



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL USO DE REFLECTORES SECUNDARIOS  
DE DISTINTAS GEOMETRÍAS EN COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

LISA ADELA PEÑA CÁCERES

PROFESORA GUÍA:  
MÓNICA ZAMORA ZAPATA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ  
BENJAMÍN HERRMANN PRIESNITZ

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA  
POR: LISA ADELA PEÑA CÁCERES  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: MÓNICA ZAMORA ZAPATA

## EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL USO DE REFLECTORES SECUNDARIOS DE DISTINTAS GEOMETRÍAS EN COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICO

Los concentradores solares de tipo cilindro parabólicos son una de las tecnologías de concentración solar más desarrolladas y completas. Sin embargo, por sus características, condiciones ambientales y las temperaturas que se alcanzan, se producen pérdidas tanto térmicas como ópticas. Diversos estudios han demostrado que al agregar un reflector secundario al concentrador, éste mejora su desempeño tanto térmico como óptico, por lo que el sistema se vuelve más eficiente, compensando en parte las pérdidas asociadas al sistema.

Este trabajo tiene como objetivo la evaluación del efecto de la geometría del reflector secundario en el desempeño de un concentrador, evaluando principalmente la uniformidad del flujo en el absorbedor, eficiencia óptica y potencia estimada. Para ello, primero se definen dos tipos de geometría a utilizar y sus variaciones, luego estas son creadas y simuladas mediante el software de trazado de rayos *Tonatiuh* para posteriormente analizar los resultados obtenidos utilizando *Mathematica*, *Excel* y *Python*.

Las geometrías evaluadas son reflectores simétricos compuestos por una sucesión de espejos, cada reflector está definido por el ancho y ángulo de apertura, este último corresponde a la separación entre los espejos que componen el reflector. La geometría 1, compuesta de dos espejos, presenta un aumento mínimo de 36% en la uniformidad del flujo en el absorbedor, mientras que la eficiencia óptica y potencia alcanzan una disminución máxima de 8%; para la geometría 2, compuesta por cuatro espejos, estos indicadores toman valores límite de 41% y 10%, respectivamente. Estas comparaciones son en relación al desempeño del concentrador original, es decir, sin reflector secundario.

El estudio muestra que independiente de la geometría, añadir un reflector secundario aumenta la uniformidad total de la distribución del flujo en el absorbedor, sin embargo esto conlleva una disminución en la eficiencia óptica y la potencia del absorbedor, esta disminución depende del ancho y ángulo de apertura del reflector secundario, ya que el primero limita la sombra generada por el reflector y el segundo determina la dirección de los rayos reflejados.

*Haz arder tu corazón*  
***Kyojuro Rengoku***

# Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia: a mi abuela Adelaida, por ser mi lugar seguro desde que soy pequeña, a mi madre Francisca, por tener una palabra en los momentos más difíciles, por esforzarse tanto para darnos una buena vida, a mis hermanos Debora y Sebastián por estar en la casa este año tan intenso, a mi tía Alicia por su amor y su gran ayuda con la terapia estos meses, a mi tío Marco que hoy nos acompaña desde otro plano, por ser el mejor tío del mundo y enseñarme tantas cosas valiosas, les quiero mucho y siempre seremos 7.

También quiero agradecer a todas las personas que he conocido en la u, a mis amigos de plan común, a las girls y todos esos viernes de borgoña practicando inglés. A mis amigos de mecánica, Suelto y Corrales, gracias por su amistad incondicional y compañía en estos últimos años tan complicados, a las frencitas Romi y Consu por escucharme tanto este año, a la gente bonita de la sala de almuerzo en especial a la Nico, Nico Pascal, Francis por apañarme tanto los últimos días de este proceso y comer papitas a pesar de la inflación y también quiero agradecer a todas las personas que componen el departamento en especial a las funcionarias que mantienen funcionando todo, muchas gracias Claudia y Maricarmen por todo lo que hacen por nosotres.

Quiero agradecer a todos los profesionales que me han acompañado este tiempo, a Alejandra Vélez, por su profesionalismo, empatía y por darme respuestas que por mucho tiempo busqué, a Melisa, mi psicóloga por su compañía estos meses, ayudarme a terminar este trabajo y a aprender a confiar en mí, a Yerko, mi antiguo psicólogo, por acompañarme en el inicio de este proceso de titulación, cuando todo se veía oscuro e incierto, gracias por mostrarme que existía un plan C, a Claudia, Nico, Gabi y Cony de la fundación en primera persona por invitarme y acogerme en el taller y mostrarme que hay cosas buenas en mí.

No puede faltar mi gratitud hacia Mónica Zamora, primero por aceptar ser mi profesora guía y por todo su apoyo este año, gracias por escucharme cada vez que llegaba a su oficina con algún problema, gracias por conseguirme un espacio tranquilo para poder realizar este trabajo, gracias por darme libertad para decidir cómo hacerlo, sin duda no sé si hubiera logrado terminar sin su compañía. También quiero agradecer a Ramón Frederick y Benjamín Herrmann, por aceptar ser parte de mi comisión y darme consejos a pesar de mi poca comunicación.

Finalmente, quiero agradecer a mi yo del pasado, por no rendirse, por ser el ave fénix y de las cenizas volver a nacer una y otra vez, por seguir viviendo aunque no existan las ganas, por mantener mi corazón ardiendo como me enseñó Rengoku y tratar de superarme día a día. Sin duda hoy no soy la misma persona que entró el 2014 y toda esta transformación no sería lo mismo sin todas y todos ustedes, muchas gracias.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes Generales . . . . .	1
1.1.1. Energía Solar . . . . .	1
1.1.1.1. Recurso solar en Chile . . . . .	1
1.1.2. Tecnologías empleadas en energía solar . . . . .	2
1.1.3. Colectores cilindro parabólicos . . . . .	3
1.1.3.1. Efectos de la geometría parabólica . . . . .	3
1.1.3.2. Reflectores secundarios . . . . .	5
1.1.3.3. Ejemplos de reflectores secundarios . . . . .	6
1.2. Motivación . . . . .	8
1.3. Objetivos . . . . .	8
1.3.1. Objetivo General . . . . .	8
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	8
1.4. Alcances . . . . .	9
<b>2. Antecedentes específicos</b>	<b>10</b>
2.1. Conceptos importantes . . . . .	10
2.2. Distribución de flujo energético en el tubo absorbedor . . . . .	11
2.3. Consideraciones simulaciones . . . . .	12
2.3.1. Parámetros fijos . . . . .	12
2.3.2. Posición tubo absorbedor . . . . .	13
2.3.3. Indicadores a evaluar . . . . .	13
<b>3. Metodología</b>	<b>15</b>
3.1. Determinación de casos de estudio y generación de geometrías . . . . .	15
3.2. Simulación de trazado de rayos . . . . .	17
3.3. Procesamiento de resultados . . . . .	21
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>22</b>
4.1. Caso base . . . . .	22
4.2. Variación de la apertura del reflector secundario . . . . .	23
4.3. Variación del ángulo de apertura del reflector secundario . . . . .	26
4.4. Variación de la posición del absorbedor . . . . .	28
4.5. Variación posición reflector secundario . . . . .	29
4.6. Comparación de indicadores caso base y casos con reflector secundario . . . . .	31
4.7. Resumen de resultados . . . . .	32
4.8. Discusión general de los resultados . . . . .	33

<b>5. Conclusiones</b>	<b>34</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>35</b>
<b>Anexos</b>	<b>37</b>
A. Bocetos geometrías utilizadas . . . . .	37
A.1. Variación ancho de apertura reflector secundario . . . . .	37
A.2. Variación ángulo de apertura reflector secundario . . . . .	40
B. Códigos computacionales . . . . .	42

# Índice de Tablas

4.1.	Indicadores caso base . . . . .	23
4.2.	Indicadores geometría 1 con $\beta = 108^\circ$ . . . . .	24
4.3.	Indicadores geometría 1 con $\beta = 140^\circ$ . . . . .	25
4.4.	Indicadores geometría 2 con $\beta = 135^\circ$ . . . . .	25
4.5.	Indicadores geometría 2 con $\beta = 140^\circ$ . . . . .	25
4.6.	Indicadores geometría 1 variando $\beta$ . . . . .	27
4.7.	Indicadores geometría 2 variando $\beta$ . . . . .	27
4.8.	Indicadores para geometría 1 con $\beta = 108^\circ$ , $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$ y $w_s = 11.5[\text{cm}]$ . . .	28
4.9.	Indicadores para geometría 2 con $\beta = 140^\circ$ , $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$ y $w_s = 11.5[\text{cm}]$ . . .	29
4.10.	Indicadores para geometría 2 con $Y_{abs} = 1.667[\text{m}]$ y $w_s = 11.5[\text{cm}]$ . . . . .	30
4.11.	Indicadores para geometría 2 con $Y_{abs} = 1.667[\text{m}]$ y $w_s = 11.5[\text{cm}]$ . . . . .	30
4.12.	Variación de indicadores para geometría 1 con $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$ , $w_s = 11.5[\text{cm}]$ y $\beta = 108^\circ$ . . . . .	31
4.13.	Variación de indicadores para geometría 2 con $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$ , $w_s = 11.5[\text{cm}]$ y $\beta = 140^\circ$ . . . . .	31

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Mapa de la radiación directa mundial. Fuente: Solargis. . . . .	2
1.2.	Representación de las tecnologías de concentración solar: A) Torre central y campo de heliostatos, B) Concentrador cilindro parabólico, C) Colector linear fresnel, D) Concentrador de disco Stirling [3]. . . . .	3
1.3.	Descripción parábola eje vertical. . . . .	3
1.4.	Diagrama que muestra la propiedad reflexiva por los elementos de la parábola. . . . .	4
1.5.	Esquema de un concentrador cilindro parabólico [4]. . . . .	4
1.6.	Gradiente térmico experimentado por el tubo absorbedor [6]. . . . .	5
1.7.	Concentrador del estudio con reflector secundario incluido [11]. . . . .	6
1.8.	Disposición del reflector secundario de estudio [12]. . . . .	7
1.9.	Tipos de reflectores secundarios [12]. . . . .	7
2.1.	Parámetros importantes para concentrador con RS. . . . .	10
2.2.	Coordenadas angulares tubo absorbedor. . . . .	11
2.3.	Representación simulación y distribución flujo en tubo. . . . .	12
2.4.	Determinación de límites de variación de la posición del tubo absorbedor según estudios mostrados. . . . .	13
3.1.	Caracterización RS geometría 1. . . . .	16
3.2.	Caracterización RS geometría 2. . . . .	16
3.3.	Procedimiento para generar geometría de reflectores secundarios. . . . .	17
3.4.	Construcción del sistema en Tonatiuh. . . . .	18
3.5.	Configuraciones para <i>Group Node</i> y <i>Surface Node</i> . . . . .	18
3.6.	Propiedades materiales utilizados para la configuración. . . . .	19
3.7.	Definición de las características de la luz solar. . . . .	19
3.8.	Características de la simulación y exportación de datos. . . . .	20
3.9.	Información por fotón entregada por Tonatiuh. . . . .	20
4.1.	Distribución del flujo energético en el absorbedor para el caso base. . . . .	22
4.2.	Distribuciones del flujo energético en el absorbedor variando $w_s$ . . . . .	23
4.3.	Distribuciones del flujo energético en el absorbedor variando $\beta$ . . . . .	26
4.4.	Distribuciones del flujo energético en el absorbedor variando $Y_{abs}$ . . . . .	28
4.5.	Distribuciones del flujo energético en el absorbedor variando $Y_{rs}$ . . . . .	29
4.6.	Comparación general de casos de estudio. . . . .	32
A.1.	Variaciones de $w_s$ para geometría 1 con $\beta = 108^\circ$ . . . . .	37
A.2.	Variaciones de $w_s$ para geometría 1 con $\beta = 140^\circ$ . . . . .	38
A.3.	Variaciones de $w_s$ para geometría 2 con $\beta = 135^\circ$ . . . . .	38
A.4.	Variaciones de $w_s$ para geometría 2 con $\beta = 140^\circ$ . . . . .	39
A.5.	Variaciones de $\beta$ para geometría 1 con $w_s = 11.5\text{cm}$ . . . . .	40
A.6.	Variaciones de $\beta$ para geometría 2 con $w_s = 11.5\text{cm}$ . . . . .	41

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes Generales

#### 1.1.1. Energía Solar

La energía solar utiliza la radiación electromagnética del sol para generar energía térmica y/o eléctrica, como este recurso viene de una fuente natural e inagotable, la energía solar se considera renovable. Esta energía se puede categorizar de acuerdo a su forma de conversión en dos tipos: energía solar fotovoltaica y energía solar térmica [1].

Los sistemas fotovoltaicos generan energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos que transforman la energía luminosa del sol en energía eléctrica, empleando células fotovoltaicas que son fabricadas con materiales semiconductores, existen diversas tecnologías y la más utilizada en la de silicio policristalino.

Los sistemas solares térmicos aprovechan la energía del sol para generar calor, el que puede ser utilizado para distintos fines como la producción de agua caliente sanitaria (ACS), generación de energía eléctrica, entre otros.

La principal diferencia entre estos tipos de energía solar radica en que la primera va generando electricidad al instante y sólo puede ser utilizada en horas de sol, en cambio la energía solar térmica permite almacenar calor y utilizarlo cuando se necesite, incluidas las horas sin sol [2].

##### 1.1.1.1. Recurso solar en Chile

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre, puede ser reflejada, absorbida o transmitida, al llegar a un punto está conformada por dos componentes: radiación directa, que corresponde a la que llega directamente del sol y la radiación difusa que corresponde a la que viene reflejada por cuerpos como las nubes, la unión de estas se conoce como la radiación global. Cabe destacar que la radiación normal directa (DNI) es un importante indicador a la hora de evaluar un emplazamiento para un proyecto de energía solar por concentración o con seguimiento.

En las Figura 1.1 se puede observar que por su ubicación geográfica y condiciones atmosféricas, el norte de Chile posee uno de los índices de radiación más altos del planeta tierra,

en particular en el desierto de Atacama, por lo que es un sitio ideal para la implementación de tecnologías solares.

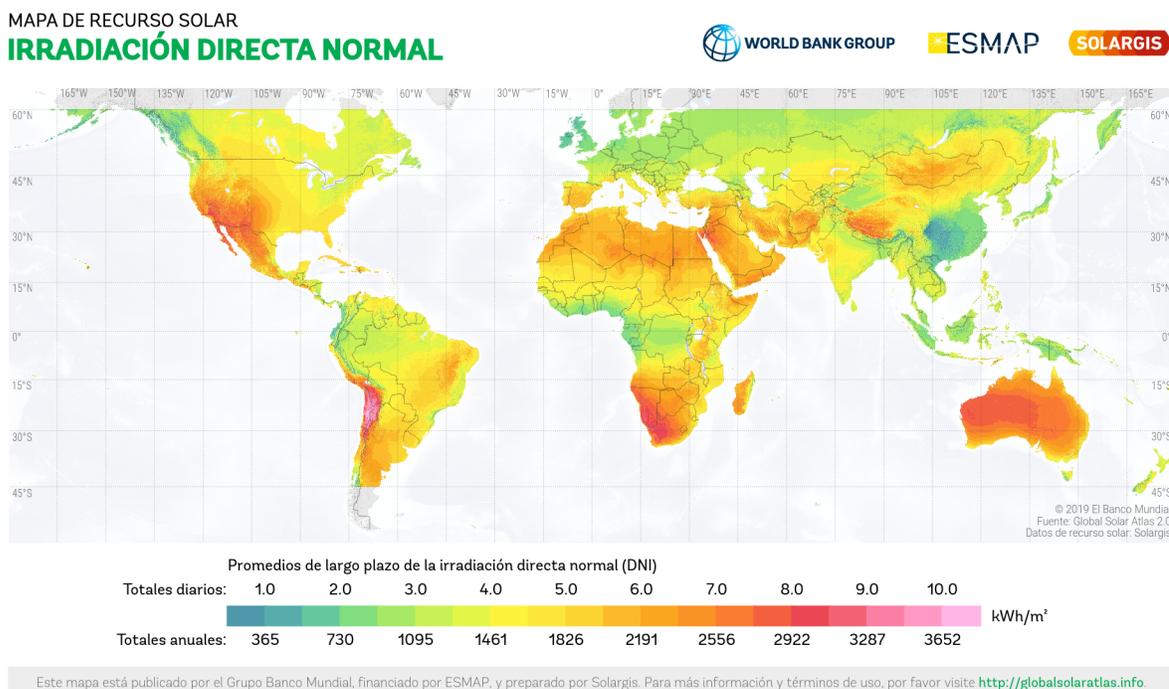


Figura 1.1: Mapa de la radiación directa mundial. Fuente: Solargis.

### 1.1.2. Tecnologías empleadas en energía solar

Las tecnologías utilizadas para la captación de energía solar son conocidas como colectores y son equipos diseñados para transformar la radiación solar en calor útil al calentar un fluido de trabajo, estos pueden ser con o sin concentración.

En general los colectores consisten en una superficie absorbadora que capta la radiación solar y mediante un circuito hidráulico permite la circulación del fluido de trabajo. Cuando se utiliza mediana o alta concentración solar es necesario tener un sistema de seguimiento, ya que los dispositivos ópticos solo pueden reflejar la radiación hacia el absorbador si ésta se encuentra dentro del ángulo de aceptación, que corresponde al rango aceptado para el funcionamiento, entonces para conseguir ese ángulo es necesario seguir la trayectoria del sol durante todo el día.

Por lo anterior, los colectores se pueden clasificar en: colectores solares estacionarios y colectores solares con seguimiento. Los primeros son tecnologías que utilizan nula o baja concentración solar, por lo que no requieren seguimiento del sol, un ejemplo de esta tecnología son los colectores de placa plana. En cambio, los colectores con seguimiento utilizan mediana y alta concentración solar, por lo que es imperante mantener el ángulo de incidencia de la radiación, dentro del ángulo de aceptación del colector, algunos ejemplos para esta tecnología se pueden apreciar en la Figura 1.2 y son: concentradores de torre central y campo de helióstatos, concentración de disco Stirling, colectores lineales Fresnel y colectores cilindro parabólico (PTC).

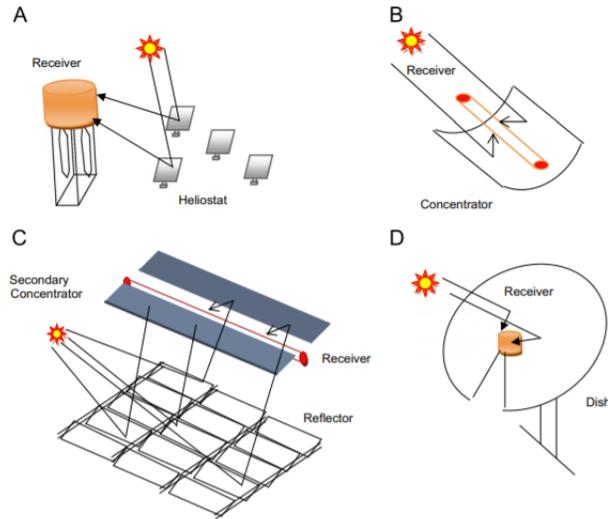


Figura 1.2: Representación de las tecnologías de concentración solar: A) Torre central y campo de helióstatos, B) Concentrador cilindro parabólico, C) Colector lineal fresnel, D) Concentrador de disco Stirling [3].

