



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

**CARACTERIZACIÓN DE GEOMETRÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR  
UTILIZANDO MODELOS DE TRAZADO DE RAYOS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

**BENJAMIN IGNACIO CANALES RAMIREZ**

PROFESOR GUÍA:  
MÓNICA ZAMORA ZAPATA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: **BENJAMIN IGNACIO CANALES RAMIREZ**  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: MÓNICA ZAMORA ZAPATA

## **CARACTERIZACIÓN DE GEOMETRÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR UTILIZANDO MODELOS DE TRAZADO DE RAYOS.**

Con la motivación de aportar al conocimiento que existe sobre las energías renovables, en especial la energía solar, en el presente trabajo se planteó estudiar, analizar y caracterizar el comportamiento óptico de un colector solar de tipo cilindro parabólico, específicamente analizando la distribución del flujo energético presente en el receptor frente a la variación de parámetros geométricos y ópticos del colector solar.

Los parámetros a variar fueron la distancia focal, el tamaño y forma del receptor de diferentes perfiles (circular, hexagonal y elíptico) y el ángulo cenital. Los indicadores estadísticos a medir fueron: la no uniformidad del flujo en el receptor, su desviación estándar, el porcentaje de superficie del receptor que recibe flujo, la eficiencia óptica del colector y la potencia estimada en el receptor.

La metodología de trabajo se dividió en 3 partes principales: generación de geometrías en el software *Autocad Inventor*, simulación de trazado de rayos para las diferentes geometrías en el software *Tonatiuh* y su posterior procesamiento y cálculo de indicadores y ajustes de curvas en el software *Mathematica*. Se obtuvieron las curvas deseadas que permiten obtener los indicadores estadísticos del perfil del flujo energético en el receptor frente a la variación de los parámetros geométricos del colector solar anteriormente descritos.

Dentro de los principales resultados obtenidos se encuentra que el punto de máxima eficiencia óptica corresponde a una distancia focal de  $f = 147cm$ , que difiere con el tamaño estándar del colector estandarizado EuroTrough. En la variación del radio del receptor circular se obtuvo que al disminuir su valor aumenta la concentración del flujo energético, el porcentaje superficie con flujo y la desviación estándar. Este experimento también arrojó un máximo de eficiencia óptica para una distancia focal para  $f \sim 140cm$ . En el perfil hexagonal se obtuvo un comportamiento muy similar al perfil circular (salvo para  $a = 10mm$ ) en los indicadores de desviación estándar, eficiencia óptica y porcentaje de superficie con flujo. El comportamiento del perfil elíptico depende de su orientación, obteniéndose un 19% más de porcentaje de superficie con flujo para el semieje mayor=10mm en relación al semieje menor=10mm, sin embargo, dicho valor (76%) no supera al máximo porcentaje de superficie con flujo del perfil circular (81%). Por último en relación a la variación del ángulo cenital se obtuvo que su aumento, está asociado con una menor desviación estándar del flujo, menor eficiencia óptica y una mayor pérdida de potencia por la pérdida o efecto del coseno y por la porción del receptor que no recibe flujo.

*“Cuando el último árbol sea cortado,  
el último río envenenado,  
el último pez pescado,  
solo entonces el hombre descubrirá  
que el dinero no se come”*  
***Proverbio de los Indios Cree***

# Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia por permitirme llegar a este punto, que muchas veces se vió lejano y difícil. A mi mamá, por su amor, apoyo, confianza y entrega, que me ha dado fuerza para seguir adelante. A mi hermana Andrea por su esfuerzo incomparable y entrega a la familia que me permitió no tener tantas preocupaciones y poder enfocarme en el estudio, por su amor, confianza y motivación. A mi Hermana Sol por su gran amor, sabiduría y valentía que tanto admiro y por su apoyo a pesar de la distancia. A mi hermano Jorge por su buena onda, amor y apoyo incondicional en todo momento. A mi sobrina Vale, por su cariño, confianza y apoyo. A mis otros sobrinos (Anto, Julián, Dianita y Elena) que me hacen reír, rabiar y que amo con todo mi corazón.

También quiero agradecer a la Frani, que me acompañó en este largo camino, por su confianza, amor y buenos momentos vividos. A mis amigos Norcillo y Aguado, por apañar a tirar la talla, sacar la vuelta, expresar nuestra disconformidad de con la u y estudiar(a veces), haciendo de mecánica un lugar más agradable y poder compartir fuera la U. A la Andrea y Sofi por su cariño y buena onda.

Agradezco también al Carlos, que me apaño en cada oportunidad que se pudo a pedalear, viajar y compartir, sin duda me ayudó demasiado a sobrellevar la u. Al Cañas, por ser tan motivado y apañador. A los demás cabros, que los vi poquito, pero se pasó bien cuando se pudo.

A toda mi familia en general, ti@s, abuel@s y prim@s, muchas gracias, siempre me dieron su apoyo y confianza. A mis amigos de sección que sin duda fueron una parte importante en mi ~~gran~~ pasada por la u y a toda le gente bella y buena onda que conocí en la facultad.

A mi profe guía, Mónica Z., por su gran apoyo, conocimiento, disponibilidad y entrega, que me permitieron avanzar en la tesis. Gracias también al profe Ramón F. por su apoyo.

Como último, pero no menos importante, quiero agradecer a mi psicóloga que me permitió salir adelante ante momentos difíciles y ayudarme a lograr organizarme de mejor manera para poder realizar la tesis.

*¡Gracias totales!*



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes Generales . . . . .	2
1.1.1. Energía de concentración solar . . . . .	2
1.1.1.1. Tecnologías de concentración sin formación imagen . . . . .	4
1.1.1.2. Tecnología de concentración con formación de imagen . . . . .	5
1.1.1.3. Tecnologías CSP más utilizadas . . . . .	6
1.1.2. Geometría de un colector cilindro parabólico y daño en el colector solar	10
1.2. Motivación, Objetivos y alcances . . . . .	11
1.2.1. Motivación . . . . .	11
1.2.2. Objetivo general . . . . .	11
1.2.3. Objetivos específicos . . . . .	11
1.2.4. Alcances . . . . .	11
<b>2. Antecedentes específicos</b>	<b>12</b>
2.1. Definición de términos importantes . . . . .	12
2.2. Colector Solar Euro Trough . . . . .	13
2.3. Sistema coordenadas solares y pérdida del coseno . . . . .	14
2.4. Distribución del flujo energético en el receptor . . . . .	15
2.5. Parámetros invariables . . . . .	16
2.6. Variables independientes y dependientes de los experimentos . . . . .	18
2.6.1. Variables Independientes . . . . .	18
2.6.2. Variables dependientes . . . . .	20
<b>3. Metodología</b>	<b>22</b>
3.1. Generación de geometría . . . . .	23
3.2. Simulación de trazado de rayos . . . . .	24
3.3. Procesamiento de resultados . . . . .	27
<b>4. Experimentos y resultados</b>	<b>31</b>
4.1. Variación de la distancia focal . . . . .	31
4.2. Variación de distancia focal en diferentes radios . . . . .	34
4.3. Variación del radio . . . . .	37
4.4. Variación del ángulo cenital . . . . .	41
4.5. Geometría Hexagonal . . . . .	45
4.6. Geometría Elíptica . . . . .	48
4.7. Curvas de ajuste paramétrico de resultados . . . . .	50
<b>5. Discusión y conclusiones</b>	<b>53</b>

5.1. Discusión de resultados . . . . .	53
5.2. Conclusiones . . . . .	54
<b>Bibliografía</b>	<b>56</b>
<b>Anexos</b>	<b>58</b>
<b>Anexo A. Resultados y ajustes paramétricos</b>	<b>58</b>
A.1. Variación distancia focal . . . . .	58
A.2. Variación distancia focal diferentes en radios . . . . .	61
A.2.1. Flujos energéticos en el receptor . . . . .	61
A.2.2. Gráficos de variables estadísticas del flujo . . . . .	62
A.3. Variación de Radio en diferentes distancia focales . . . . .	65
A.3.1. Flujos energéticos en el receptor . . . . .	65
A.3.2. Gráficos de variables estadísticas del flujo . . . . .	66
A.4. Geometría hexagonal . . . . .	69
A.4.1. Flujo energético en el receptor . . . . .	69
A.4.2. Gráficos de variables estadísticas del flujo . . . . .	69
A.5. Geometría Elíptica . . . . .	73
A.5.1. Flujo energético en el receptor . . . . .	73
A.5.2. Gráficos de variables estadísticas del flujo . . . . .	73
A.6. Variación del ángulo cenital . . . . .	76
<b>Anexo B. Código Mathematica</b>	<b>79</b>

# Índice de Tablas

1.1.	Componentes principales de una planta CSP y sus sub-componentes. . . . .	6
1.2.	Comparación de las 4 principales tecnologías de concentración solar. Info obtenida de:[13],[15],[8] . . . . .	9
2.1.	Parámetros característicos de ET100 y ET150 [16] . . . . .	14
2.2.	Parámetros fijos en la realización de los experimentos . . . . .	17
4.1.	Cálculo de pérdida de potencia por coseno y por ausencia de rayos solares frente a la variación de $\Theta_z$ . . . . .	44
A.1.	Coefficientes de curvas de ajuste para evaluar la variación de la distancia focal en diferentes radios. . . . .	64
A.2.	Coefficientes de curvas de ajuste para evaluar la variación de la distancia focal en diferentes radios. . . . .	68
A.3.	Coefficientes de curvas de ajuste para evaluar la variación del parámetro $a$ en la geometría hexagonal. . . . .	72
A.4.	Coefficientes de curvas de ajuste para evaluar la variación del parámetro $s$ en la geometría elíptica. . . . .	75

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Mapa de irradiación directa normal. . . . .	3
1.2.	Colector de imagen y colector de no imagen[4]. . . . .	4
1.3.	Esquema (a) y simulación (b) de un colector compuesto[3]. . . . .	4
1.4.	Componentes principales de una planta CSP[5]. . . . .	5
1.5.	Disco solar parabólico[6]. . . . .	6
1.6.	Planta termosolar SPT Cerro dominador[9]. . . . .	7
1.7.	Planta con tecnología Fresnel[7]. . . . .	8
1.8.	Planta CSP con sistema de PTC[10]. . . . .	9
1.9.	Forma el espejo y ubicación del cilindro receptor . . . . .	10
1.10.	Gradiente térmico presente en el tubo receptor [12]. . . . .	10
2.1.	Medidas generales del colector PTC.[14] . . . . .	12
2.2.	Prototipo extendido del colector <i>EUROTROUGH 150</i> en operación en la plataforma solar de Almería[16]. . . . .	13
2.3.	Sistema de Coordenadas y variables utilizadas para determinar la posición y trayectoria del sol[18]. . . . .	14
2.4.	Efecto del coseno entre la superficie del colector y la irradiación incidente [13].	15
2.5.	Coordenadas angulares en receptor cilíndrico. . . . .	15
2.6.	Trazado de rayos colector cilindro parabólico. . . . .	16
2.7.	Perfil del flujo energético en el receptor. . . . .	16
2.8.	Variación de la distancia focal. . . . .	18
2.9.	Variación del radio del receptor. . . . .	18
2.10.	Variación del ángulo cenital. . . . .	19
2.11.	Caracterización del perfil elíptico del receptor. . . . .	19
2.12.	Perfil hexagonal en su orientación horizontal y vertical respectivamente. . . . .	20
3.1.	Metodología general de trabajo. . . . .	22
3.2.	Pasos realizados en el software <i>Autodesk Inventor</i> . . . . .	24
3.3.	Parámetros ópticos escogidos para los materiales del Reflector y receptor . . . . .	25
3.4.	width=10 . . . . .	26
3.5.	Interfaz y trazado de rayos en software <i>Tonatiuh</i> . . . . .	27
3.6.	Esquema de funcionamiento de archivo elemental en <i>Mathematica</i> . . . . .	28
3.7.	Esquema de funcionamiento del "archivo tipo" 2 <i>Mathematica</i> . . . . .	29
3.8.	Esquema de funcionamiento del "archivo tipo" 3 <i>Mathematica</i> . . . . .	29
3.9.	Variación número de segmentos de división del rango angular. . . . .	30
4.1.	Forma de la parábola y posición del receptor para valores $f = 0,5[m]$ y $f = 2[m]$ respectivamente. . . . .	31
4.2.	Flujo energético presente en el receptor para diferentes valores de distancia focal.	32
4.3.	Valor del parámetro No Uniformidad( <i>N.U.</i> ) vs la distancia focal $f$ . . . . .	32

