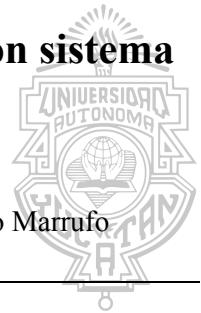


Diseño y simulación de un concentrador solar de plato parabólico con sistema de seguimiento



Ricardo A. Mena Pérez, Danna M. Cortés Chablé, A. Cristina Valencia Rosado, Renato E. Castillo Marrufo
Prof. Lifter O. Ricalde Cab



Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán
Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte. Mérida, Yucatán, Mexico.

ARTÍCULO INFO.

RESUMEN

Palabras clave:

Concentrador solar
Flujo radiativo
Nivel de concentración óptico
Reflectividad
Sistema de seguimiento solar

Los sistemas de concentración solar son de gran utilidad en aplicaciones de alta temperatura como el reformado y reciclado de plásticos, para lo que se requiere temperaturas de hasta 300°C. En este trabajo se lleva a cabo un estudio para el diseño de un sistema de concentración de plato parabólico de 2 m de diámetro, partiendo desde la parametrización de la parábola, la selección del material reflectivo y la creación de un modelo tridimensional para finalmente evaluar el desempeño del sistema mediante simulaciones de trazado de rayos.

Asimismo, se lleva a cabo el desarrollo de un programa de orientación que permite determinar los valores de azimut y altitud solar para cualquier día y hora del año, tomando en cuenta los ajustes de horario local y el movimiento aparente del Sol a lo largo del año. Esto con la finalidad de implementar un sistema de seguimiento en etapas posteriores del trabajo.

El material seleccionado para la superficie reflectora del colector fue el mylar, el cual posee un índice de reflectividad cercano al aluminio pulido ($r=0.85$) a un costo mucho más accesible, y con el cual se obtuvo un nivel de concentración óptico promedio de 168.5 soles en la cavidad del receptor. De igual forma, se encontró que un lapso de 4 minutos para el reposicionamiento del sistema de seguimiento no tiene repercusión en el desempeño óptico del concentrador.

Nomenclatura

<i>CSP</i>	<i>Sistema de concentración de potencia</i>	α	<i>Altura solar</i>
<i>PDC</i>	<i>Concentrador de plato parabólico</i>	γ_s	<i>Azimut</i>
<i>PTC</i>	<i>Concentrador cilindro-parabólico</i>	L_s	<i>Longitud del meridiano estándar</i>
<i>PET</i>	<i>Polietileno Tereftalato</i>	L_e	<i>Longitud del meridiano local</i>
<i>HDPE</i>	<i>Polietileno de alta densidad</i>	E_t	<i>Ecuación del tiempo</i>
<i>HSE</i>	<i>Hora solar estándar</i>	D	<i>Diámetro de la parábola</i>
<i>HSL</i>	<i>Hora solar local</i>	f	<i>Distancia focal</i>
ϕ	<i>Latitud</i>	h	<i>Profundidad de la parábola</i>
ω	<i>Ángulo horario</i>	V	<i>Vértice de la parábola</i>
δ	<i>Declinación solar</i>	m	<i>Pendiente de la recta</i>

1. Introducción

El presente trabajo es la primera etapa de un proyecto orientado al aprovechamiento de la radiación solar como fuente de calor para el reformado de plástico mediante el uso de concentradores solares parabólicos de plato (PDC), con los que se pretende alcanzar una temperatura de 300°C (PlastikCity) para poder derretir plástico del tipo PET y HDPE.

El exceso en la producción de plástico de un solo uso y principalmente su mal manejo como desecho es un problema medioambiental muy conocido en la actualidad y es el motivo principal de la realización de este trabajo. El sistema de concentración que se estudió fue un colector parabólico de plato acoplado a un sistema de seguimiento solar del cual se hablará más a detalle en la sección 3.2 *Modelo*.

1.1 Objetivos

En esta primera etapa del trabajo no nos centramos en darle solución al problema del plástico sino en sentar las bases teóricas para diseñar un sistema de concentración solar que sea factible para implementarse a nivel local con el propósito ya mencionado. En este sentido, el objetivo principal de este proyecto es:

Maximizar el tiempo de incidencia perpendicular de los rayos solares sobre las superficies de los espejos parabólicos de plato para garantizar una óptima captación solar.

Asimismo, se plantearon 4 objetivos específicos orientados al logro del objetivo general:

1. *Estudiar la naturaleza óptica de los espejos parabólicos de plato.*

2. *Identificar las limitaciones de los espejos que tengan un impacto en el rendimiento óptico de los sistemas de concentración.*
3. *Definir la forma y disposición adecuada de los elementos del sistema y determinar el nivel de concentración alcanzado bajo determinadas condiciones de operación.*
4. *Crear un modelo de simulación y un plano de construcción del sistema con todas las especificaciones necesarias.*

1.2 Clasificación

Existen diversas tecnologías diseñadas para aprovechar la radiación solar entre las cuales podemos hacer una primera distinción: las que aprovechan la radiación para generar energía eléctrica y las que lo hacen para un uso térmico. Los sistemas de colectores solares pertenecen a este último grupo y dependiendo del diseño de estos dispositivos se pueden alcanzar diferentes temperaturas. (Y. Hernandez, 2012)

1.2.1 Sistemas de acumulación

Este tipo de colectores tienen el propósito de acumular temperatura y transferir calor a una superficie. Se caracterizan por no incluir un sistema de seguimiento, por lo que la relación entre la superficie del colector y la de absorción es prácticamente la misma (Y. Hernandez, 2012), a diferencia de los sistemas de concentración. Algunos de ejemplos de estos sistemas son los colectores solares de placa plana y los tubos evacuados. Es importante mencionar que este tipo de colectores logra superar con dificultad los 70°C aunque para aplicaciones industriales pueden

llegar hasta los 250°C (H. Barshilia et al., 2010), por lo que son utilizados mayormente en aplicaciones de baja temperatura como el calentamiento del agua.

1.2.2 Sistemas de concentración

Este tipo colectores utilizan un sistema de seguimiento con el fin de aumentarla radiación solar directa en la superficie absorbente y concentrada ya sea en una superficie, una línea, en un solo punto. Los sistemas de concentración alcanzan temperaturas desde los 400°C hasta 1000°C (H. Barshilia et al., 2010). Existen tres clasificaciones de los sistemas de concentración de potencia (CSP):

- **Centrales de concentración:** Consisten en varios helióstatos situados alrededor de una torre, los cuales reflejan los rayos solares hacia una superficie de concentración en la punta de la torre. El fluido de trabajo que emplean son usualmente sales derretidas dado que alcanzan temperaturas superiores a los 500°C.
- **Concentradores cilindro-parabólico (PTC):** Tienen un diseño conformado por la mitad de un cilindro con una concavidad geométrica de parábola. En el foco se coloca un tubo por donde pasa un fluido, el cual absorbe la energía térmica para aplicaciones como la generación de energía eléctrica.
- **Concentradores de plato parabólico (PDC):** Su diseño permite dirigir los rayos solares hacia un solo punto focal. La energía térmica es captada por un receptor el cual hace circular un fluido que absorbe esta energía para aplicaciones como la generación de energía.

1.3 Antecedentes

Varios estudios se han realizado tanto de manera experimental como de manera teórica en programas de simulación para demostrar la factibilidad de los sistemas de concentración solar para diferentes aplicaciones, de entre las cuales algunos autores ya han estudiado su uso para derretir plástico. En un estudio por Marrakchi et al. (2017) se simuló un PTC con un tubo evacuado como receptor y obtuvo una temperatura máxima de 300°C en el interior del receptor. En otro estudio por Fabian Dähler et al. (2018) se alcanzó un nivel de concentración máximo de 11,100 soles con un sistema PDC de 4.5m de diámetro. S. Umar et al. (2014) alcanzó los 200°C con un sistema PTC. En otro estudio se alcanzó una temperatura de 1400K con un PDC de 4.18 m de diámetro y un receptor que emplea argón como fluido de trabajo, asimismo, se realizó una demostración experimental que sustenta sus resultados (H. Cherif et al., 2019).

Respecto a los estudios enfocados al reciclado del plástico, en una tesis por D. Mewes (2018) se diseñó y probó un pequeño PTC de 1 m de largo con un tubo encapsulado hecho de materiales sencillos ya que se diseñó

para implementarse en países como Indonesia, que no poseen muchos recursos económicos pero tienen un grave problema con el plástico. En sus resultados se alcanzó una temperatura por encima de los 200°C incluso habiendo realizado sus experimentos en zonas de Europa que no tienen un recurso solar tan alto como la zona ecuatorial o la tropical. En la Universidad Xavier-Ateneo, Filipinas, se llevó a cabo un proyecto para reformar el plástico HDPE en bloques de construcción a partir de un PDC de 1 m de diámetro junto con una lente Fresnel, logrando alcanzar temperaturas mayores a los 200°C, con lo que se pudo llevar el HDPE a su temperatura de transición vítreo y reformarlo en bloques de construcción (E. Dollera et al., 2019). Monnet et. al (2018) diseñaron un PDC de 1 m de diámetro utilizando pequeños espejos cuadrados y ubicaron en el punto focal un receptor cuadrado de metal, con lo que alcanzaron temperaturas por encima de los 200°C; en este estudio también se utilizó la radiación solar para derretir plástico, el cual directamente se pasaba por una máquina de extrusión para moldearlo.

Por otro lado, se ha estudiado que la forma del espejo es vital para lograr un nivel de concentración alto ya que pequeños defectos en la superficie como la rugosidad o el ángulo de curvatura producen puntos focales con áreas extensas con una parte especular y otra difusa que afectan el desempeño del sistema (B. Anak et al. 2015).

Asimismo, en un artículo por Evangelos Bellos et al. (2019) se estudiaron 5 diferentes receptores de cavidad empleados comúnmente en sistemas PDC, se realizó un análisis térmico, óptico y exergético y se encontró que la disposición que presenta la mayor eficiencia es el receptor cilíndrico-cónico con un serpentín de cobre en el interior y una cubierta gruesa de aislante ($k=0.04 \text{ W/mK}$). La eficiencia térmica que alcanza es de 67.95% y la óptica de 85.42% a una temperatura del fluido de trabajo de 300°C.

2. Marco teórico

En el diseño de un sistema PDC se deben tomar en consideración varios aspectos de la radiación solar para poder aprovecharla en la mayor medida posible, para ello se debe comprender el movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste desde el punto de vista de un observador, los fenómenos ópticos que afectan la propagación de la luz en una superficie, así como las formas geométricas que permiten concentrar esta radiación.

2.1 Movimiento aparente del Sol

El sistema Sol-Tierra ha sido estudiado desde siglos atrás y en la actualidad se cuenta con un amplio conocimiento de la interacción entre uno y otro. En un sistema de concentración es de vital importancia conocer la tra-

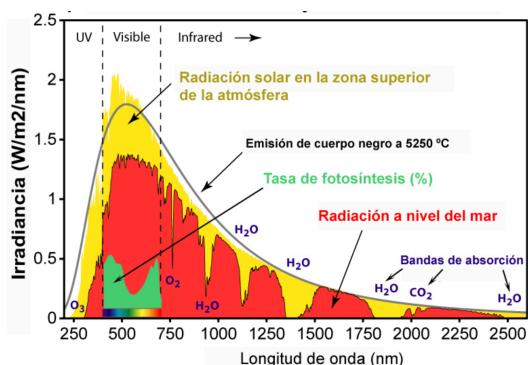


Fig. 2 Comparación del flujo radiativo emitido por el Sol y el percibido en la superficie terrestre.

yectoria del Sol en la bóveda celeste a lo largo del año para maximizar la incidencia de los rayos solares de manera perpendicular. Para esto existen ecuaciones que permiten determinar la trayectoria del sol en locaciones específicas.

La declinación solar (δ) es el ángulo que se forma entre el ecuador y la línea trazada del centro de la Tierra al centro del Sol. Su valor varía debido a la inclinación sobre el eje de rotación de la Tierra (Honsberg et. al), el cual se describe por la ecuación (1), donde n es el número del día en días julianos. Los valores máximos que puede tomar la declinación son $\pm 23.45^\circ$.