### 1.1.3. Colectores cilindro parabólicos

#### 1.1.3.1. Efectos de la geometría parabólica

Una parábola es el lugar geométrico de un punto que se mueve en un plano equidistando una recta fija, llamada directriz y de un punto fijo en el plano, llamado foco.

En el caso de una parábola de eje vertical, con vértice  $(x, y)$  y foco  $(h, y + p)$ , como se ve en la Figura 1.3 , su ecuación viene dada por:

$$(x - h)^2 = 4p(y - k) \tag{1.1}$$

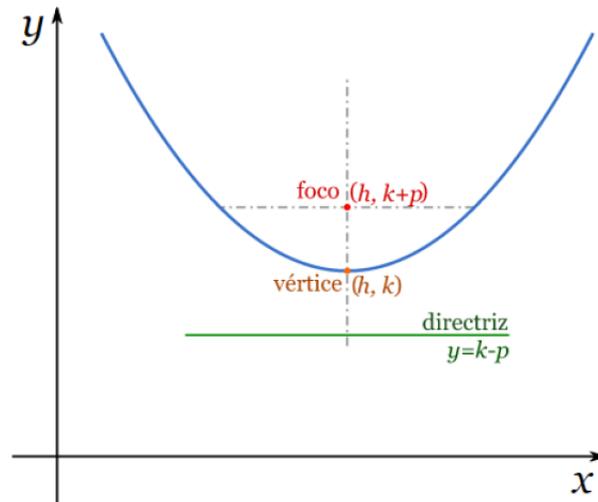


Figura 1.3: Descripción parábola eje vertical.

Cuando el vértice de la parábola está ubicado en el origen  $(0,0)$  y su foco en el punto  $(0, p)$ , la Ecuación 1.1 se reescribe así:

$$y = \frac{x^2}{4p} \quad (1.2)$$

En la parábola se cumple que la tangente bisecta el ángulo entre el foco, el punto de tangencia y su proyección a la directriz. Lo que permite que líneas paralelas al eje de la parábola, también paralelas a la proyección a la directriz, sean reflejadas en dirección al foco, como se ve en la Figura 1.4.

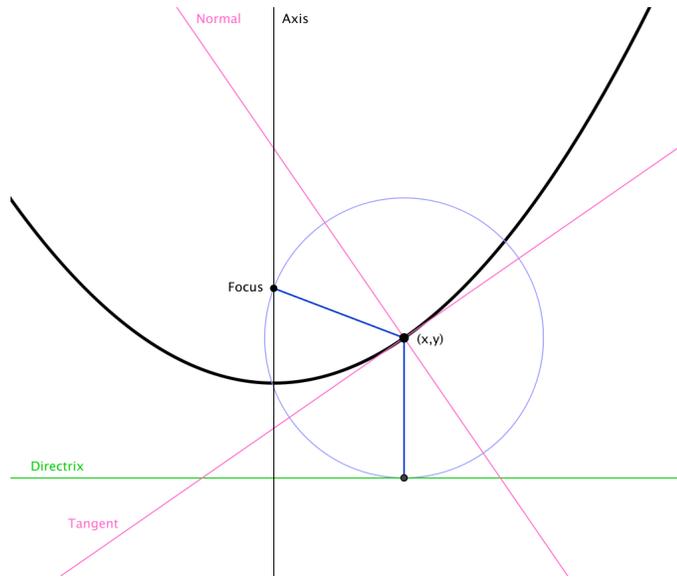


Figura 1.4: Diagrama que muestra la propiedad reflexiva por los elementos de la parábola.

En un concentrador cilindro parabólico, el reflector toma la forma parabólica y el tubo absorbedor se ubica en el punto focal de ella, con el fin de concentrar la radiación solar en el tubo, tal como se aprecia en la Figura 1.5.

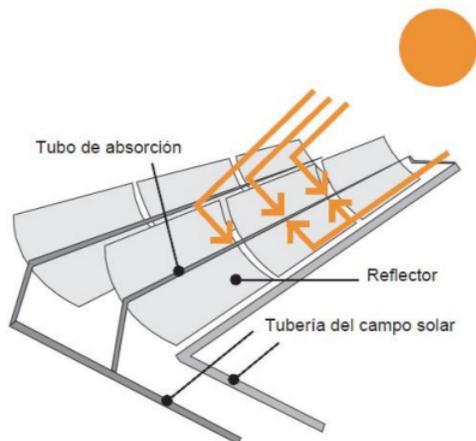


Figura 1.5: Esquema de un concentrador cilindro parabólico [4].

Lo anterior trae como consecuencia que la distribución del flujo de calor alrededor del tubo no sea uniforme, ocasionando un alto gradiente térmico (ver Figura 1.6) , lo que conlleva a un daño en el tubo absorbedor por estrés térmico y en consecuencia baja la confiabilidad del concentrador [5].

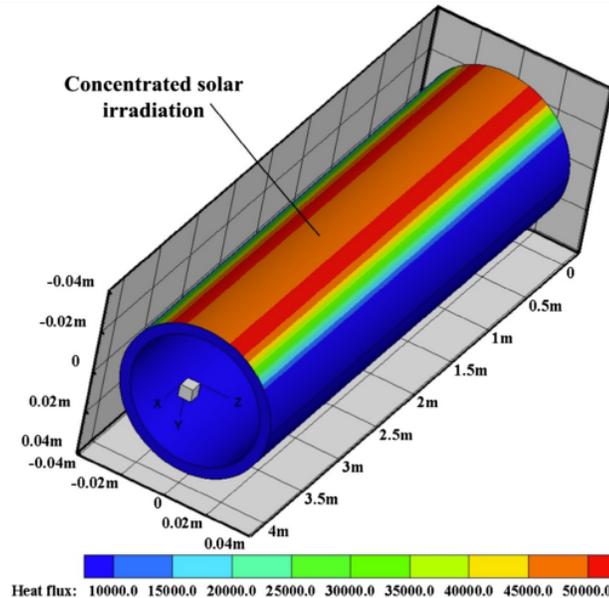


Figura 1.6: Gradiente térmico experimentado por el tubo absorbedor [6].

### 1.1.3.2. Reflectores secundarios

Los reflectores secundarios son dispositivos reflectantes que se utilizan para mejorar el desempeño óptico y térmico de los concentradores solares, ya que se ubican estratégicamente para aprovechar la reflexión de la radiación que llega a la superficie reflectante principal. Estos pueden ser de distintas formas, planos [7], triangulares[8], parabólicos [9] o con geometrías compuestas[10].

Generalmente, el reflector secundario (de ahora en adelante RS), se ubica sobre el tubo absorbedor, con el fin de obtener un flujo térmico más uniforme y mejorar el desempeño general. Para ello, es importante tener en consideración lo siguiente [9]:

- Ancho de apertura del RS: debe ser mayor al diámetro del tubo absorbedor y menor al 5 % del ancho de apertura del reflector primario.
- Posición del RS: debe ser un punto en el que lleguen rayos reflejados del relector primario y puedan ser reflejados al tubo absorbedor.
- Posición del tubo absorbedor: la distancia mínima desde el foco del reflector primario está determinada por los rayos reflejados por la tangente del borde exterior de éste y la máxima distancia se calcula asumiendo que al menos el 50 % de los rayos reflejados en el reflector primario llegan al receptor.

### 1.1.3.3. Ejemplos de reflectores secundarios

En el año 2019 en Atenas, Grecia, se realizó un estudio que evaluaba el desempeño de un reflector secundario plano con la característica que su superficie inferior tenía forma parabólica coincidente con la del reflector principal, ubicado al final del concentrador [11]. En este estudio se realizó un análisis óptico y térmico utilizando el recurso solar de la ciudad de Atenas y variando la altura del reflector secundario. En la Figura 1.7 se aprecia un esquema del reflector estudiado.

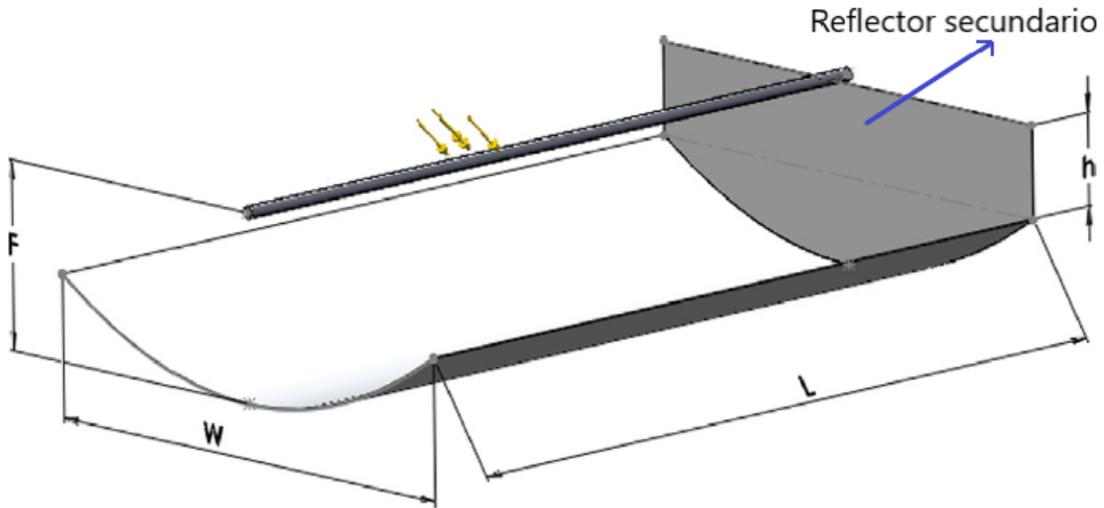


Figura 1.7: Concentrador del estudio con reflector secundario incluido [11].

Para la realización del estudio primero se analizó el desempeño de un colector de tipo cilindro parabólico convencional, luego se evaluaron los distintos casos que consistían en este colector convencional con reflector secundario variando la altura  $h$ . Posteriormente realizaron una comparación crítica y obtuvieron conclusiones al respecto.

Este estudio arrojó como conclusión que a mayor altura del reflector mayor era el beneficio, sin embargo el rango evaluado en el estudio siempre resultó beneficioso. Además, se demostró que mientras mayor es el ángulo de incidencia, mayor es la mejora óptica del concentrador, siendo la mejora óptica anual de un 21,7 %. Las mejoras térmicas son mayores que las ópticas y aumentan a mayores temperaturas de entrada siendo el mejor caso para una temperatura de 650 K una mejora de un 75,38 % [11].

Un estudio realizado por Tang et al. en 2021 [12] muestra cómo se puede optimizar el diseño de un reflector secundario para mejorar el flujo térmico en el tubo absorbedor. En este estudio el reflector secundario corresponde a un espejo cuya forma está descrita por una ecuación que permite variar la forma del espejo el que se encuentra ubicado como muestra la Figura 1.8 y considera dos diseños mostrados en la Figura 1.9.

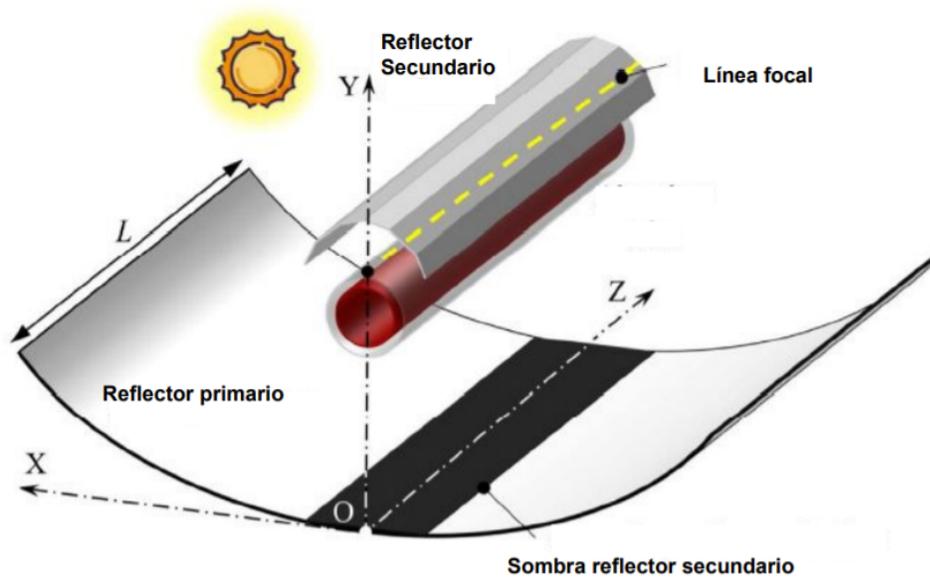
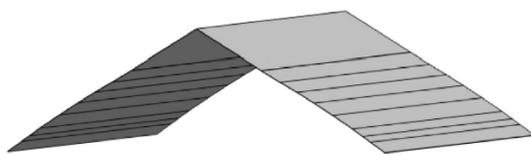
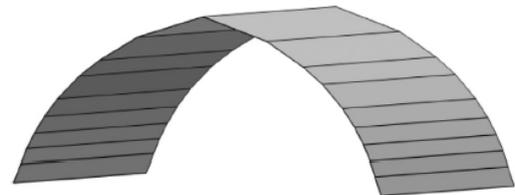


Figura 1.8: Disposición del reflector secundario de estudio [12].



(a) Diseño LS-2 PTC.



(b) Diseño LS-3 PTC.

Figura 1.9: Tipos de reflectores secundarios [12].

Este estudio compara la uniformidad del flujo térmico del tubo absorbente con y sin reflector secundario, para el primer caso se analiza la uniformidad tanto de la parte superior como inferior del tubo, ya que la primera recibe la reflexión del reflector secundario y la segunda la recibe del reflector primario, demostrando que con este diseño se logra una distribución parecida tanto en la parte inferior como superior del tubo absorbente, generando uniformidad en éste.

Para el diseño LS-2 se logra una uniformidad en el tubo cercana al 95,68%. Al comparar

con otros reflectores secundarios la eficiencia óptica de este diseño alcanza un 81,5 %, sin embargo al compararlo con el concentrador sin reflector se genera una disminución del 3 % debido a la sombra generada por el reflector secundario.

Para el diseño LS-3 se logra una uniformidad de un 90,76 %. Al comparar la eficiencia óptica del sistema con y sin reflector secundario, se ve una mejora de un 6 % para el primer caso.

## **1.2. Motivación**

Hasta agosto del 2021, la matriz energética para producción eléctrica de Chile proviene en un 53,3 % de fuentes renovables, de los cuales un 24 % corresponde a recurso hidráulico, un 17,8 % corresponde a recurso solar, un 9,9 % corresponde a recurso eólico, un 1,5 % corresponde a biomasa y el 0,2 % corresponde a energía geotérmica. Sin embargo, el 46,7 % sigue siendo obtenido de fuentes térmicas, de los cuales un 17,8 % corresponde a carbón, un 17,6 % corresponde a gas natural y un 11,3 % corresponde a petróleo [13].

Si bien en los últimos años ha habido un aumento en la implementación de tecnologías renovables, el escenario ambiental actual amerita más acción y lo antes posible, como quedó demostrado en los resultados de la COP26 [14], por lo que es necesario buscar soluciones limpias que permitan seguir abasteciendo las necesidades energéticas de la humanidad.

Por lo anterior y los antecedentes presentados, este trabajo busca contribuir al estudio del efecto del uso de reflectores secundarios, analizando el comportamiento óptico del concentrador al variar las características geométricas del reflector secundario.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluar el efecto del uso de reflectores secundarios en concentradores cilindro parabólico y la influencia de las características geométricas de éstos en el desempeño óptico y la distribución del flujo del tubo absorbedor.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Establecer las condiciones geométricas del concentrador del caso base, que servirá para comparar y analizar las propuestas.
2. Evaluar la distribución del flujo del tubo absorbedor considerando los parámetros  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
3. Definir para cada reflector secundario su ancho y ángulo de apertura, además de la posición del reflector secundario y tubo absorbedor para cada caso a evaluar.
4. Simular y analizar los resultados de cada caso para verificar el aumento en la uniformidad del flujo alrededor del absorbedor y cómo esto afecta la eficiencia óptica del sistema.

## 1.4. Alcances

Este trabajo de título consiste en una evaluación del efecto de utilizar reflectores secundarios (RS) en concentradores cilindro parabólicos, por lo que el estudio se centrará en estudiar el concentrador como unidad, es decir, no considerará un arreglo de concentradores y los estudios se realizarán en 1 concentrador cilindro parabólico por caso.

La evaluación se realizará considerando dimensiones fijas para el tubo absorbedor y reflector principal, es decir, las variaciones dimensionales, aplicarán solamente a la estructura del reflector secundario.

Las simulaciones del concentrador con y sin reflector secundario serán tridimensionales, sin embargo, para el análisis no se considerará la longitud del absorbedor, debido a que la distribución del flujo en el eje longitudinal es uniforme.

El estudio se centrará en la evaluación óptica del desempeño del concentrador con reflector secundario, dejando de lado la parte térmica y aspectos económicos.

# Capítulo 2

## Antecedentes específicos

### 2.1. Conceptos importantes

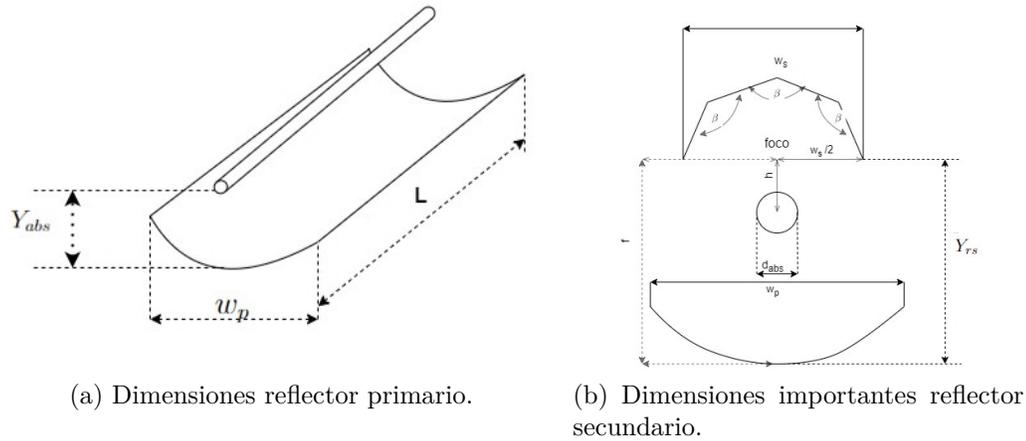


Figura 2.1: Parámetros importantes para concentrador con RS.