4.4.	Desviación estándar del flujo energético en el receptor ( $D.E.$ ) vs la distancia focal $f$ . . . . .	33
4.5.	Porcentaje de superficie con flujo $S.F.$ vs la distancia focal $f$ . . . . .	33
4.6.	Eficiencia óptica ( $E.Op$ ) vs la distancia focal $f$ . . . . .	34
4.7.	Variación de distancia focal para diferentes valores de $r$ . Figura superior $r = 10[mm]$ , Figura inferior $r = 50[mm]$ . Lado izquierdo $f = 50cm$ y lado derecho $f = 200cm$ . . . . .	34
4.8.	Flujo energético en el receptor para distintos valores de $f$ evaluados en valores de $r = 10mm$ (izquierda) y $r = 50mm$ (derecha). . . . .	35
4.9.	No uniformidad vs distancia focal para distintos valores de $r$ . . . . .	35
4.10.	Desviación estándar vs distancia focal para distintos valores de $r$ . . . . .	36
4.11.	Porcentaje de superficie con flujo vs distancia focal para distintos valores de $r$ . . . . .	36
4.12.	Eficiencia óptica vs distancia focal para distintos valores de $r$ . . . . .	37
4.13.	Variación de radio para distintos valores de $f$ Arriba $f = 50cm$ y abajo $f = 200cm$ . Izquierda $r = 10mm$ y derecha $r = 50mm$ . . . . .	37
4.14.	Flujo energético para diferentes valores de $r$ . A la izquierda $f = 50cm$ y a la derecha $f = 200cm$ . . . . .	38
4.15.	No uniformidad vs radio del receptor para diferentes valores de $f$ . . . . .	38
4.16.	Desviación estándar vs radio del receptor para diferentes valores de $f$ . . . . .	39
4.17.	Porcentaje de superficie con flujo vs radio del receptor para diferentes valores de $f$ . . . . .	39
4.18.	Eficiencia Óptica vs radio del receptor para diferentes valores de $f$ . . . . .	40
4.19.	Variación del ángulo Cenital. Arriba $\Theta_z = 0^\circ$ y abajo $\Theta_z = 45^\circ$ . . . . .	41
4.20.	Flujo energético en el receptor para diferentes valores del ángulo cenital. . . . .	41
4.21.	Desviación estándar vs ángulo cenital. . . . .	42
4.22.	Porcentaje de superficie con flujo vs ángulo cenital. . . . .	42
4.23.	Eficiencia óptica vs ángulo cenital. . . . .	43
4.24.	Perdida de potencia vs ángulo cenital. . . . .	43
4.25.	Perdida de potencia en el receptor por ausencia de rayos solares (extremo negro). . . . .	44
4.26.	Perfil hexagonal en su orientación horizontal y vertical respectivamente. . . . .	45
4.27.	Perfiles del flujo energético para la geometría hexagonal en orientación horizontal(izquierda) y vertical(derecha). . . . .	45
4.28.	N.U. vs parámetro $a$ para geometría hexagonal y circular. . . . .	46
4.29.	Desviación estándar vs parámetro $a$ para geometría hexagonal y circular. . . . .	46
4.30.	Porcentaje de superficie con flujo vs parámetro $a$ para geometría hexagonal y circular. . . . .	47
4.31.	Eficiencia Óptica vs parámetro $a$ para geometría hexagonal y circular . . . . .	47
4.32.	Perfil elíptico y su parámetros $a$ y $b$ respectivamente. . . . .	48
4.33.	Perfil del flujo energético en receptor para las variaciones de $a$ y $b$ . . . . .	48
4.34.	Desviación estándar vs semieje. . . . .	49
4.35.	Porcentaje de superficie con flujo vs semieje. . . . .	49
4.36.	Porcentaje de superficie con flujo vs semieje. . . . .	50
4.37.	Ajuste para resultados obtenidos en N.U. vs distancia focal. . . . .	51
4.38.	Ajuste para resultados obtenidos en N.U. vs distancia focal. . . . .	51
4.39.	Ajuste para resultados obtenidos en E.Op. vs distancia focal. . . . .	52
A.1.	Resultados experimento variación de la distancia focal [1/3] . . . . .	58
A.2.	Resultados experimento variación de la distancia focal [2/3] . . . . .	59

A.3.	Resultados experimento variación de la distancia focal [3/3] . . . . .	60
A.4.	Resultados experimento variación de la distancia focal en diferentes radios [1/2]	61
A.5.	Resultados experimento variación de la distancia focal en diferentes radios [1/2]	62
A.6.	Resultados experimento variación de la distancia focal en diferentes radios[2/2]	63
A.7.	Resultados experimento variación del radio en diferentes distancias focales. . .	65
A.8.	Resultados experimento variación del radio para diferentes distancias focales [1/2].	66
A.9.	Resultados experimento variación del radio para diferentes distancias focales[2/2].	67
A.10.	Flujo energético en el receptor hexagonal para su orientación horizontal y vertical.	69
A.11.	Resultados experimento de variación de la geometría hexagonal. [1/3] . . . . .	69
A.12.	Resultados experimento de variación de la geometría hexagonal. [2/3] . . . . .	70
A.13.	Resultados experimento de variación de la geometría hexagonal. [3/3] . . . . .	71
A.14.	Flujos energéticos en el receptor elíptico en variación del semieje mayor y semieje menor . . . . .	73
A.15.	Resultados experimento de variación de la geometría elíptica. [1/2] . . . . .	73
A.16.	Resultados experimento de variación de la geometría elíptica. [2/2] . . . . .	74
A.17.	Resultados experimento Variación del ángulo cenital [1/2]. . . . .	76
A.18.	Resultados experimento Variación del ángulo cenital [2/2]. . . . .	77

# Capítulo 1

## Introducción

Miles de millones de toneladas de  $CO_2$  son liberadas a la atmósfera cada año producto de la utilización de carbón, petróleo y gas natural como principales fuentes de energía para satisfacer la demanda energética global, la cual se incrementa con el paso de los años producto del crecimiento poblacional, industrialización y urbanización. La actividad humana está produciendo gases de efecto invernaderos a un nuevo record, contribuyendo activamente al cambio climático<sup>1</sup>. Las energías renovables, con casi cero emisiones de GHG (gases de efecto invernadero) y contaminantes, son la mejor alternativa para combatir el cambio climático y satisfacer la demanda energética a nivel global.

Comúnmente las energías renovables utilizan de forma directa la energía del sol o bien de forma indirecta el impacto que esta energía tiene en la tierra (caídas de agua, viento, biomasa, energía mareomotriz, entre otras).

La energía proveniente del sol está ampliamente disponible alrededor de la tierra y es un recurso que estará presente por miles de millones de años más. La principal forma de utilizar la energía solar es mediante tecnología solar fotovoltaica, la cual para el año 2020 contribuyó con el 99,1 % (709.674 MW) de la capacidad instalada de energía solar a nivel global, mientras que la tecnología solar térmica contribuyó con el 0,9 % (6.479 MW)[1]. Pese a la gran diferencia de la capacidad instalada entre energía solar fotovoltaica y energía solar térmica, esta última, en particular la tecnología de concentración solar de potencia (CSP), ofrece la posibilidad de generar energía térmica directamente y almacenar energía sin la utilización de baterías, haciendo posible la producción de energía eléctrica de manera continua, como es el caso de la planta termosolar Cerro Dominador, ubicada en María Elena, región de Antofagasta, Chile, inaugurada en 2021, la cual posee un almacenamiento térmico de 17,5 horas y una capacidad de producción de 110 MW.

Existen 4 tipos de tecnologías principales dentro de la energía de concentración solar (CSP): cilindro parabólico (PTC), linear fresnel (LFR), disco solar parabólico (SPD) y torre central (SPT). En comparación con las otras energías de concentración, la de cilindro parabólico es la más avanzada y usada en todo el mundo[2]. Pese a su posición como energía más utilizada, hoy en día se siguen buscando formas de alcanzar una mayor eficiencia y resolver desafíos, tales como la no uniformidad de temperatura presente normalmente en el cilindro receptor, la cual puede causar considerable estrés térmico y daño en el cilindro receptor[11].

---

<sup>1</sup> <https://www.un.org/en/un75/climate-crisis-race-we-can-win>

El presente trabajo busca caracterizar variables relacionadas con la uniformidad del flujo energético en el receptor frente a la variación parámetros geométricos y ópticos en el colector solar, ya sea en el espejo reflector primario o bien el cilindro receptor. Los parámetros a variar son la distancia focal ( $f$ ), el tamaño y forma del receptor de diferentes perfiles (circular ( $r$ ), hexagonal ( $a$ ) y elíptico ( $a, b$ ) y el ángulo cenital ( $\Theta_z$ ). Las variables a medir son la no uniformidad del flujo en el receptor ( $N.U.$ ), su desviación estándar ( $D.E.$ ), el porcentaje de superficie del receptor que recibe flujo ( $S.F.$ ), la eficiencia óptica del colector ( $E.Op.$ ) y la potencia estimada en el receptor ( $P.$ ).

## 1.1. Antecedentes Generales

### 1.1.1. Energía de concentración solar

La producción de energía a gran escala mediante la utilización de tecnología de concentración solar ofrece obtener una producción de energía estable mediante el uso de su almacenamiento energético o haciéndola parte de un sistema de producción híbrido (CSP-fosil)[2].

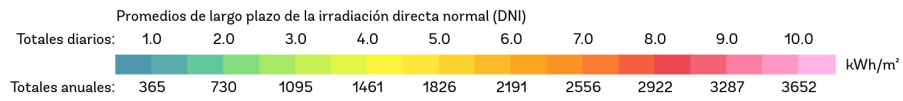
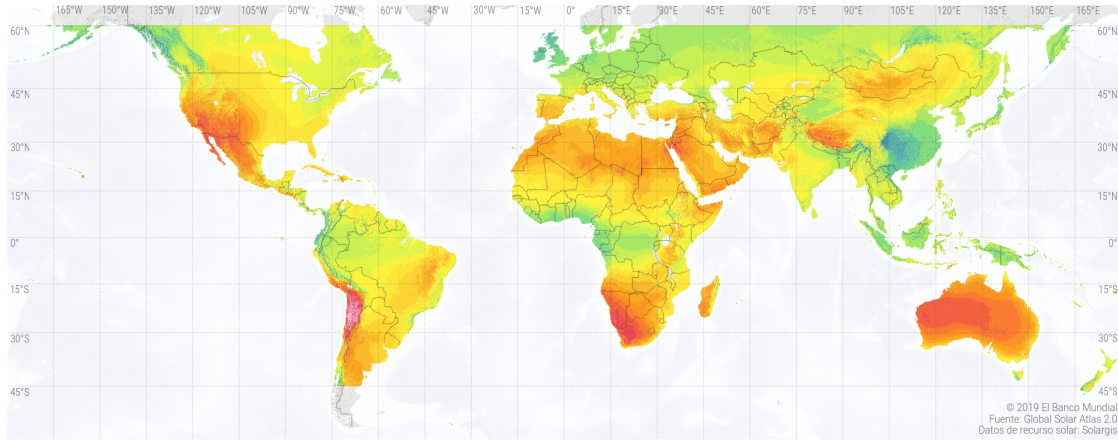
El principal indicador para evaluar la potencial instalación de una planta de concentración solar es la irradiación normal directa (DNI), variable que representa la cantidad de radiación solar recibida por unidad de área por una superficie que siempre se mantiene perpendicular (o normal) a los rayos que vienen en línea recta desde la dirección del sol en su posición actual en el cielo. En los países más soleados, el área del planeta con mayor DNI es llamada ‘cinturón del sol’ (Norte de África, Medio oriente, Mediterráneo, California, etc). Adicionalmente los países ubicados en el ‘cinturón de sol’ hay otros con un gran potencial para el uso de energía solar y en particular CSP, como es caso de Chile. El mapa mostrado en la figura 1.1<sup>2</sup> muestra la DNI incidente, en unidades de energía total diaria y anual, a lo largo de todo el mundo, en donde a simple vista se puede notar que en Chile, Bolivia y Argentina se alcanza el mayor valor de DNI a nivel global, cercano a 10 [ $kWh/m^2$ ].

---

<sup>2</sup> <https://globalsolaratlas.info/download/world>



MAPA DE RECURSO SOLAR  
**IRRADIACIÓN DIRECTA NORMAL**



Este mapa está publicado por el Grupo Banco Mundial, financiado por ESMAP, y preparado por Solargis. Para más información y términos de uso, por favor visite <http://globalsolaratlas.info>.

Figura 1.1: Mapa de irradiación directa normal.

### 1.1.1.1. Tecnologías de concentración sin formación imagen

Las tecnologías convencionales de concentración solar involucran generación de imagen en el colector solar, esto quiere decir, que la imagen de la fuente (el sol) se ve reflejada en el colector, mientras que los colectores de no imagen no presentan esta característica. La diferencia entre un colector que genera imagen y otro que no genera imagen se puede ver en la figura 1.2. Los colectores de no imagen presentan radios de concentración relativamente bajos ( $<3x$ ) y medios ( $3-10x$ ) mientras que los colectores de imagen tienen radios de concentración superiores ( $>30x$ ) [3].

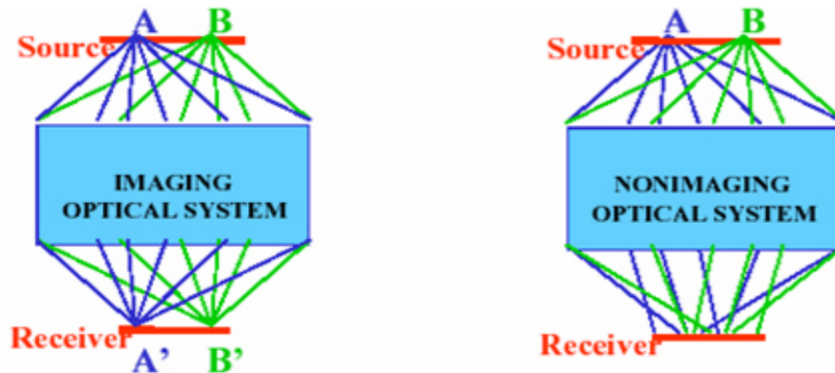


Figura 1.2: Colector de imagen y colector de no imagen [4].