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365}(n + 284) \right] \quad (1)$$

El ángulo horario (ω) indica el desplazamiento angular del Sol sobre el plano de la trayectoria solar. Se toma como origen del ángulo el mediodía solar, por lo que los valores incrementan en el sentido del movimiento del sol (Honsberg et. al), donde cada hora corresponde a 15° . La ecuación (2) describe el comportamiento del ángulo horario, donde T representa a la hora solar en decimales, en valores de 0 hasta 24.

$$\omega = -15(12 - T) \quad (2)$$

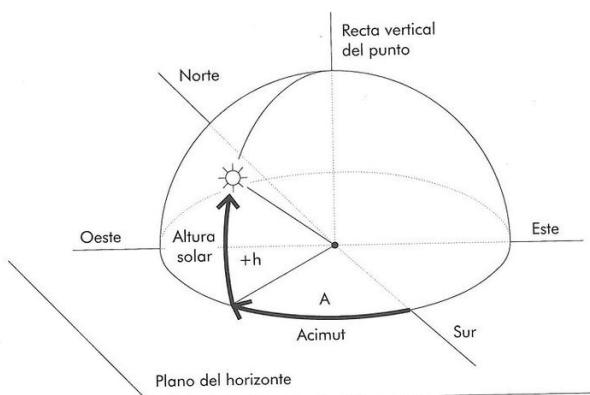


Fig. 1 Diagrama ilustrativo de la altura solar y el azimut.

La altura o elevación solar (α) es el ángulo que se forma entre el plano del observador y el Sol (figura 1). Su valor varía desde el horizonte (0°) hasta el cenit (90°) en función de la latitud (ϕ) del lugar y el día del año (Honsberg et. al). El ángulo máximo de elevación se da al medio día solar. La ecuación (3) expresa el método de cálculo de la altura solar:

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (3)$$

El azimut γ_s es el ángulo de orientación sobre el plano del observador (figura 1) que determina en dónde se encuentra el cuerpo celeste, es la dirección de la brújula (Honsberg et. al). Su valor varía a lo largo del día y se describe en la ecuación (4).

$$\gamma_s = \arccos \left[\frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \right] \quad (4)$$

El mundo está virtualmente dividido en 24 zonas horarias, en la que cada una cubre 15° , es decir, por cada 15° se tiene 1 hora diferente. Los meridianos estándar son múltiplos de 15° y se miden hacia el este y el oeste, partiendo desde el meridiano 0, conocido como meridiano de Greenwich. Se le denomina Hora Solar Estándar (HSE) a la hora correspondiente del meridiano de referencia o meridiano estándar de cada zona horaria. La Hora Solar Local (HSL) es la hora respecto al meridiano local, el cual corresponde a la longitud geográfica del lugar (Messenger, et. al, 2005). En este sentido, si se busca que un colector solar tenga una orientación lo más exacta posible es necesario hacer un ajuste de horario de la hora estándar a la hora local:

$$HSL = HSE + 4(L_s - L_e) + E_t \quad (5)$$

Donde L_s es la longitud del meridiano estándar y L_e es la longitud del meridiano local.

Asimismo, existe una discrepancia entre el movimiento del Sol medio y el movimiento aparente del sol verdadero (Messenger, et. al, 2005), a esto se le conoce como la ecuación del tiempo:

$$E_t = [0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos(2\Gamma) - 0.04089 \sin(2\Gamma)](229.18) \quad (6)$$

$$\text{Donde } \Gamma = 2\pi \frac{n - 1}{365}.$$

2.2 Fenómenos ópticos en las superficies

La luz proveniente del Sol presenta un comportamiento de emisión descrito por un cuerpo negro a 5780K, sin embargo, el flujo de radiación que incide sobre la superficie de la Tierra se ve mermado debido a la dispersión que este experimenta al atravesar la atmósfera. La figura 2

muestra la comparación entre el espectro de emisión del Sol y el que incide sobre la superficie terrestre al nivel del mar.

La radiación que logra atravesar la atmósfera es la que puede ser aprovechada por los sistemas de concentración, pero a nivel superficial, en los materiales, esta radiación experimenta otros fenómenos de propagación antes de incidir en la superficie objetivo. La luz incidente puede reflejarse, absorberse o transmitirse, de tal manera que el flujo total de radiación se expresa como:

$$I_T = I_r + I_a + I_t \quad (7)$$

Donde I_r es el flujo reflejado, I_a la parte absorbida e I_t la parte transmitida.

Para un sistema de concentración solar se busca que la superficie de colección posea un valor muy alto de reflectividad así como valores muy bajos de absorbtividad y transmitividad en las longitudes de onda que se desean captar para así maximizar el flujo radiativo que es dirigido hacia el receptor. Usualmente se emplean espejos de muy alta reflectividad para este tipo de sistemas pero se puede emplear cualquier material que cumpla con esta propiedad. En este sentido, el parámetro más importante a tomar en cuenta para la superficie del colector es el índice de reflectividad (r), el cual indica la proporción del flujo que es reflejado con respecto al total incidente:

$$r = \frac{I_r}{I_T} \quad (8)$$

Esta reflexión se da en un caso ideal como totalmente especular, sin embargo, en la realidad no existe una superficie perfectamente lisa a nivel atómico, por lo que la reflexión especular contiene siempre un pequeño grado de dispersión (M. Hongn et al., 2011). La rugosidad es un factor importante ya que, de acuerdo con la ley de la reflexión, cada rayo que incide sobre una superficie se reflejará con ángulos iguales medidos sobre la normal a la superficie (figura 3a), de esta manera los ángulos de reflexión serán distintos para cada rayo según sea la pendiente de la superficie rugosa y por tanto, la luz será dispersada de manera difusa en todas las direcciones sobre el plano de incidencia (figura 3b).

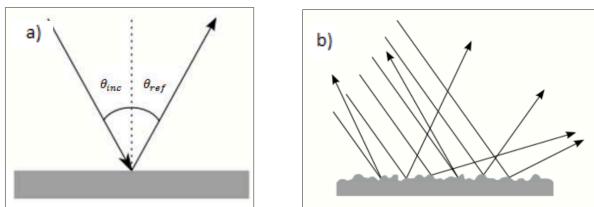


Fig. 3 Fenómeno de reflexión de la luz.

Sin embargo, este efecto se puede reducir al emplear superficies muy lisas, de tal manera que el resultado es un

ligero ensanchamiento del haz cónico de luz que se refleja en la dirección especular, de modo que la mayoría de los rayos se reflejan de manera especular con el ángulo θ_{ref} y un pequeño conjunto lo hace con un desplazamiento de $\pm\phi$ de la dirección especular (M. Hongn et al., 2011), como se muestra en la figura 4.

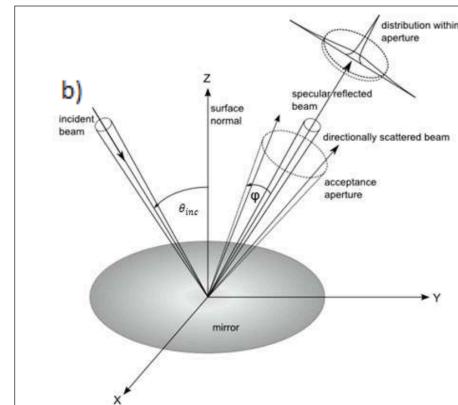


Fig. 4 Componentes especular y disperso de la reflexión de un haz de luz.

2.2.1 Selección del material reflectivo

Como se mencionó en el apartado anterior, para un concentrador solar se necesitan materiales de muy alta reflectividad. Los espejos de lámina de plata son uno de los materiales ideales para esta aplicación puesto que tienen índices de reflectividad por encima de 0.9 (M. Hongn et al., 2011). Sin embargo, estos son muy costosos y pesados en comparación con otros materiales como el aluminio pulido, el cual también tiene valores de r muy altos, alrededor de 0.8 (H. Jamali, 2019), por lo que es más usual encontrar aluminio en los concentradores solares, especialmente aquellos con áreas de colección muy grandes por la dureza del material. Aún así, el aluminio requiere equipo especial para moldearlo en forma de plato parabólico, por lo que, para aplicaciones más sencillas resulta ser caro en comparación con otras opciones como el mylar. Este material, también conocido como manta térmica, es mucho más económico que el aluminio y tiene

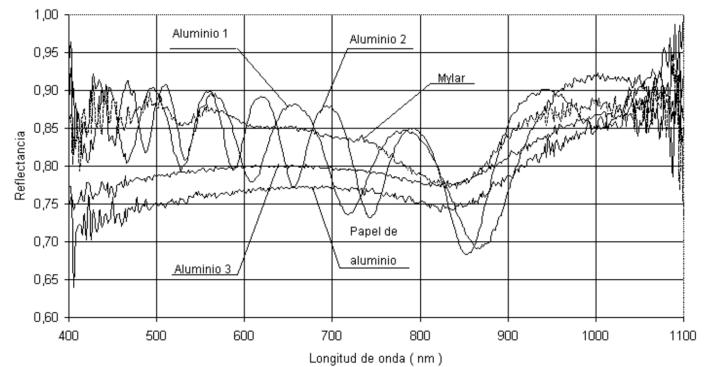


Fig. 5 Comparación de la reflectancia espectral de diferentes materiales.

propiedades ópticas muy similares, en la figura 5 se compara la reflectancia espectral entre el mylar y 4 tipos de aluminio (R. Echazú), y como se puede observar, presenta un índice de reflectividad bastante alto de 0.85 en promedio.

Tomando lo anterior en consideración, se eligió al mylar como el material apropiado para la realización de este trabajo debido a su precio accesible, fácil manipulación y alta reflectividad. Las propiedades y costos en comparación con otros materiales se encuentran en la Tabla 1 (M. Hongn et al., 2011) (R. Echazú).

Tabla 1
Reflectividad y costo de algunos materiales.

Material	r	\$MXN/m ²
Espejo de 4 mm, vidrio blanco	0.94	422
Espejo de 3 mm, vidrio verde	0.82	290
PVC blanco	0.932	322
Aluminio pulido	0.853	376
Papel aluminio 400	0.799	9
Manta térmica	0.851	21

2.3 La parábola

Para que un sistema pueda concentrar la radiación debe ser capaz de direccionar la luz reflejada hacia una zona determinada, que en el caso de los PDC es su punto focal. Un sistema PDC emplea la propiedad geométrica de la parábola que permite dirigir un haz que incide sobre cualquier punto de su superficie hacia el punto focal; esta figura está descrita matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$y = \frac{1}{4p} x^2 \quad (9)$$

Donde p es la distancia del vértice (V) al punto focal. La figura 6 muestra que la parábola es el lugar geométrico del punto de intersección (M) entre dos rectas, una anclada a una recta directriz y siempre vertical y otra anclada al punto focal (F).

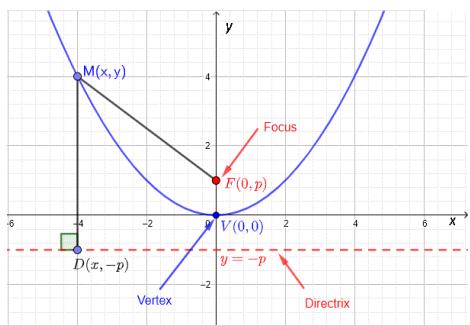


Fig. 6 Representación geométrica de una parábola.

Si se trazaran varias líneas perpendiculares (Q) a la directriz que se reflejen en la parábola, como se ilustra en la figura 7, todas estas líneas terminarán pasando por el foco.

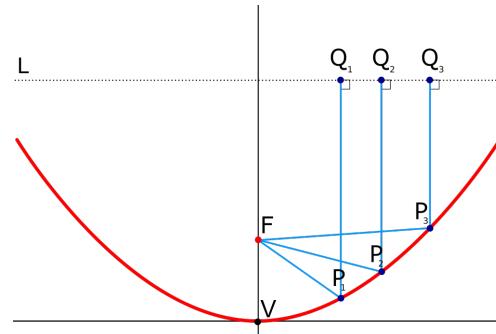


Fig. 7 Representación de los rayos reflejados en la superficie de la parábola.

3. Metodología

El proceso de realización de este trabajo se dividió en 3 secciones principales: El desarrollo de un programa de orientación el cual entrega los valores de altura solar y azimut para una fecha y hora específicas, tomando en cuenta los ajustes de la HSL y la ecuación del tiempo (E_t) relativos al movimiento aparente del Sol; el diseño de un modelo digital del concentrador solar y el sistema de seguimiento mecánico, tomando en cuenta la naturaleza de la radiación solar y aprovechando las propiedades de las superficies de tal manera que se concentre la radiación en un área pequeña; y finalmente, la simulación del trazado de rayos del sistema para analizar el desempeño del sistema propuesto bajo diferentes condiciones de operación.