- Ancho de apertura del reflector primario ( $W_p$ [m]): corresponde a la distancia lateral del reflector primario y en conjunto con el largo del reflector ( $L$ ) se puede calcular el área de apertura.
- Ancho de apertura del reflector secundario ( $W_s$ [m]): corresponde a la distancia lateral del reflector secundario.
- Área de apertura ( $A_a$ [ $m^2$ ]): corresponde a la superficie máxima que recibe radiación. En este caso se debe considerar la sombra que genera el reflector secundario, por lo que su fórmula viene dada por:

$$A_a = (W_p - W_s) \cdot L[m^2] \quad (2.1)$$

- Distancia focal ( $f_p$ [m]): corresponde al foco del reflector primario y punto geométrico donde se concentran los rayos solares.
- Desplazamiento del tubo absorbente desde el foco ( $h$ [m]): corresponde al desplazamiento vertical de la posición del tubo absorbente desde su posición original en el foco.

- Diámetro del tubo absorbedor ( $d_{abs}[m]$ ): corresponde al diámetro interno del tubo absorbedor, para este estudio solo se considerará esta dimensión.
- Posición del tubo absorbedor ( $Y_{abs}[m]$ ): corresponde a la posición vertical del tubo absorbedor.
- Posición del reflector secundario ( $Y_{rs}[m]$ ): corresponde a la posición vertical del borde del reflector secundario.
- Ángulo de apertura del reflector secundario ( $\beta$ ): corresponde a la separación angular entre los espejos consecutivos que forman el reflector secundario, para este estudio se considera igual para todos los espejos del caso.
- Reflectividad ( $\rho$ ): corresponde a una propiedad de un material e indica cuanta energía es reflejada por él. En general varía entre 0.9 y 0.95 [15].
- Absortividad ( $\alpha$ ): corresponde a una propiedad de un material e indica la fracción de energía que es capaz de absorber.

## 2.2. Distribución de flujo energético en el tubo absorbedor

La radiación incidente en el área de apertura es reflejada por el espejo primario hacia el tubo absorbedor. Esta radiación se distribuye en el receptor de manera no homogénea, su distribución depende, principalmente, de las características geométricas del reflector primario. El estudio de esta distribución del flujo energético en el tubo absorbedor es el principal foco de estudio de este trabajo.

Para medir y estudiar las diferentes distribuciones del flujo energético en el tubo absorbedor es necesario establecer el sistema de coordenadas en el mismo. En la Figura 2.2 se muestra el sistema coordenadas angulares en el receptor, además para profundizar en el análisis de la distribución se divide el absorbedor en parte superior e inferior..

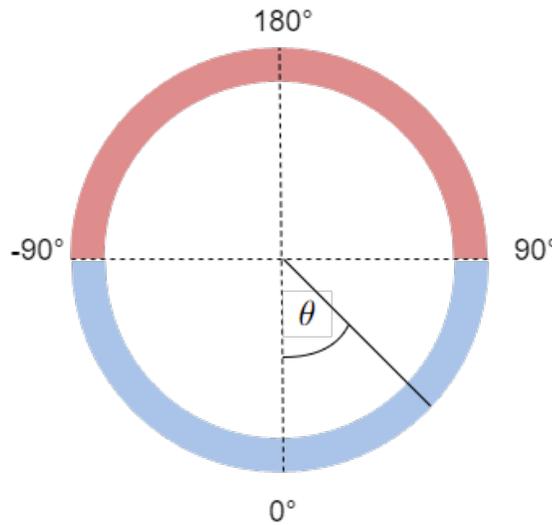


Figura 2.2: Coordenadas angulares tubo absorbedor.

Para ejemplificar la distribución del flujo energético se muestra la Figura 2.3, que por un lado muestra una simulación de un colector cilindro parabólico con el tubo absorbedor posicionado en el punto focal y por el otro la distribución del flujo alrededor del tubo y se puede notar que la parte superior del tubo no recibe flujo.

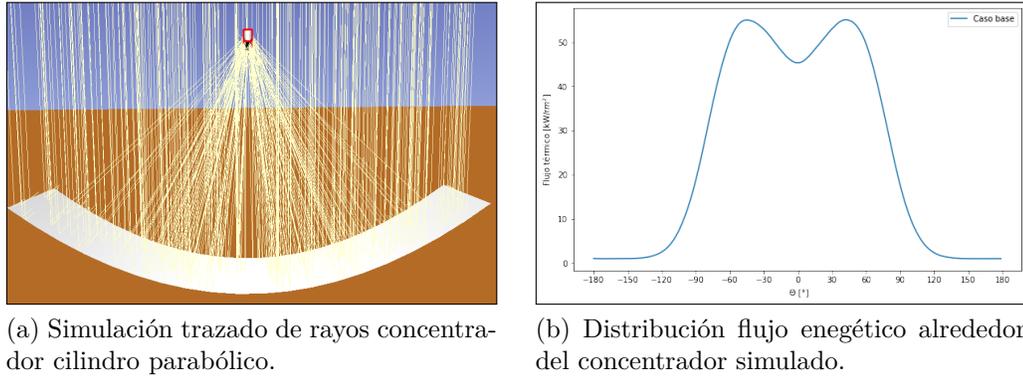


Figura 2.3: Representación simulación y distribución flujo en tubo.

## 2.3. Consideraciones simulaciones

### 2.3.1. Parámetros fijos

Para todos los experimentos se utilizan los siguientes parámetros fijos:

- Reflector primario: para este se utilizan las dimensiones de un módulo del colector europeo EuroTrough ET100 [16], quedando la parábola determinada por un ancho de apertura  $W_p = 5.77[\text{m}]$ , una distancia focal  $f_p = 1.71[\text{m}]$  y un largo  $L_p = 12[\text{m}]$ .
- Diámetro tubo absorbedor: se utiliza ( $d_{abs} = 70 [\text{mm}]$ ), basándose en el colector ET100.
- Reflector secundario: el único parámetro fijo para todos los experimentos con RS es el largo  $L_s = 12[\text{m}]$ .
- La reflectividad de ambos reflectores se setea en 0.94 y la absorptividad del tubo absorbedor se deja en 0.96.
- El número de rayos a utilizar para cada simulación es de 10 millones, basado en estudios similares utilizando Tonatiuh [17] [18].
- Los ángulos azimutal y cenital se establecen en  $90^\circ$  y  $0^\circ$ , respectivamente.

### 2.3.2. Posición tubo absorbedor

Como se mencionó en la sección 1.1.3.2, la posición del tubo absorbedor debe estar idealmente ubicada a una distancia mínima definida por el ángulo de borde  $\varphi$ , delimitado por el eje vertical del centro de la parábola y el borde extremo de esta, como se muestra en la Figura 2.4.a. La distancia máxima desde el foco idealmente debe permitir que al menos la mitad de los rayos reflejados lleguen de forma directa al tubo absorbedor, como se ve en la Figura 2.4.b.

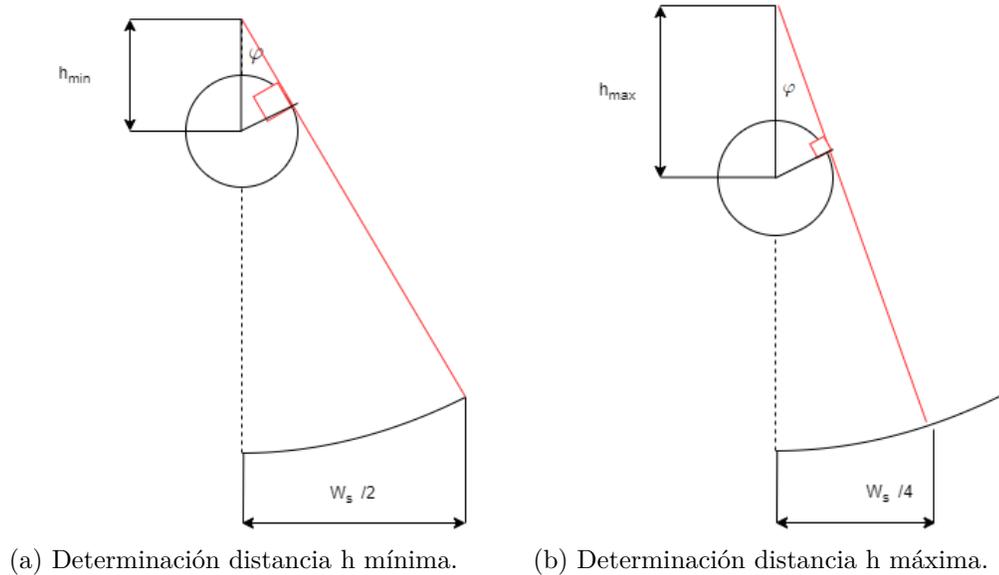


Figura 2.4: Determinación de límites de variación de la posición del tubo absorbedor según estudios mostrados.

De acuerdo a las dimensiones del colector ET100, los límites ideales de la posible ubicación del tubo absorbedor quedan en  $h_{min} = 0,036[m]$  y  $h_{max} = 0.049[m]$ .

### 2.3.3. Indicadores a evaluar

Son los indicadores que permiten caracterizar la distribución del flujo en el tubo absorbedor.

- Uniformidad: Mide la dispersión del flujo, considerando un coeficiente de variación que relaciona la desviación estándar ( $\sigma_f$ ) y el promedio ( $\bar{F}$ ). Se denota como U y se define:

$$U = \left(1 - \frac{\sigma_f}{\bar{F}}\right) \times 100\% \quad (2.2)$$

- No Uniformidad: Evalúa los flujos energéticos puntuales  $F_i$ , en cierto rango de ángulos, comparando la diferencia entre el mínimo y el máximo. Se denota como N.U. y se define:

$$N.U. = \left(\frac{F_{i,max} - F_{i,min}}{2 \cdot (F_{i,max} + F_{i,min})}\right) \times 100\% \quad (2.3)$$

- Porcentaje de la superficie que recibe flujo: Mide la razón entre la superficie del absor-

bedor que recibe flujo, es decir que es mayor al flujo basal del tubo y la superficie total de éste. Se denota como S.F. y se define como:

$$S.F. = \frac{\text{Superficie con flujo} > \text{flujo basal}}{\text{Superficie absorbedor}} [\%] \quad (2.4)$$

- Eficiencia óptica: Mide la capacidad de captar la radiación, es decir compara la cantidad de rayos que efectivamente llegan al absorbedor versus la cantidad total de rayos de la simulación que atraviesan el área de apertura. Se denomina E.O. y se define como:

$$E.O. = \frac{\text{N}^\circ \text{ de rayos que llegan al absorbedor}}{\text{N}^\circ \text{ total de rayos}} [\%] \quad (2.5)$$

- Potencia estimada en el tubo absorbedor: Utiliza la potencia por fotón que entrega el programa de trazado de rayos Tonatiuh para estimar la potencia total considerando los fotones válidos que llegan al tubo absorbedor. Se denomina P y se define:

$$P = \text{Potencia por fotón} \cdot \text{N}^\circ \text{ de fotones en absorbedor} [kW] \quad (2.6)$$

# Capítulo 3

## Metodología

La metodología que se planteó para esta investigación incluyó tres etapas, primero la caracterización geométrica de los casos de estudios, segundo las simulaciones del trazado de rayos de las configuraciones del estudio y tercero, el procesamiento de los resultados. A continuación, se detalla cada parte del procedimiento seguido.

### 3.1. Determinación de casos de estudio y generación de geometrías

En términos generales, este trabajo consistió en estudiar el efecto de añadir un reflector secundario a un concentrador cilindro parabólico y variar la geometría del reflector secundario.

Para el desarrollo de este trabajo, lo primero fue definir los parámetros del caso base, siendo utilizadas las dimensiones de un módulo del concentrador Eurotrough.

Luego se determinó que para el reflector secundario se utilizarían dos tipos de geometrías: dos espejos 3.1 y cuatro espejos 3.2, ambas configuraciones son construidas en base a una línea segmentada [12], ubicada en la parte superior del interior de una circunferencia imaginaria con centro en el foco del reflector primario y radio igual a  $\frac{W_s}{2}$ , cada segmento de la línea corresponde a un espejo. A continuación, se describen los casos y sus variables.

- Geometría 1: Reflector simétrico compuesto por dos espejos, definido por su apertura  $W_s$  y su ángulo de apertura  $\beta$ .

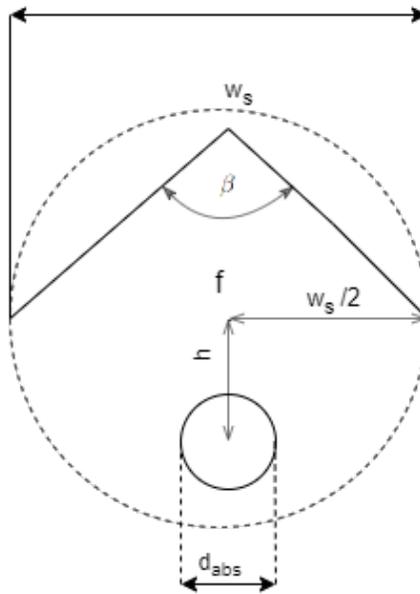


Figura 3.1: Caracterización RS geometría 1.

- Geometría 2: Reflector simétrico compuesto por cuatro espejos, definido por su apertura  $W_s$  y su ángulo de apertura  $\beta$ .

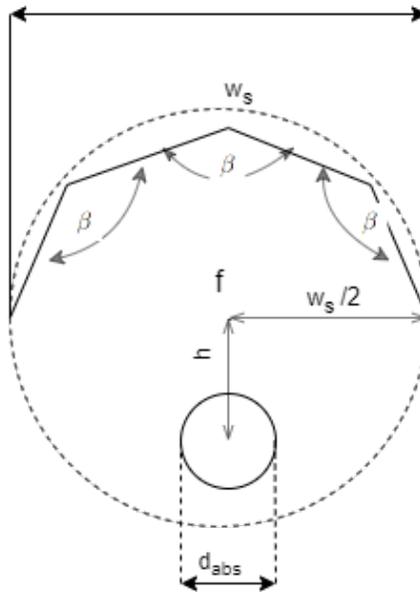
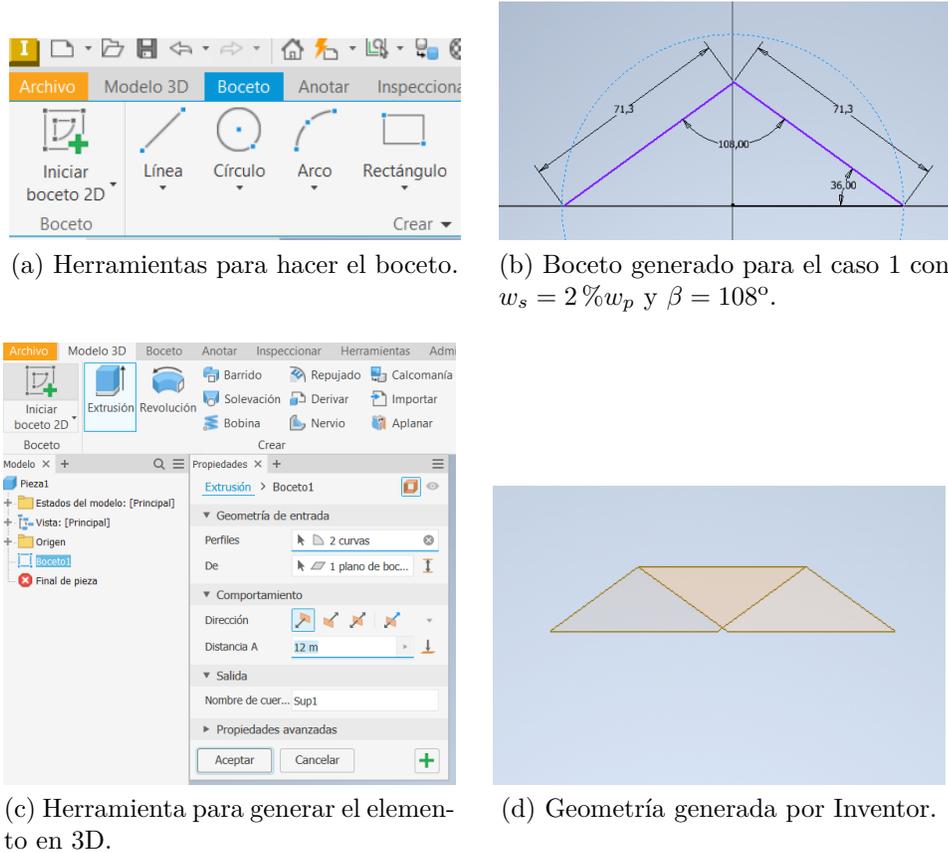


Figura 3.2: Caracterización RS geometría 2.

Posterior a esto, se generaron las geometrías en el software de modelamiento 3D *Autodesk Inventor*. Para ello, primero se genera el boceto de la geometría, definida por una línea segmentada con la apertura y los ángulos de elevación y apertura correspondientes, luego se setea el largo necesario mediante la herramienta de extrusión (ver Figura 3.3). Finalmente,

se exporta la geometría en formato .STL, ya que es el formato aceptado por Tonatiuh. Este procedimiento fue repetido para cada caso a evaluar. El detalle de todas las geometrías creadas se puede ver en Anexo A.



(a) Herramientas para hacer el boceto.

(b) Boceto generado para el caso 1 con  $w_s = 2\%w_p$  y  $\beta = 108^\circ$ .

(c) Herramienta para generar el elemento en 3D.

(d) Geometría generada por Inventor.

Figura 3.3: Procedimiento para generar geometría de reflectores secundarios.

### 3.2. Simulación de trazado de rayos

El siguiente paso, fue la simulación de cada caso a evaluar en el software de trazado de rayos *Tonatiuh*, que utiliza el modelo de trazado de rayos de Monte Carlo para la simulación radiativa de sistemas de concentración solar.

Este software tiene distintas herramientas, siendo *Group Node* la principal, ya que permite definir posiciones y características espaciales, que definen a todos los elementos dentro del nodo, por lo que cada elemento del sistema a evaluar debe tener su propio nodo. Además, se cuenta con la herramienta tracker que permite añadir un sistema de seguimiento a la configuración a evaluar. Para añadir una superficie, es necesario dentro del nodo añadir un *Surface Node*, el programa trae integradas distintas superficies comunes y además se pueden importar superficies en formato CAD o diseñarlas dentro del mismo programa.

