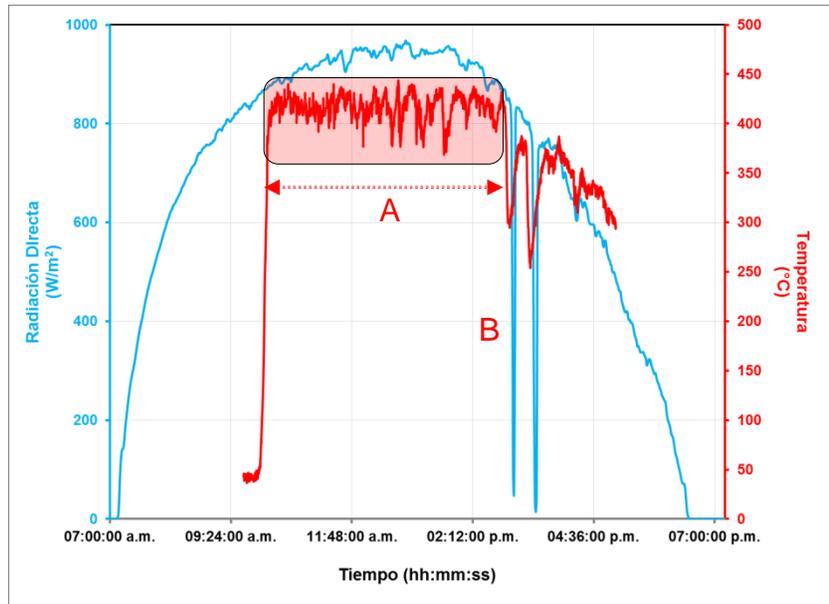
Tabla J.17: Prueba del 27-02-14(Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor presento pocas oscilaciones, se mantuvo estable durante 7.2 horas en un rango de 300 a 450 °C.
B₁,B₂	En el punto "B" se observan dos caídas de la temperatura producto del paso de nubes.

Prueba del 28-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

La prueba experimental se realizó con ocho secciones recubiertas del concentrador ($A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$), dio inicio a las 09:38:32 horas y finalizó a las 16:58:55 horas. Se graficaron 2661 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

La temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 5 horas en un rango de 350 °C a 450 °C, a partir de ese punto se presentaron dos caídas bruscas de la temperatura producto del paso de nubes (Gráfica J.17).



Gráfica J.17: Prueba del 28-02-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

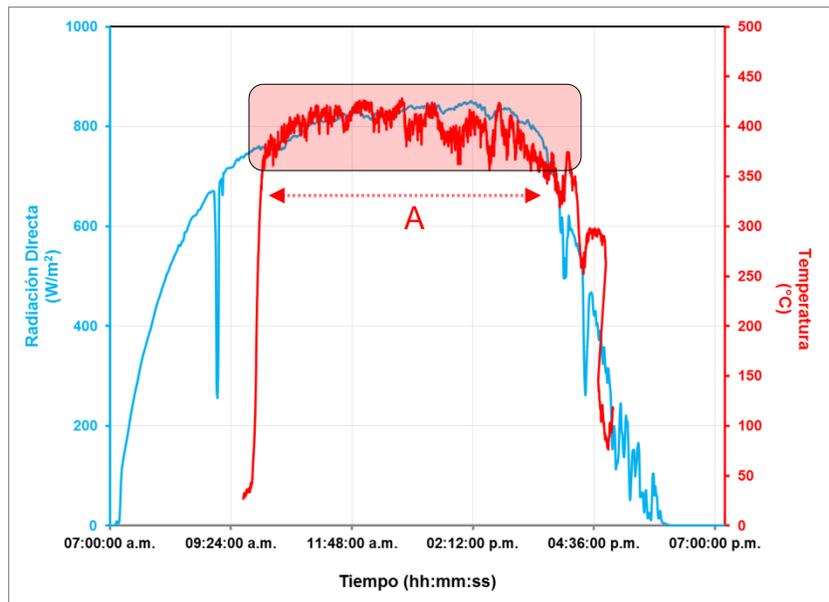
Tabla J.18: Prueba del 28-02-14(Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 5 horas en un rango de 350 a 450 °C. Las pequeñas variaciones de la temperatura en el receptor son producto de variación de la radiación solar incidente, perdidas convectivas y el ajuste continuo del seguimiento.
B	En este punto la intensidad de la radiación solar empezó a disminuir, se presentaron dos caídas bruscas de la temperatura producto del paso de nubes.