El concepto de un colector de no imagen es llevado a la práctica con la aparición del un concentrador parabólico compuesto (CPC), propuesto por Hinterberg and Winston en 1965. En la figura 1.3.a se muestra el diseño básico de un CPC. AD Y CB son 2 perfiles parabólicos distintos con el punto focal en la salida del área de apertura. Un sistema de Ray-tracing para este tecnología es mostrado en la figura 1.3.b.

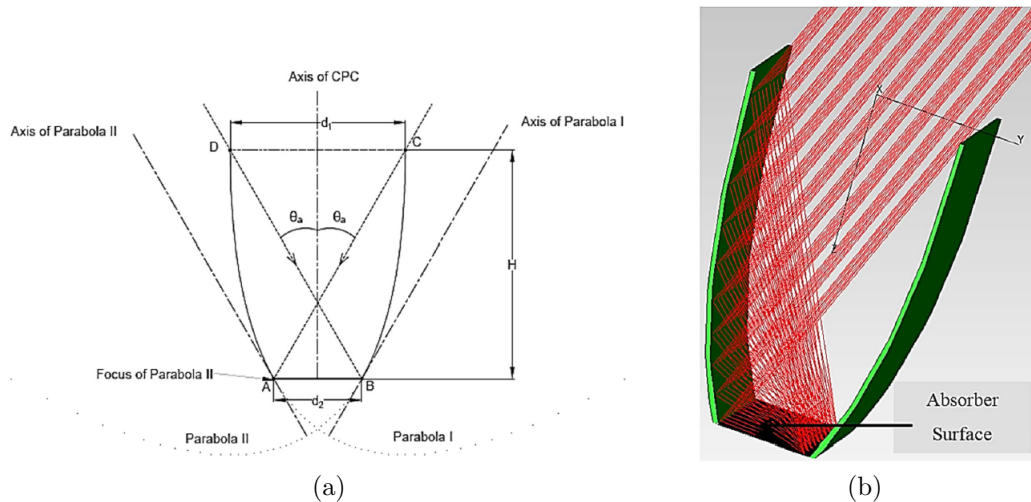


Figura 1.3: Esquema (a) y simulación (b) de un colector compuesto [3].

### 1.1.1.2. Tecnología de concentración con formación de imagen

La tecnología de concentración solar con formación de imagen es la más utilizada a gran escala y normalmente no se le conoce por el atributo de la formación de imagen. De ahora en adelante solo se tratará con esta tecnología, mencionándola solo como tecnología CSP. De manera general, una planta con tecnología CSP, como se muestra en la Figura 1.4 y en la Tabla 1.1 se compone de 3 partes principales:

- Campo solar: Esta unidad se tiene por objetivo calentar un fluido de transferencia de calor, en el cual se almacena la energía de forma térmica. Está compuesta principalmente por los espejos, receptores y el sistema de seguimiento, el cual es de gran importancia ya que, como se mencionó anteriormente, la tecnología CSP, utiliza principalmente la Irradiación Normal Directa, por lo que se necesita un ajuste permanente para seguir la trayectoria del sol.
- Unidad de almacenamiento térmico: En esta unidad se almacena el fluido de transferencia de calor directamente o bien, este utiliza para calentar otro fluido con el objetivo de almacenar energía para cuando se requiera utilizar posteriormente. Usualmente se utilizan tanques de sales fundidas para almacenar la energía térmica.
- Unidad de potencia: Si se tiene como objetivo producir electricidad, se utiliza el bloque de potencia, en el cual mediante el calor aportado por el fluido caliente o las sales fundidas, se acciona un ciclo termodinámico, usualmente un ciclo de vapor.

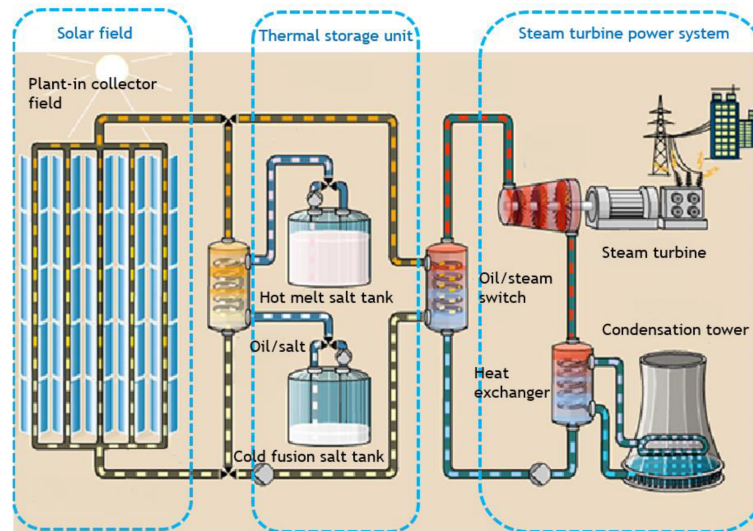


Figura 1.4: Componentes principales de una planta CSP[5].

Tabla 1.1: Componentes principales de una planta CSP y sus sub-componentes.

Campo Solar	Almacenamiento térmico	Unidad de potencia
Receptor		
Espejos		Turbina
Estructura de soporte	Sales fundidas	Generador
Sistema de seguimiento	Tanque caliente	Condensador
Tuberías	Tanque frío	Bombas
Fluido de transferencia de calor	Intercambiadores de calor	Intercambiadores de calor
Bombas	Bombas	Caldera fósil (opcional)
Intercambiadores de calor		

### 1.1.1.3. Tecnologías CSP más utilizadas

Estas tecnologías de concentración son 4 principales, a continuación se describen cada una de ellas:

- **Disco parabólico**

El sistema SPD (solar-parabolic-dish) está compuesto por un disco con forma de parábola, el cual redirige la radiación del sol hacia el receptor en el punto focal de la parábola. Estos colectores tienen un sistema de seguimiento del sol de 2 ejes. En el punto focal se ubica un sistema de conversión de energía térmica-eléctrica, que utiliza un ciclo termodinámico Stirling o Brayton. El diámetro del disco varía de entre 5 a 10 [m]. Este sistema posee una de las eficiencias globales (solar-eléctrica) más altas entre las tecnologías CSP, esta se debe principalmente a la forma de su espejo primario y el sistema de seguimiento de doble eje, que le permite estar apuntando directamente al sol, evitando pérdidas, como la pérdida del coseno.

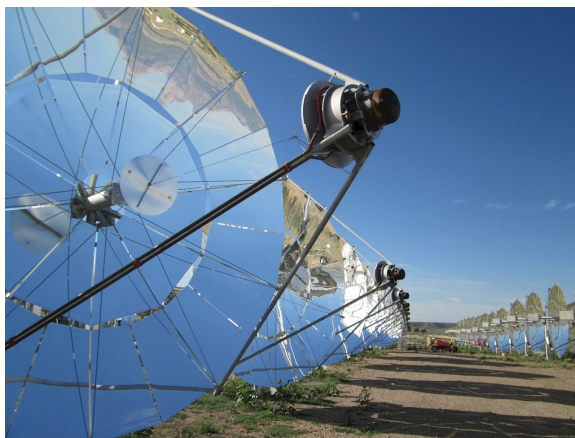


Figura 1.5: Disco solar parabólico[6].



- **Torre central de potencia**

El campo solar de un sistema SPT (Solar Power Tower) está compuesto principalmente por 2 componentes: los helióstatos y la torre central. Los helióstatos son espejos planos que poseen un sistema de seguimiento de 2 ejes, lo que les permite redireccionar la radiación solar hacia la cima de una torre central. La torre central, en su parte superior, contiene al receptor que se encarga de recibir la radiación redirigida por cientos o miles de helióstatos. La energía que llega al receptor varía en promedio entre  $200 [kW/m^2]$  a  $1000 [kW/m^2]$ , con esta energía es posible calentar un fluido de trabajo a altas temperaturas, que comúnmente puede ser agua, vapor, sales fundidas, aire, entre otros. Una fracción del calor recibido es almacenado ( en tanques de almacenamiento) mientras que la otra parte es enviada, al igual que en la tecnología PTC, al bloque de potencia para generar energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico.



Figura 1.6: Planta termosolar SPT Cerro dominador[9].

- **Lineal fresnel**

Las plantas LFR (Linear Fresnel Reflector) consisten en un arreglo lineal de espejos planos que están inclinados de tal forma que reflejan la radiación en una línea focal o sector en común (basado en los lentes Fresnel), en donde se ubica el receptor. El receptor está compuesto generalmente por un arreglo de tubos más pequeños que generalmente contienen agua, la cual al calentarse con la radiación proveniente del arreglo de espejos principales, generan vapor, el cual se utiliza para accionar un ciclo de vapor para producir electricidad.



Figura 1.7: Planta con tecnología Fresnel[7].

- **Cilindro parabólico**

Una planta de tecnología PTC (Parabolic trough collector) consiste en un acople lineal de espejos en forma de parábola, que dirigen la radiación solar hacia un tubo receptor. Los espejos están dispuestos generalmente en dirección Norte-Sur, de tal forma que con el sistema de seguimiento de un eje se ajuste a la trayectoria Este-Oeste del sol durante el día. El tubo receptor está cubierto o pintado de un color oscuro de tal forma de absorber la mayor cantidad de energía desde el espejo primario. Como fluido de trabajo usualmente se utiliza aceite, sales fundidas u otro material que contenga el calor. Al igual que en la tecnología de torre central, una parte del calor contenido en el fluido de trabajo puede ser almacenado para producir energía eléctrica cuando no esté presente el recurso solar o bien puede usarse directamente para generar energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico. En ocasiones la tecnología PTC se complementa con la utilización de combustibles fósiles para suplir la falta de energía incidente y/o cuando hay baja radiación solar. Comparadas con las otras tecnologías CSP, la de cilindro parabólico es la más avanzada e implementada en todo el mundo[2].



Figura 1.8: Planta CSP con sistema de PTC[10].

A continuación, en la Tabla 1.2, se muestran la principales características de las tecnologías anteriormente descritas.

Tabla 1.2: Comparación de las 4 principales tecnologías de concentración solar. Info obtenida de:[13],[15],[8] .

	Disco parabólico	Torre central	Fresnel	Cilindro parabólico
Temperatura alcanzada [°C]	700-750	530-570	285	350-550
Radio de concentración	2000	250	40	70-100
Eficiencia [%]	25-30	20-35	8-10	15

### 1.1.2. Geometría de un colector cilindro parabólico y daño en el colector solar

La forma del espejo parabólico corresponde a una parábola, cuya forma viene dada por la ecuación  $y = \frac{x^2}{4f}$ , donde  $y$  es la altura en el punto  $x$  y  $f$  es la distancia focal, como se muestra en la Figura 1.9, el receptor de radio  $r$  se ubica en el punto focal de la parábola.

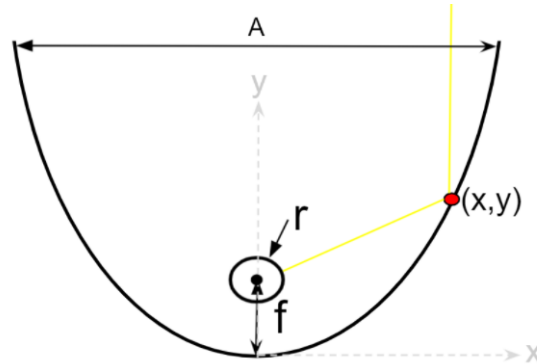


Figura 1.9: Forma del espejo y ubicación del cilindro receptor

Dependiendo del tamaño del espejo reflector principal y el tamaño y forma del receptor se puede producir un gran gradiente de temperatura en el tubo receptor (como el que se muestra en la Figura 1.10, lo que puede provocar daño físico por el estrés térmico.

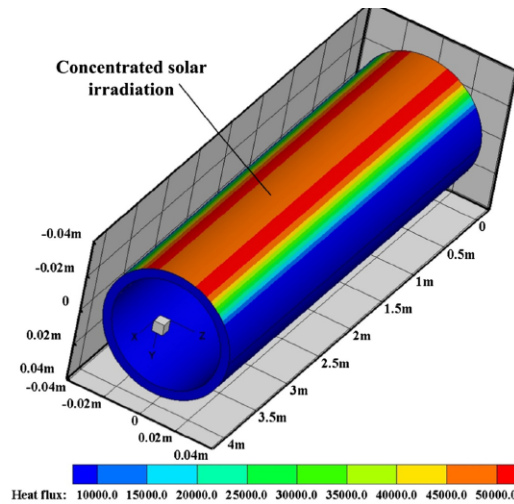


Figura 1.10: Gradiente térmico presente en el tubo receptor [12].



## 1.2. Motivación, Objetivos y alcances

### 1.2.1. Motivación

En la matriz energética primaria de Chile predominan los recursos fósiles con una participación del 68 % del total, le sigue la Biomasa con un 23 % y finalmente la energía de origen hídrico (5 %), solar (2 %) y eólica (1 %)<sup>3</sup>. Las formas de implementar la energía solar son muy variadas y adaptables para cada necesidad o requerimiento. Como ha sido mencionado, nuestro país posee una posición privilegiada para el desarrollo e implementación de esta tecnología, entre otras renovables. Se requieren cambios en la política y un fomento de la educación ambiental para potenciar el desarrollo de las energías renovables en nuestro país.

El desarrollo del presente trabajo tiene como objetivo contribuir al entendimiento del comportamiento óptico de los colectores solares de tipo cilindro parabólicos frente a la variación de sus parámetros geométricos, tales como formas, medidas y posición del reflector y del receptor. También se busca ser un aporte en los antecedentes para la evaluación global del colector solar, entre ellos, la evaluación de esfuerzos térmicos en el colector.