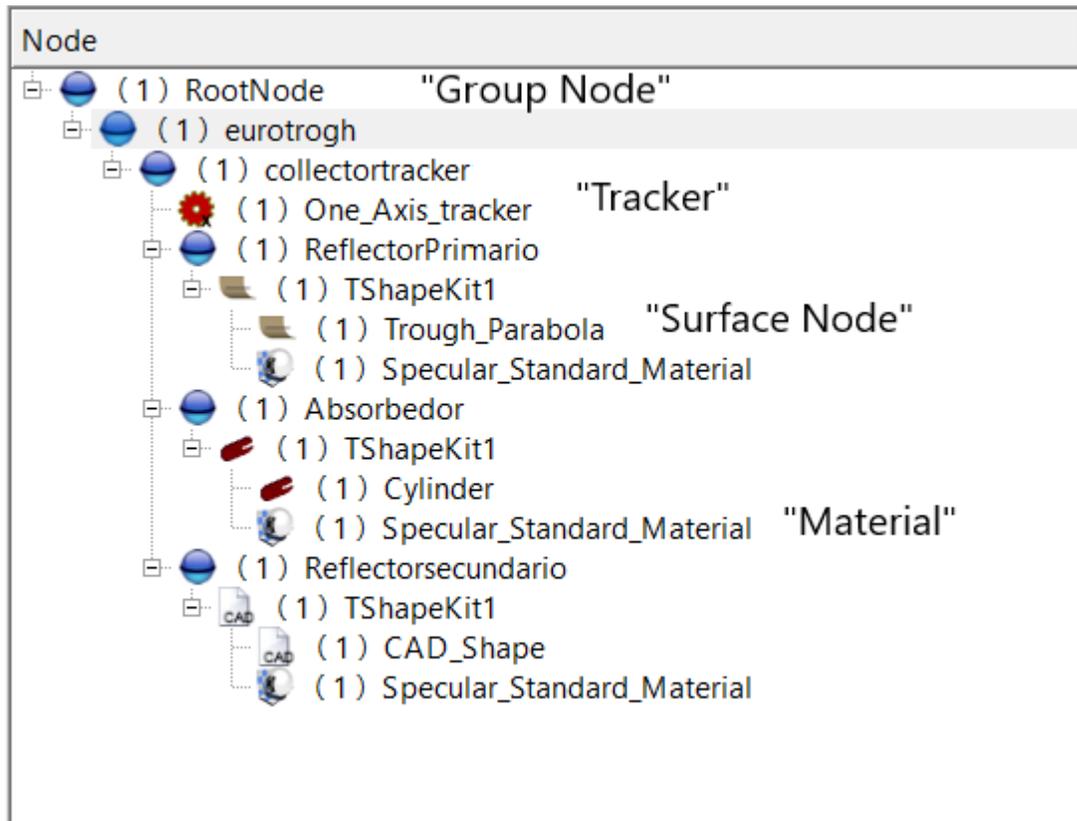


Figura 3.4: Construcción del sistema en Tonatiuh.

En la Figura 3.4, se aprecian todos los componentes del sistema a simular, cada parte de este (sistema de seguimiento, reflector primario, tubo absorbedor y reflector secundario) está asignado a un *Group Node* para poder definir su posición entre otras características espaciales como se ve en la Figura 3.5.a. Dentro de cada nodo se añade la superficie correspondiente y para las geometrías ofrecidas por *Tonatiuh* se le pueden configurar las dimensiones como se ve en la Figura 3.5.b.

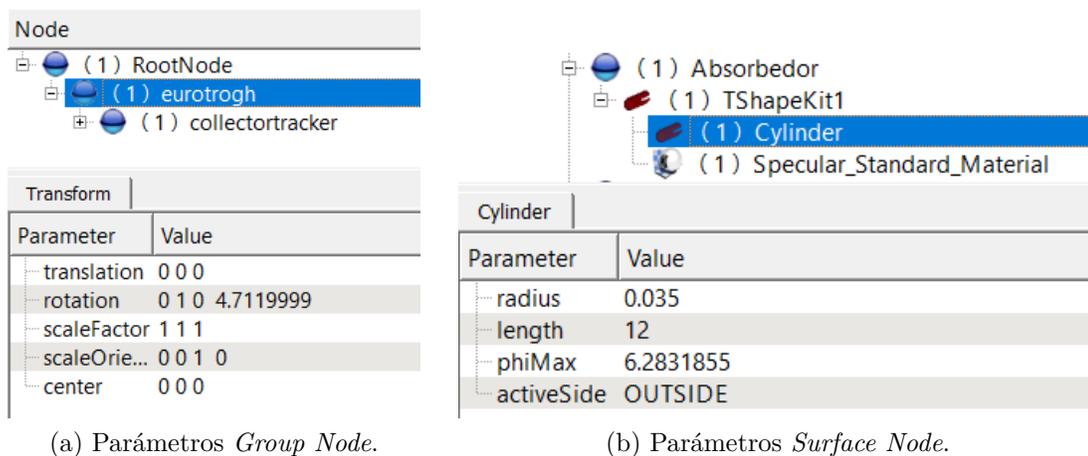


Figura 3.5: Configuraciones para *Group Node* y *Surface Node*.

Luego de haber configurado todas las superficies, fue necesario agregar un material a cada una de ellas, para ello dentro de *Surface Node* se seleccionó un material de los disponibles

en el programa, cada uno de ellos viene con propiedades definidas (ver Figura 3.6), en este caso se utilizó el material *specular standar material* y se seleccionó para ambos reflectores una reflectividad de 0.94 y para el absorbedor una absorptividad de 0.96.

Parameter	Value
m_reflect...	0.039000001
m_sigma...	2
m_distrib...	NORMAL
m_ambie...	0.2 0.2 0.2
m_diffus...	0.80000001 0.80000001 0.80000001
m_specul...	0 0 0
m_emissi...	0 0 0
m_shinin...	0.2
m_transp...	0

(a) Propiedades material tubo absorbedor.

Parameter	Value
m_reflect...	0.94
m_sigma...	2
m_distrib...	NORMAL
m_ambie...	0.2 0.2 0.2
m_diffus...	0.80000001 0.80000001 0.80000001
m_specul...	0 0 0
m_emissi...	0 0 0
m_shinin...	0.2
m_transp...	0

(b) Propiedades material reflectores.

Figura 3.6: Propiedades materiales utilizados para la configuración.

Después de haber configurado el sistema, se procede a definir las características solares, para ello se utiliza la herramienta *Environment*, en la cual se pueden definir la distribución que tendrán los rayos, la irradiación simulada, como se ve en la Figura 3.7.a, también se puede definir la posición del sol con los ángulos azimutal y cenital como se ve en la Figura 3.7.b.

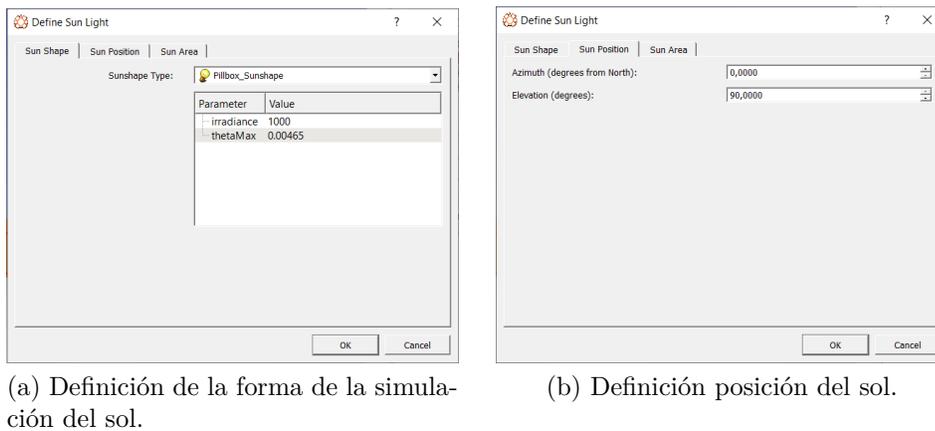
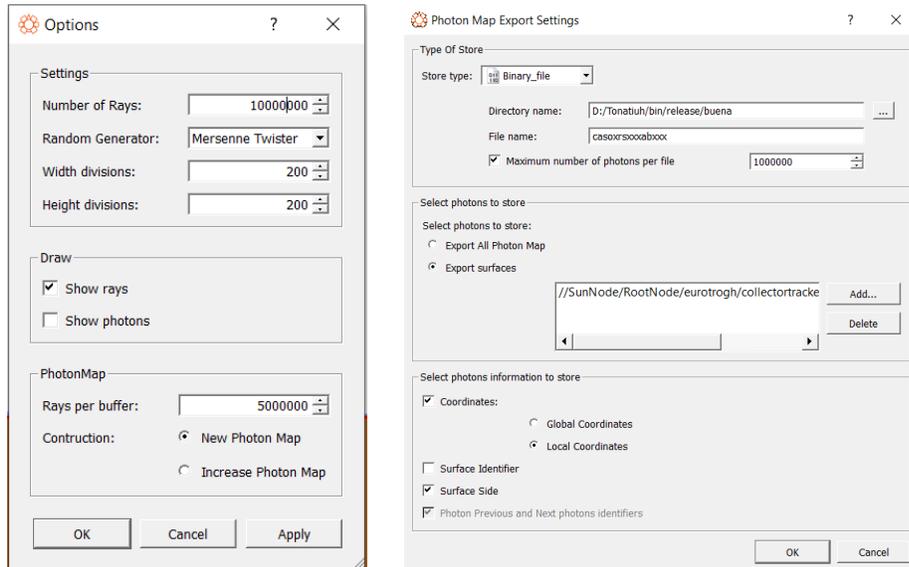


Figura 3.7: Definición de las características de la luz solar.

Teniendo todos los parámetros mencionados definidos, para poder realizar la simulación se configuró la cantidad de rayos, dejándolo en 10 millones de rayos (ver Figura 3.8.a), posterior a esto se corrió la simulación y el programa solicita definir los parámetros de exportación: tipo de archivo, ubicación, nombre, superficies a exportar, tipo de coordenadas, entre otros, como se ve en la Figura 3.8.b.



(a) Opciones para el trazado de rayos.

(b) Detalles de exportación de resultados.

Figura 3.8: Características de la simulación y exportación de datos.

Se decidió exportar solamente la superficie del absorbedor, ya que en él se centró el estudio, el formato de exportación escogido fue de archivos binarios con un máximo de 1 millón de fotones por archivo, obteniendo para cada simulación un número de archivos en formato .dat y un archivo de texto que contiene la información mostrada en la Figura 3.9.

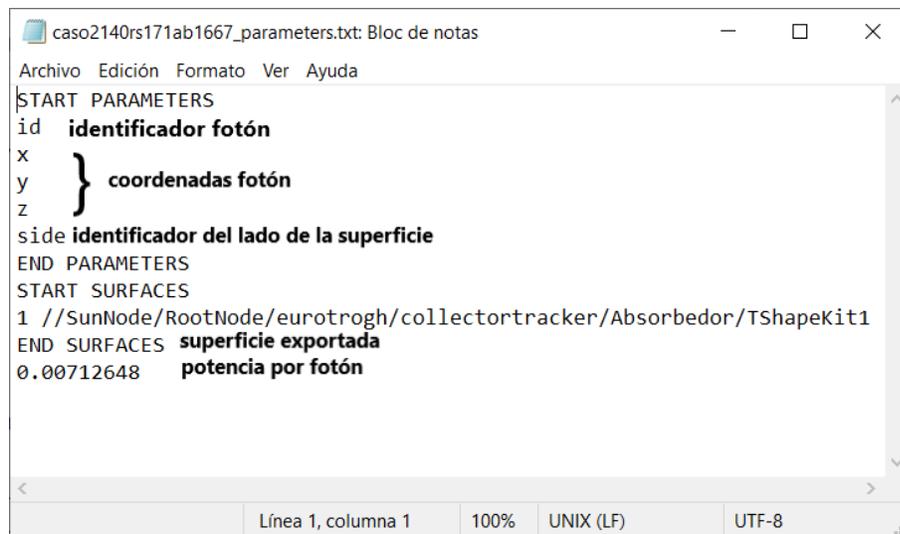


Figura 3.9: Información por fotón entregada por Tonatiuh.

### 3.3. Procesamiento de resultados

Con los datos obtenidos de las simulaciones se deseaba caracterizar el flujo alrededor del tubo absorbedor y calcular las variables dependientes definidas, para poder leer los datos se utilizó un código computacional en el software Mathematica. Con este código, se pudo leer los datos de los archivos binarios, filtrar los que no eran necesarios, transformar las coordenadas cartesianas a polares y asignar a cada una de ellas un valor para el flujo energético en dicho punto, además de contar los fotones de la superficie para poder calcular la eficiencia óptica. Este código también permite exportar los datos en distintos formatos, en este caso se exportaron las coordenadas polares en conjunto con su flujo correspondiente, y las variables calculadas en formato .txt y luego fueron ordenados en un archivo excel para agruparlos por geometría y separar las variables de los datos de flujo, posteriormente para cada geometría se transformó el formato del archivo a .csv para trabajar los datos del flujo en python de manera más expedita, ya que se deseaba conocer analizar la distribución de flujo total y local de la parte inferior y superior del absorbedor. El detalle de los códigos utilizados se puede ver en Anexo B.

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

### 4.1. Caso base

Para poder evaluar de mejor manera los resultados de los experimentos propuestos, primeramente se realiza un simulación para el concentrador sin reflector secundario para ver su distribución de flujo e indicadores. Adicionalmente, se realiza otra simulación variando la posición vertical del absorbedor  $Y_{abs}$ . Los valores escogidos para esta variación corresponden a los valores ideales para el concentrador ET100, según lo expuesto en antecedentes.

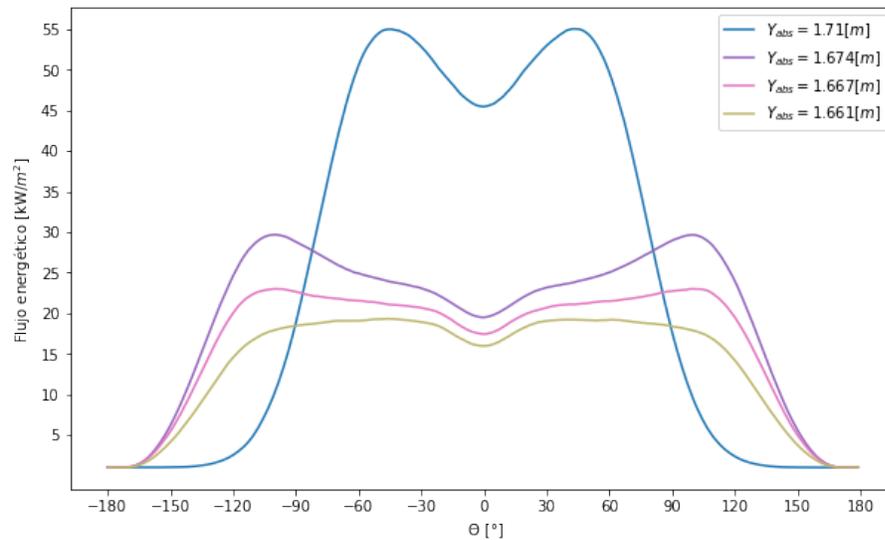


Figura 4.1: Distribución del flujo energético en el absorbedor para el caso base.

En la Figura 4.1 se aprecia que para el caso original ( $Y_{abs} = 1.71[m]$ ) el flujo se concentra principalmente en la parte inferior del absorbedor y aproximadamente a partir de los  $135^\circ$  el flujo es nulo. Se observa también que al desplazar el absorbedor la distribución es un poco más uniforme, además se logra conseguir flujo para ángulos mayores a  $90^\circ$ , lo que implica que hay flujo en la parte superior del absorbedor.

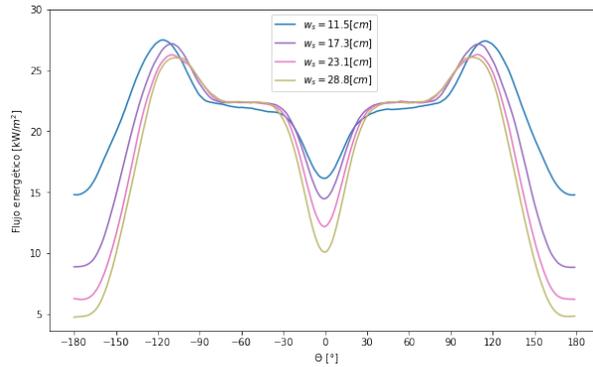
Tabla 4.1: Indicadores caso base

$Y_{abs}$ [m]	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O. [%]	P [kW]
1.71	8.7	22.9	76	48	62.67	91.3	65.1
1.661	52.2	28	95	45	83	51.4	36.6
1.667	53.9	28	73	46	85.0	61.1	43.5
1.674	52.3	25	89	47	86	72.4	51.6

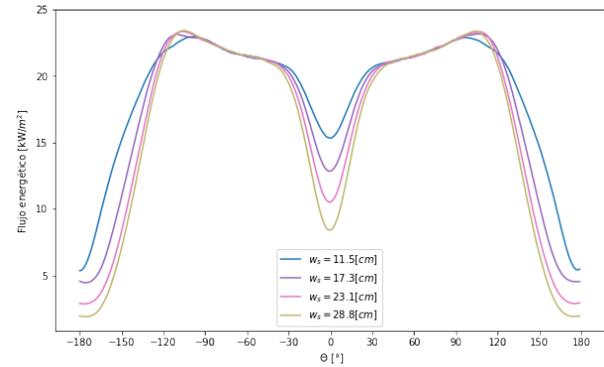
En la Tabla 4.1 se muestran los indicadores estadísticos y ópticos para el caso y base y sus variaciones desplazando el absorbedor, en ella se complementa la información entregada por la Figura 4.1 y se observa que mejorar la uniformidad de la distribución del flujo genera una pérdida de eficiencia óptica y de potencia. Debido a lo anterior, para todos los experimentos con reflector secundario<sup>1</sup>, la posición del absorbedor  $Y_{abs}$  queda en 1.667[m].

## 4.2. Variación de la apertura del reflector secundario

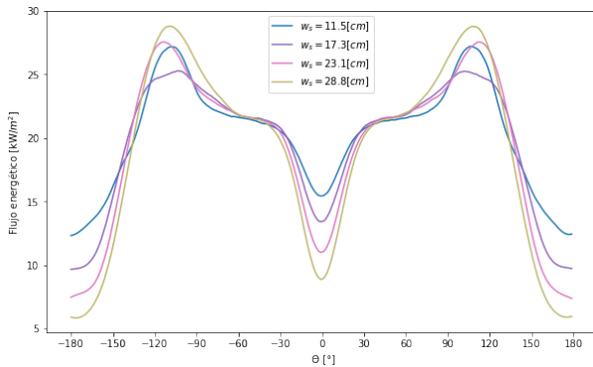
En este experimento se busca ver cómo afecta el ancho de apertura del reflector secundario en la distribución del flujo energético del absorbedor, para ello cada geometría es simulada con una apertura  $w_s$  igual a 2%, 3%, 4% y 5% de la apertura del reflector primario  $w_p$ . A continuación, se presentan los resultados principales de este experimento.



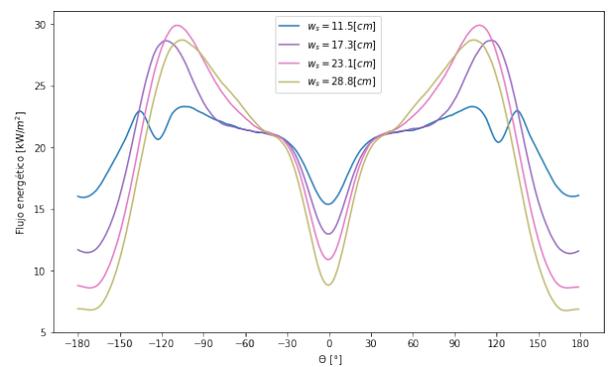
(a) Flujo energético geometría 1 con  $\beta = 108^\circ$ .