Prueba del 03-03-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

La prueba experimental dio inicio a las 09:38:32 horas y finalizó a las 16:58:55 horas, Se graficaron 2699 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

La temperatura en el receptor presento pocas oscilaciones, se mantuvo estable durante 6 horas en un rango de 350 °C a 450 °C , posterior a este punto, la temperatura en el receptor disminuyó en función de la radiación solar directa incidente (Gráfica J.18).



Gráfica J.18: Prueba del 03-03-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

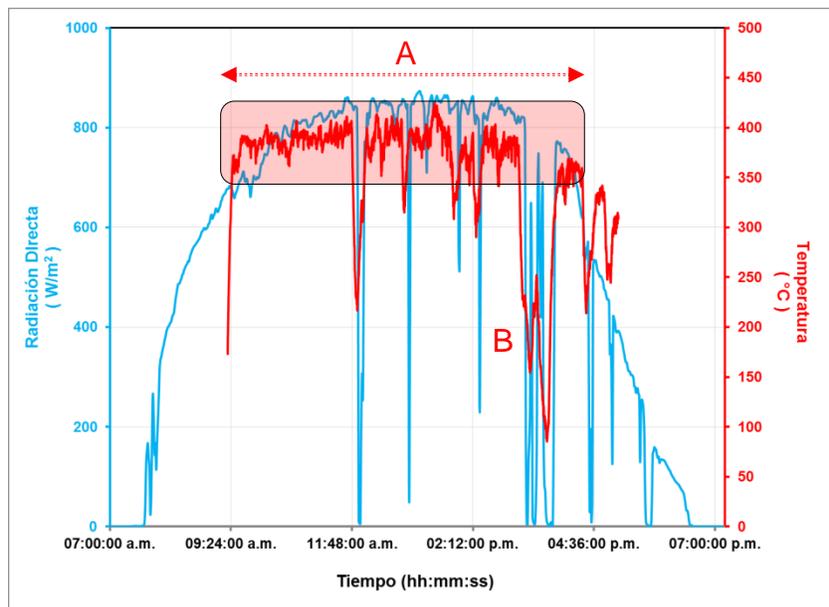
Tabla J.19: Prueba del 03-03-14(Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor presento oscilaciones, se mantuvo estable durante 6 horas en un rango de 350 °C a 450 °C, A partir de ese punto la intensidad de la radiación solar empezó a disminuir y con ello la temperatura del receptor.

Prueba del 04-03-14 (Día parcialmente nublado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

La prueba experimental dio inicio a las 09:20:07 horas y finalizó a las 17:05:09 horas. Se graficaron 2788 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

La temperatura del receptor se mantuvo estable durante 7.5 horas en un rango de 350 °C a 450 °C, a lo largo de la prueba se presentaron caídas de la temperatura producto del paso de nubosidad (Gráfica J.19).



Gráfica J.19: Prueba del 04-03-14 (Día parcialmente nublado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

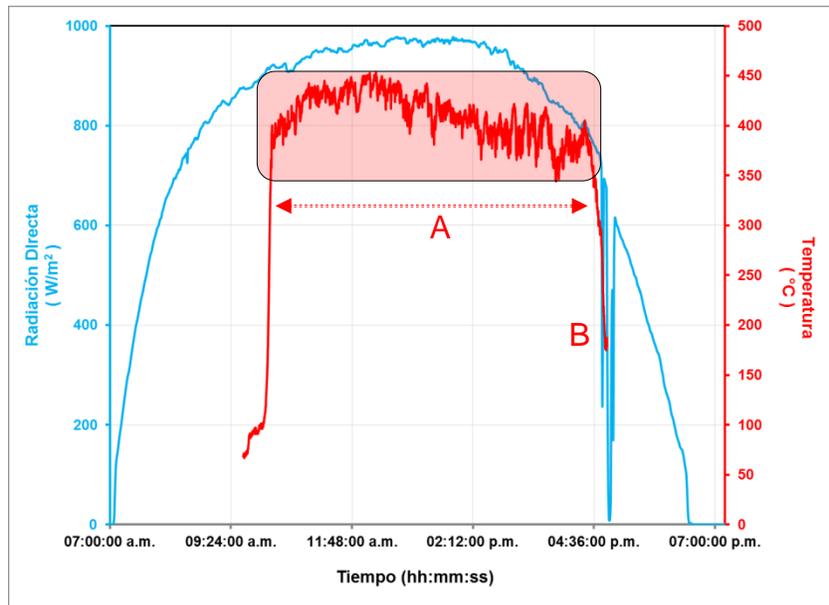
Tabla J.20: Prueba del 04-03-14(Día parcialmente nublado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor presento oscilaciones, se mantuvo estable durante 7.5 horas en un rango de 350 °C a 450 °C.
B	En el punto “B”, la temperatura del receptor fue afectada por la ausencia de radiación solar directa, el tiempo promedio que tarda en recuperarse la temperatura del receptor después de que paso la nubosidad es de 14 minutos.