3.1 Programa de orientación

Un concentrador de plato parabólico debe recibir los rayos solares de manera perpendicular para concentrarlos en el punto focal y así poder funcionar adecuadamente. Tomando en cuenta que el Sol está en constante movimiento, fue necesario desarrollar un sistema de orientación para que los rayos solares permanezcan perpendiculares al colector, independientemente del día y hora. Para lograr esto, se desarrolló un programa que realiza los cálculos de ajuste de horario y de orientación con sólo introducir la fecha y la hora.

3.1.1 Matlab

Se utilizó el software de Matlab para la creación inicial del programa. El código está conformado por 3 etapas: la declaración de las variables de entrada, que son la hora en decimales, la longitud del meridiano estándar, la longitud del meridiano del lugar, el número de día y la

latitud; el ajuste del la HSE a la HSL; y las variables de salida del programa que son la altura solar y el azimut.

La lógica que sigue el programa es la siguiente: Una vez declaradas las variables iniciales, se calcula la E_t con la ecuación (6) y se sustituye en la ecuación del ajuste de horario (5) para obtener la HSL, en donde cada término de esta se encuentra en horas, es decir, decimales. De esta forma la hora que se utiliza dentro de las ecuaciones siguientes es la local del lugar, esto con la intención de que la orientación sea la más precisa respecto al movimiento del sol. Posteriormente, se calcula el ángulo horario (2) y la declinación solar (1), y una vez teniendo estos parámetros se sustituyen en las ecuaciones, como corresponda, de altura solar (3) y azimut (4) y se imprimen sus valores.

3.1.2 Arduino

Para la implementación real del sistema de seguimiento es necesario tener la información en tiempo real y de manera automática. De acuerdo con Sambasiva (2013), el elemento ideal para obtener la información de esta manera es mediante un dispositivo Real Time Clock (RTC) (figura 8), por lo que se recurrió al uso del programa Arduino para extraer las variables de entrada de este dispositivo.



Fig. 8 Dispositivo RTC.

Del RTC es posible extraer las variables de hora y fecha en formato numérico decimal. Consultando el datasheet se encontró que el RTC contempla los años bisiestos y los tiene declarados hasta el año 2100, por lo que al diseñar el código se tomó en cuenta el ajuste de días julianos para los años bisiestos.

Para utilizar y extraer información del dispositivo RTC, el código de Matlab fue reescrito en el lenguaje de programación de Arduino. Dado que los valores extraídos son numéricos, se añadió una conversión para obtener el valor de la fecha en días julianos, de esta manera, los datos extraídos serán las nuevas variables de entrada y el proceso de cálculo de la orientación se hará de forma automática como se expuso en el apartado anterior, con lo que las variables de salida también se obtendrán de manera automática según se configure la frecuencia de la operación.

3.2 Modelo

En paralelo con el desarrollo del programa se comenzó el diseño del modelo 3D. El método de construcción que se propone usar es inflar el mylar, ya que es un material flexible, sobre una base plana, de tal manera que se genere una superficie en forma de catenaria (J. Lee et al., 2003), la cual posteriormente será moldeada con algún material rígido para conservar la forma de manera permanente. Como se vió anteriormente, la forma ideal para un colector solar es la parábola, ya que esta permite concentrar la radiación en un espacio pequeño; afortunadamente, la catenaria y la parábola comparten la misma forma en la región próxima a sus vértices (J. Cook, 2020), lo cual nos permitió realizar un diseño con la ecuación de la parábola y después hacer el ajuste con una catenaria.

Retomando la ecuación (9), que describe una parábola, se propuso un diseño en el que las medidas estén en función del diámetro (D) para que este pueda ser escalado a las dimensiones que se requiera. El objetivo fue que el diseño no fuese tan profundo (cóncavo) para que la película flexible no se deformase y no se comprometa su resistencia, pero también tratando de mantener el punto focal a una distancia cercana. Esto último con la intención de mantener el centro de gravedad cerca de la base, ya que estas dos características son contrarias, es decir, mientras menor sea la distancia focal, mayor será la profundidad de la parábola. Tomando los parámetros como unidades con respecto a diámetro, las medidas propuestas son las que se encuentran en la Tabla 2, en la cual el valor propuesto se obtuvo considerando un diámetro de 2 metros.

Tabla 2
Parámetros de la parábola

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor propuesto
Diámetro	D	1D	2 m
Distancia focal	f	0.33D	0.66 m
Profundidad	h	0.19D	0.38 m

Se propuso un diámetro de 2 m ya que la mayoría de los artículos consultados en los antecedentes emplean colectores de 1 m de diámetro y llegan a temperaturas a penas encima de los 200°C, incluso utilizando materiales de alta reflectividad. Por ello se hizo una primera propuesta de hasta 2 m de diámetro, considerando que el material a utilizar no tiene una reflectividad tan alta.

El ajuste de la curva catenaria a la de la parábola se realizó de manera experimental hasta obtener una ecuación que presente una diferencia muy pequeña entre ambas curvas. Se modelaron las dimensiones relativas a un diámetro de 1 para poder escalar fácilmente el diseño a cualquier diámetro que se necesite. La figura 9 muestra el resultado de este ajuste y la ubicación del punto focal.

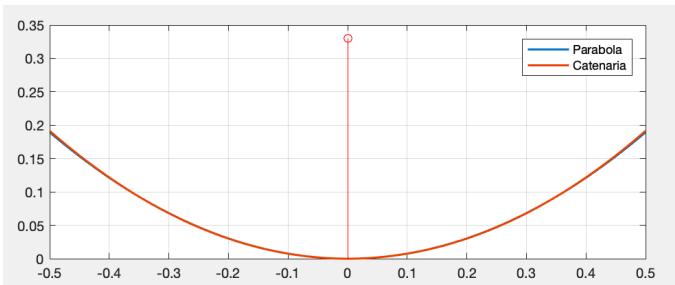


Fig. 9 Ajuste de la curva catenaria a una parábola.

La máxima diferencia entre ambas curvas es de 0.002D y las ecuaciones que las describen son:

$$\text{Parábola: } y = \frac{25}{33}x^2 \quad (10)$$

$$\text{Catenaria: } y = 1.5 \cosh(x) + 1.5 \quad (11)$$

Una vez habiendo definido la forma del colector, este se modeló en Fusion 360 junto con el recibidor consultado de E. Bellos et al. (2019) y se le agregaron soportes de madera al plato, una varilla para ubicar el recibidor a la distancia focal y se colocaron pequeños tornillos sobre la superficie reflectora para asemejar un armado realista. En la figura 10 se muestran el recibidor y el colector.

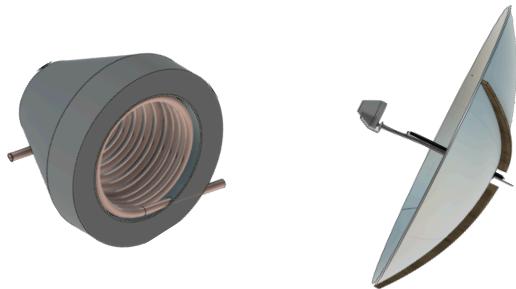


Fig. 10 Modelo del recibidor (izquierda) y del colector solar (derecha).

Con las medidas definidas para cada componente, el nivel de concentración geométrico (C_A) resulta de 70.64, el cual es la relación entre el área del colector y la del la cavidad del recipiente (I. Sarbu et al., 2017).

Por otro lado, se comenzó a trabajar en el diseño mecánico del sistema de seguimiento pero debido a la complejidad de las piezas a modelar, para este primer trabajo sólo se propusieron las dimensiones y los materiales de la carcasa. Los criterios de selección de los materiales fueron que sean asequibles, fáciles de conseguir o que ya contemos con ellos, y fáciles de manipular sin maquinaria especializada debido a las limitaciones por la pandemia. Por ello se propuso el uso de cubetas de pintura (figura 11a), latas de aluminio (figura 11b) y motores DC de electrodomésticos antiguos (figura 11c). Asimismo, se planea comprar baleros (figura 11d) para las partes rotatorias. Todos estos elementos se incluyeron en el modelado del sistema de seguimiento ilustrados en la figura 11.

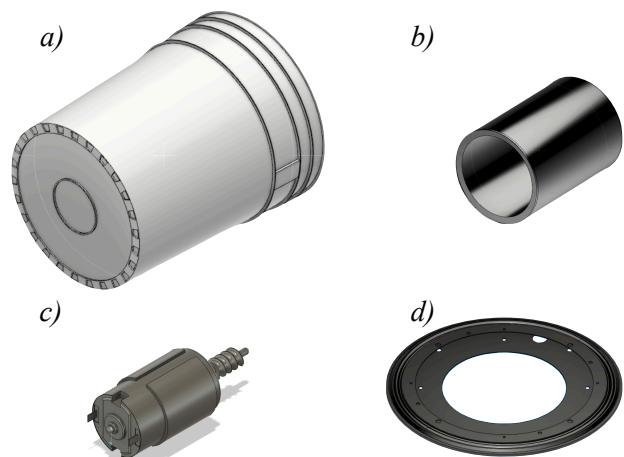


Fig. 11 Elementos del sistema de seguimiento.

El modelo ya ensamblado tendrá la disposición que se muestra en la figura 12, con el espacio de dos cubetas para acomodar un soporte interno y un motor con engranaje planetario para mover en dirección azimutal una tercera cubeta en la parte superior, la cual se encuentra asentada sobre un balero de 30 cm (figura 11d). Dentro de esta cubeta se encuentra un eje horizontal, el cual permite un movimiento de rotación vertical para el ajuste de la altura solar; este movimiento será realizado por el motor de la figura 11c. La base del colector estará anclada a la lata de la figura 11b para hacer la conexión con el eje horizontal.



Fig. 12 Modelo del sistema de seguimiento solar acoplado al colector.

Una vez completado el modelo digital se procedió a realizar las simulaciones.

3.3 Simulación

Para la realización de las simulaciones del trazado de rayos se usó el software COMSOL Multiphysics 5.3 utilizando el módulo de óptica sin efectos térmicos. El primer impedimento con este software fue que no permitía introducir el modelo completo por conflictos con la genera-

ción de mallas, puesto que las superficies de los tubos del receptor son muy pequeñas. Por esta razón, se optó por modelar únicamente el plato del colector con sus tornillos y el exterior del receptor, al que se le agregó una cubierta en su abertura inferior para analizar el mapeo de incidencia sobre una superficie plana. Se simularon 3 acomodos del sistema: con el receptor a la distancia focal (figura 13a), con el receptor 5 cm por encima de la distancia focal (figura 13b), luego a 1.85 cm por debajo de la distancia focal (figura 13c) y finalmente, con el receptor a la distancia focal pero sin la cubierta en la abertura (figura 13d) para analizar el mapeo en el interior, ya que en la realidad el receptor no lleva cubierta. Asimismo, se realizaron 5 simulaciones extras para estudiar casos especiales y limitaciones del sistema.

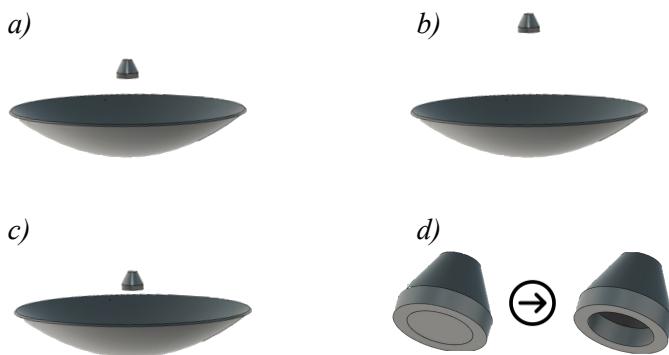


Fig. 13 Acomodos para las simulaciones del trazado de rayos.