(b) Flujo energético geometría 1 con  $\beta = 140^\circ$ .



(c) Flujo energético geometría 2 con  $\beta = 135^\circ$ .



(d) Flujo energético geometría 2 con  $\beta = 140^\circ$ .

Figura 4.2: Distribuciones del flujo energético en el absorbedor variando  $w_s$ .

<sup>1</sup> Excepto el experimento "Variación de la posición del absorbedor".

La Figura 4.2.a muestra que el flujo se distribuye similarmente en torno al absorbedor al variar la apertura, esto es porque cada curva corresponde a un reflector con el mismo ángulo de apertura. Sin embargo, la diferencia entre los máximos y mínimos va aumentando al aumentar  $w_s$ , teniendo una variación de 65 % entre el mínimo y máximo valor de  $w_s$ . Además la cantidad de flujo por unidad de área entre  $-30^\circ$  y  $30^\circ$  va disminuyendo a medida que aumenta  $w_s$ , lo que debe estar relacionado con la sombra generada por el RS.

En la Figura 4.2.b se ve que para el caso simulado la diferencia entre los máximos y mínimos aumenta un 21.9 % entre  $w_{s,min}$  y  $w_{s,max}$ , esto indica que como se ve en la figura la variación de la apertura para esta geometría no es tan relevante, en comparación con el caso 1 con  $\beta = 108^\circ$ . De lo anterior se infiere que para el caso 1 con ángulos de apertura mayores la apertura del reflector secundario no es lo más relevante.

La Figura 4.2.c muestra, al igual que en los casos anteriores, que en la parte inferior del absorbedor a medida que aumenta  $w_s$ , el flujo es menor y más disperso. La diferencia entre el flujo máximo y mínimo tiene un aumento de 54 % entre  $w_{s,min}$  y  $w_{s,max}$ .

En la Figura 4.2.d se ve que en este caso  $w_s$  tiene una influencia importante para el ancho menor, ya que en esta curva el flujo mínimo se encuentra en la parte inferior del absorbedor y en la parte superior existen 4 puntos con alto flujo. Para los demás anchos, la distribución es similar a los casos anteriores, teniendo solo 2 puntos máximos en la parte superior.

De todo lo anterior, se puede inferir que el ancho de apertura del reflector secundario influye principalmente por la sombra que genera, quitándole uniformidad a la parte inferior del absorbedor.

Tabla 4.2: Indicadores geometría 1 con  $\beta = 108^\circ$ .

$W_s$ [cm]	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
11.5	83.7	79.4	91.1	15.5	100	79.57	56.71
17.3	73.3	63.1	87.8	25.8	100	74.33	52.97
23.1	66.7	53.7	83.8	31.2	100	70.05	49.93
28.8	61.9	47.5	79.8	34.9	100	67.32	47.98

La Tabla 4.2 indica que al aumentar  $w_s$  la uniformidad total del flujo disminuye, al igual que las uniformidades superior e inferior, sin embargo la diferencia entre estas va aumentando desde un 12 % hasta un 32 %. Para esta geometría  $w_s$  no influye en la superficie que recibe flujo, ya que para todo el rango evaluado, el 100 % del absorbedor recibe flujo. La potencia del absorbedor y la eficiencia óptica se ven disminuidas al aumentar  $w_s$ , teniendo una variación de 15 % aproximadamente para ambas variables.

Tabla 4.3: Indicadores geometría 1 con  $\beta = 140^\circ$ .

$W_s$ [cm]	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
11.5	74.5	64.4	89.9	31.2	100	69.07	49.22
17.3	66	52.1	85.7	34.1	100	65.17	46.44
23.1	59.5	42.4	81.3	39.3	90.33	62.02	44.20
28.8	54.9	36.2	77.1	42.7	88	59.74	42.57

La Tabla 4.3 muestra que la uniformidad total, superior e inferior disminuyen al aumentar  $w_s$ , además la diferencia entre las últimas aumenta desde un 25.6 % hasta un 41 %. También se puede ver que para  $w_s$  mayores a 23.1[cm] no toda la superficie recibe flujo, pero considerando el caso anterior, esta disminución tiene que ver con el ángulo de apertura. En cuanto a la eficiencia óptica y potencia del absorbedor se tiene una disminución al aumentar  $w_s$ , teniendo una variación de aproximadamente un 14 % para ambas variables, este valor es similar para el caso anterior por lo que se infiere que esta disminución de las variables se debe principalmente al aumento de  $w_s$ .

Tabla 4.4: Indicadores geometría 2 con  $\beta = 135^\circ$ .

$W_s$ [cm]	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
11.5	79.6	72.7	89.7	19	100	74.97	53.43
17.3	75.3	67.5	85.5	22.8	100	72.99	52.02
23.1	68.2	58.1	81.6	29	100	71.44	50.92
28.8	62.1	50.4	76.4	33.4	100	70.21	50.04

La Tabla 4.4 muestra que para este caso la diferencia de uniformidad entre la parte inferior y superior del absorbedor aumenta en menor medida que para los casos con 2 espejos, ya que las diferencias van entre 17 % y 26 %. Lo mismo ocurre con la eficiencia óptica y la potencia, ya que la diferencia es de un 6.3 %, para ambas variables.

Tabla 4.5: Indicadores geometría 2 con  $\beta = 140^\circ$ .

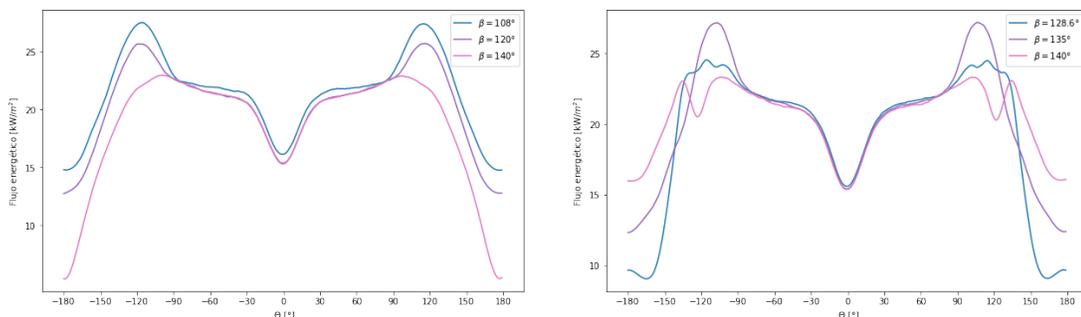
$W_s$ [cm]	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
11.5	88.4	87.1	89.9	10.9	100	75.58	53.86
17.3	74.9	68.1	85.6	21.9	100	75.48	53.79
23.1	66.4	56.8	79	28.3	100	74.33	52.97
28.8	61.9	51.1	74.4	31.2	100	70.87	50.51

La Tabla 4.5 muestra nuevamente, la particularidad de la distribución para esta geometría con una apertura de 11.5[cm], ya que la diferencia entre la uniformidad de la parte inferior y superior del absorbedor es solo un 2.8 %, en cambio para las otras aperturas la diferencia es similar en comportamiento para el caso con  $\beta = 135^\circ$  pero menor numéricamente, ya que para la apertura mayor la diferencia de uniformidad alcanza un 23 %. La disminución de eficiencia óptica y potencia alcanza un 6.2 %.

De todo lo anterior, se infiere que la uniformidad del flujo, está influida por la apertura del reflector  $w_s$ , puesto que en todos los casos esta disminuye al aumentar  $w_s$ , sin embargo las diferencias entre la parte inferior y superior del absorbedor dependen también de la forma(cantidad de espejos) y del ángulo de apertura.

### 4.3. Variación del ángulo de apertura del reflector secundario

En esta sección se evaluará la influencia del ángulo de apertura considerando una apertura fija para el reflector secundario.



(a) Flujo energético geometría 1 con  $w_s = 0.115\text{m}$ .

(b) Flujo energético geometría 2 con  $w_s = 0.115\text{m}$ .

Figura 4.3: Distribuciones del flujo energético en el absorbedor variando  $\beta$ .

Al variar el ángulo de apertura para la geometría compuesta por 2 espejos, como se ve en la Figura 4.3.a, el flujo se distribuye de manera similar para los casos con  $\beta = 108^\circ$  y  $\beta = 120^\circ$ , presentando un alza significativa de flujo en la parte superior del absorbedor, entre los  $90^\circ$  y  $115^\circ$  aproximadamente, además, para estos casos el flujo mínimo es mayor a  $10[kW/m^2]$ . En cambio, para el caso  $\beta = 140^\circ$  el máximo flujo se encuentra en los  $99^\circ$  y en la parte superior del absorbedor el flujo descende de manera más abrupta que para los otros casos y tanto el flujo mínimo como el máximo son menores que para ángulos menores.

De lo anterior se desprende que al aumentar el ángulo de apertura, los flujos alcanzados en el absorbedor son menores, esto se debe a que  $\beta$  condiciona la elevación del espejo con respecto a la horizontal, lo que afecta la trayectoria de los rayos reflejados. Entonces, considerando que para esta geometría es 1 espejo el que busca cubrir toda la superficie de un lado de la parte superior del absorbedor, el efecto de la disminución de la elevación al aumentar  $\beta$  hace que el porcentaje de rayos reflejados por el reflector secundario no lleguen a toda la superficie superior, concentrándose en el primer tramo de este y/o desviándose.

Para la geometría compuesta por 4 espejos, la Figura 4.3.b muestra que el ángulo de apertura influye notablemente en la distribución del flujo, ya que las 3 curvas mostradas en la parte superior de absorbedor difieren entre sí. También es posible ver que al aumentar  $\beta$ , la diferencia entre el flujo máximo y mínimo disminuye, lo que se traduce en mayor uniformidad.

Para el caso  $\beta = 128.6^\circ$ , en el primer tramo de la parte superior del absorbedor ( $\theta = 90^\circ$  y  $\theta = 135^\circ$ ), se aprecian 3 fluctuaciones correspondientes a los flujos más altos por lado (iz-

quierdo y derecho), en las cercanías de  $\theta = 115^\circ$  y luego se ve un descenso abrupto del flujo llegando a un mínimo en los  $160^\circ$  aproximadamente, para luego aumentar hasta el punto más alto del absorbedor.

Cuando  $\beta$  toma el valor de  $135^\circ$ , el flujo aumenta en la parte superior del absorbedor hasta alcanzar su máximo en  $\theta = 110^\circ$  para luego descender hasta el flujo mínimo, ubicado en  $\theta = 180^\circ$ .

El caso con  $\beta = 140^\circ$  presenta el caso menos disperso de los 3, ya que en la parte superior del absorbedor, la diferencia entre el flujo mínimo y máximo es menor que en los otros 2 casos, además se observa un máximo alrededor de los  $100^\circ$ , luego una leve disminución hasta los  $120^\circ$  aproximadamente para nuevamente aumentar en los  $130^\circ$ , con un valor levemente menor que el máximo, finalmente el flujo empieza a descender a medida que aumenta  $\theta$ . Para este caso particular el flujo mínimo se encuentra en la parte inferior del absorbedor ( $\theta = 0^\circ$ ).

Como esta geometría esta compuesta de 2 espejos por lado, cada espejo tiene una elevación distinta, por lo que los rayos son reflejados en distintas direcciones. Para ambos espejos, la elevación disminuye al aumentar  $\beta$ , sin embargo, el espejo superior tiene una elevación menor que el inferior. Esta combinación de inclinaciones permite que para  $\theta$ 's mayores a  $145^\circ$ , el aumento de  $\beta$  otorgue un mayor flujo.

Tabla 4.6: Indicadores geometría 1 variando  $\beta$ .

$\beta^\circ$	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
108	83.7	79.4	91.1	15.5	100	79.57	56.71
120	82.4	76.8	89.9	17.1	100	75.5	53.81
140	74.5	64.4	89.9	31.2	100	69.07	49.22

En la Tabla 4.6 se ve con mayor claridad que el aumento de  $\beta$  disminuye la uniformidad del flujo en el absorbedor, siendo la uniformidad de la parte superior la más afectada, además la diferencia de uniformidad en ambos hemisferios del absorbedor crece con el aumento de  $\beta$ . En cuanto al desempeño del absorbedor se observa una disminución tanto en la eficiencia óptica como en la potencia, a medida que aumenta  $\beta$ .

Tabla 4.7: Indicadores geometría 2 variando  $\beta$ .

$\beta^\circ$	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
128.6	74.3	64	90.2	24.1	100	71.65	51.06
135	79.6	72.7	89.7	19	100	74.97	53.43
140	88.4	87.1	89.9	10.9	100	75.58	53.86

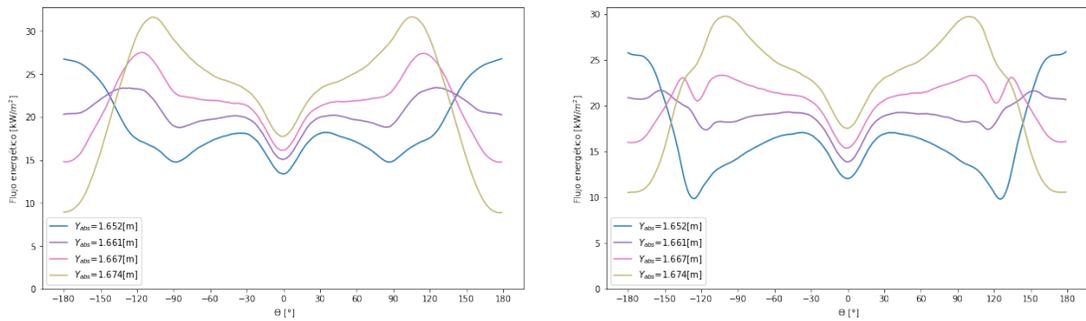
Para la geometría 2 el aumento de  $\beta$  produce un mejora general en las variables evaluadas, tal como se ve en la Tabla 4.7. La uniformidad total crece y la diferencia entre la uniformidad superior e inferior disminuye a medida que aumenta  $\beta$ , sobretodo en el caso  $\beta = 140^\circ$ . Así mismo, la eficiencia óptica y potencia presentan mejoras de un 5.5%.

En este experimento todas las geometrías evaluadas tienen la misma apertura, por lo que

la sombra generada tiene las mismas dimensiones en todos los casos, esto se traduce en una uniformidad inferior similar para cada geometría (90 % aproximadamente), por lo que se infiere que el ángulo de apertura del reflector secundario condiciona la distribución de flujo en la parte superior del absorbedor, sin embargo el comportamiento creciente o decreciente al aumentar  $\beta$  depende de la cantidad de espejos que determina cuantas direcciones posibles tendran los rayos incidentes en el reflector secundario.

#### 4.4. Variación de la posición del absorbedor

En este experimento se busca evaluar la influencia de la posición del absorbedor, para ello se fija la apertura en  $w_s = 11.5[\text{cm}]$  y la posición del reflector secundario  $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$  y se varía la posición  $Y_{abs}$  en 1.652[m], 1.661[m], 1.667[m] y 1.674[m], para cada geometría evaluada.



(a) Flujo energético geometría 1 con  $\beta = 108^\circ$ . (b) Flujo energético geometría 2 con  $\beta = 140^\circ$ .

Figura 4.4: Distribuciones del flujo energético en el absorbedor variando  $Y_{abs}$ .

Un desplazamiento de la posición del absorbedor, varía la distancia entre el reflector secundario y el absorbedor, es decir, mientras más alto está posicionado el absorbedor la distancia entre ambos elementos disminuye, esto se traduce en menores valores de  $h$  a mayores valores de  $Y_{abs}$ .

En la Figura 4.4 se puede ver que para ambas geometrías, la variación de este parámetro produce diferencias de distribución en ambos hemisferios del absorbedor. Para ambas geometrías, desplazar el absorbedor hacia arriba produce mayor flujo en la parte inferior, en cambio en la parte superior para  $\theta$ 's mayores a  $150^\circ$ , un absorbedor más alto produce menor flujo.

Tabla 4.8: Indicadores para geometría 1 con  $\beta = 108^\circ$ ,  $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$  y  $w_s = 11.5[\text{cm}]$ .

$Y_{abs}$ [m]	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
1.652	79.5	80	91	16.9	100	69.27	49.37
1.661	90.3	94	91	11	100	75.36	53.71
1.667	83.7	79	90	15.4	100	79.57	56.71
1.674	71.2	60	88	28.2	100	83.79	59.71

La Tabla 4.8, complementa la Figura 4.4.a y muestra que para los valores recomendados para  $Y_{abs}$ , al posicionar más alto el absorbedor la uniformidad total disminuye y la diferencia entre ambos hemisferios crece, sin embargo tanto la eficiencia óptica como la potencia aumentan, el valor utilizado fuera del rango recomendado corresponde al borde de la circunferencia imaginaria en donde se ubica el reflector secundario, para esta geometría, utilizar dicha posición provoca mejor uniformidad que en el mejor caso de las posiciones recomendadas, pero peores indicadores para eficiencia óptica y potencia que el mínimo recomendado.

Tabla 4.9: Indicadores para geometría 2 con  $\beta = 140^\circ$ ,  $Y_{rs} = 1.71[m]$  y  $w_s = 11.5[cm]$ .

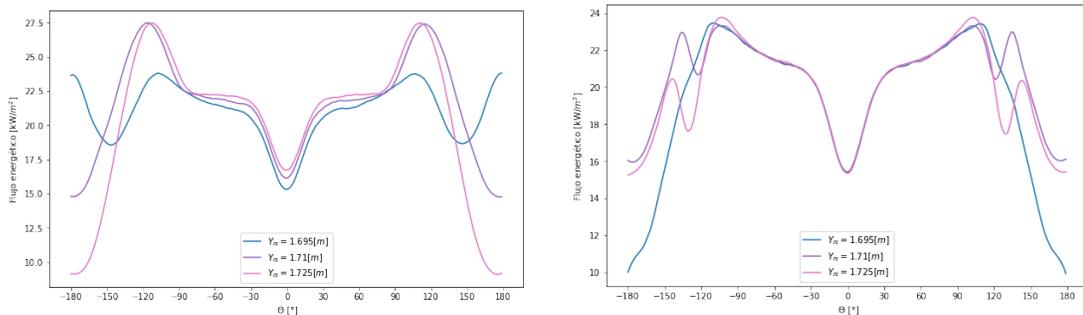
$Y_{abs}$ [m]	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
1.652	73.6	66	91	23.3	100	60.55	43.15
1.661	90.9	93	91	11.5	100	70.08	49.94
1.667	88.4	87.1	89	10.9	100	75.58	53.86
1.674	73.8	65	87	24.1	100	81.84	58.3

En la Tabla 4.9 se puede ver que para la geometría 2 la variación de los indicadores con respecto a la posición del absorbedor sigue la misma tendencia en los valores recomendados que la geometría 1. En cuando a  $Y_{abs} = 1.652[m]$ , se puede ver una mayor diferencia de uniformidad entre hemisferios, lo que se complementa con la Figura 4.4.b, además la disminución de la eficiencia óptica y potencia es mayor para esta geometría.