Prueba del 05-03-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

La prueba experimental dio inicio a las 09:38:32 horas y finalizó a las 16:51:35 horas. Se graficaron 2600 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

La radiación solar directa no tuvo perturbaciones significativas, por lo que la temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 6 horas, oscilando en un rango de 350 °C a 450 °C (Gráfica J.20).



Gráfica J.20: Prueba del 05-03-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

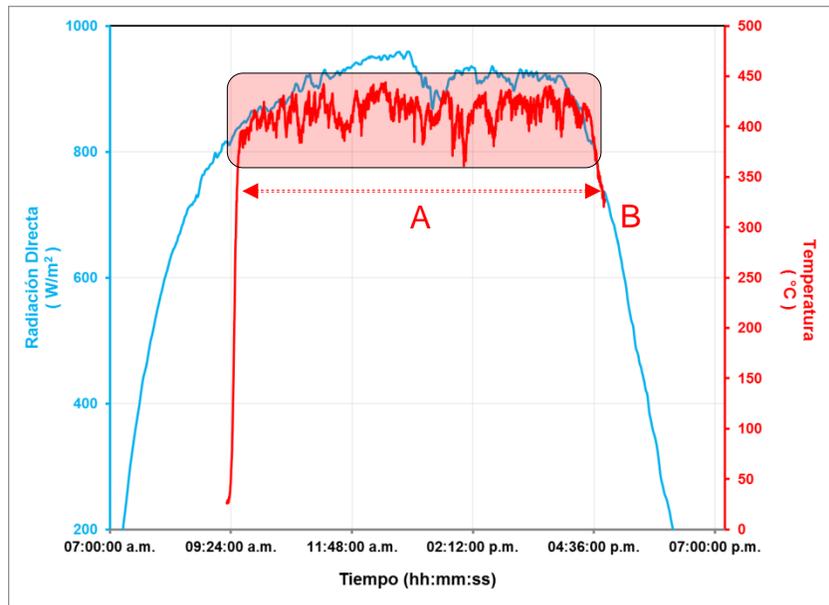
Tabla J.21: Prueba del 05-03-14(Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La radiación solar directa no tuvo perturbaciones significativas, por lo que la temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 6 horas, oscilando en un rango de 350 °C a 450 °C
B	En el punto “B” la temperatura del receptor disminuyo de manera considerable, debido al sombreamiento del concentrador por edificaciones cercanas.

Prueba del 06-03-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

La prueba experimental dio inicio a las 09:18:55 horas y finalizó a las 16:48:55 horas. Se graficaron 2702 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos cada uno.

La radiación solar directa no tuvo perturbaciones significativas, por lo que la temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 7 horas, oscilando en un rango de 350 °C a 450 °C (Gráfica J.21).



Gráfica J.21: Prueba del 06-03-14 (Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

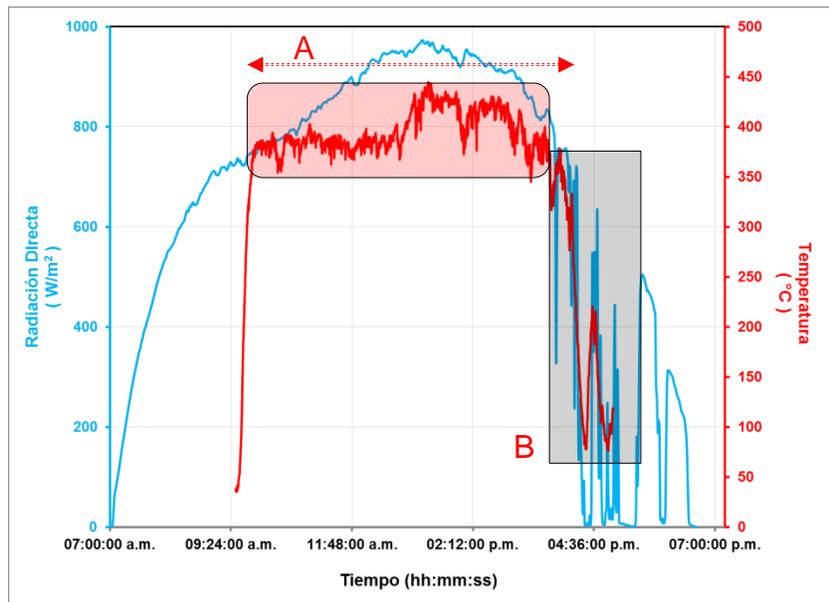
Tabla J.22: Prueba del 06-03-14(Día soleado, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

Punto en la Gráfica	Explicación
A	La temperatura en el receptor se mantuvo estable durante 7 horas, oscilando en un rango de 350 °C a 450 °C.
B	En el punto “B” la temperatura del receptor fue disminuyendo producto del sombreado de edificaciones cercanas.