Después de haber preparado los diferentes acomodos en archivos STEM, estos se importaron dentro del software de trazado de rayos. En este se determinaron los parámetros de todas las superficies del colector, las más importantes fueron la superficie reflectora y la cubierta del receptor (o su interior para el caso del último acomodo). La figura A2 muestra las configuraciones aplicadas a la superficie del reflector. Dado que el software no permitía asignar un valor de reflectividad directamente, se eligió un modelo de reflexión probabilística, con el que se determinó la fracción de la luz reflejada de forma especular y la fracción difusa; el valor seleccionado fue de 0.85, de acuerdo con las propiedades del mylar. Asimismo, al ser un material opaco la transmitividad se seleccionó de 0 y se asignó una absorvtividad de 0 para la parte reflejada de manera especular, por lo que la ecuación (7) del flujo radiativo total quedaría como sigue:

$$I_T = (I_{r \text{ especular}} + I_{r \text{ difusa}}) + \gamma_\alpha + \gamma_\tau \quad (12)$$

De esta manera se forzó una “reflectividad equivalente” atendiendo a la definición de la ecuación (8), ya que el valor de 0.85 corresponde a la fracción de la luz que se refleja hacia el receptor con respecto al total.

La superficie de la cubierta se designó como un acumulador para poder analizar posteriormente el mapeo de incidencia.

Dado que los ajustes de orientación dentro del software fueron difíciles de realizar, se mantuvo el colector en posición horizontal para las primeras simulaciones, por lo que fue necesario determinar el día y la hora a la que el Sol pasará justo encima del colector dadas las coordenadas de Mérida, Yucatán (21° N, 89.6° W), considerando una zona horaria UTC-6 para todo el año. Para determinar esta fecha se aplicó la premisa de que el día que la declinación solar coincida con la latitud de Mérida, entonces el Sol pasará con un azimut de 90° todo el día, es decir, a las 12:00 solar se encontrará sobre el colector, por lo que al sustituir el valor de declinación en la ecuación (1) se obtuvieron los días 19 de Julio y 24 de Mayo, siendo este último el seleccionado para la simulación. Sin embargo, dado que el software trabaja con una hora estándar, hacia falta calcular la corrección del horario aplicando las ecuaciones (5) y (6), de tal manera que se obtuvo un retraso de 4 min con 36 segundos. Esta configuración se observa en la figura A3 al introducir la hora 11:55:24, y de igual manera se ilustra la posición del sol que se buscaba (encima del colector).

4. Resultados

Después de haber configurado todas las variables del sistema y la posición del Sol, se procedió a realizar las simulaciones del trazado de rayos en los acomodos propuestos; se simuló una cantidad de 1500 rayos con las características de la radiación solar. Cabe señalar que todos los rayos mostrados en las simulaciones son los que han sido reflejados por la superficie del colector, los rayos incidentes solares no se muestran sino como un vector grueso color rojo indicando su dirección.

El nivel de concentración óptico (C_o) se calculó como la razón entre la intensidad de radiación incidente en el receptor (I_{rec}) y la intensidad incidente en la superficie reflectora (I_{sref}) (I. Sarbu et al., 2017), la cual se mantuvo constante en 1000W/m^2 para todas las simulaciones, la ecuación (13) describe este cálculo:

$$C_o = \frac{I_{rec}}{I_{sref}} \quad (13)$$

Debido a que la superficie del receptor presenta una distribución no uniforme del flujo radiativo (I_{rec}), se tomó el valor promedio como referencia para calcular C_o .

4.1 Simulación sobre la distancia focal

En esta primera simulación con el colector a 5 cm sobre el punto focal (figura 14a) se observan dos tendencias

principales, la primera es que la mayoría de los rayos siguen una trayectoria especular, mientras que una pequeña fracción se refleja de manera difusa, tal como se estableció en las configuraciones de la superficie. Por otro lado, a esta distancia resulta que la mayoría de los rayos no son aprovechados ya que el colector se encuentra muy lejos; la figura 14b muestra los rayos que terminan por incidir en la cubierta del colector.

El nivel de concentración promedio que se obtuvo en la superficie del recibidor fue de 29.33, es decir, una intensidad incidente promedio de 29,330 W/m², la figura 14c muestra que la distribución de este flujo es muy disperso sobre esta superficie y que no se está aprovechando por completo.

4.2 Simulación a la distancia focal

En esta simulación, la superficie de la cubierta del recibidor fue situada a la distancia focal, es decir, 66 cm desde la base del colector, con lo que se aseguró que todos los rayos incidan sobre la superficie del recibidor, como se observa en las figuras 15a-15b. Dado que la superficie coincide con el punto focal, el nivel de concentración presenta un máximo de 15,540 soles, sin embargo este sólo se presenta en un punto, el promedio sobre la superficie es de 929.4 en una distribución circular, como se observa en la figura 15c.

4.3 Simulación bajo la distancia focal

Para esta simulación se eligió un valor específico de desfase entre el punto focal y la superficie del recibidor del tal manera que los rayos incidan sobre la superficie completa y no se pierda ninguno. Esta condición se cumple a una distancia de 1.85 cm (0.00925D) arriba o por debajo de la distancia focal ya que la forma que producen los rayos reflejados es un cono a manera de hiperboloide de 2 hojas.

Los resultados de esta simulación son muy similares a los de la anterior (figuras 16a-16c) con la diferencia que el área de incidencia es más grande y por ende se tiene un nivel de concentración promedio más bajo de 620.73 así como un máximo menor de 2,277.8.

4.4 Simulación sin la cubierta del recibidor

En una aplicación real el recibidor no llevará una cubierta sino que los rayos incidirán en la superficie interna, por lo que se realizó una simulación a la distancia focal con el recibidor descubierto. Las figuras 17a-17b muestran la trayectoria de los rayos en la cavidad del recibidor y se observa que ninguno es desperdiciado. Sin embargo, el mapeo de la figura 17c muestra una distribución no uniforme del flujo radiativo en el interior, el cual coincide

con los resultados de E. Bellos et al. (2019) para un recibidor de cavidad cilíndrico-cónico. El nivel de concentración promedio es de 168.5 y el máximo que se alcanza en los bordes inferiores es de 472.21.

Tabla 3

Resultados de las simulaciones en las 4 configuraciones.

Simulación	C ₀	C _{0 max}
Sobre la distancia focal	29.33	159.5
A la distancia focal	929.4	15,540.0
Bajo la distancia focal	620.73	2,277.8
Recibidor sin cubierta	168.5	472.21

4.5 Simulaciones extra

4.5.1 Demostración del programa

Se realizó una simulación para demostrar la validez del programa desarrollado. Para este caso, se seleccionó el 1º de Agosto a las 10:30 am como una fecha y hora arbitrarios, de las cuales se obtuvieron los valores de $\alpha=67.42^\circ$ y $\gamma_s=-86.27^\circ$ con el programa descrito en la sección 3.1. Posteriormente se orientó el modelo con estas especificaciones y se simuló el trazado de rayos introduciendo en las configuraciones la fecha y hora establecida, es decir, no se realizó ningún otro ajuste. La figura 18a muestra el resultado de esta simulación y se puede observar que el colector se encuentra perfectamente alineado con el Sol.

4.5.2 Simulación sin ajuste horario

Esta simulación se realizó para mostrar la importancia de implementar el ajuste horario en el sistema de orientación ya que a lo largo del año se van presentando desfases entre la HSL y la HSE debido a las variaciones de la declinación. Se eligieron las configuraciones del acomodo sobre la distancia focal para apreciar mejor la trayectoria de los rayos, sin embargo, la hora introducida fue las 12:00 am. La figura 18b muestra la distribución de los rayos que inciden sobre la superficie del recibidor, los cuales reducen ligeramente el nivel de concentración en comparación cuando se realizó el ajuste de horario.

4.5.3 Simulación sin ajuste de orientación

Se planteó un caso extremo en el cual no se realiza un ajuste de orientación para seguir al sol y se simuló bajo las mismas condiciones que en la simulación a la distancia focal pero para el mes de diciembre. El resultado se puede observar en la figura 18c donde ningún rayo incide

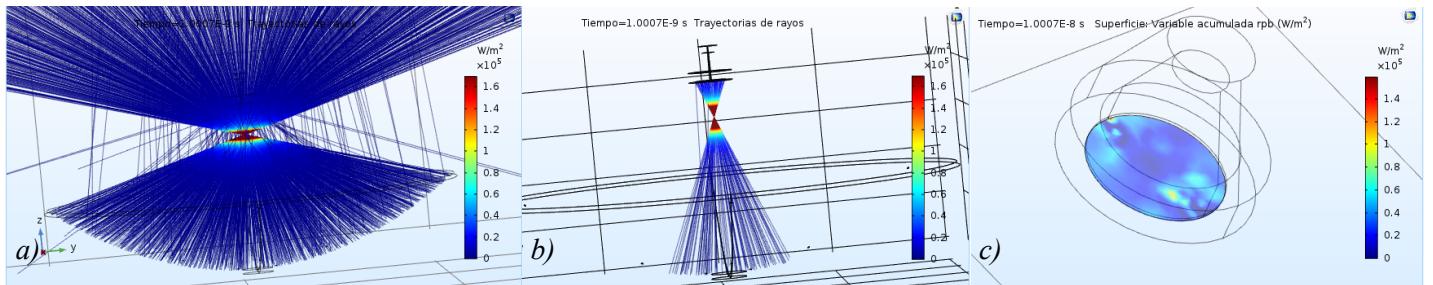


Fig. 14 Resultados de la simulación en la configuración del receptor sobre la distancia focal.

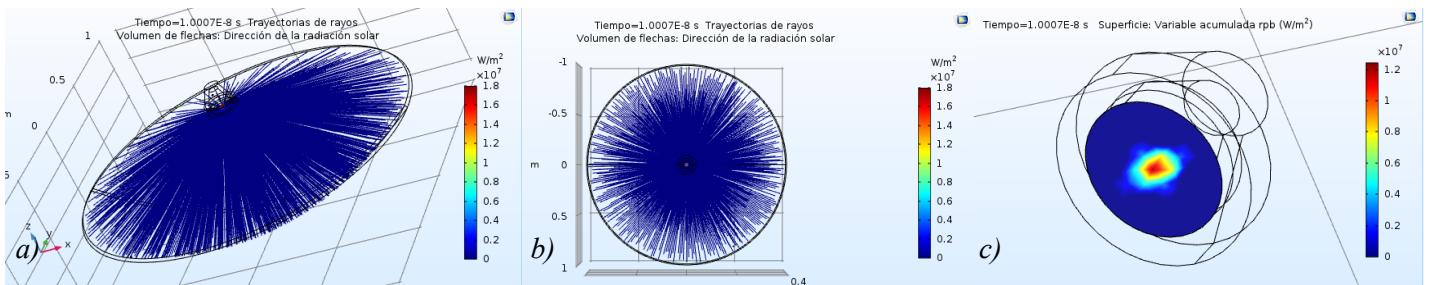


Fig. 15 Resultados de la simulación en la configuración del receptor a la distancia focal.

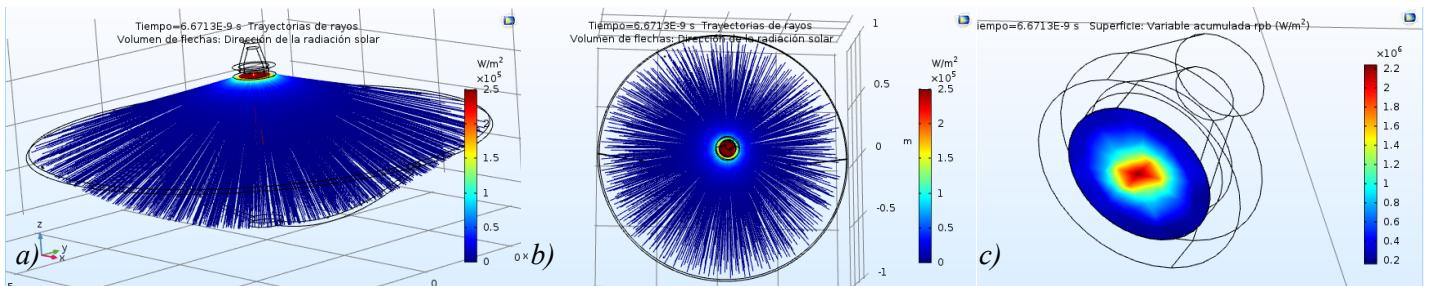


Fig. 16 Resultados de la simulación en la configuración del receptor bajo la distancia focal.