### 1.2.2. Objetivo general

Caracterizar la concentración solar en el receptor de colectores cilindro parabólicos mediante simulaciones con trazado de rayos para obtener relaciones paramétricas entre la geometría y la distribución del flujo energético en el receptor.

### 1.2.3. Objetivos específicos

- Definir los parámetros que permitan medir y caracterizar la distribución del flujo energético en el receptor y cómo serán medidos.
- Definir las geometrías de concentración a utilizar y de qué forma se variarán.
- Establecer una metodología para la realización de los experimentos y la obtención de resultados
- Elaborar modelos de ajuste paramétrico que relacionen las variables geométricas con parámetros característicos de la concentración solar en el receptor del colector.

### 1.2.4. Alcances

- El presente trabajo se enfoca netamente en los colectores solares de tipo cilindro parabólico.
- El tema a tratar y a desarrollar se restringe a la óptica de los colectores solares, de tal manera que no se aborda la parte térmica.
- El trabajo a desarrollar contempla su fase experimental vía software de trazado de rayos, por lo que no se realizan experimentos en físico.

---

<sup>3</sup> [https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN\\_Matriz\\_energetica\\_electrica\\_en\\_Chile.pdf](https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN_Matriz_energetica_electrica_en_Chile.pdf)

# Capítulo 2

## Antecedentes específicos

### 2.1. Definición de términos importantes

- Ancho de apertura o Apertura ( $A[m]$ )  
Es la distancia lateral del espejo primario que permite calcular el área de apertura. Definiendo el ancho de apertura y la distancia focal, la forma de la parábola totalmente determinada. Esta distancia, entre otras se muestran la Figura 2.1.

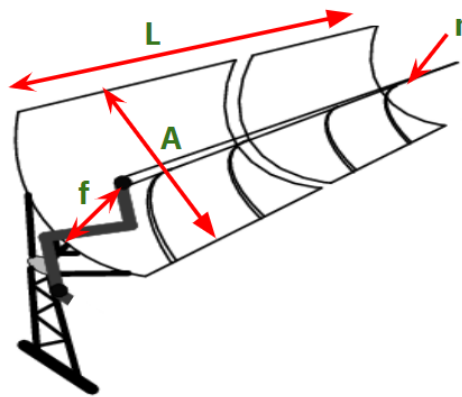


Figura 2.1: Medidas generales del colector PTC.[14]

- Área de apertura ( $A_a[m]$ )  
El área de apertura ( $A_a$ ) se define como la máxima superficie proyectada del colector a través de la cual pasa la irradiación solar. Luego de pasar por el área de apertura, la irradiación es concentrada. Para el caso del colector de tipo cilindro parabólico, el área de apertura viene dada por:

$$A_a = A * L \quad [m^2] \quad (2.1)$$

Donde A es el ancho de apertura y L es el largo del colector.

- Distancia focal ( $f[cm]$ )  
Es el parámetro característico de la parábola y el punto geométrico en donde se concentran los rayos solares.
- Radio de concentración geométrico ( $CR$ )  
El radio de concentración geométrico ( $CR$ ) se define como la relación entre el Área de

apertura del colector solar y el área de absorción del receptor.

$$C_r = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.2)$$

En donde  $A_r$  es el área del receptor que recibe la radiación del reflector.

- Radio de concentración óptico ( $CR_o$ )  
Corresponde a la razón entre la irradiación promedio integrada sobre el área del receptor ( $A_r$ ) y la irradiación incidente sobre el área de apertura  $I_a$ :

$$CR_o = \frac{\frac{1}{A_r} \cdot \int I_r \cdot A_r dA_r}{I_a} \quad (2.3)$$

- Reflectividad ( $\rho$ )  
Es una propiedad de cualquier material reflectante que indica cuanta energía es reflejada. Varía de 0 a 1. Los colectores de alta calidad tienen una reflectividad superior a 0.95[13].
- Absortividad ( $\alpha$ )  
Es la propiedad de un material que indica la fracción de energía que absorbe.

## 2.2. Colector Solar Euro Trough

El colector solar de tipo cilindro parabólico *EUROTROUGH* es un colector estandarizado que ha sido desarrollado, testado e implementado por el consorcio Eurotrugh, compuesto por países de la Unión Europea con el objetivo de proveer un colector estandarizado para la producción de energía a gran escala. ET100 y ET150 son los 2 colectores desarrollados, estos permiten la utilización de varios tipos de fluidos de transferencia de calor y son compatibles con los tubos receptores paneles de espejos disponibles en el mercado. En particular, el prototipo del colector *EUROTROUGH* (Figura 2.2) fue preparado, puesto en marcha y evaluado en detalle en la Plataforma solar de Almería (PAS), España [16] [17].



Figura 2.2: Prototipo extendido del colector *EUROTROUGH 150* en operación en la plataforma solar de Almería[16].

Las características principales de los colectores ET100 y ET150 son mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Parámetros característicos de ET100 y ET150 [16] .

Modelo EuroTrough	ET100	ET150
Distancia focal	1.71m	1.71 m
Radio del receptor	3.5 cm	3.5 cm
Ancho de apertura	5.77m	5.77m
Área de apertura	545 m <sup>2</sup>	817.5 m <sup>2</sup>
Largo del colector	99.5 m	148.5 m
Radio de concentración Óptico	82	82

Los experimentos a desarrollar toman como modelo base los parámetros característicos de los colectores ET100 y ET150 en cuanto a distancia focal, radio del receptor, ancho de apertura y largo de los módulos.

### 2.3. Sistema coordenadas solares y pérdida del coseno

La trayectoria y posición del sol a una hora determinada, desde un punto fijo en la tierra, varía día a día. Para caracterizar su trayectoria y posición para un punto específico en la tierra se utiliza el sistema de coordenadas mostrado en la Figura 2.3, en donde se muestra que a lo largo de toda su trayectoria por el cielo (línea segmentada), el ángulo de inclinación con respecto al Zenit (punto más alto en el cielo), corresponde al ángulo cenital, que es el complemento a la altura solar. Por otro lado, si analizamos su trayectoria en el plano terrestre, el ángulo de inclinación con respecto al eje Norte-sur, corresponde al ángulo acimutal.

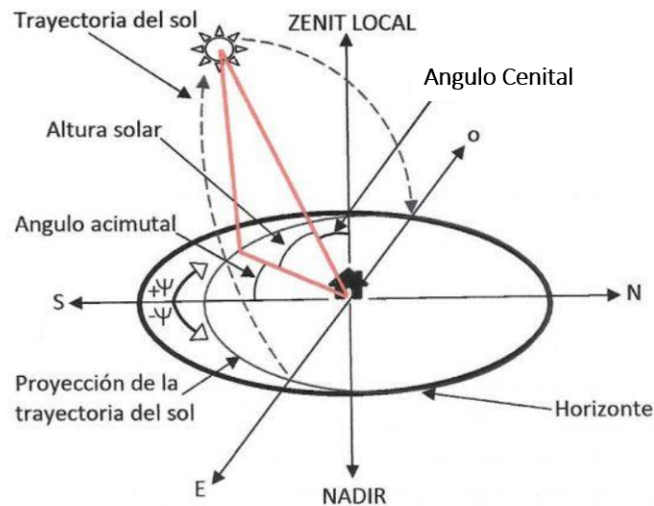


Figura 2.3: Sistema de Coordenadas y variables utilizadas para determinar la posición y trayectoria del sol[18].

En un colector solar, si la superficie de apertura no es normal a los rayos provenientes

del sol, la irradiación incidente,  $I_0$ , será reducida por el coseno del ángulo  $\Theta_z$ , que forma la superficie del colector con la superficie normal a la irradiación incidente ( Figura 2.4), de esta forma:

$$I_f = I_0 * \cos \Theta_z \quad (2.4)$$

En donde  $I_f$  es la irradiación final producto del ángulo ( $\Theta_z$ ) presente entre la superficie del colector y los rayos solares.

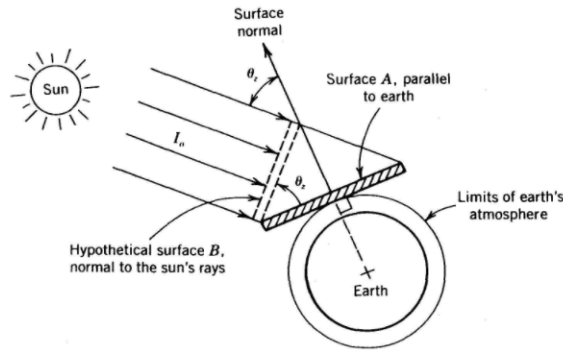


Figura 2.4: Efecto del coseno entre la superficie del colector y la irradiación incidente [13].

## 2.4. Distribución del flujo energético en el receptor

La radiación incidente en el área de apertura es reflejada por el espejo primario hacia el receptor. Esta radiación, compuesta a su vez, para efectos prácticos, por una cantidad determinada de rayos, se distribuye en el receptor de manera no homogénea, su distribución depende de diversos factores, tales como la forma del receptor, forma del espejo primario, la distancia focal, entre otros. El estudio de esta distribución del flujo energético en el receptor es el principal foco de estudio de este trabajo.

Para medir y comparar las diferentes distribuciones del flujo energético en el receptor es necesario establecer el sistema de coordenadas en el mismo. En la Figura 2.5 se muestra el sistema coordenadas angulares en el receptor.

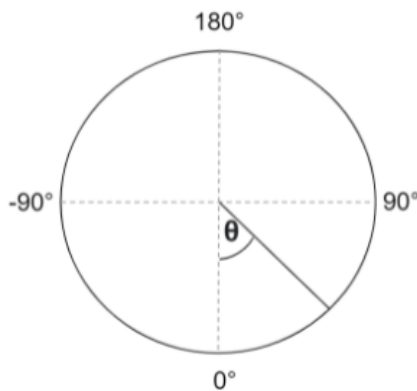


Figura 2.5: Coordenadas angulares en receptor cilíndrico.

A continuación, a modo de ejemplo, se muestra un esquema de trazado de rayos en el

colector cilíndrico con receptor de perfil circular y posteriormente, en la Figura 2.7 el gráfico de la distribución del flujo energético en el receptor.

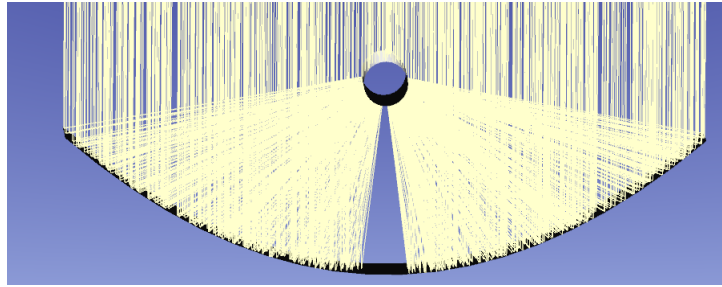


Figura 2.6: Trazado de rayos colector cilindro parabólico.

Como es posible notar en la figura anterior y basándose en el sistema de coordenadas angular descrito, se puede decir que el receptor prácticamente no recibe flujo en su parte inferior ( $\Theta \sim 0$ ), luego, desde cierto valor ( $\Theta \sim 10^\circ$ ) hasta aproximadamente  $\Theta \sim 90^\circ$  hay flujo energético concentrado. Luego de ese valor hasta  $\Theta = 180^\circ$ , que corresponde a la parte superior del receptor, solo se recibe flujo directo del sol, sin ser concentrado. Dicho comportamiento queda plasmado en la Figura 2.7.

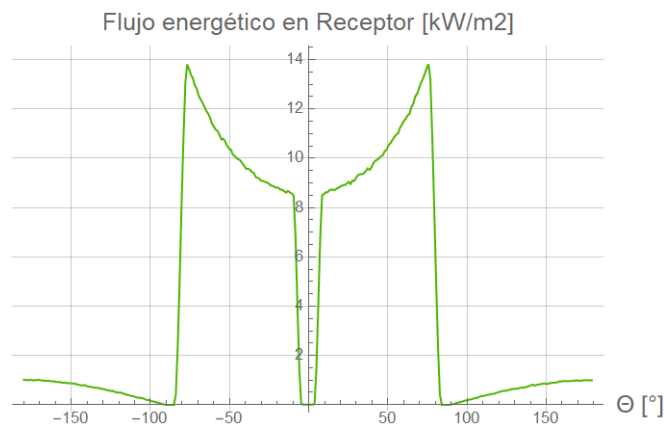


Figura 2.7: Perfil del flujo energético en el receptor.

## 2.5. Parámetros invariables

Para la realización de los experimentos de variación de geometrías y parámetros ópticos, se mantienen los siguientes parámetros fijos:

- El ancho de apertura se deja fijo en  $A = 5.77[m]$ , que corresponde al ancho del colector EuroTrough.
- La reflectividad del espejo se establece en 1 y la absorptividad del receptor se establecen en 1, simulando que reflejan y absorben, respectivamente, todos los rayos.
- El número de rayos se establece en 10 Millones, valor determinado experimentalmente, que permite tener una baja desviación estándar de los resultados ( $<0.001[MW]$ ), según otros experimentos realizados en tecnología CSP en el software Tonatiuh [19]. Pese a ser un valor alto de rayos, cada simulación toma aproximadamente de 2 a 3 minutos.