En resumen, un cambio en la posición del absorbedor no influye significativamente en la uniformidad de la parte inferior, en cambio si afecta la uniformidad superior y total. Además, es importante respetar el límite recomendado para obtener una buena eficiencia óptica y potencia.

## 4.5. Variación posición reflector secundario

En este experimento se busca evaluar la influencia de la posición del reflector secundario, para ello se fija la apertura en  $w_s = 11.5[cm]$  y la posición del absorbedor  $Y_{abs} = 1.667[m]$  y luego se varía la posición del reflector secundario  $Y_{rs}$  en 1.695[m], 1.71[m] y 1.725[m], para cada geometría evaluada.



(a) Flujo energético geometría 1 con  $\beta = 108^\circ$ . (b) Flujo energético geometría 2 con  $\beta = 140^\circ$ .

Figura 4.5: Distribuciones del flujo energético en el absorbedor variando  $Y_{rs}$ .

Para la geometría 1, desplazarla hacia abajo genera una diferencia en la distribución del flujo en la parte superior como se ve en la Figura 4.5.a, en cambio desplazarla hacia arriba aumenta la diferencia entre el flujo máximo y el mínimo, provocando menor uniformidad.

Al desplazar la geometría 2, la parte inferior no se ve afectada, sin embargo al desplazar el reflector hacia arriba, el flujo es menor para  $\theta$ 's entre  $120^\circ$  y  $150^\circ$ . Si el reflector se desplaza hacia abajo la distribución cambia su forma, presentando 1 solo peak y presenta una disminución más abrupta en la parte superior.

Tabla 4.10: Indicadores para geometría 2 con  $Y_{abs} = 1.667[\text{m}]$  y  $w_s = 11.5[\text{cm}]$ .

$Y_{rs}$ [m]	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
1.695	90	91	90	11.2	100	77.63	55.32
1.71	84	79	91	15.5	100	79.57	56.71
1.725	75	64	92	25.4	100	75.38	53.72

La Tabla 4.10 muestra que posicionar este reflector bajo el foco del reflector primario, se obtiene una uniformidad superior e inferior similares y de gran magnitud (90 %), sin embargo, se pierde un poco de eficiencia óptica y potencia. Si el reflector se posiciona sobre el foco, el flujo pierde uniformidad y la disminución de eficiencia óptica y potencia es mayor que al posicionarlo bajo el foco.

Tabla 4.11: Indicadores para geometría 2 con  $Y_{abs} = 1.667[\text{m}]$  y  $w_s = 11.5[\text{cm}]$ .

$Y_{rs}$ [m]	U [%]	$U_{sup}$ [%]	$U_{inf}$ [%]	N.U. [%]	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
1.695	80	73	90	20.2	100	71.24	50.77
1.71	88	87	90	10.5	100	76.19	54.30
1.725	87	85	89	11.2	100	73.98	52.72

En la Tabla 4.11, muestra que para la geometría 2 un cambio en la posición de ésta no contribuye en una mejora para la uniformidad del flujo, tampoco genera mejoras en eficiencia óptica y potencia, sin embargo a diferencia de la geometría 1 bajar el reflector disminuye más estos indicadores que subirlo.

De lo anterior se desprende que la distancia focal es en general una buena ubicación para el reflector secundario, para efectos de rendimiento (eficiencia óptica y potencia), sin embargo para efectos de la uniformidad del flujo, según este estudio está más influenciada por la geometría que por la posición de ésta.

## 4.6. Comparación de indicadores caso base y casos con reflector secundario

Como se mencionó anteriormente, esta investigación busca evaluar si utilizar un reflector secundario para el concentrador ET100 es una buena estrategia para mejorar la uniformidad del flujo en el absorbedor.

Considerando que esta investigación no optimiza las geometrías, lo que se compara del caso base son las curvas desplazadas mostradas en la Figura 4.1 con su equivalente usando reflector secundario para cada geometría.

Tabla 4.12: Variación de indicadores para geometría 1 con  $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$ ,  $w_s = 11.5[\text{cm}]$  y  $\beta = 108^\circ$ .

$Y_{abs}$ [m]	U	$U_{sup}$	$U_{inf}$	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
1.661	+73 %	+235 %	-4 %	+20 %	+47 %	+47 %
1.667	+55 %	+182 %	-3 %	+18 %	+30 %	+30 %
1.674	+36 %	+140 %	-1.1 %	+16 %	+18 %	+18 %

Tabla 4.13: Variación de indicadores para geometría 2 con  $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$ ,  $w_s = 11.5[\text{cm}]$  y  $\beta = 140^\circ$ .

$Y_{abs}$ [m]	U	$U_{sup}$	$U_{inf}$	S.F. [%]	E.O [%]	P[kW]
1.661	+74 %	+232 %	-4 %	+20 %	+36 %	+36 %
1.667	+64 %	+210 %	-3 %	+18 %	+25 %	+25 %
1.674	+41 %	+160 %	-2.2 %	+16 %	+13 %	+13 %

De las Tablas 4.12 y 4.13 se desprende que usar un reflector secundario mejora la mayoría de los indicadores en comparación con solamente desplazar el absorbedor.

## 4.7. Resumen de resultados

Para finalizar los resultados de esta investigación y poder comparar los casos de estudio de forma general, se establece un nuevo indicador  $\Delta U$  correspondiente al valor absoluto de la diferencia de uniformidad entre la parte superior e inferior del absorbedor.

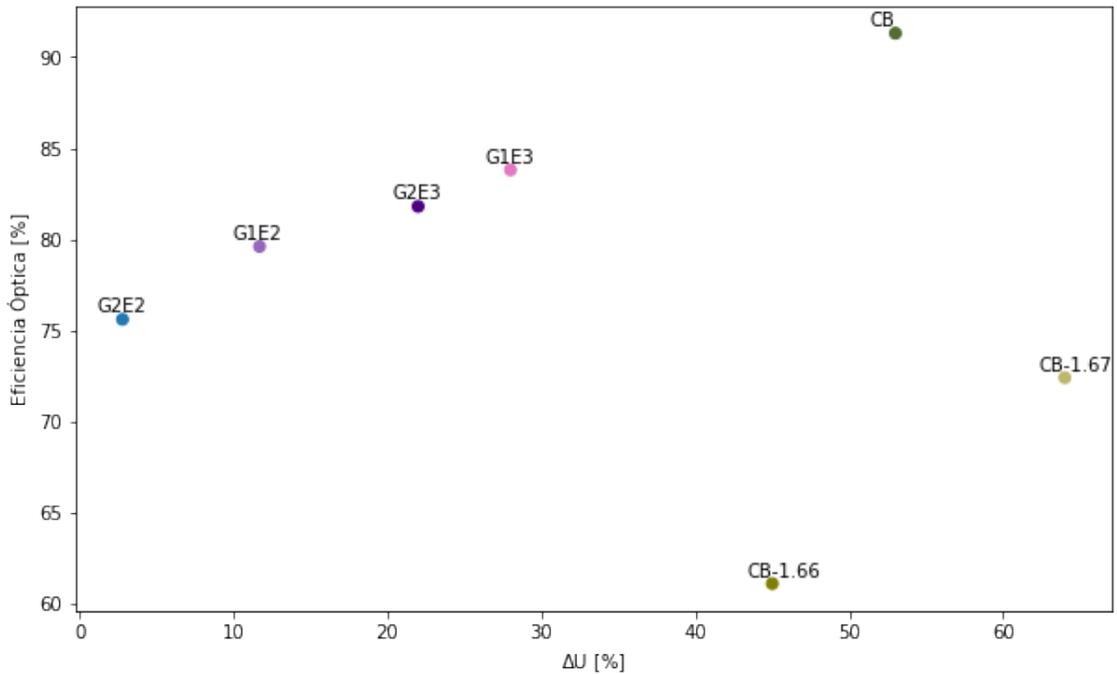


Figura 4.6: Comparación general de casos de estudio.

En la Figura 4.6 se observa que para los casos evaluados con reflector secundario la diferencia entre uniformidades es inferior al 30 %, mientras que para el concentrador original y sus variaciones desplazando la posición vertical del absorbedor es mayor al 45 %. En cuanto a la eficiencia óptica se observa que los casos propuestos alcanzan valores entre 75 % y 85 %, mientras que el caso original alcanza un valor de 91.3 % y sus variaciones desplazando el absorbedor no logran superar el 72 % de eficiencia. Si bien se presenta una disminución en eficiencia óptica en los casos propuestos, esta pérdida es porcentualmente menor a la ganancia en uniformidad.

## 4.8. Discusión general de los resultados

Con los resultados obtenidos de los experimentos realizados se afirma lo siguiente:

1. La apertura del reflector secundario  $w_s$  determina la sombra generada, lo que incide directamente sobre el rendimiento del absorbedor, el porcentaje de superficie que logra captar los rayos reflejados y determina en mayor medida la distribución del flujo en la parte inferior del absorbedor. Vale decir que si se busca maximizar el rendimiento del concentrador,  $w_s$  debe ser una variable a considerar.
2. El ángulo de apertura  $\beta$  determina la distribución de flujo en la parte superior porque este ángulo va a determinar la elevación de los espejos y con ello la normal de la superficie de estos, definiendo la dirección de los rayos reflejados desde cada espejo del reflector secundario. Esta variable otorga a la uniformidad y al rendimiento del absorbedor un comportamiento creciente para la geometría 2 y decreciente para la geometría 1.
3. La cantidad de espejos determina la cantidad de direcciones en que se reflejan los rayos, por lo que cada espejo incidirá en un tramo específico del absorbedor, entonces si lo que se busca es mayor uniformidad, se debe considerar más de 1 espejo por lado, un claro ejemplo de esto es que la geometría 2 con  $\beta = 140^\circ$ , presenta mejores indicadores que la geometría 1 con el mismo ángulo de apertura.
4. La posición vertical del absorbedor  $Y_{abs}$  hace que la uniformidad y los indicadores de rendimiento se comporten de manera inversa, es decir, al aumentar esta variable disminuye la uniformidad, pero tanto la eficiencia óptica como la potencia aumentan, sin importar la geometría del reflector secundario.
5. La posición del reflector secundario  $Y_{rs}$  influye en la cantidad de rayos captados y reflejados por él, por lo que influye en el rendimiento del absorbedor.
6. Utilizar un reflector secundario es una mejor estrategia que simplemente desplazar el absorbedor hacia abajo.
7. Si bien ninguna de las propuestas aquí presentadas mejora el rendimiento óptico del concentrador (E.O y P), la disminución de estos indicadores para la geometría 1 alcanza un valor mínimo de 8% y 10% para la geometría 2.
8. La geometría 2 con  $\beta = 140^\circ$ ,  $w_s = 11.5[\text{cm}]$ , ubicada en  $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$ , con el absorbedor ubicado en  $Y_{abs} = 1.661[\text{m}]$ , alcanza una uniformidad de 90.1%, siendo éste el mejor valor alcanzado para este indicador en todas las simulaciones realizadas, incluyendo el caso base y sus variaciones.
9. La geometría 1 con  $\beta = 108^\circ$ ,  $w_s = 11.5[\text{cm}]$ , ubicada en  $Y_{rs} = 1.71[\text{m}]$ , con el absorbedor ubicado en  $Y_{abs} = 1.674[\text{m}]$ , alcanza una eficiencia óptica de 83.79% y una potencia de 59.71 [kW], siendo éstos los máximos alcanzados para estos indicadores en todas las simulaciones realizadas utilizando reflectores secundarios, ya que para el caso base estos indicadores son más altos.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Este estudio evaluó la influencia de las características geométricas de un reflector secundario en la uniformidad, eficiencia óptica y potencia estimada del absorbedor de un concentrador cilindro parabólico. Para ello, se utilizaron 2 tipos de geometrías, conformadas por una sucesión de espejos y definidas por un ancho de apertura  $w_s$  y un ángulo de apertura  $\beta$ .

Los resultados obtenidos permiten concluir que tanto  $w_s$  como  $\beta$ , influyen en la distribución del flujo en el absorbedor. El primero caracteriza principalmente la superficie inferior debido a que determina la sombra generada por el reflector y la segunda determina principalmente la distribución de la superficie superior, ya que determina la normal de la superficie de cada sub-espejo del reflector y con ello direcciona los rayos hacia el absorbedor.

Ambas geometrías evaluadas, presentaron mejoras significativas en la uniformidad total del absorbedor en comparación con el concentrador Eurotrough convencional, obteniendo valores por sobre un 36% y 41%, para las geometrías 1 y 2, respectivamente; además de disminuir la diferencia de uniformidad entre ambos hemisferios del absorbedor. Por lo que si se busca mejorar la uniformidad del flujo en el absorbedor, añadir un reflector secundario es una buena estrategia, incluso mejor que simplemente desplazar el absorbedor hacia abajo.

Las geometrías evaluadas no logran mejorar la eficiencia óptica y potencia estimada en el absorbedor en comparación con el concentrador convencional, sin embargo en comparación a la estrategia de bajar el absorbedor para mejorar la uniformidad, se obtienen mejores valores para estos indicadores, obteniendo mejoras por sobre 18% para la geometría 1 y 13% para la geometría 2.

En resumen, la uniformidad del flujo en el absorbedor de un concentrador Eurotrough mejora al añadir un reflector secundario con las geometrías propuestas a costa de una disminución en la eficiencia óptica y potencia del absorbedor. Sin embargo, estos indicadores podrían ser mejorados si se optimizan las variables geométricas del tipo de reflector evaluado en este estudio.

# Bibliografía

- [1] Generadoras, “Energía solar,” 2021, <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-solar>.
- [2] Novoa, S., “Concentración solar de potencia,” 2021, <https://hрудnick.sitios.ing.uc.cl/alumno13/consolar/sites.google.com/site/concentracionssolardepotencia/tecnologias-actuales.html>.
- [3] Behara, O., Khellaf, A., y Mohammedi, K., “The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 12–39, 2013, [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00088-4).
- [4] Velasco, C. P., “Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en paraguay,” Escuela Técnica superior de ingenieros de minas, 2012.
- [5] Khanna, S., Newar, S., Sharma, V., Panigrahi, P. K., y Mallick, T. K., “Deformation of receiver in solar parabolic trough collector due to non uniform temperature and solar flux distribution and use of bimetallic absorber tube with multiple supports,” *Energy*, vol. 165, pp. 1078–1088, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.145>.
- [6] Xiangtao, G., Fuqiang, W., Haiyan, W., Jianyu, T., Qingzhi, L., y Huaizhi, H., “Heat transfer enhancement analysis of tube receiver for parabolic trough solar collector with pin fin arrays inserting,” *Solar Energy*, vol. 144, pp. 185–202, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.020>.
- [7] Rodriguez-Sanchez, D. y Rosengarten, G., “Improving the concentration ratio of parabolic troughs using a second-stage flat mirror,” *Applied Energy*, vol. 159, pp. 620–632, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.106>.
- [8] Bharti, A., Mishra, A., y Paul, B., “Thermal performance analysis of small-sized solar parabolic trough collector using secondary reflectors,” *International Journal of Energy Research*, 2019, <https://doi.org/10.1080/14786451.2019.1613991>.
- [9] Shajan, S. y Baiju, V., “Designing a novel small-scale parabolic trough solar thermal collector with secondary reflector for uniform heat flux distribution,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 213, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118660>.
- [10] Maatallah, T. y Ammar, R., “Design, modeling, and optimization of a dual reflector parabolic trough concentration system,” *International Journal of Sustainable Energy*, pp. 1–13, 2020, <https://doi.org/10.1002/er.5157>.
- [11] Bellos, E. y Tzivanidis, C., “Investigation of a booster secondary reflector for a parabolic trough solar collector,” *Solar Energy*, vol. 179, pp. 174–185, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.071>.
- [12] Tang, X., Yang, W., Yang, Y., Jiao, Y., y Zhang, T., “A design method for optimizing the secondary reflector of a parabolic trough solar concentrator to achieve uniform heat flux

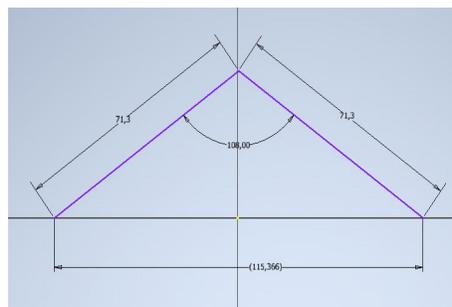
- distribution,” *Energy*, vol. 229, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120749>.
- [13] Generadoras, “Generación eléctrica en Chile,” 2021, <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>.
- [14] (BBC), R. H., “Medio ambiente: ¿cuál es el veredicto de los científicos sobre lo acordado para frenar el cambio climático?,” 2021, <https://www.bbc.com/mundo/noticias-59323791>.
- [15] Mentado-Islas, D., Elizalde-Carrizo, S., y et al, “Simulación de un concentrador solar de canal parabólico mediante el software soltrace.,” *Revista prototipos tecnológicos*, vol. 2, pp. 68–75, 2016.
- [16] Geyer, M., Lüpfert, E., Osuna, R., Esteban, A., y Schiel, W., “Eurotrough - parabolic trough collector developed for cost efficient solar power generation.,” 2002.
- [17] Canales, B., “Caracterización de geometrías de concentración solar utilizando modelos de trazado de rayos.,” Tesis pregrado, Universidad de Chile, 2022.
- [18] Uygur, S., “Detailed simulations of parabolic trough collector for investigating enhancement of heat transfer to absorber tube flow.,” Middle East Technical University, 2021.

# Anexos

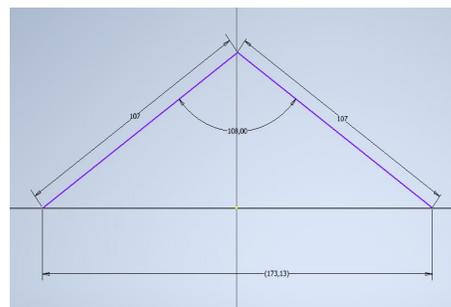
## Anexo A. Bocetos geometrías utilizadas

En este apartado se detallan las características de las geometrías utilizadas en cada experimento que variaba dichas características. Las dimensiones están en milímetros.

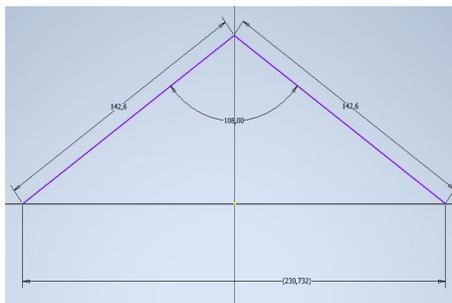
### A.1. Variación ancho de apertura reflector secundario



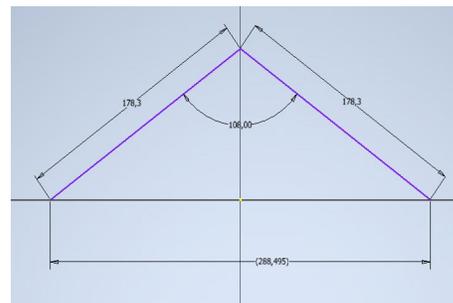
(a) Geometría 1  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 108^\circ$ .