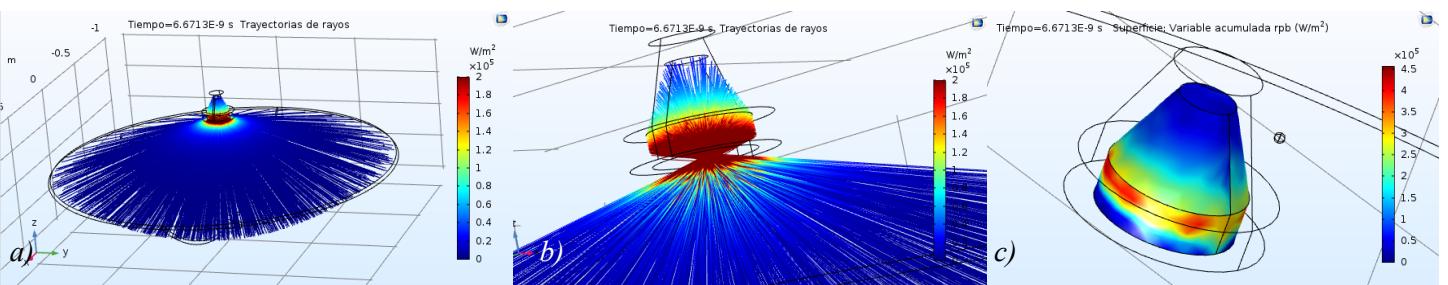


Fig. 17 Resultados de la simulación en la configuración del receptor a la distancia focal sin cubierta.

sobre la superficie del receptor ya que el Sol cambia su trayectoria a lo largo del año.

4.5.4 Simulación de retrasos

Finalmente, se planteó el caso en el que el sistema de seguimiento no se reposicione de manera continua sino que lo haga en intervalos de tiempo discretos. Para ello se simuló el comportamiento de la trayectoria de los rayos hacia el receptor con un tiempo de espera de 10 min en intervalos de 1 min, los resultados se muestran en la figura 19 y en la Tabla 4 se registraron los niveles de concentración promedio para cada caso así como su relación con

el valor inicial en porcentaje. El acomodo seleccionado fue a la distancia focal.

5. Discusión de resultados

De acuerdo con los resultados de las simulaciones en los 4 acomodos propuestos, el que presenta el mayor nivel de concentración promedio es aquel con el receptor situado a la distancia focal. Se definió este acomodo como el ideal porque es el único de los acomodos propuestos que aprovecha todos los rayos incidentes y permite un rango de tolerancia en el tiempo de reposiciona-

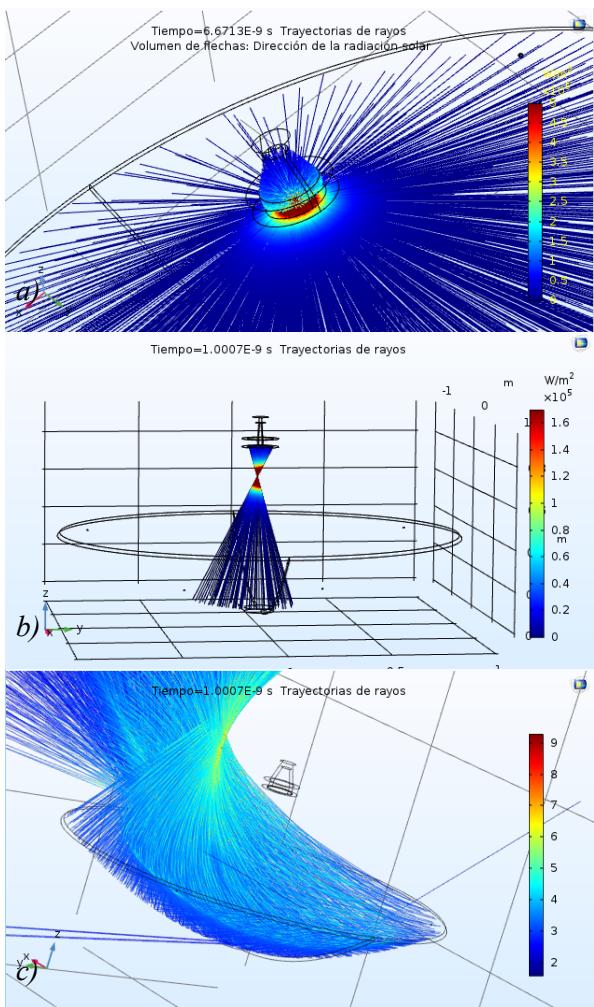


Fig. 18 Resultados de las simulaciones extra a) demostración del programa, b) sin el ajuste horario y c) sin ajuste de orientación.

miento del colector, ya que la simulación por debajo de la distancia focal requiere una orientación permanente y exacta hacia el Sol, de lo contrario se comenzarían a perder rayos incidentes desde el primer minuto. Si bien el nivel de concentración en la cavidad del receptor no es

Tabla 4
Resultados de la simulación de retrasos.

Retraso (min)	I _{rec} (W/m ²)	C ₀	C ₀ /C _{0 0}
0	1.6858E+05	168.58	100.0%
1	1.6848E+05	168.48	99.9%
2	1.6872E+05	168.72	100.1%
3	1.6894E+05	168.94	100.2%
4	1.6835E+05	168.35	99.9%
5	1.6217E+05	162.17	96.2%
6	1.5323E+05	153.23	90.9%
7	1.4511E+05	145.11	86.1%
8	1.3667E+05	136.67	81.1%
9	1.2823E+05	128.23	76.1%
10	1.1881E+05	118.81	70.5%

tan alto como el alcanzado en la cubierta, en una aplicación real este no llevará la cubierta.

Por otro lado, la simulación de demostración del programa valida la fiabilidad del mismo al posicionar con gran precisión el colector puesto que los valores de α y γ_s que arroja ya están ajustados para cualquier fecha y hora.

Las simulaciones sin los ajustes de horario y de orientación muestran la importancia de tomarlos en consideración porque afectan fuertemente en el desempeño del sistema. La primera puede variar entre unos pocos segundos y varios minutos dependiendo de la fecha que se trate, y como ya se analizó en la simulación de retrasos, incluso con pocos minutos de desfase se presentan pérdidas en el rendimiento del sistema. El ajuste de orientación es el más importante de estos dos puesto que existe una mayor variación en la trayectoria del Sol que en los desfases de

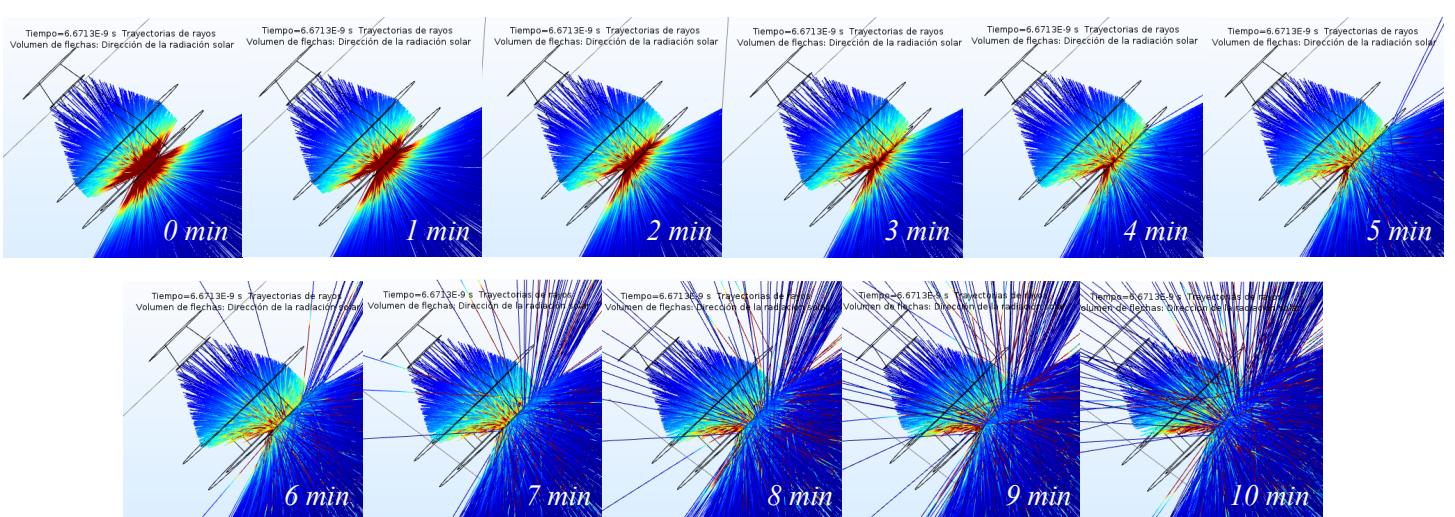


Fig. 19 Trayectorias de los rayos en el receptor con diferentes retrasos de reposicionamiento.

horarios, pudiendo hacer que el sistema no concentre en absoluto la radiación si se encuentra muy desorientado.

Finalmente, la simulación de retrasos muestra una tendencia a reducir el nivel de concentración conforme mayor sea el desfase excepto para los casos de 2 y 3 min, donde de hecho el valor de la concentración promedio es hasta 0.2% mayor. Esto es debido a que se trabaja con promedios y al irse moviendo el punto focal, una zona de mayor concentración se acerca más a las paredes de la cavidad, ocasionando un incremento en el flujo radiativo máximo y por ende incrementando el promedio. Sin embargo, una vez pasados los 4 min se empiezan a perder rayos y el nivel de concentración disminuye. Por esta razón se consideró que un intervalo de 4 min para el reposicionamiento del sistema de seguimiento no tendrá impacto en el desempeño del sistema, siempre y cuando se respete el acomodo del receptor situado a la distancia focal.

6. Conclusiones

De acuerdo con el objetivo general de este trabajo, el programa de seguimiento solar desarrollado asegura que el colector esté siempre orientado correctamente hacia el Sol de tal manera que todos los rayos incidentes sean reflejados hacia el receptor, permitiendo así maximizar el tiempo de incidencia perpendicular de los rayos solares para lograr una mayor captación solar.

También se obtuvo que el acomodo óptimo para el colector solar es aquel en el que el receptor se encuentra ubicado a la distancia focal, ya que permite una mayor libertad de tiempo para el sistema de reposicionamiento en comparación con los demás acomodos simulados.

El nivel de concentración solar promedio en el acomodo óptimo y bajo condiciones ideales, es decir, cielo despejado e irradiancia de 1 kW/m^2 , es de 168.5 soles en el interior del receptor, con un máximo de 472.21 soles en las paredes bajas del interior.

El tiempo máximo de reposicionamiento del colector debe ser de 4 minutos, de acuerdo con las simulaciones efectuadas, de lo contrario se comenzará a perder el nivel de concentración y por ende la eficiencia del sistema decaerá.

Asimismo, las simulaciones extra realizadas muestran la importancia de implementar un sistema de seguimiento mecánico así como de tomar en cuenta los ajustes de horario para asegurar un desempeño óptimo del colector solar.

7. Bibliografía

S. Marrakchi, Z. Leemrana, H. Asselman, A. Aoukilib, A. Asselman.(2018). Temperature distribution analysis of parabolic trough solar collector using

CFD. ELSEVIER. Procedia Manufacturing, 773-779.

F. Dähler, M. Wild, R. Schäppi, P. Haueter, T. Cooper, P. Good, C. Larrea, M. Schmitz, P. Furler, A. Steinfeld. (2018). *Optical design and experimental characterization of a solar concentrating dish system for fuel production via thermochemical redox cycles*. ELSEVIER. Solar Energy, 568–575.

B. Anak, F. Zainudina, T. ZanariahShamsirAli, R. Bakara, G. Ming. (2015). *Effect of rim angle to the flux distribution diameter in solar parabolic dish collector*. ELSEVIER. Energy Procedia, 45 – 52

S. Umar, K. Muhammad, M. Garba, N. Yahya. (2014). *Effects of atmospheric variables on the performances of parabolic trough concentrating collector*. Science PC. American Journal of Energy Engineering, 23-26.

H. Cherif, A. Ghomrassi, J. Sghaier, H. Mhiri, P. Bournot. (2019). *A receiver geometrical details effect on a solar parabolic dish collector performance*. ELSEVIER. Energy Reports, 882–897.

E. Bellos, E. Bousi, C. Tzivanidis, S. Pavlovic. (2019). *Optical and thermal analysis of different cavity receiver designs for solar dish concentrators*. ELSEVIER. Energy Conversion and Management.