- El ángulo azimutal se establece en  $90^\circ$ , simulando una posición del sol de medio día.

Tabla 2.2: Parámetros fijos en la realización de los experimentos

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Ancho de apertura	5.77 m
Irradiación	$1000 \text{ W/m}^2$
Reflectividad espejo parabólico	1
Absortividad receptor	1
Número de rayos simulación	10000000
Azimuth	$90^\circ$
Ángulo Cenital <sup>a</sup>	$0^\circ$
Largo del colector	12 m

<sup>a</sup> Solo varía su valor en el experimento de "Variación del ángulo cenital"

## 2.6. Variables independientes y dependientes de los experimentos

### 2.6.1. Variables Independientes

Con el fin de caracterizar la concentración solar en el receptor de un PTC se escogen los siguientes parámetros geométricos y ópticos a variar.

- **Distancia focal ( $f$ )**

Este es un parámetro característico del colector solar PTC, su variación, al mantener el ancho de apertura ( $A$ ) fijo, implica que la parábola resultante, como se muestra en la Figura 2.8, se abra o cierre según su variación. Se varía  $f$  desde 0.5 m a 2.0 m.

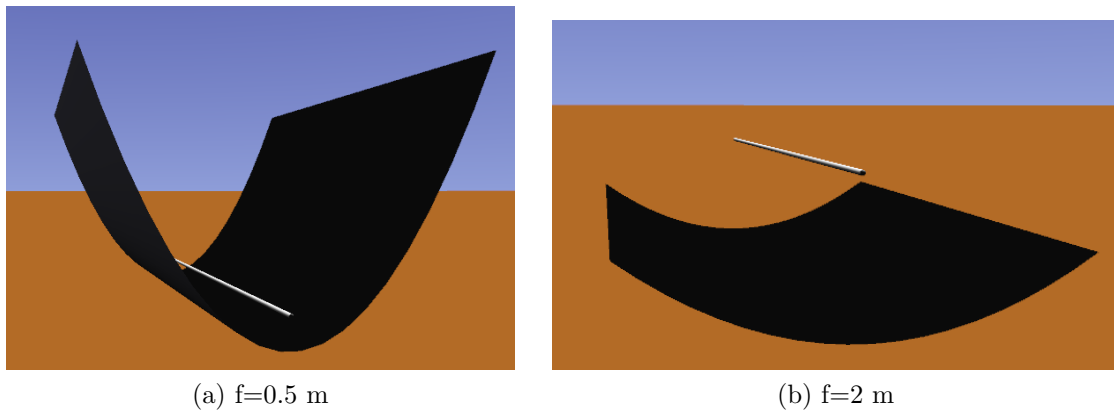


Figura 2.8: Variación de la distancia focal.

- **Radio del receptor ( $r$ )**

La variación del radio de receptor implica un aumento o disminución en el flujo energético por unidad de área en el mismo. Además de una distribución diferente en el sistema de coordenadas angular en el receptor. Se varía el radio desde los 10 mm hasta los 50 mm, como se muestra en la Figura 2.9.

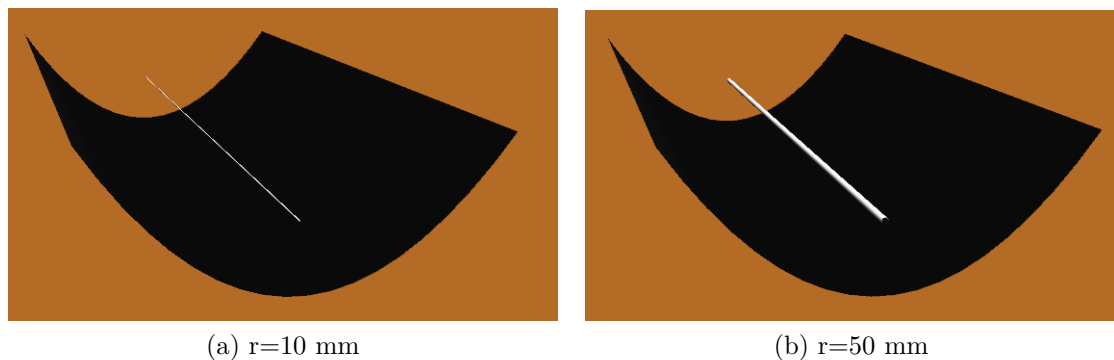


Figura 2.9: Variación del radio del receptor.



- **Ángulo Cenital ( $\theta_z$ )**

Se varía Ángulo del Zenit de  $\Theta_z = 0^\circ$  a  $\Theta_z = 45^\circ$  con el fin de simular la inclinación presente del sol que se puede presentar con el transcurso del año. A modo de representación de la variación del ángulo cenital, en la Figura 2.10 se muestran los rayos solares.

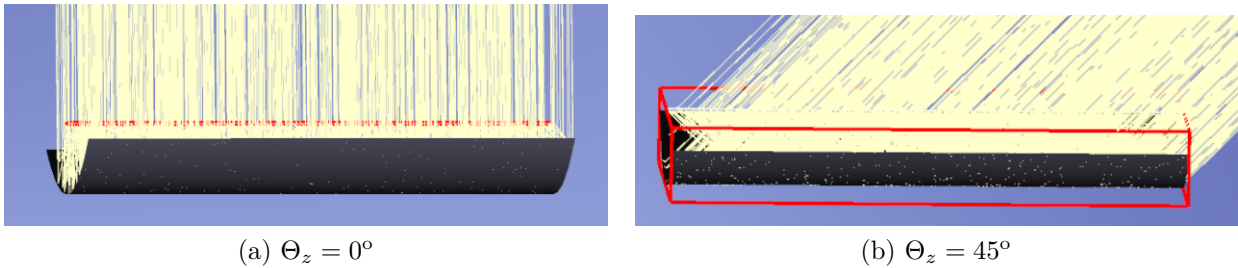


Figura 2.10: Variación del ángulo cenital.

- **Forma elíptica**

Se evalúa la incorporación de un receptor con forma elíptica. Se caracteriza la forma elíptica mediante su semieje mayor( $a$ ) y su semieje menor( $b$ ), tal como se muestra en la Figura 2.11. Cada semieje se varía desde 10mm a 35 mm.

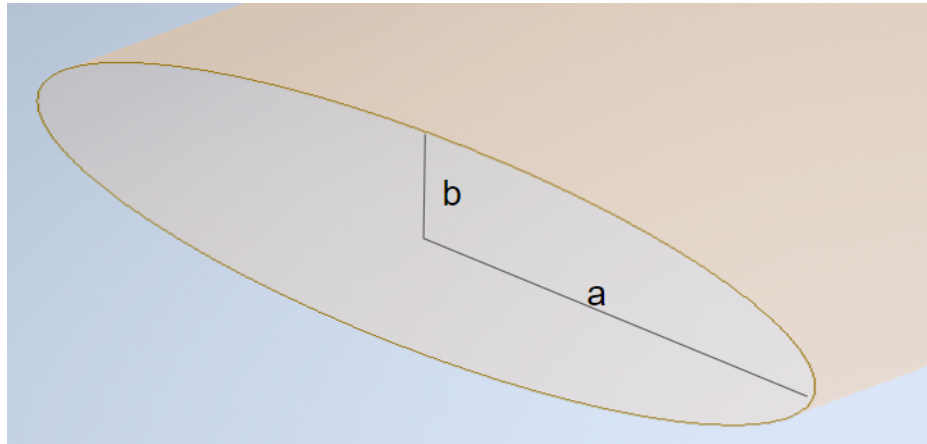


Figura 2.11: Caracterización del perfil elíptico del receptor.

- **Forma hexagonal**

También se evalúa la utilización de un receptor con perfil de forma de hexagonal regular. Para caracterizar el perfil hexagonal se define el parámetro  $a$ , como la distancia de su centro a un vértice. También evalúan 2 orientaciones diferentes, la horizontal y la vertical, las cuales se muestran en la Figura 2.12. El valor del parámetro  $a$  se varía, de 10 mm a 50mm.

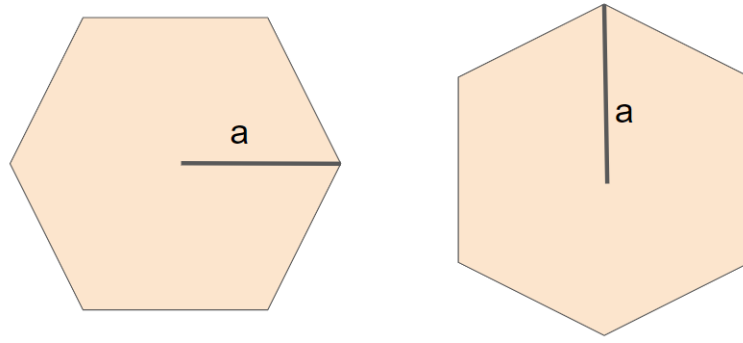


Figura 2.12: Perfil hexagonal en su orientación horizontal y vertical respectivamente.

## 2.6.2. Variables dependientes

Se establecen y definen las siguientes variables o indicadores estadísticos que permiten caracterizar la concentración del flujo energético en el receptor.

- No uniformidad (*N.U.*)

Mide la diferencia entre el flujo máximo y el mínimo en el receptor.

$$N.U. = \frac{\max F_i - \min F_i}{2 \cdot (\max F_i + \min F_i)} \quad (2.5)$$

En donde  $F_i$  es el flujo energético puntual en cierto rango de ángulos.

- Desviación estándar (*D.E.*)

Cuantifica la dispersión del flujo  $F$  sobre el receptor.

$$D.E. = \sqrt{\frac{\sum (F_i - \bar{F})^2}{n - 1}} \quad (2.6)$$

Donde  $\bar{F}$  es el flujo promedio y  $n$  es la cantidad de flujos puntuales medidos a lo largo del receptor.

- Porcentaje de superficie con flujo (*S.F.*)

$$S.F. = \frac{\text{Superficie con flujo} > \text{Flujo basal}}{\text{Superficie total}} \quad (2.7)$$

En donde *Flujo basal* es el flujo base en el colector, es decir, en donde no hay radiación concentrada.

- Eficiencia óptica (*E.Op.*)

$$E.Op. = \frac{N^\circ \text{ de Rayos que llegan al receptor}}{N^\circ \text{ Total de rayos}} \quad (2.8)$$

En donde *N° Total de rayos* es el total de rayos que atraviesan el área de apertura.

- Potencia estimada en el receptor ( $P$ )

$$P = N^{\circ} \text{ fotones en receptor} \cdot \text{Potencia por fotón} \quad (2.9)$$

- Desviación estándar Normalizada ( $D.E.Normalizada$ )

Corresponde al cociente entre la Desviación estándar y la división de la Potencia estimada en el receptor y el área del receptor:

$$D.E.Normalizada = \frac{D.E.}{(P./A_r)} \quad (2.10)$$

# Capítulo 3

## Metodología

Para la elaboración del trabajo realizado se contemplaron 3 etapas principales:

1. Generación de geometrías, mediante la utilización del programa *Autodesk Inventor*.
2. Simulación del trazado de rayos en el colector mediante el programa de trazado de rayos *Tonatiuh*.
3. Procesamiento de los datos entregados por *Tonatiuh* y la posterior elaboración gráficos, ajustes de curvas y demás indicadores mediante la utilización del programa *Mathematica*.

El esquema de la metodología utilizada y mencionada anteriormente se muestra en la Figura 3.1

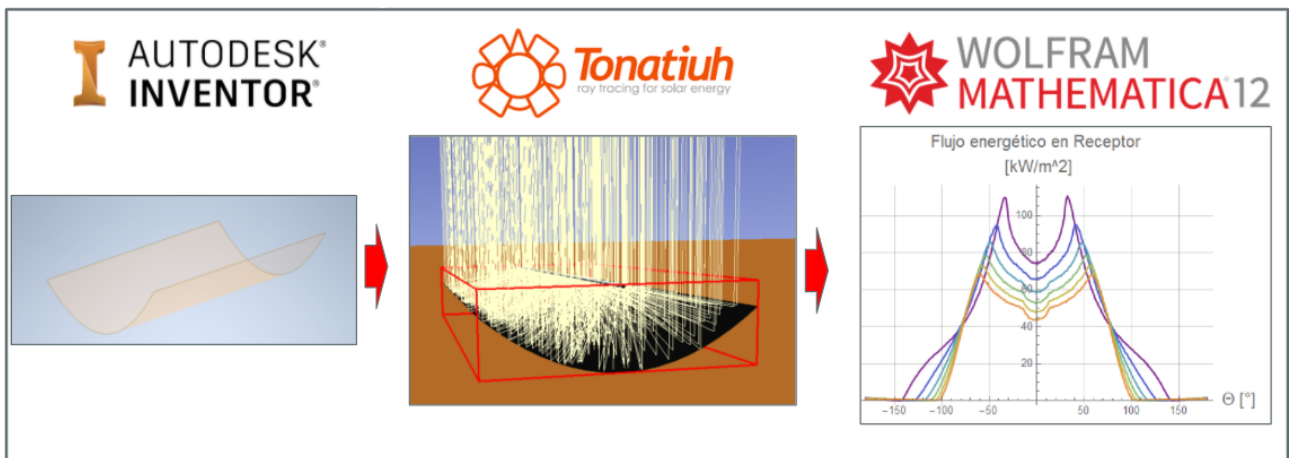


Figura 3.1: Metodología general de trabajo.