(b) Geometría 1  $w_s = 173\text{mm}$  y  $\beta = 108^\circ$ .

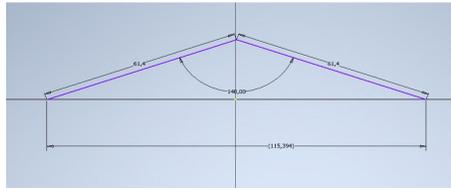


(c) Geometría 1  $w_s = 231\text{mm}$  y  $\beta = 108^\circ$ .

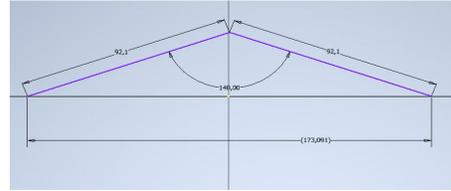


(d) Geometría 1  $w_s = 288\text{mm}$  y  $\beta = 108^\circ$ .

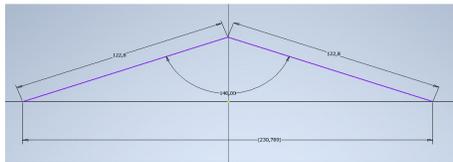
Figura A.1: Variaciones de  $w_s$  para geometría 1 con  $\beta = 108^\circ$ .



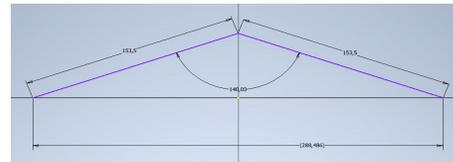
(a) Geometría 1  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .



(b) Geometría 1  $w_s = 173\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .

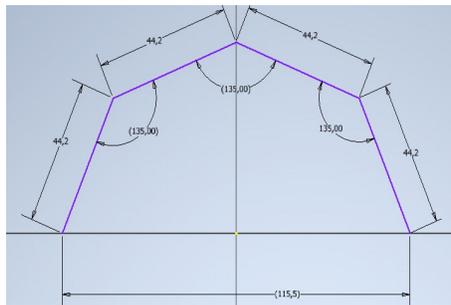


(c) Geometría 1  $w_s = 231\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .

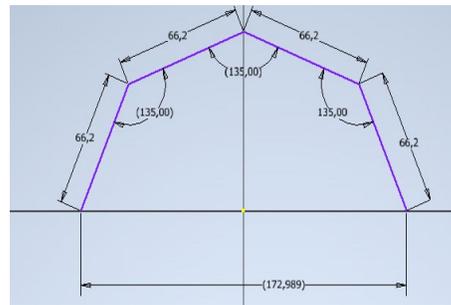


(d) Geometría 1  $w_s = 288\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .

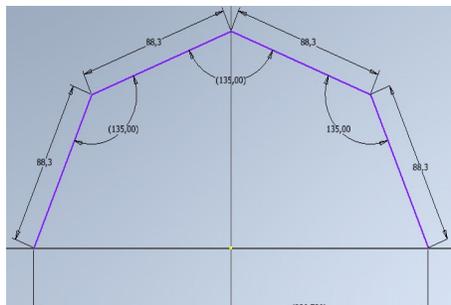
Figura A.2: Variaciones de  $w_s$  para geometría 1 con  $\beta = 140^\circ$ .



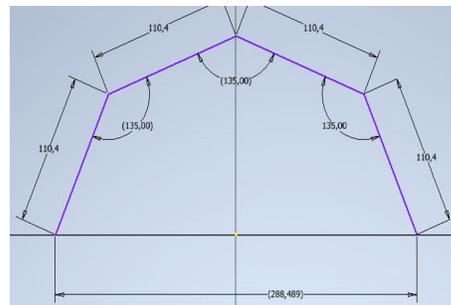
(a) Geometría 2  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 135^\circ$ .



(b) Geometría 2  $w_s = 173\text{mm}$  y  $\beta = 135^\circ$ .

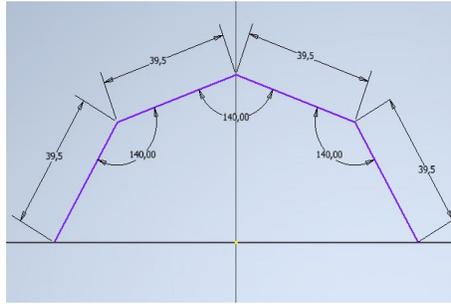


(c) Geometría 2  $w_s = 231\text{mm}$  y  $\beta = 135^\circ$ .

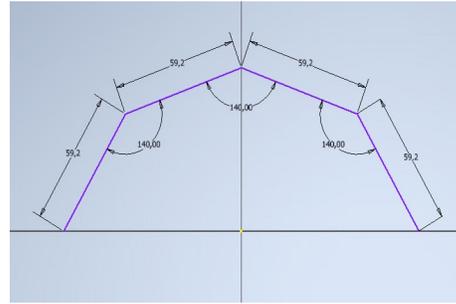


(d) Geometría 2  $w_s = 288\text{mm}$  y  $\beta = 135^\circ$ .

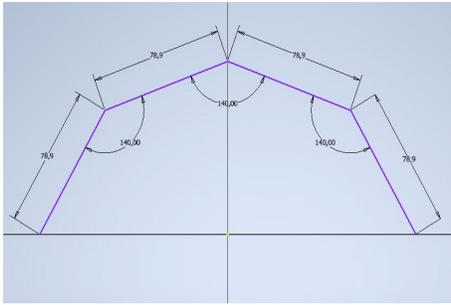
Figura A.3: Variaciones de  $w_s$  para geometría 2 con  $\beta = 135^\circ$ .



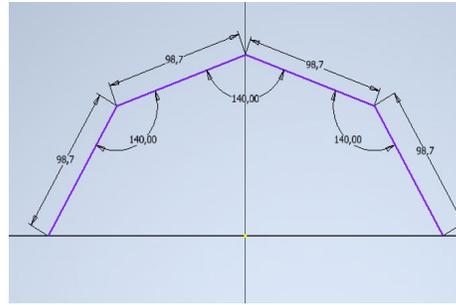
(a) Geometría 2  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .



(b) Geometría 2  $w_s = 173\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .



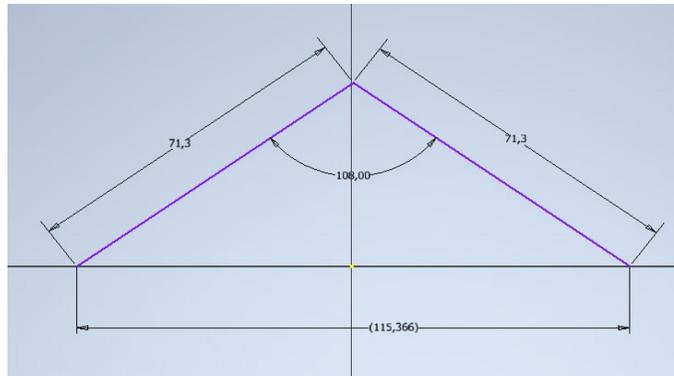
(c) Geometría 2  $w_s = 231\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .



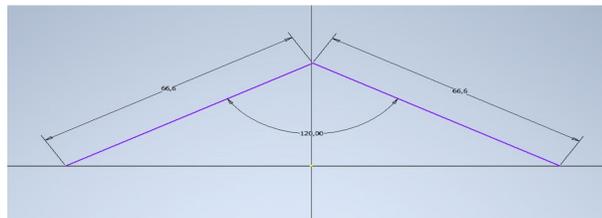
(d) Geometría 2  $w_s = 288\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .

Figura A.4: Variaciones de  $w_s$  para geometría 2 con  $\beta = 140^\circ$ .

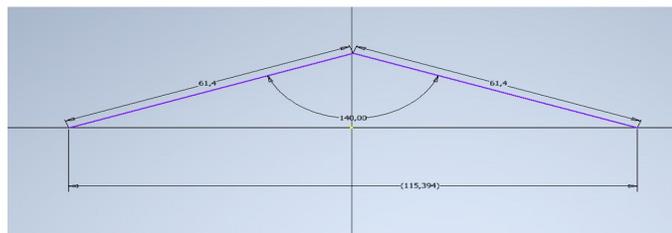
## A.2. Variación ángulo de apertura reflector secundario



(a) Geometría 1  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 108^\circ$ .

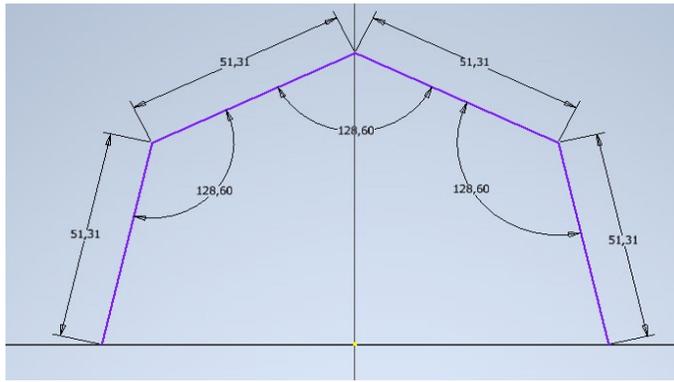


(b) Geometría 1  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 120^\circ$ .

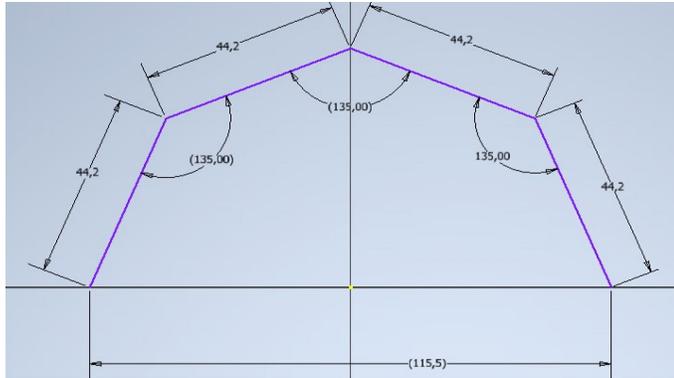


(c) Geometría 1  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .

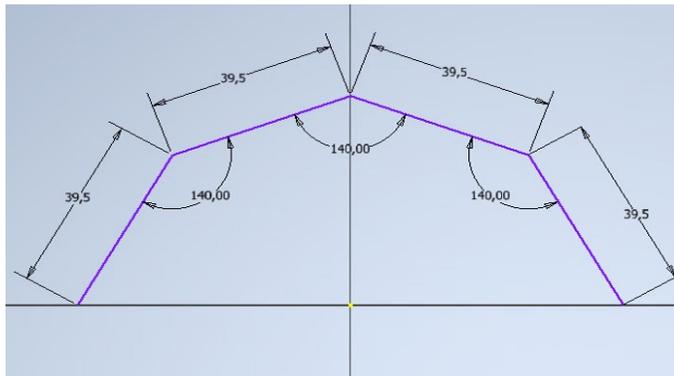
Figura A.5: Variaciones de  $\beta$  para geometría 1 con  $w_s = 11.5\text{cm}$ .



(a) Geometría 2  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 128.6^\circ$ .



(b) Geometría 2  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 135^\circ$ .



(c) Geometría 2  $w_s = 115\text{mm}$  y  $\beta = 140^\circ$ .

Figura A.6: Variaciones de  $\beta$  para geometría 2 con  $w_s = 11.5\text{cm}$ .

## Anexo B. Códigos computacionales

En este apartado se detallan los códigos utilizados para el procesamiento de los datos resultantes de las simulaciones. Primero se muestra el código de Mathematica, utilizado para leer los datos binarios y rescatar la información del flujo y sus coordenadas. Luego se muestran los códigos de Python utilizados, para graficar, y calcular las uniformidades por hemisferio del absorbedor.

```
In[*]:= SetDirectory[NotebookDirectory[]]
```

```
Out[*]= D:\Tonatiuh\bin\release\buena
```

```
In[*]:= (*Función para comprobar el lado correcto del colector*)  
side[{photonID_,x_,y_,z_,sideID_},refSide_]:=sideID==refSide
```

```
In[*]:= file=FileNames["c11082rs171ab1667vf_*.dat"]
```

```
Out[*]= {c11082rs171ab1667vf_1.dat, c11082rs171ab1667vf_2.dat,  
c11082rs171ab1667vf_3.dat, c11082rs171ab1667vf_4.dat, c11082rs171ab1667vf_5.dat,  
c11082rs171ab1667vf_6.dat, c11082rs171ab1667vf_7.dat, c11082rs171ab1667vf_8.dat}
```

```
In[*]:= numberOfFiles=Length[file]
```

```
Out[*]= 8
```

## Parámetros geométricos absorbedor

```
In[*]:= rAbsorbedor=0.035 ; (*m*)  
lAbsorbedor=12 ; (*m*)  
nElementsTHETA=300;  
nElementsYZ=1;  
dsTHETA=360 / (nElementsTHETA) ; (*grados*)  
dsArco=(2 *Pi*rAbsorbedor) / (nElementsTHETA) ; (*metros*)  
dsYZ=lAbsorbedor/nElementsYZ;  
elementAreaTHETA=dsArco*dsYZ (*m2*);
```

## Cálculo flujo energético en superficie absorbedor

```
In[*]:= totalPhotonsCounts=ConstantArray[0,{nElementsTHETA, nElementsYZ}];
```

```
In[*]:= totalNumberOfPhotons=0;  
nRayos=10000000;  
powerPerPhoton=0.00712639;
```

```
In[*]:= conversionFactor=powerPerPhoton / (elementAreaTHETA*1000) ; (*kW/m2*)
```

In[\*]:=

```

Conteo=ConstantArray[0,{nElementsTHETA}];

For[i=1,i<=numberOfFiles,++i,fileRawData=BinaryReadList[file[[i]],"Real64",ByteOrdering->+1];(*Ciclo
Print["Iteration # ",i,". Processing file: ",file[[i]]];
filePhotonSet=Partition[fileRawData[[1;;Length[fileRawData]]],5];
Clear[fileRawData];
fileValidPhoton=Select[filePhotonSet,side[#,1]&]/.{photonID_,x_,y_,z_,sideID_}>{x,y,z};(*Se obt
Clear[filePhotonSet];
fileNumberOfValidPhotons=Length[fileValidPhoton];
totalNumberOfPhotons=totalNumberOfPhotons+fileNumberOfValidPhotons;(*Conteo de fotones*)
Polares=ConstantArray[0,{Length[fileValidPhoton],2}];(*Para cada lista que contiene las coordena
For[j=0,j< Length[fileValidPhoton],++j;
coordx=fileValidPhoton[[j,1]];
coordy=fileValidPhoton[[j,2]];
radio= Sqrt[(coordx)^2+(coordy)^2];
If[coordy<=0,Theta= ArcSin[coordx/radio]*180/Pi ;,If[coordx>0,Theta=180-ArcSin[coordx/radio]*
Theta=-180-ArcSin[coordx/radio]*180/Pi ]];
Polares[[j,1]]=Theta;
Polares[[j,2]]=radio;
];
conteoAngulos=BinCounts[Polares[[All,1]],{-180,180,dsTHETA}];
Conteo=Conteo+conteoAngulos;
Clear[fileValidPhoton];
]
Angulo=Range[-180.,180.-dsTHETA,dsTHETA];
FluxDistribution=conversionFactor* Conteo;
PolarCounts=Transpose[{Angulo,FluxDistribution}];
estimatedPowerAtAbs=powerPerPhoton * totalNumberOfPhotons/1000 ;(*kW*)

```

```

Iteration # 1. Processing file: c11082rs171ab1667vf_1.dat
Iteration # 2. Processing file: c11082rs171ab1667vf_2.dat
Iteration # 3. Processing file: c11082rs171ab1667vf_3.dat
Iteration # 4. Processing file: c11082rs171ab1667vf_4.dat
Iteration # 5. Processing file: c11082rs171ab1667vf_5.dat
Iteration # 6. Processing file: c11082rs171ab1667vf_6.dat
Iteration # 7. Processing file: c11082rs171ab1667vf_7.dat
Iteration # 8. Processing file: c11082rs171ab1667vf_8.dat

```

In[\*]:=

In[ ]:=

```

(*Evaluación de uniformidad*)
(*Creación de una nueva lista, que contenga solo los valores que superan cierto umbral en el conteo*)
UmbralConteo= 4.;
PorcFlujo=0.;

For[i=0,i < Length[FluxDistribution],++i;
  If[FluxDistribution[[i]]≥UmbralConteo,
    PorcFlujo++;None
  ]]

FlujoValido=FluxDistribution;

PorcFlujo=PorcFlujo/Length[FluxDistribution]*100;

(*Superficie absorbedor*)
RadioAbsorbedor=rAbsorbedor (*m*);
LargoAbsorbedor=12. (*m*);
SuperficieAbsorbedor=2*Pi*RadioAbsorbedor*LargoAbsorbedor;

(*Valores estadísticos*)
Promedio=Mean[FlujoValido];
Desviacion=StandardDeviation[FlujoValido];
Uni=1- Desviacion/Promedio;
EficOptica=totalNumberOfPhotons/nRayos*100.;

Print["Valor de uniformidad : ", Uni]
Print["Porcentaje de superficie que recibe flujo: ", PorcFlujo, "%"]
Print["Porcentaje de rayos que llegan al absorbedor: ",EficOptica,"%"]
Print["Potencia estimada en el absorbedor : ", estimatedPowerAtAbs, "[kW]"]

(*Exportación datos variables calculadas*)
SetDirectory["D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\resultados"];
Export["variables_c1_108_2_rs171_ab1667.txt",{ "g1_108_2_171_1667",Uni, PorcFlujo, EficOptica, esti

```

Valor de uniformidad : 0.83749

Porcentaje de superficie que recibe flujo: 100.0%

Porcentaje de rayos que llegan al absorbedor: 79.5744%

Potencia estimada en el absorbedor : 56.7078[kW]

In[ ]:=

```

(*Exportacion de datos flujo absorbedor*)
SetDirectory["D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\resultados"];
Export["caso1_108°_ws2wp_rs171_ab1667vf.txt",PolarCounts,"Table"];

```

In [1]:

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plot
import csv
from os import listdir
from os.path import isfile, join
import scipy as scipy
from scipy.signal import savgol_filter
```

In [3]:

```
#buscamos los archivos deseados
mypath="D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\flujos\\c1"
files= [f for f in listdir(mypath) if isfile(join(mypath, f))]
```

In [4]:

```
#calculamos la uniformidad superior
U=[]
for nombre in files:
    data=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\flujos\\c1\\"+nombre, sep=';')
    der=data[data['Columna1'] >= 90]
    tramo1=der[der['Columna1']<=180]
    tramo=tramo1.drop(['Columna1'],axis=1)
    min_values=tramo.min()
    maxvalues=tramo.max()
    NU=1-tramo.std()/tramo.mean()
    print('-----')
    print('Archivo:'+nombre)
    print('uniformidad sup:'+str(NU))
    U.append((NU,nombre))
```

```
-----
Archivo:caso1_108°.csv
uniformidad sup:2%    0.794501
3%    0.631086
4%    0.537584
5%    0.475724
dtype: float64
-----
```