D. Mewes. (2018). *Applications of Solar Thermal Technology for Plastic Waste Management in Developing Communities*. KTH School of Industrial Engineering and Management. Energy Technology.

W. Monnet1, J. Carroll, P. Ember. (2018). *Using Solar Thermal Collectors for Plastic Recycling in Additive Manufacturing*. University of Kurdistan Hewler.

Sambasiva. (2013). *Time operated solar tracking for optimum power generation*. International Journal of Scientific & Engineering Research.

E. Dollera, N. Corbita, M. Quitiol, J. Tagno-ay, G. Trazona. (2019). *Xu Solar Furnace For Recycled Plastic Lumbars*. International journal of scientific & technology research, Volumen 8.

S. Quezada, H. Sanchez, M. Polo, R. Cazares. (2019). *Modeling and simulation to determine the thermal efficiency of a parabolic solar trough collector system*. ELSEVIER, Case Studies in Thermal Engineering, 100523 .

K. Ghazouani, S. Skouria, S. Bouadilaa, A. Guizani. (2019). *Thermal analysis of linear solar concentrator for indirect steam generation*. ELSEVIER, Energy Procedia 162, 136–145 .

Anónimo. (s.f.). *Reflexión y refracción de la luz*. Fisicalab, recuperado de <https://www.fisicalab.com/apartado/reflexion-refraccion-luz>

Anónimo. (2013). *Radiación electromagnética*. Naturalmente Ciencias, recuperado de <https://naturalmenteciencias.wordpress.com/tag/longitud-de-onda/>

Anónimo. (s.f.). *Equation of Parabola*. Free Mathematics Tutorials, recuperado de <https://www.analyzemath.com/parabola/Equation.html>

M. Hongn, S. Flores Larsen , M. Altamirano , M. Gea, L. Saravi. (2011). *Estudio de reflectancia de espejos para un concentrador solar fresnel lineal*. ASA-DES. Universidad Nacional de Salta

J. Lee, W. Derbes, J. Gordon. (2003). *Inflatable reflector antenna for space based radars* (U.S. Patent No. 6,650,304 B2). United States Patent. <https://www.freepatentsonline.com/6650304.pdf>

J. Cook. (2020). *Best approximation of a catenary by a parabola*. John D. Cook Consulting, recuperado de <https://www.johndcook.com/blog/2020/06/29/parabola-catenary/>

Anónimo. (s.f.). *Plastic Material Melt And Mould Temperatures*. PlastikCity, recuperado de <https://www.plastikcity.co.uk/useful-stuff/material-melt-mould-temperatures>

I. Sarbu, C. Sebarchievici. (2017). *Solar Collectors*. Academy Press. Solar Heating and Cooling Systems, 29-97.

C. Honsberg, S. Bowden (s/f). *Propiedades de la luz: Radiación solar*. PV education. Recuperado de: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/radiaci%C3%B3n-solar>

N. Selvakumar,, H. Barshilia, K. Rajam. (2010). *Review of sputter deposited mid- to high- temperature solar selective coatings for flat plate/evacuated tube collectors and solar thermal power generation applications*. National Aerospace Laboratories. Project Document SE 1025.

H. Jamali. (2019). *Investigation and review of mirrors reflectance in parabolic trough solar collectors (PTSCs)*. ELSEVIER. Energy Reports, 145–158

Messenger, R. A. y Ventre, J. (2005). Photovoltaic Systems Engineering. (2da Edición, pp. 51-54). Boca Raton, CRC Press.

R. Echazú, C. Cadena, L. Saravia. (s.f.). *Estudio de materiales reflexivos para concentradores solares*. INENCO. Universidad Nacional de Salta.

8. Anexos

La forma en la que se realiza el trazado de rayos es de acuerdo con la ley de la reflexión, la cual dice que cada rayo que incide sobre una superficie se reflejará con ángulos iguales medidos sobre la normal de la superficie (M. Hongn et al., 2011). Para comprobar esto en una parábola, se llevará a cabo una demostración de la figura 7, en la cual se observa que cualquier rayo que incide perpendicular a la directriz de la parábola se reflejará hacia el foco.

El proceso de demostración se realizó en Matlab, tomando la ecuación (10) de la parábola diseñada y un rayo incidente $x=1$. Al igualar ambas ecuaciones se obtiene el punto de incidencia $(1, \frac{25}{33})$ sobre el cual se realizarán las evaluaciones de las siguientes ecuaciones. Para obtener la recta normal al punto de incidencia primero se debe calcular la recta tangente, por lo que se deriva la ecuación de la parábola y se evalúa en dicho punto para obtener la pendiente:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx} \left[\frac{25}{33}x^2 \right] = \frac{50}{33}x \quad \rightarrow \quad m = \frac{50}{33}(1) = \frac{50}{33}$$

La recta tangente se calcula entonces de la siguiente manera:

$$y = \frac{50}{33}(x - 1) + \frac{25}{33} = \frac{50}{33}x - \frac{25}{33}$$

Para obtener la perpendicular se aplica una conversión de pendiente donde $m_{\perp} = -\frac{1}{m}$, por lo tanto:

$$y = -\frac{33}{50}(x - 1) + \frac{25}{33} = -\frac{33}{50}x + \frac{2339}{1650}$$

El siguiente paso será demostrar que el ángulo entre el rayo incidente y el reflejado es el mismo con respecto a la normal, por lo que estas tres rectas se expresan como vectores tomando dos puntos de las mismas:

$$\vec{v}_{inc} = \left\langle 0, \frac{74}{33} \right\rangle, \quad \vec{v}_{nor} = \left\langle -1, \frac{33}{50} \right\rangle, \quad \vec{v}_{ref} = \left\langle -1, -\frac{14}{33} \right\rangle$$

La ecuación del rayo incidente y de la normal ya se conocen así que sólo se evaluaron dos puntos cualquiera de ellas, en cambio para el rayo reflejado, se sabe que este debe ir del punto incidente al punto focal, por lo que su vector se obtuvo de estos dos puntos. El último paso es demostrar que los ángulos son iguales, por lo que se aplica la siguiente ecuación de Análisis Vectorial:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{|\vec{v}_1| |\vec{v}_2|} \right)$$

Los módulos y los productos punto de los vectores se calculan de la siguiente manera:

$$|\vec{v}_{inc}| = \sqrt{0^2 + \left(\frac{74}{33}\right)^2} = \frac{74}{33} \quad \vec{v}_{inc} \cdot \vec{v}_{nor} = 0 + \frac{37}{25} = \frac{37}{25}$$

$$|\vec{v}_{nor}| = \sqrt{(-1)^2 + \left(\frac{33}{50}\right)^2} = 1.1982 \quad \vec{v}_{nor} \cdot \vec{v}_{ref} = 1 - \frac{7}{25} = \frac{18}{25}$$

$$|\vec{v}_{ref}| = \sqrt{(-1)^2 + \left(\frac{14}{33}\right)^2} = 1.0863$$

Finalmente, se sustituyen estos valores en la ecuación presentada y se comparan los resultados:

$$\alpha_1 = \arccos \left(\frac{37/25}{74/33 (1.1982)} \right) = 56.57^\circ \quad \alpha_2 = \arccos \left(\frac{18/25}{1.1982 (1.0863)} \right) = 56.42^\circ$$

De esta manera se comprueba que el ángulo entre ambos vectores y la recta normal a la superficie es el mismo.

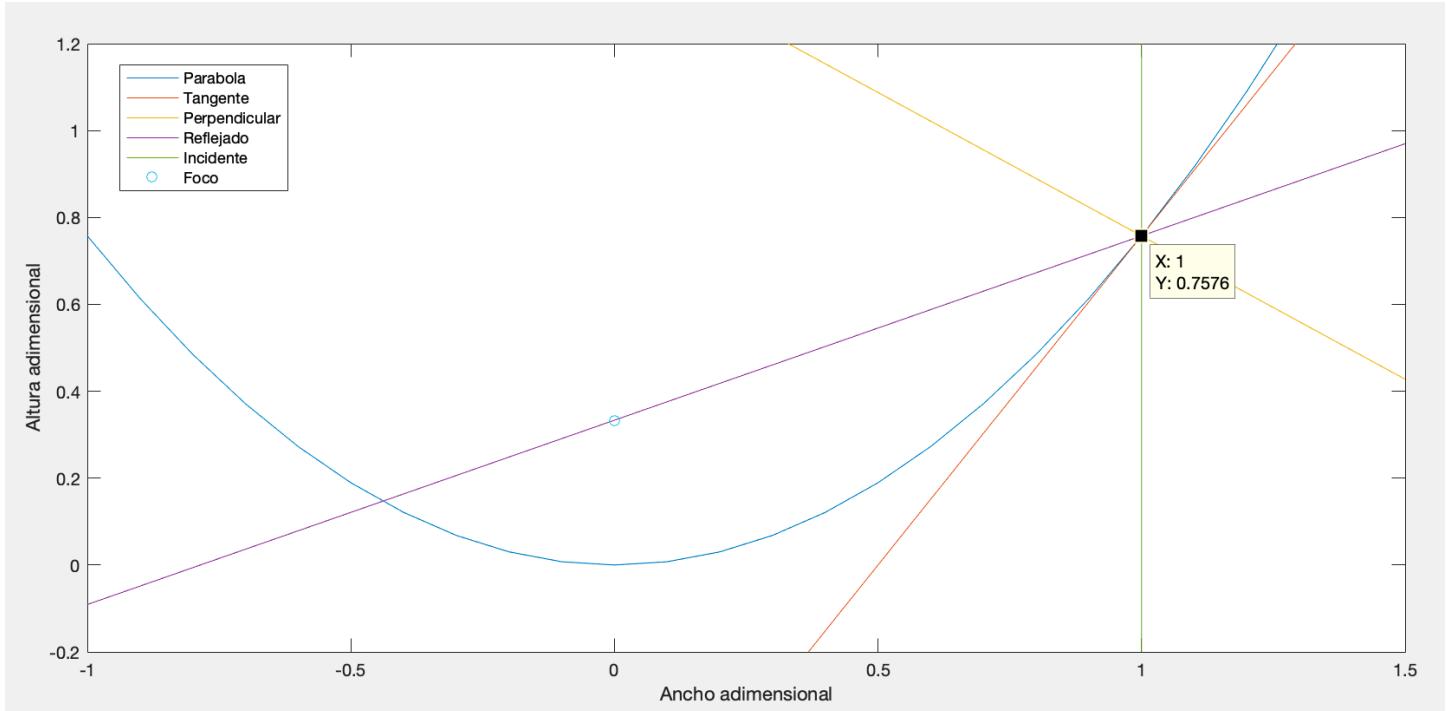


Fig. A1 Esquema del proceso de demostración del trazado de rayos en una parábola.

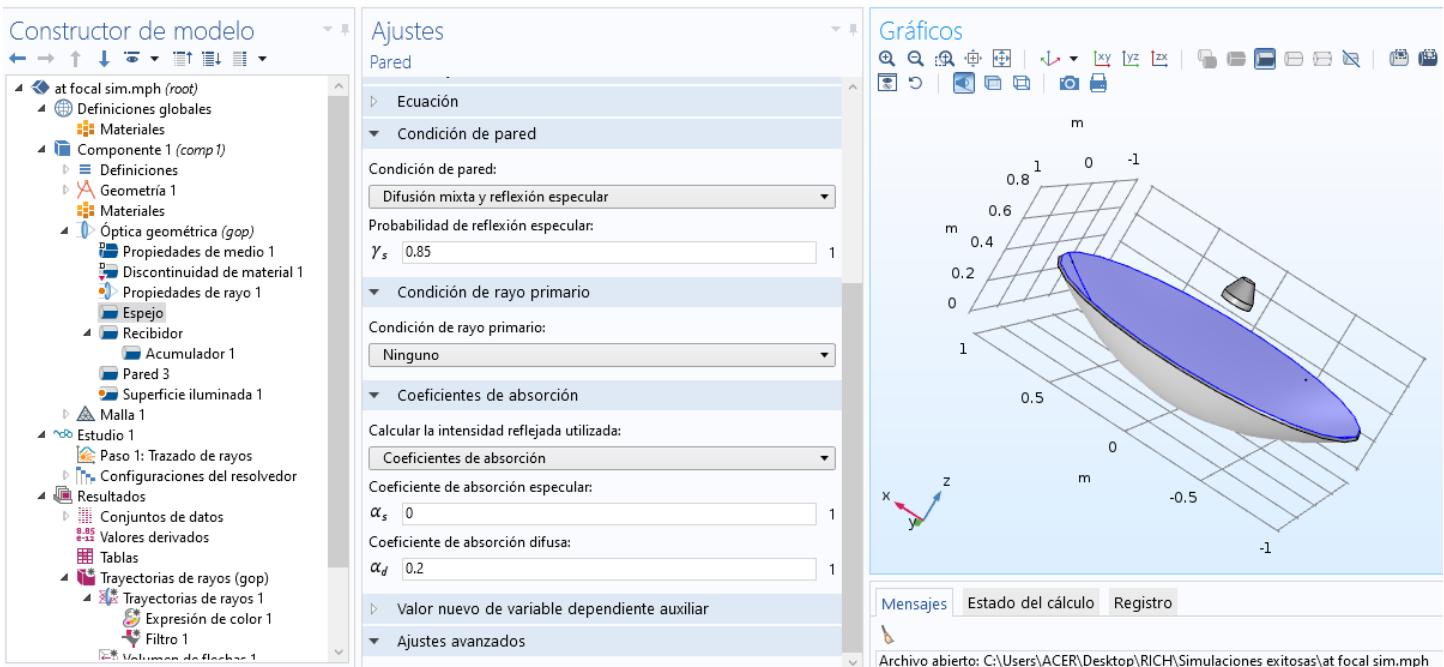


Fig. A2 Asignación de las propiedades de la superficie reflectora.