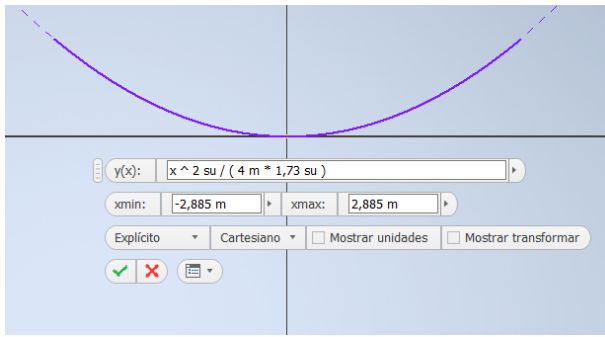
En las siguientes secciones se describen cada una de las etapas principales de la metodología utilizada.

### 3.1. Generación de geometría

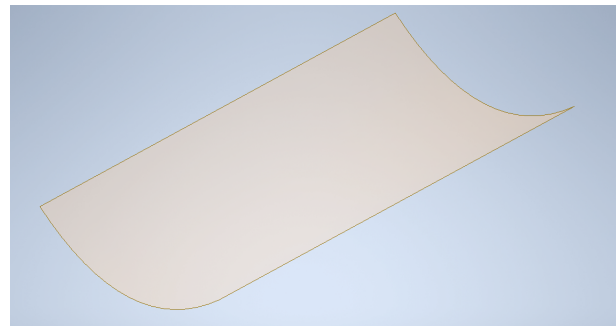
El software de trazado de rayos *Tonatiuh*, que será descrito en la siguiente sección, posee algunas geometrías para su utilización, que incluyen un perfil parabólico, pero no otras geometrías interesantes consideradas a evaluar, como la geometría elíptica y la geometría hexagonal. Por ello, y para que todas las geometrías tengan el mismo formato de origen, se decidió realizar en un software de modelamiento 3D, *Autodesk Inventor*, que es un paquete de modelado paramétrico de sólidos en 3D producido por la empresa de software *Autodesk*.

Las geometrías a evaluar son de forma sencilla y el programa posee facilidades para su elaboración. En primera instancia, mediante la herramienta de generación de una curva paramétrica, se introduce la ecuación de la parábola a utilizar (en el caso de la geometría parabólica), indicando la distancia focal, se genera el perfil y luego se setea el largo deseado. Con la superficie creada, se procede a la generación del archivo CAD. El Software *Tonatiuh* acepta archivos .STEP y .STL debido a alguna incompatibilidad que no pudo ser resuelta, se decidió exportar la geometría en formato .STL, en el cual, la geometría se exporta como una malla compuesta por pequeños triángulos, por lo que se pierde en cierto porcentaje la calidad de la forma, sin embargo, se ajustaron los parámetros de exportación (Figura 3.2.(c)) para obtener la calidad más alta posible.

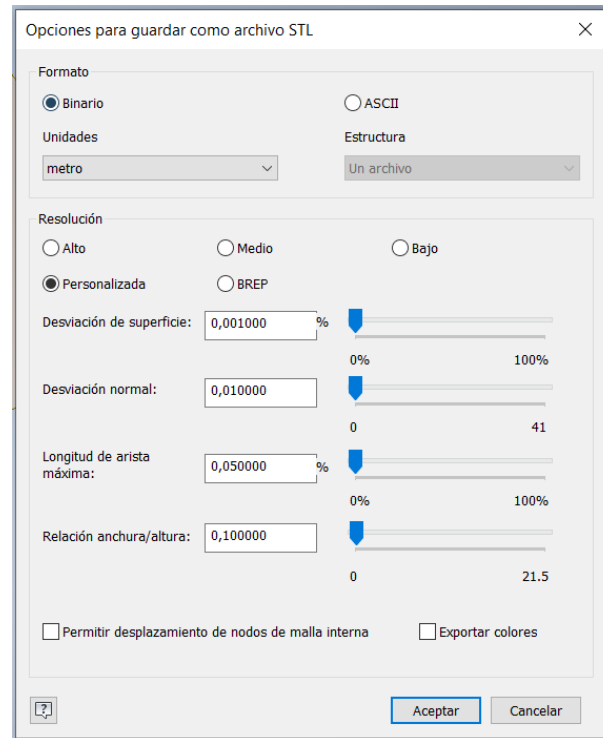
Los pasos mencionados anteriormente y los parámetros utilizados para la exportación de la geometría se muestran en la siguiente figura:



(a) Definición de geometría



(b) Superficie creada



(c) Parámetros de exportación

Figura 3.2: Pasos realizados en el software *Autodesk Inventor*

## 3.2. Simulación de trazado de rayos

El Software *Tonatiuh* es un software de trazado de rayos en 3D de código libre<sup>4</sup> que utiliza el modelo de trazado de rayos de Monte Carlo para la simulación óptica de sistemas de concentración solar. El objetivo principal de utilizar *Tonatiuh* es obtener un perfil del flujo energético recibido por el receptor del colector solar.

*Tonatiuh* Permite modificar bastantes parámetros ópticos, ya sea de las condiciones ambientales, como la radiación solar incidente, la posición del sol (Azimut y Elevación), entre otros. También permite modificar parámetros ópticos del colector, tales como: reflectividad,

<sup>4</sup> <https://iat-cener.github.io/tonatiuh/>

absortividad, transmisividad, errores de desviación del rayos, brillo de la superficie, transparencia, entre otros. Además de lo anterior, es posible modificar la cantidad de rayos a generar y en cuantos archivos agrupar los resultados.

A continuación se muestran algunos parámetros utilizados en *Tonatiuh*:

- Se setea la Irradiación en  $1000[W/m^2]$ , que es un valor acorde a lo percibido en el norte de Chile, pese a que no se escoge ningún lugar en particular para simular todas sus condiciones ambientales.
- En cuanto a los parámetros ópticos del material establecieron los siguientes valores:

ConcentratorMaterial		TubeMaterial	
Parameter	Value	Parameter	Value
m_reflectivity	1	m_reflect...	0
m_sigmaSlope	0	m_sigma...	0
m_distribution	NORMAL	m_distrib...	NORMAL
m_ambientColor	0.2 0.2 0.2	m_ambie...	0.2 0.2 0.2
m_diffuseColor	0.40000001 0.40000001 0.5	m_diffus...	0.80000001 0.80000001 0.80000001
m_specularColor	0 0 0	m_specul...	0 0 0
m_emissiveColor	0 0 0	m_emissi...	0 0 0
m_shininess	0.2	m_shinin...	0.2
m_transparency	0	m_transp...	0

(a) Material del espejo reflector

(b) Material del receptor

Figura 3.3: Parámetros ópticos escogidos para los materiales del Reflector y receptor

La reflectividad del espejo se setea en 1 y la del receptor en 0 , lo que significa que se modelan como espejos y receptores perfectos, que reflejan y reciben todos los rayos emitidos. Esto no es posible en la realidad, como se vio en lo antecedentes los reflectores de gran calidad tienen una reflectividad por sobre 0.95 pero no de 1. Se escoge este valor para evaluar con mayor precisión la performance de la geometría utilizada. Los demás parámetros se escogen por defecto del software en su modo de colector cilindro parabólico.

- Al incorporar una geometría CAD, se setea su posición acorde a lo necesitado, en el caso del receptor, el eje longitudinal del esta se ubica en el valor de la distancia focal del espejo reflector. Los parámetros de posición, traslación y algunos tamaños modificables de las geometrías existentes en el software se pueden modificar desde el menú lateral, que se muestra en la Figura 3.4.





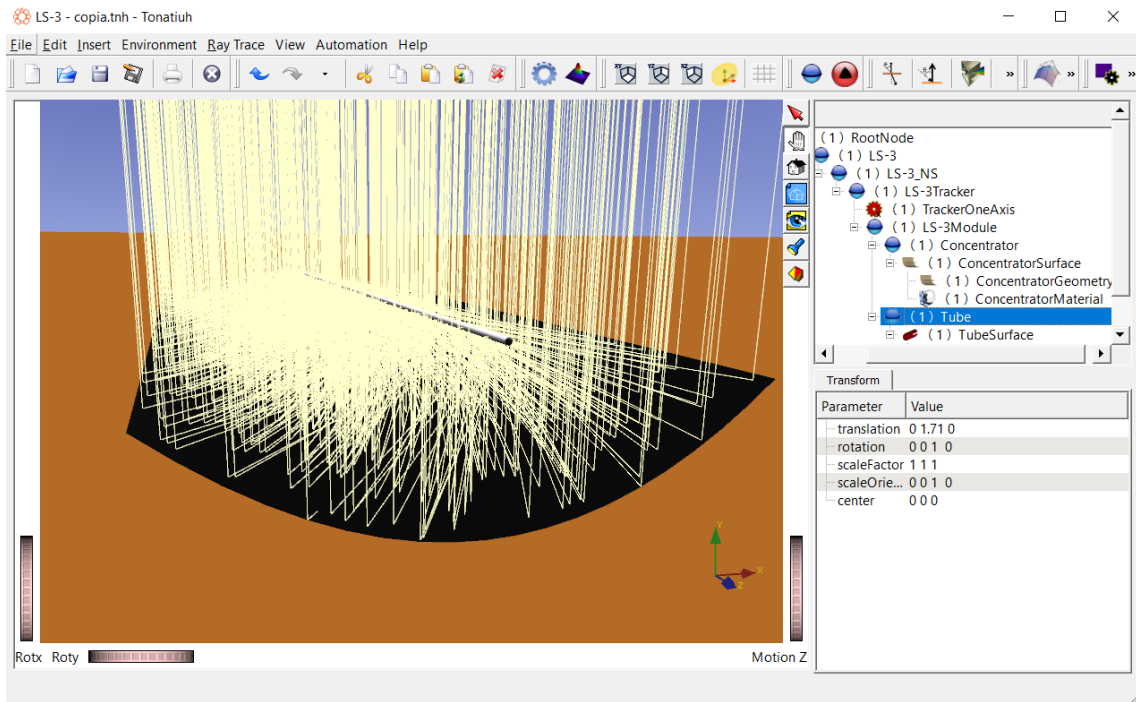


Figura 3.5: Interfaz y trazado de rayos en software *Tonatiuh*.

Para cada experimento se importaron las geometrías a utilizar y se modificaron su posición acorde a lo necesitado. Posteriormente, para cada variación de cada experimento, se procedió a establecer y comprobar los parámetros anteriormente mencionados y finalmente se realizó la simulación para la obtención del resultado. El resultado del software, para efectos de este trabajo y para cada experimento realizado, es una serie de 10 archivos .dat, en donde cada uno contiene la información de 1 millón de fotones que llegan al receptor, la información está compuesta por 5 valores; 3 de ellos son las coordenadas del fotón en el receptor (coord. cartesianas), la ID de la superficie y si esta corresponde a que llega por fuera o por dentro de la superficie. Además de estos archivos, se genera un archivo .txt en donde se entrega el valor de potencia promedio por fotón.

### 3.3. Procesamiento de resultados

Para cada variación de distancia de cada experimento realizado se obtuvieron 10 archivos en formato .dat, cada uno con la información de cerca de 10 millones de fotones acerca la coordenadas del receptor en donde llegan. Con dicha información se desea obtener el perfil de la distribución del flujo en el receptor, las variables asociadas a esa distribución de flujo ( $N.U.$ ,  $D.E.$ ,  $D.E.N.$ , y  $S.F.$ ), y también indicadores asociados al conteo de fotones, tales como la eficiencia óptica ( $E.Op$ ) y la potencia recibida por el colector ( $P$ ). Para realizar estos procesos y posteriormente realizar la comparación entre los distintos experimentos se decidió utilizar el software *Mathematica*, la cual es una herramienta computacional muy completa que permite leer y procesar bases de datos en distintos formatos, hacer cálculos matemáticos complejos, programar, generar gráficos, exportar datos, entre otros.

Se crearon 3 "archivos tipo" en *Mathematica*, relacionados entre sí, para cada uno de ellos se muestra su esquema de funcionamiento y se ejemplifica su funcionamiento con el

experimento de la evaluación de la geometría elíptica.