Prueba del 07-03-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

La prueba experimental dio inicio a las 09:29:25 horas y finalizó a las 16:58:55 horas. Se graficaron 2699 puntos experimentales con un intervalo de 10 segundos entre cada uno.

La temperatura del receptor se mantuvo estable en un lapso de 6.5 horas y en un rango de 350 °C a 450 °C, después de ese periodo se presentó nubosidad intensa, por lo que la temperatura en el receptor disminuyó en función de la radiación solar incidente (Gráfica J.22).



Gráfica J.22: Prueba del 07-03-14 (Día con nublados dispersos, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

Tabla J.23: Prueba del 07-03-14(Día con nublados dispersos, $A_{sec}=3.77 \text{ m}^2$)

Punto en la gráfica	Explicación
A	La temperatura del receptor se mantuvo estable en lapso de tiempo de 6.5 horas en un rango de 350 a 450 °C
B	En el punto "B" la temperatura del receptor disminuye en función de la variación de la radiación solar incidente.

REFERENCIAS

1. Disponible en:<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,26707,en.html>.
2. Climate Change, 2001, Cambridge, university press, 2001.
3. Godfrey Boyle "Renewable Energy, Power for a sustainable future" 2nd edition, United Kingdom oxford university 2004.
4. Delyannis, E and A.El-Nasahar, a short historical review of renewable energy, Water and Electricity Authority (WEA), Abu-Dhabi, UAE .(2003)
5. Disponible en : Brakmann,2009, <http://www.solengco.com/index.html>
6. Disponible en la Web: weather.msfc.nasa.gov/GOES/goes_es.html
7. Conagua (2007). Estadísticas del agua en México, 2007. Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México,2007
8. Sánchez Maza, (2010). Energía Solar Térmica, Limusa, España.
9. Montes Pita, M.J. Análisis y propuestas de sistemas solares de alta exergía que emplean agua como fluido calorífero. Tesis. España Universidad Politécnica de Madrid. Madrid., 2008.
10. Energía solar y Agroenergética, Curso de energía solar térmica en línea. San Sebastián, España 2006.
11. Perales, (2008). Energías Renovables (Energía fotovoltaica, Térmica, Eólica y Climatización), Creaciones Copyright, Madrid, España.
12. Almanza, R. y Muñoz, F. (1994). Ingeniería de la Energía Solar, El Colegio Nacional, México. Kreith. Principles of solar engineering. Hemisphere publishing, Washington; 1978.
13. Duffie, John A., and Beckman, William A., Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd edition. Wiley, New York, 1991.
14. Bértiz, P. y Álvarez, G. (2008). Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares, cubasolar, Cuba.
15. Cengel, Yunus A., Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer.
a. McGraw-Hill, New York, 1996.
16. Tiwari G.N. Solar energy: fundamentals, design, modeling and applications. Alpha-Science, Delhi India Centre for energy studies Indian Institute of Technology; 2002.
17. Kosuke Aiuchi, Kazuo Yoshida, Masaki Onozaki, Yukuo Katayama ,Minoru Nakamura , Katsushige Nakamura, Sensor-controlled heliostat with an equatorial mount, Solar Energy, Vol.80, December 2005.
18. Hossein Mousazageh, Alireza Keyhami, Arzhang Javadi, Hossein Mobli, Karen Abrina, Ahmad Sharifi, A review of principle and sun-tracking

methods for maximizing solar systems output, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.13, January 2009

19. Rabl, Ari, Active Solar Collectors and Their Applications. Oxford University Press, New York, 1985
20. Ari Rabl., (1975) Comparison of solar concentrators, Solar Energy, Vol.18, December 1975, pp 93-111.
21. James O'Connell, Heating Water: Rate Correction Due to Newtonian Cooling, the Physics Teacher, Vol. 37, December 1999.
22. Alley, Richard B., (2004). Abrupt Climate Change. Scientific American, Vol. 291, No.5, November 2004, pp. 62-69.
23. Disponible en la Web: <http://www.estelasolar.eu/>