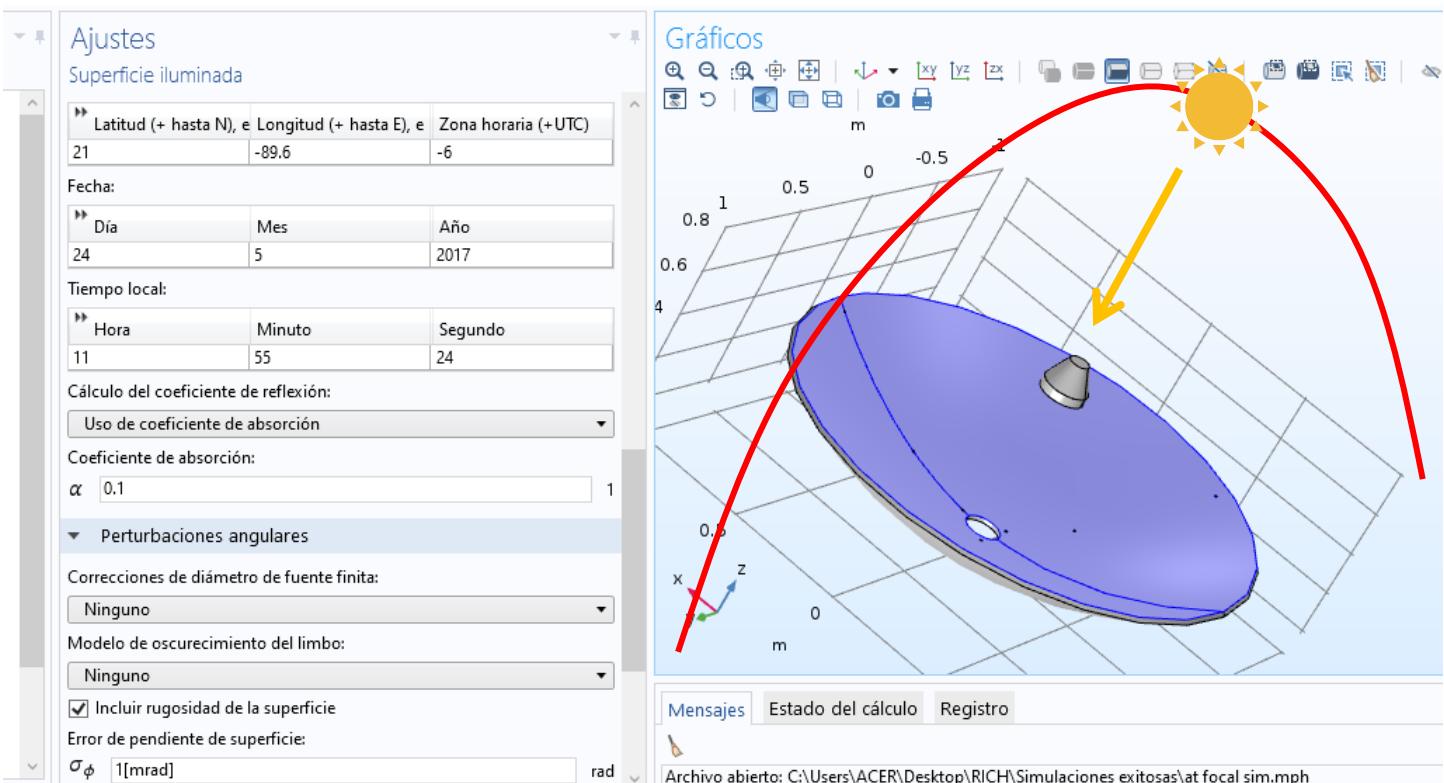
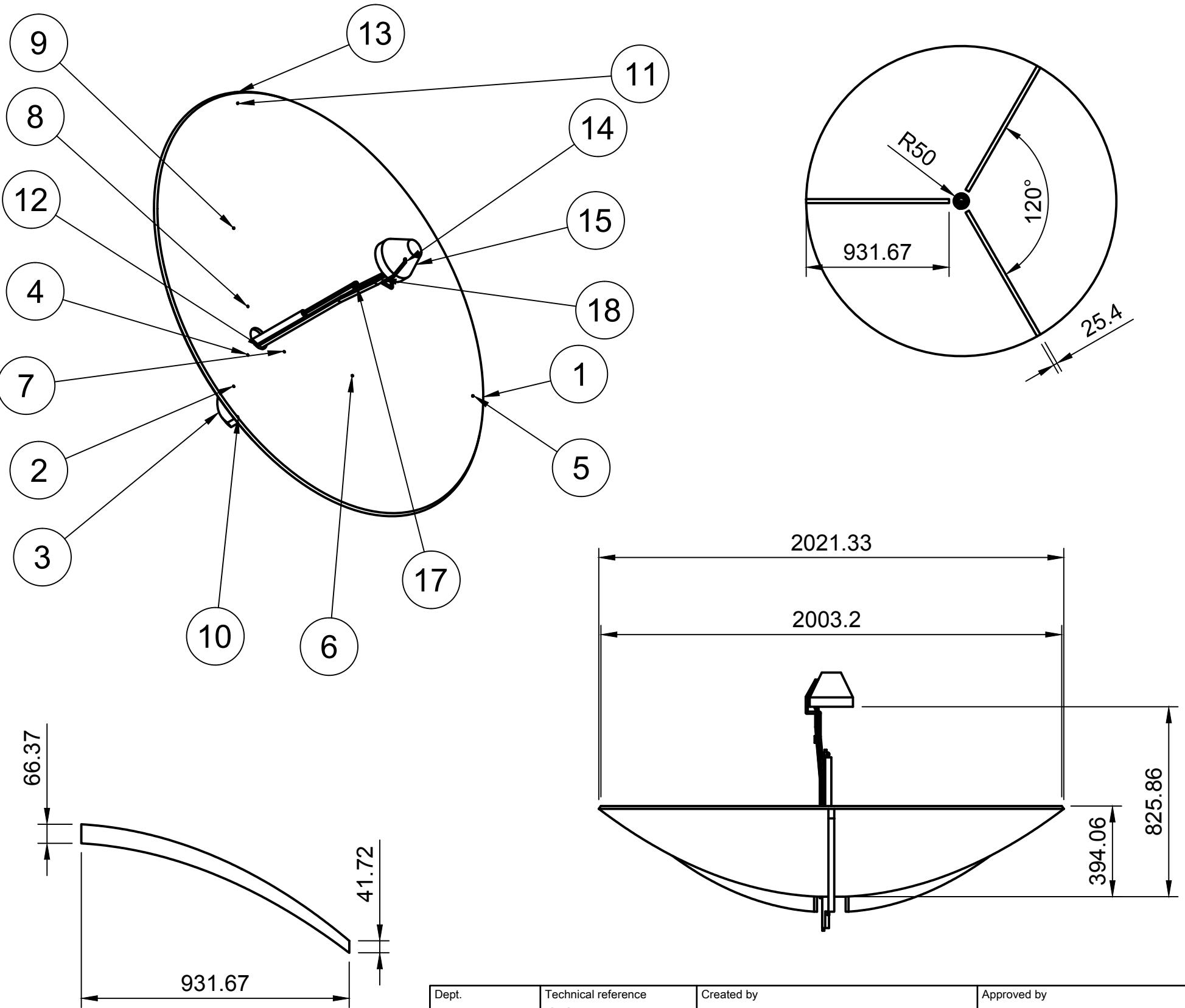


Fig. A3 Configuraciones de la posición del Sol.

1 2 3 4 5 6 7 8

Parts List

Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Plato (1)		Aluminum
2	1	Component6		Steel
3	1	Brazo 2 (1)		Wood (Oak)
4	1	Component8		Steel
5	1	Component9		Steel ASTM A53
6	1	Component10		Steel
7	1	Component11		Steel
8	1	Component12		Steel
9	1	Component13		Steel
10	1	Component14		Steel
11	1	Component15		Steel
12	1	Brazo 1 (1)		Wood (Oak)
13	1	Brazo 3 (1)		Wood (Oak)
14	1	Coil		Copper
15	1	Ext cover		PVC, Flexible
16	1	Int cover		Iron, Gray
17	1	Aislante		Plastic, Opaque Black
18	1	Soporte largo		Steel



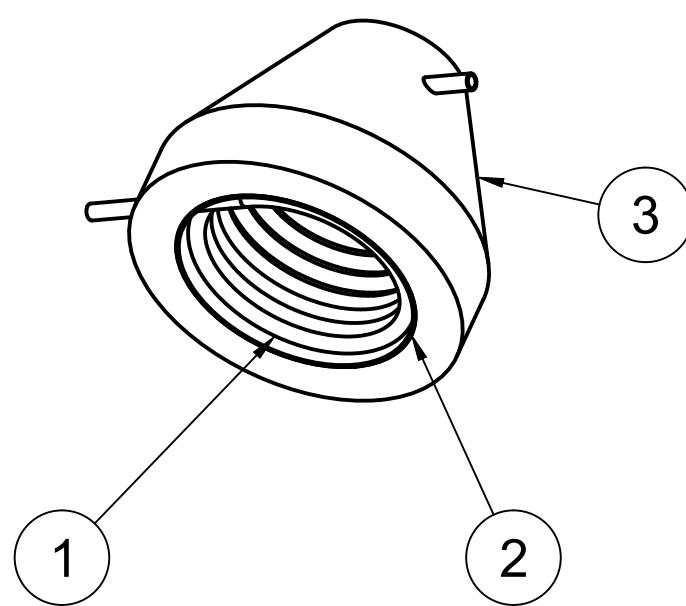
Dept. UADY	Technical reference SOLARIM.	Created by Equipo 4	Approved by
		12/20	
	Document type Proyecto final		Document status Etapa 1
	Title Parabolic dish collector remake		DWG No.
Rev.	Date of issue	Sheet	1/3

1 2 3 4 5 6 7 8

A

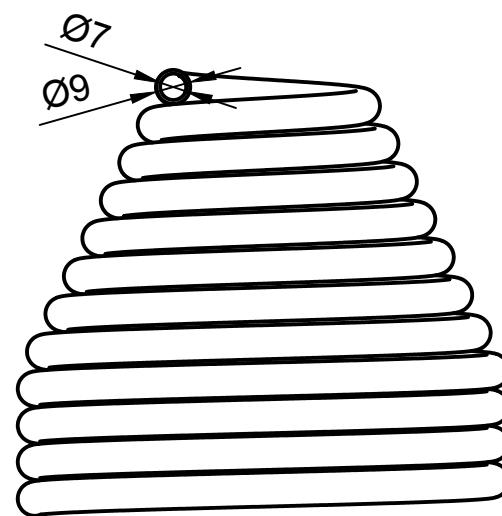
Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Coil		Copper
2	1	Int cover		Iron, Gray
3	1	Ext cover		PVC, Flexible