- "Archivo tipo" 1 utilizado en cada variación de la variable independiente:

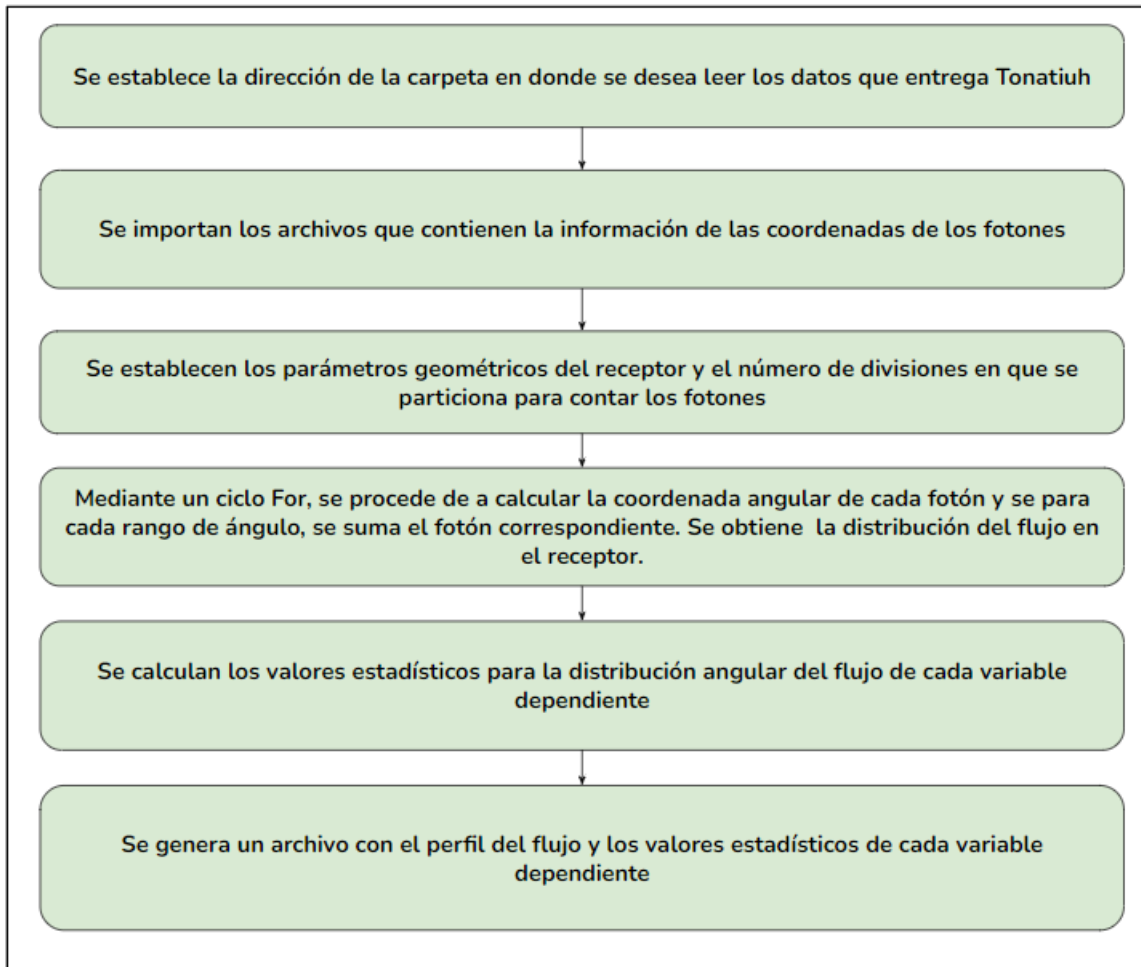


Figura 3.6: Esquema de funcionamiento de archivo elemental en *Mathematica*.

En el caso del experimento de la evaluación de la geometría elíptica, para cada variación de distancia de cada semieje se modifica y ejecuta este archivo.

- A continuación se muestra el esquema de funcionamiento del "archivo tipo" 2. El cual se utiliza para evaluar las variables dependientes ( $N.U.$ ,  $D.E.$ ,  $D.E.N.$ ,  $S.F.$ ,  $E.Op$  y  $P.$ ) frente a cada uno de los valores de la variable independiente ( $f$ ,  $r$ ,  $a$ ,  $s$  o  $\Theta_z$ ).

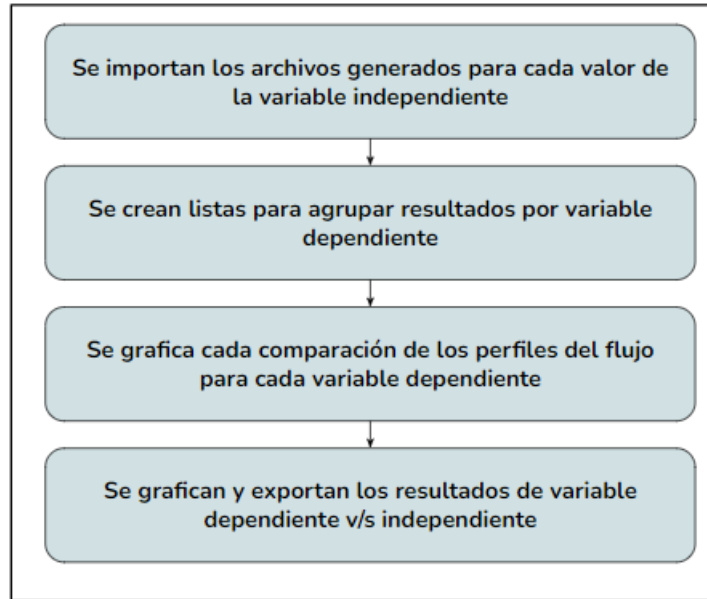


Figura 3.7: Esquema de funcionamiento del "archivo tipo" 2 *Mathematica*

En el caso del experimento de la evaluación de la geometría elíptica, la variación de cada semieje se considera un experimento independiente, por lo que se utiliza y modifica este archivo 2 veces, una vez para comparar la variación del semieje mayor y una segunda vez para comparar la variación del semieje menor.

- En caso de ser necesario, si se requiere hacer la comparación de 2 o más experimentos se utiliza el "archivo tipo" 3, cuyo esquema se muestra a continuación:

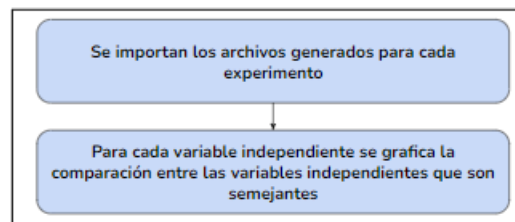


Figura 3.8: Esquema de funcionamiento del "archivo tipo" 3 *Mathematica*.

Para el caso de la evaluación de la geometría elíptica, este archivo se utiliza para comparar el comportamiento de la variación del semieje mayor vs el semieje menor.

El código de cada "archivo tipo" se muestra en el ANEXO B.

Pese a que para todos los experimentos a realizar, la metodología es la misma, en cada uno de ellos y en cada variación de los parámetros dentro del experimento se deben establecer parámetros únicos o modificaciones en el código de programación. Debido a lo anterior es importante mencionar algunas fuentes de posibles errores en los resultados a obtener, dichas fuentes de errores pueden ser: calidad o resolución de la geometría a utilizar, cantidad de rayos por simulación, número de segmentos en el rango angular en los cuales se mide el flujo energético puntual o bien un error en el código de programación.

Durante el proceso de generación de resultados se varió la cantidad de segmentos,  $n_s$ , en que se divide el rango angular ( $[-180,180]$ ), para hacer el conteo de fotones, evaluando para  $n_s = 100$ ,  $n_s = 200$  y  $n_s = 300$ , como se muestra en la Figura 3.9, obteniéndose que para  $n=300$  la curva de resultado presenta menos variación con respecto a los otros valores de  $n_s$  evaluados. Debido a esto, se estableció  $n_s=300$ . para todos los experimentos.

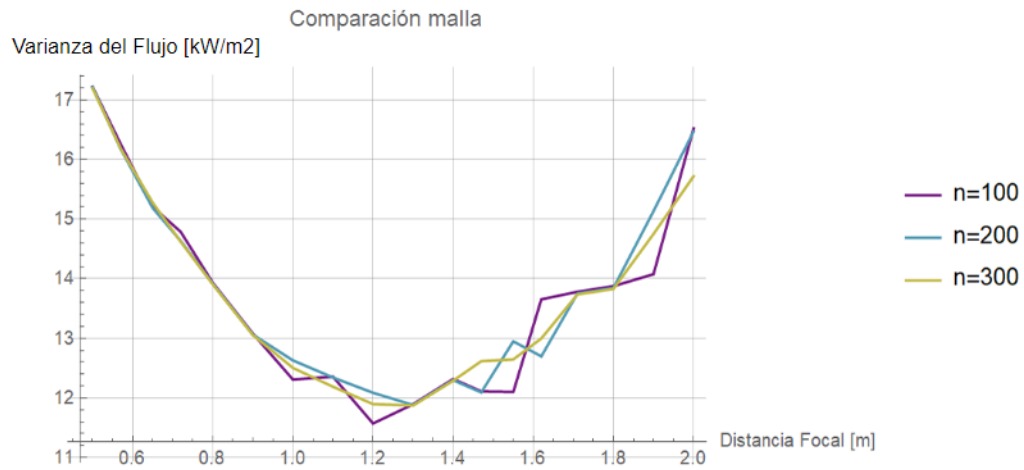


Figura 3.9: Variación número de segmentos de división del rango angular.

# Capítulo 4

## Experimentos y resultados

En este capítulo se explican y esquematizan los experimentos realizados, indicando las variables utilizadas; independientes y dependientes, su rango de variación y posteriormente los resultados obtenidos más relevantes para cada experimento, el resto de los resultados de los experimentos realizados muestran en el Anexo A.

### 4.1. Variación de la distancia focal

En este experimento se varía la distancia focal desde  $f = 0,5[m]$  hasta  $f = 2[m]$ , estableciendo 18 puntos de medición, manteniendo fijo el radio del receptor en  $r = 35[mm]$ , también, como se indicó anteriormente, se mantiene la apertura en  $A = 5.76[m]$ . En la Figura 4.1 se muestran las formas de la parábola y la posición de receptor para los valores mínimo y máximo de  $f$ . Con el fin de mostrar el trazado de los rayos, para la generación de la Figura 4.1, el número de rayos se estable en  $n = 300$  ya que el valor para cada simulación es del 10 millones.

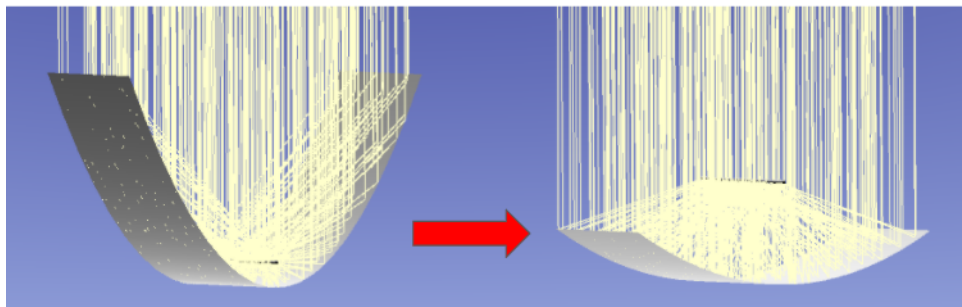


Figura 4.1: Forma de la parábola y posición del receptor para valores  $f = 0,5[m]$  y  $f = 2[m]$  respectivamente.

A continuación se muestran los resultados más relevantes para el experimento de variación de la distancia focal:

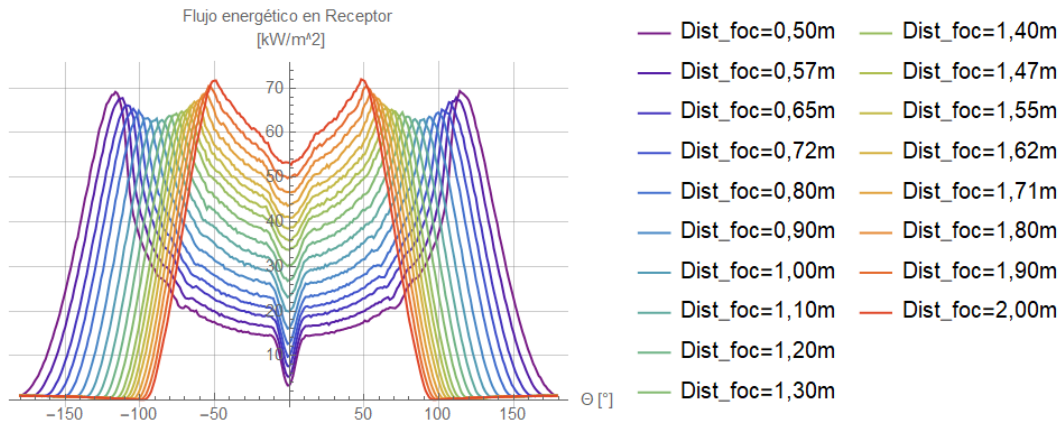


Figura 4.2: Flujo energético presente en el receptor para diferentes valores de distancia focal.

En la Figura 4.2, se muestra el flujo energético presente en el receptor para diferentes valores de  $f$ . De modo general se puede observar que el flujo no es uniforme a lo largo de la superficie del receptor y presenta 2 peaks simétricos que varía entre los  $50^\circ$  y  $120^\circ$  según el valor de  $f$ . Además, al disminuir  $f$ , aumenta el rango en donde hay flujo.

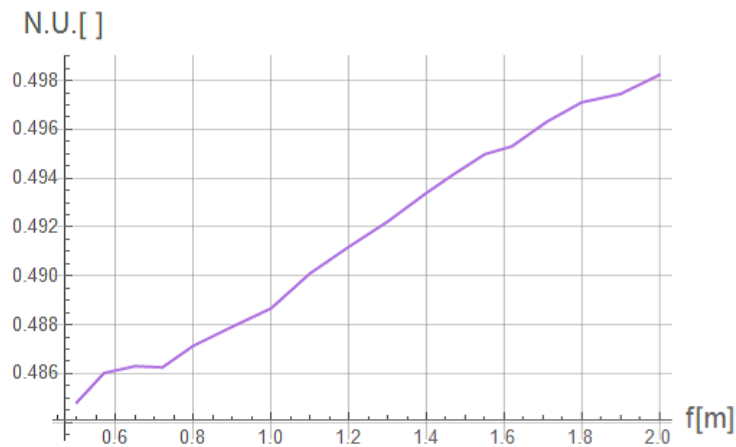


Figura 4.3: Valor del parámetro No Uniformidad( $N.U.$ ) vs la distancia focal  $f$

En la Figura 4.3 se puede observar que el parámetro  $N.U.$  presenta una tendencia creciente, a modo general, de forma lineal con cierta irregularidad. El parámetro  $N.U.$  se ve afectado mayormente cuando se aumenta el valor del flujo mínimo. Al disminuir la distancia focal, el flujo energético se distribuye de manera diferente, permitiendo que aumente el valor del flujo mínimo.