```
Archivo:caso1_120°.csv
uniformidad sup:2%    0.768436
3%    0.593872
4%    0.500224
5%    0.445831
dtype: float64
-----
```

```
Archivo:caso1_140°.csv
uniformidad sup:2%    0.644787
3%    0.520651
4%    0.424495
5%    0.362215
dtype: float64
```

In [5]:

```
#calculamos la uniformidad inferior
U=[]
for nombre in files:
    data=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\flujos\\c1\\"+nombre, sep=';')
    der=data[data['Columna1'] >= 0]
    tramo1=der[der['Columna1']<=89.99999]
    tramo=tramo1.drop(['Columna1'],axis=1)
    min_values=tramo.min()
    maxvalues=tramo.max()
    NU=1-tramo.std()/tramo.mean()
    print('-----')
    print('Archivo:'+nombre)
    print('uniformidad inf:'+str(NU))
    U.append((NU,nombre))
```

```
-----
Archivo:caso1_108°.csv
uniformidad inf:2%    0.911098
3%    0.878286
4%    0.838194
5%    0.798798
dtype: float64
```

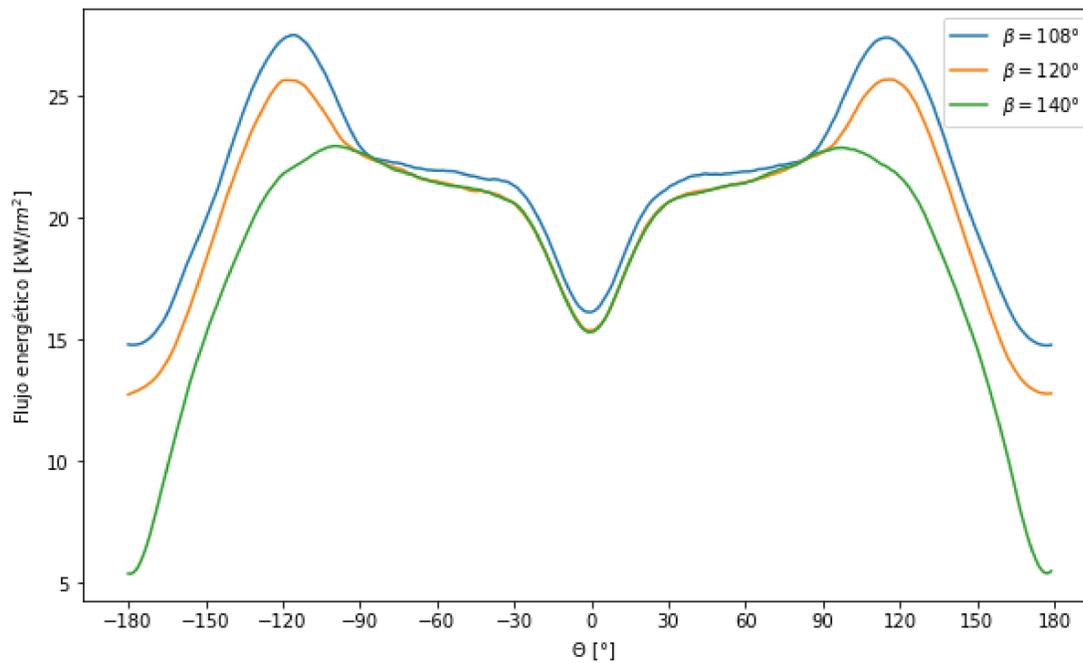
```
-----
Archivo:caso1_120°.csv
uniformidad inf:2%    0.899427
3%    0.868115
4%    0.833011
5%    0.787306
dtype: float64
```

```
-----
Archivo:caso1_140°.csv
uniformidad inf:2%    0.898810
3%    0.857535
4%    0.814519
5%    0.772293
dtype: float64
```

In [13]:

```
#graficamos la variación de beta para ws fijo
```

```
for nombre in files:
    data=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\flujos\\c1\\"+nombre, sep=';')
    Y=savgol_filter(data['2%'],19,3)
    nombre1=nombre.replace(".csv","")
    nombre2=nombre1.replace("caso1_",r"$\beta=$")
    plot.rcParams["figure.figsize"]=(10,6)
    plot.plot(data['Columna1'],Y, label=nombre2)
    plot.xticks(range(-180, 181, 30))
    plot.xlabel(' $\Theta$ [°]')
    plot.ylabel('Flujo energético [kW/rm^2]')
    plot.legend()
```



In [1]:

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plot
import csv
from os import listdir
from os.path import isfile, join
import scipy as scipy
from scipy.signal import savgol_filter
```

In [2]:

```
#Variación posición reflector secundario

#definimos la direccion de los archivos
mypath="D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\rs"
files= [f for f in listdir(mypath) if isfile(join(mypath, f))]
```

In [3]:

```
# calculamos la uniformidad superior

U=[]
for nombre in files:
    data=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\rs\\"+nombre, sep=';')
    der=data[data['Columna1'] >= 90]
    tramo1=der[der['Columna1']<=180]
    tramo=tramo1.drop(['Columna1'],axis=1)
    min_values=tramo.min()
    maxvalues=tramo.max()
    NU=1-tramo.std()/tramo.mean()

    print('-----')
    print('Archivo:'+nombre)
    print('uniformidad superior:'+str(NU))

    U.append((NU,nombre))
```

```
-----
Archivo:variacionposicionrscaso11082.csv
uniformidad superior:1.695    0.911561
1.71    0.794501
1.725    0.638939
dtype: float64
-----
Archivo:variacionrsc21402.csv
uniformidad superior:1.695    0.734788
1.71    0.871053
1.725    0.851174
dtype: float64
```

In [4]:

```
# calculamos la uniformidad inferior

U=[]
for nombre in files:
    data=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\rs\\"+nombre, sep=';')
    der=data[data['Columna1'] >= 0]
    tramo1=der[der['Columna1']<=89.99999]
    tramo=tramo1.drop(['Columna1'],axis=1)
    min_values=tramo.min()
    maxvalues=tramo.max()
    NU=1-tramo.std()/tramo.mean()

    print('-----')
    print('Archivo:'+nombre)
    print('uniformidad inferior:'+str(NU))

    U.append((NU,nombre))
```

```
-----
Archivo:variacionposicionrscaso11082.csv
uniformidad inferior:1.695    0.897209
1.71    0.911202
1.725    0.916115
dtype: float64
-----
Archivo:variacionrsc21402.csv
uniformidad inferior:1.695    0.901280
1.71    0.899232
1.725    0.897898
dtype: float64
```

In [5]:

```
# graficamos el flujo para cada
# variacion posicion reflector secundario g1
caso1=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\rs\\variacionposicionrscaso11082.csv")

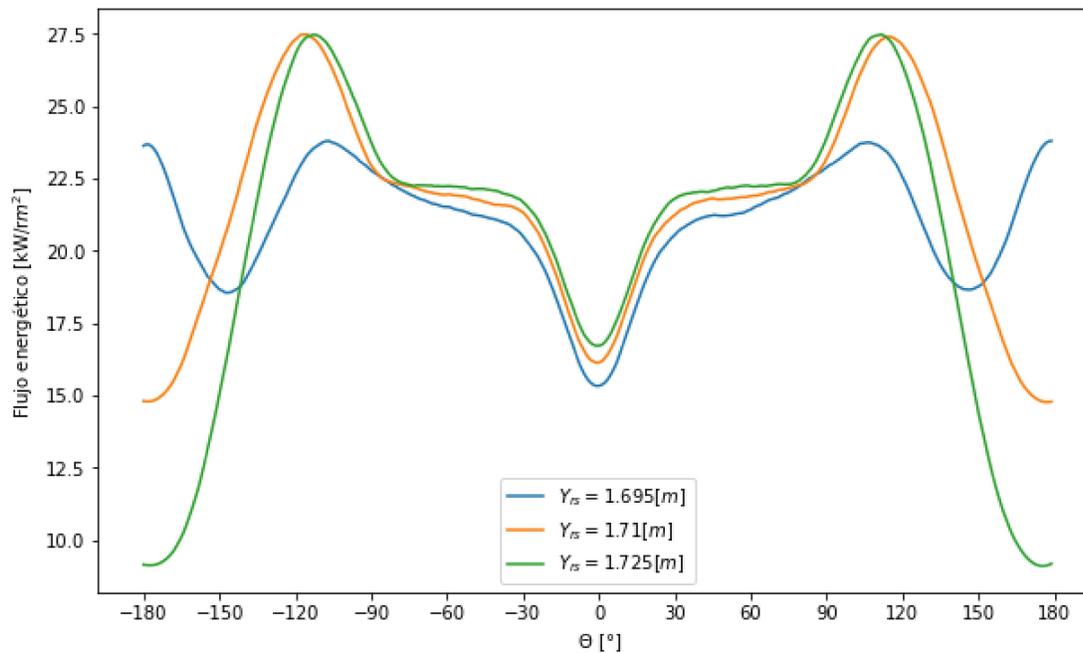
X=caso1['Columna1']
flujos=caso1.drop(['Columna1'], axis=1)

# suavizamos las curvas
def myfilter(x):
    return savgol_filter(x,21,3)
curvas=flujos.apply(myfilter,axis=0,args=())

plot.rcParams["figure.figsize"]=(10,6)
plot.plot(X,curvas['1.695'], label='$Y_{rs}=1.695[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.71'], label='$Y_{rs}=1.71[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.725'], label='$Y_{rs}=1.725[m]$')
plot.xlabel(' $\Theta$ [°]')
plot.xticks(range(-180, 181, 30))
plot.ylabel('Flujo energético [kW/rm^2]')
plot.legend()
```

Out[5]:

<matplotlib.legend.Legend at 0x266bdad2550>



In [6]:

```
# graficamos el flujo para cada
#variación posición reflector secundario g2
caso2=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\rs\\variacionrsc21402.csv", sep=';')

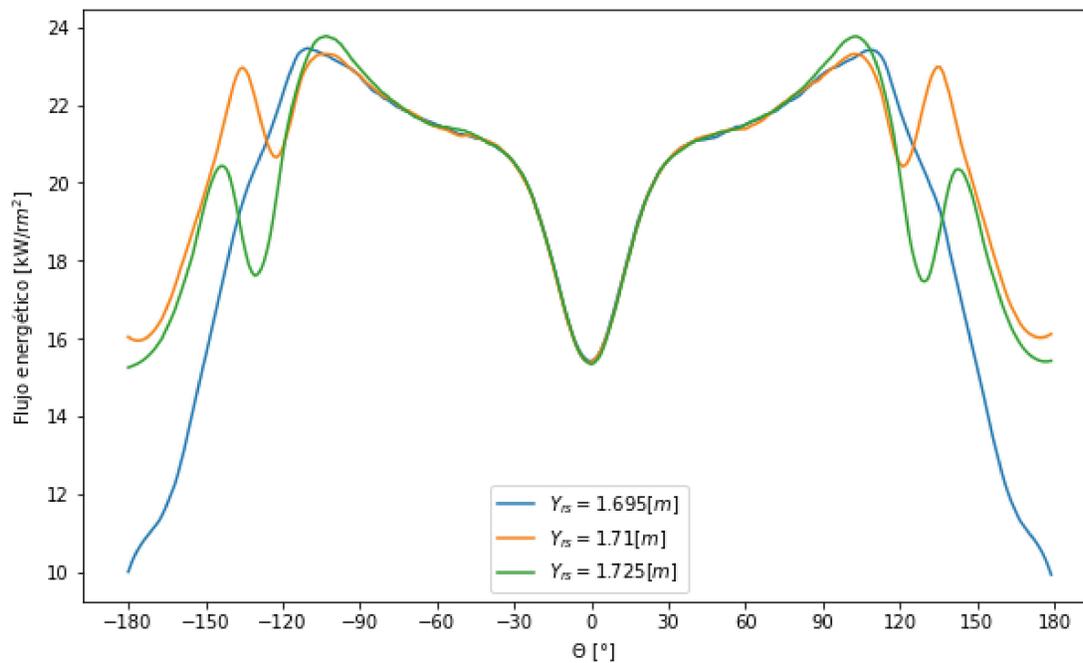
X=caso2['Columna1']
flujos=caso2.drop(['Columna1'], axis=1)

def myfilter(x):
    return savgol_filter(x,21,3)
curvas=flujos.apply(myfilter,axis=0,args=())

plot.rcParams["figure.figsize"]=(10,6)
plot.plot(X,curvas['1.695'], label='$Y_{rs}=1.695[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.71'], label='$Y_{rs}=1.71[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.725'], label='$Y_{rs}=1.725[m]$')
plot.xlabel(' $\Theta$ [°]')
plot.xticks(range(-180, 181, 30))
plot.ylabel('Flujo energético [kW/rm^2]')
plot.legend()
```

Out[6]:

<matplotlib.legend.Legend at 0x266bdd25ee0>



In [7]:

```
#Variación posición absorbedor

#definimos la direccion de Los archivos
mypath="D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\abs"
files= [f for f in listdir(mypath) if isfile(join(mypath, f))]
```

In [8]:

```
# calculamos la uniformidad superior

U=[]
for nombre in files:
    data=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\abs\\"+nombre, sep=';')
    der=data[data['Columna1'] >= 90]
    tramo1=der[der['Columna1']<=180]
    tramo=tramo1.drop(['Columna1'],axis=1)
    min_values=tramo.min()
    maxvalues=tramo.max()
    NU=1-tramo.std()/tramo.mean()

    print('-----')
    print('Archivo:'+nombre)
    print('uniformidad superior:'+str(NU))

    U.append((NU,nombre))
```

```
-----
Archivo:variacionyabsc11082.csv
uniformidad superior:1.652    0.801124
1.661    0.942738
1.667    0.794501
1.674    0.596597
dtype: float64
```

```
-----
Archivo:variacionyabsc21402.csv
uniformidad superior:1.652    0.658395
1.661    0.926812
1.667    0.871053
1.674    0.645487
dtype: float64
```

In [9]:

```
# calculamos la uniformidad inferior

U=[]
for nombre in files:
    data=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\abs\\"+nombre, sep=';')
    der=data[data['Columna1'] >= 90]
    tramo1=der[der['Columna1']<=180]
    tramo=tramo1.drop(['Columna1'],axis=1)
    min_values=tramo.min()
    maxvalues=tramo.max()
    NU=1-tramo.std()/tramo.mean()

    print('-----')
    print('Archivo:'+nombre)
    print('uniformidad inferior:'+str(NU))

    U.append((NU,nombre))
```

```
-----
Archivo:variacionyabsc11082.csv
uniformidad inferior:1.652    0.801124
1.661    0.942738
1.667    0.794501
1.674    0.596597
dtype: float64
```

```
-----
Archivo:variacionyabsc21402.csv
uniformidad inferior:1.652    0.658395
1.661    0.926812
1.667    0.871053
1.674    0.645487
dtype: float64
```

In [10]:

```
# graficamos el flujo para cada
# variacion posicion absorbedor g1
caso1=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\abs\\variacionyabsc11082.csv", sep=';')

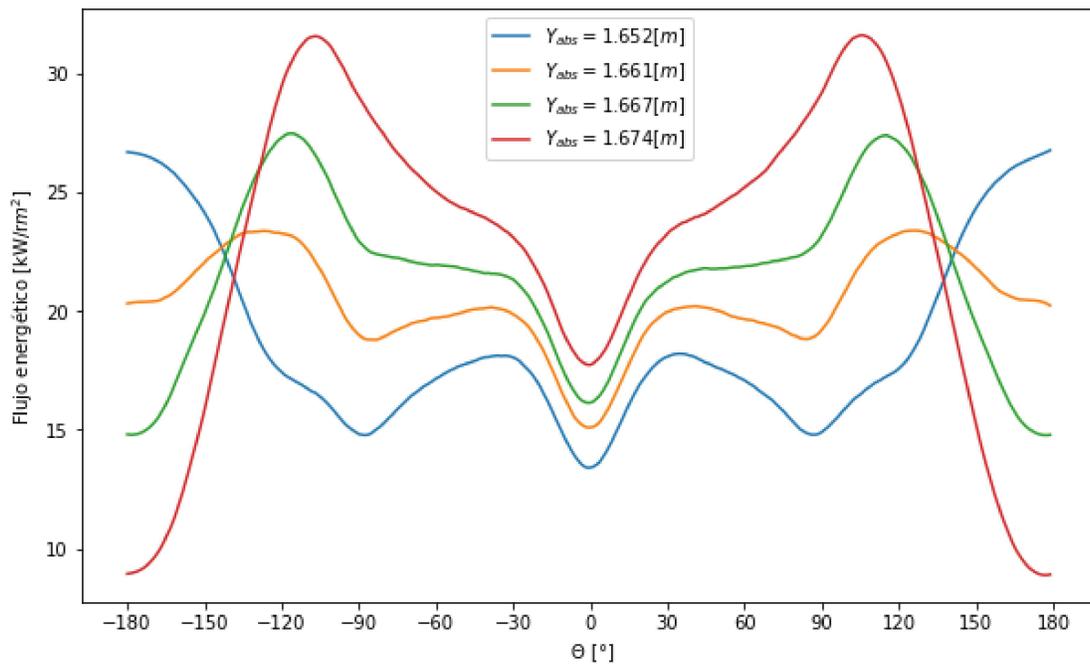
X=caso1['Columna1']
flujos=caso1.drop(['Columna1'], axis=1)

# suavizamos las curvas
def myfilter(x):
    return savgol_filter(x,21,3)
curvas=flujos.apply(myfilter,axis=0,args=())

plot.rcParams["figure.figsize"]=(10,6)
plot.plot(X,curvas['1.652'], label='$Y_{abs}=1.652[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.661'], label='$Y_{abs}=1.661[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.667'], label='$Y_{abs}=1.667[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.674'], label='$Y_{abs}=1.674[m]$')
plot.xlabel(' $\Theta$ [°]')
plot.xticks(range(-180, 181, 30))
plot.ylabel('Flujo energético [kW/rm^2]')
plot.legend()
```

Out[10]:

<matplotlib.legend.Legend at 0x266bef7e0a0>



In [11]:

```
# graficamos el flujo para cada
# variacion posicion absorbedor g2
caso1=pd.read_csv("D:\\Tonatiuh\\bin\\release\\buena\\abs\\variacionyabsc21402.csv", sep=';')

X=caso1['Columna1']
flujos=caso1.drop(['Columna1'], axis=1)

# suavizamos las curvas
def myfilter(x):
    return savgol_filter(x,21,3)
curvas=flujos.apply(myfilter,axis=0,args=())

plot.rcParams["figure.figsize"]=(10,6)
plot.plot(X,curvas['1.652'], label='$Y_{abs}=1.652[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.661'], label='$Y_{abs}=1.661[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.667'], label='$Y_{abs}=1.667[m]$')
plot.plot(X,curvas['1.674'], label='$Y_{abs}=1.674[m]$')
plot.xlabel(' $\Theta$ [°]')
plot.xticks(range(-180, 181, 30))
plot.ylabel('Flujo energético [kW/rm^2]')
plot.legend()
```

Out[11]:

<matplotlib.legend.Legend at 0x266bdd0d5e0>