B

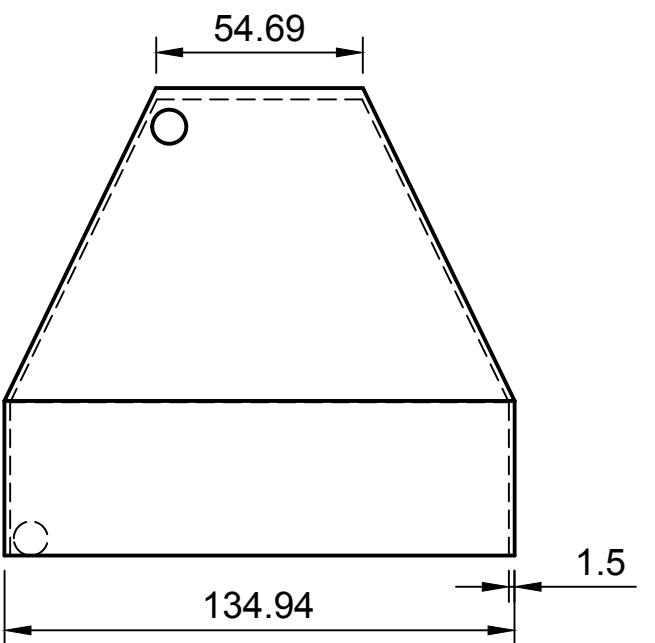


C

E

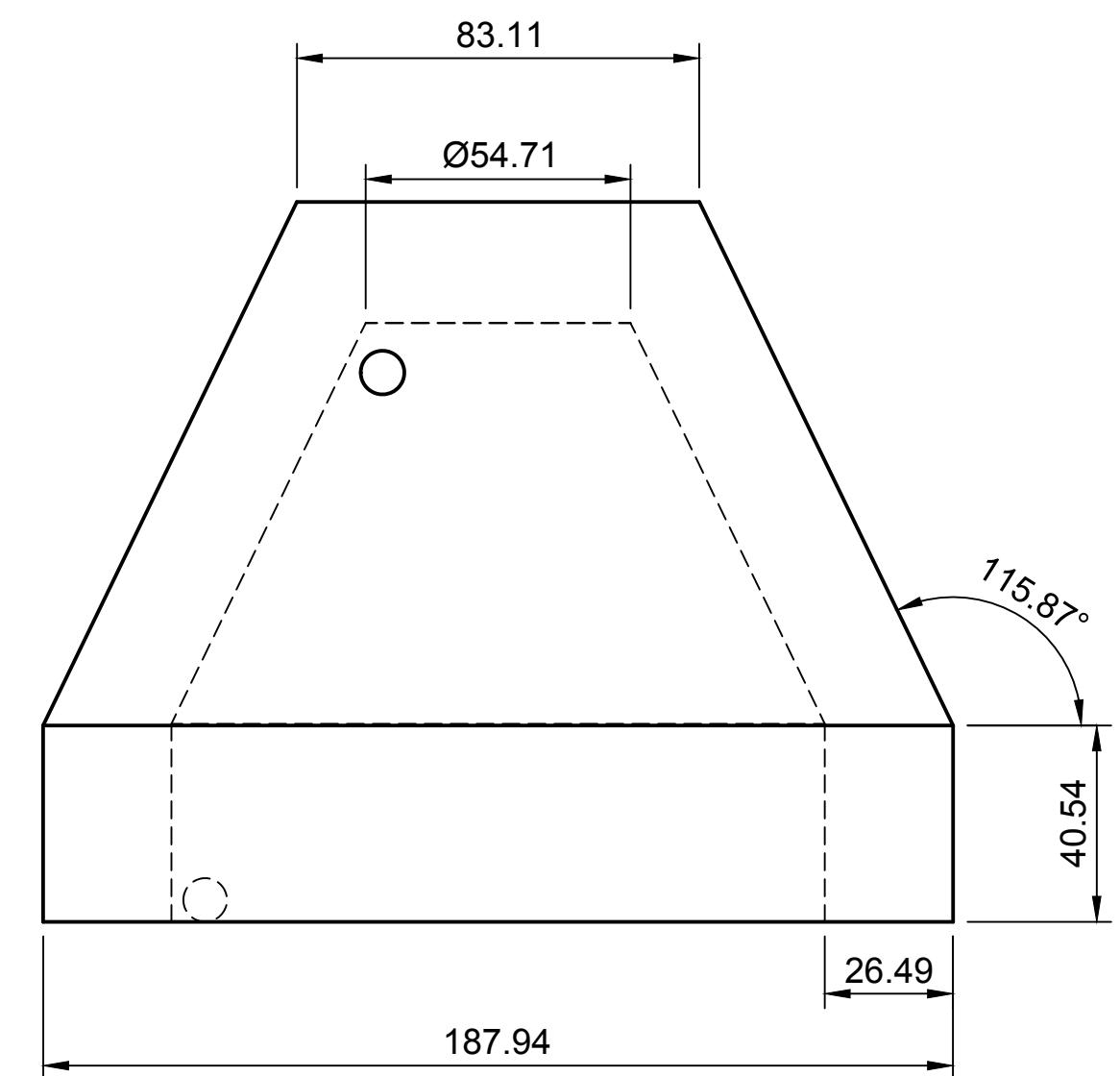


F



1 2 3 4 5 6 7 8

A



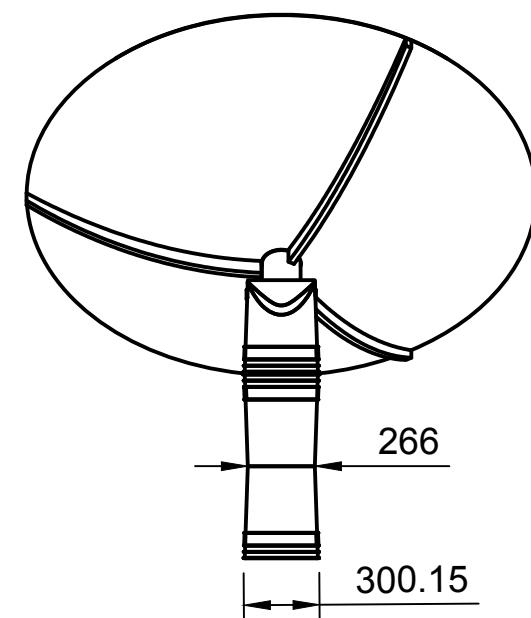
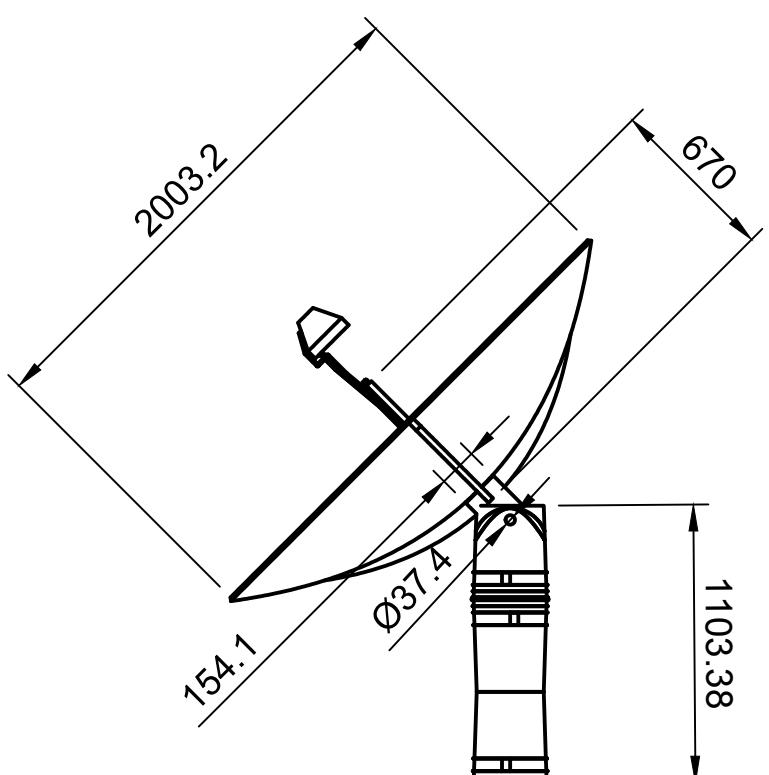
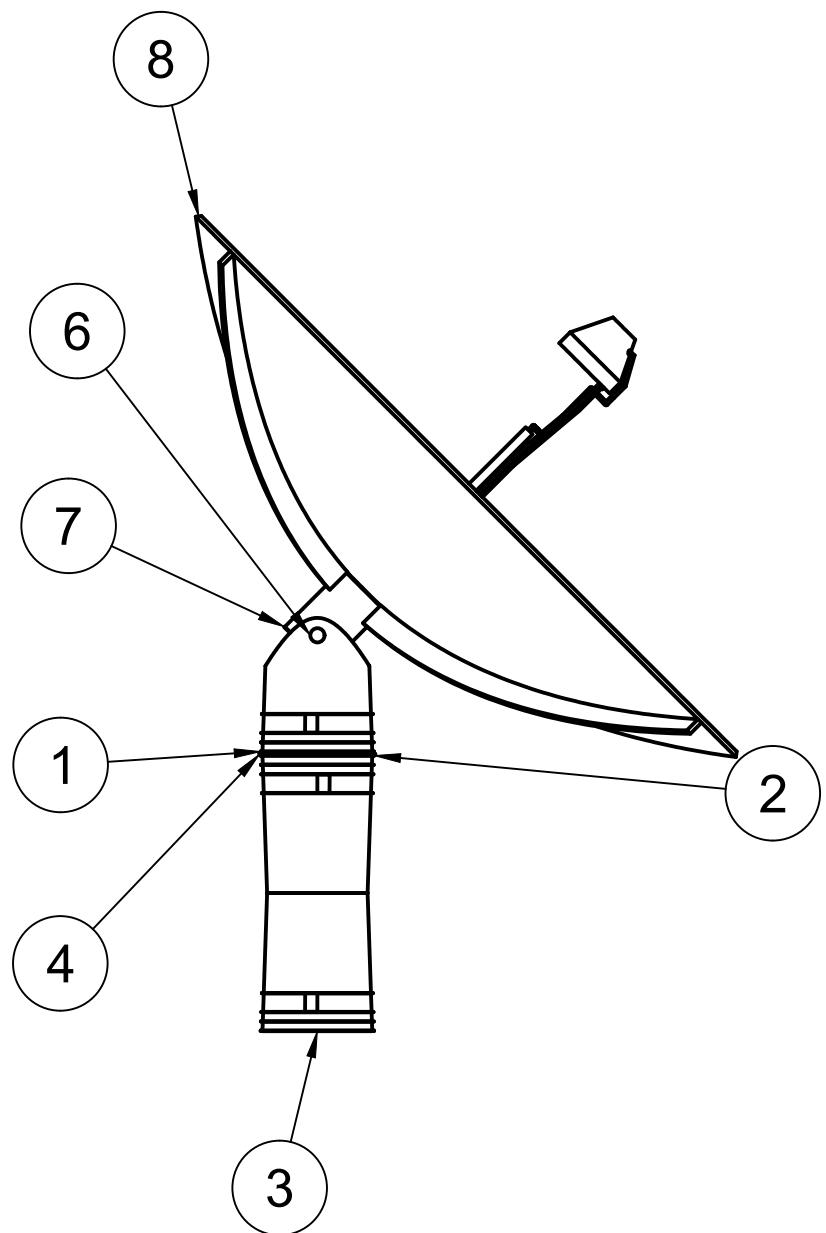
Dept. UADY	Technical reference SOLARIM.	Created by Equipo 4	Approved by
		12/20	
	Document type Proyecto		Document status Etapa 1
	Title Recibidor		DWG No.
Rev.	Date of issue	Sheet	2/1



1 2 3 4 5 6 7 8

Parts List

Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Cubeta		Plastic, Opaque White
2	1	Cubeta (1)		Plastic, Opaque White
3	1	Cubeta (2)		Plastic, Opaque White
4	1	Balero 30cm		Steel
6	1	H axis		Steel
7	1	Lata		63Sn37Pb
8	1	Plato (1)		Aluminum



Dept. UADY	Technical reference SOLARIM.	Created by Equipo 4	Approved by
		12/20	
		Document type Proyecto	Document status Etapa 1
		Title Cubierta SOAA	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet 3/3