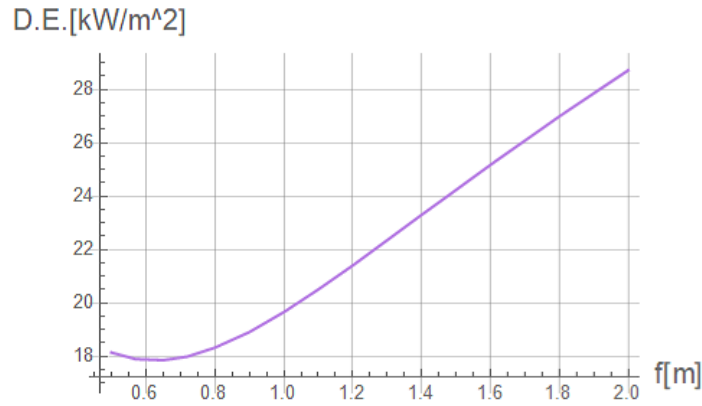


Figura 4.4: Desviación estándar del flujo energético en el receptor ( $D.E.$ ) vs la distancia focal  $f$ .

Como se puede apreciar en la Figura 4.4 el parámetro  $D.E.$ , presenta un comportamiento parabólico, con un mínimo presente en  $f = 0.6[m]$ . A menor distancia focal el flujo energético se distribuye parcialmente por la superficie de manera más uniforme, provocando que la diferencia entre el flujo promedio y el flujo puntual sea menor.

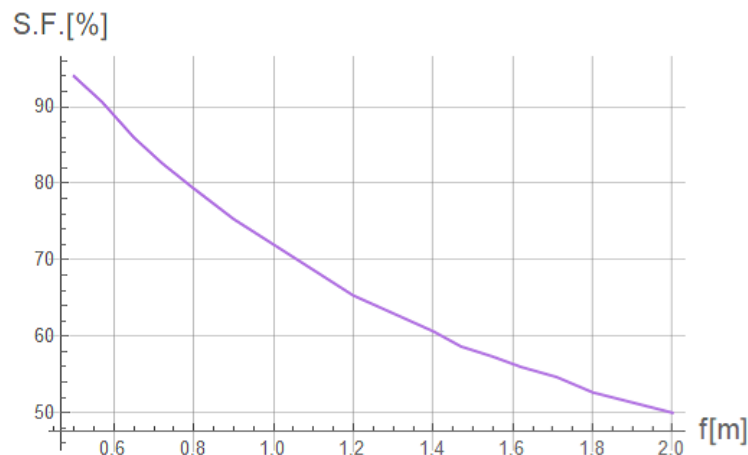


Figura 4.5: Porcentaje de superficie con flujo  $S.F.$  vs la distancia focal  $f$

La variable  $S.F.$  mostrada en la Figura 4.5 presenta una tendencia estrictamente decreciente en el dominio evaluado con una forma parabólica. A una menor distancia focal, un mayor porcentaje de la superficie del receptor recibe flujo, esto se debe a que, como se muestra en la Figura 4.1, parte de la radiación llega por la parte superior del receptor. Por otro lado, el flujo percibido en la parte inferior decae notoriamente.

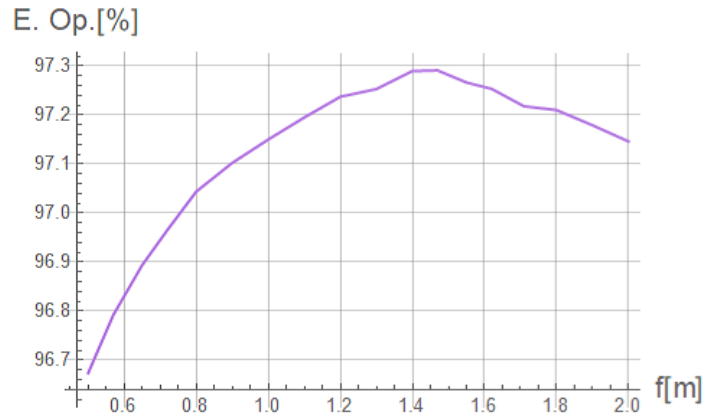


Figura 4.6: Eficiencia óptica ( $E.Op$ ) vs la distancia focal  $f$

El comportamiento de la Eficiencia Óptica al variar la distancia focal, es representado en la Figura 4.6, en donde se puede notar que la variable presenta un comportamiento parabólico con un máximo presente en  $f \sim 1.45[m]$ , pese a que la diferencia entre el máximo y el mínimo es solo de un 0.6 %.

## 4.2. Variación de distancia focal en diferentes radios

Al igual que en el experimento anterior, se varía la distancia focal  $f$ , pero en este caso, se realiza la variación en diferentes valores del radio del receptor, este se varía desde  $r = 10[mm]$  a  $r = 50[mm]$  y se comparan los resultados entre los distintos valores de  $r$ . Se mide en 5 valores de  $r$  y 5 valores de  $f$ . En la Figura 4.7, se muestra dicha variación.

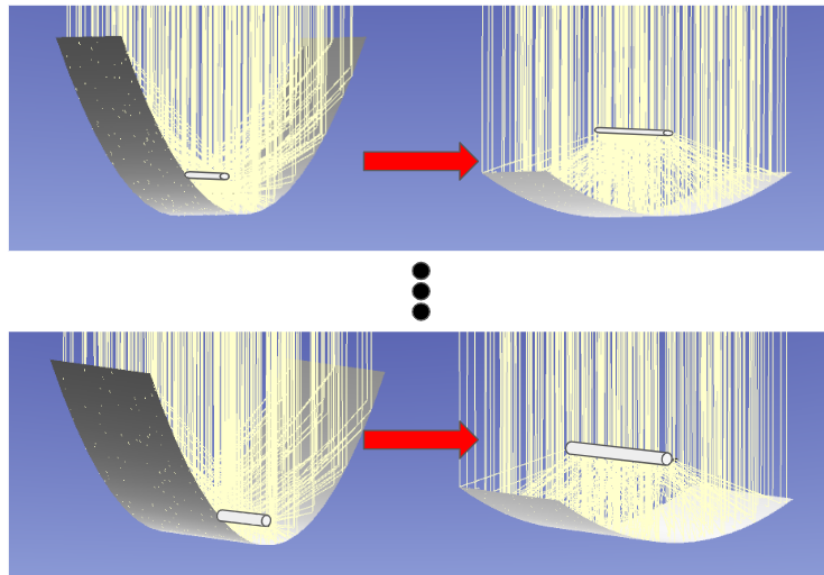


Figura 4.7: Variación de distancia focal para diferentes valores de  $r$ .  
 Figura superior  $r = 10[mm]$ , Figura inferior  $r = 50[mm]$ .  
 Lado izquierdo  $f = 50cm$  y lado derecho  $f = 200cm$ .



A continuación, en la Figura 4.8, se muestran los perfiles de flujo obtenidos para los valores máximo y mínimo de  $r$  (10mm y 50 mm), posteriormente se muestran las curvas obtenidas en cada variable dependiente.

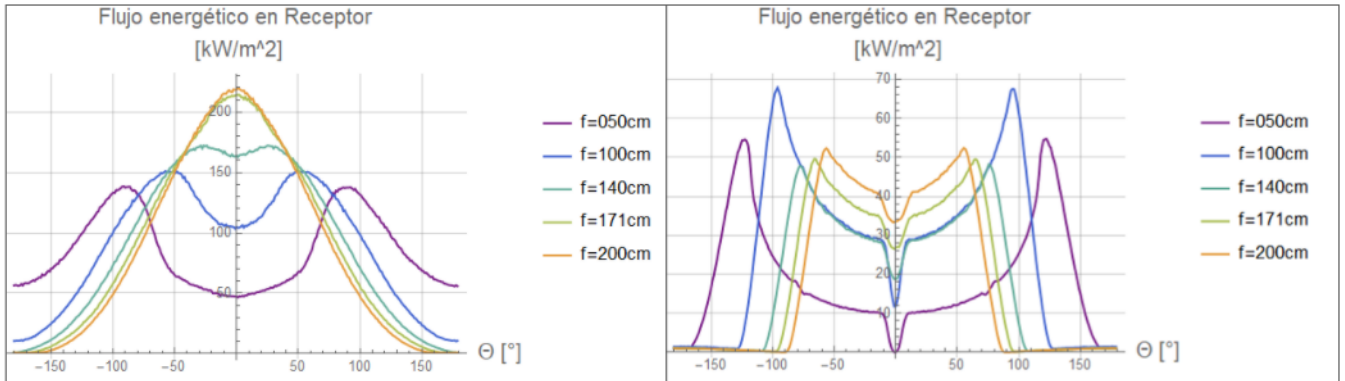


Figura 4.8: Flujo energético en el receptor para distintos valores de  $f$  evaluados en valores de  $r = 10mm$  (izquierda) y  $r = 50mm$  (derecha).

Al observar la Figura 4.8, es posible notar que en el radio menor ( $r=10$  mm), el flujo energético se distribuye en una mayor superficie del receptor y también la forma de la distribución cambia, de tal manera que los peaks simétricos son más atenuados en comparación al radio mayor ( $r=50mm$ ) y para valores de  $f = 171cm$  y  $f = 200cm$  solo hay un peak central en la parte inferior del receptor ( $\Theta = 0^\circ$ )

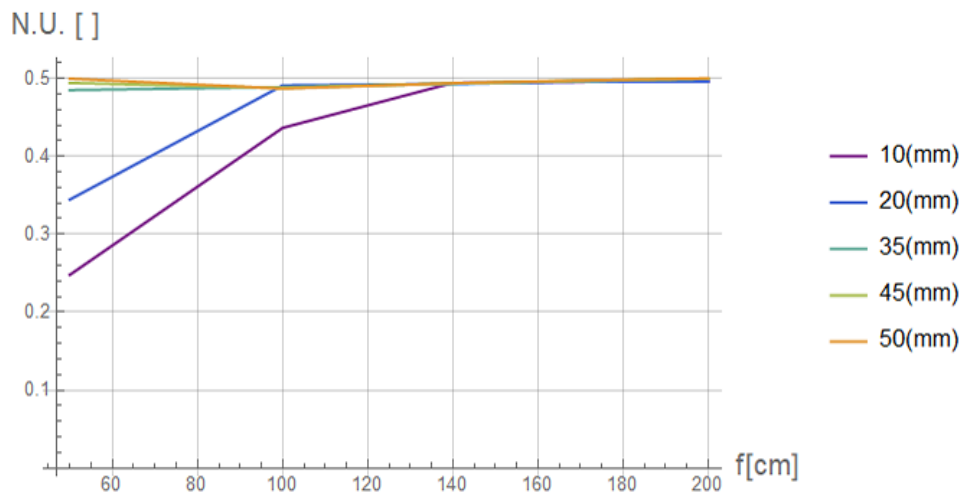


Figura 4.9: No uniformidad vs distancia focal para distintos valores de  $r$ .

En la Figura 4.9 se puede observar que se obtienen valores similares y casi constantes de N.U. para los de 35 a 50 mm. Para los menores de valores de los radios ( $r = 10mm$  y  $r = 20mm$ ) y para distancias focales menores a 140 cm, decrece el valor del N.U., pues disminuye la diferencia entre máximo y el mínimo valor del flujo presente en el receptor.

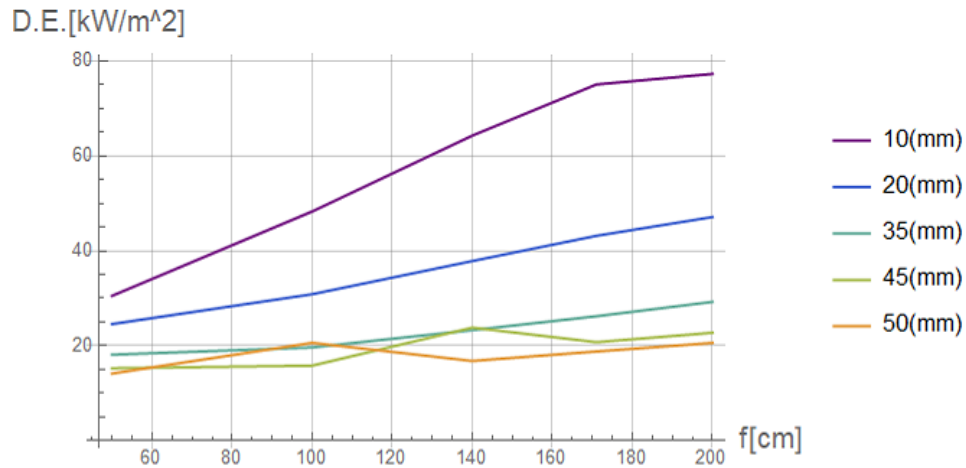


Figura 4.10: Desviación estándar vs distancia focal para distintos valores de  $r$ .

Al aumentar la distancia focal el flujo tiende a concentrarse en la parte inferior del receptor y en los radios menores (10 y 20 mm) debido a los altos valores de concentración, la variación del flujo en el receptor es mayor, como es observado en la Figura 4.10.

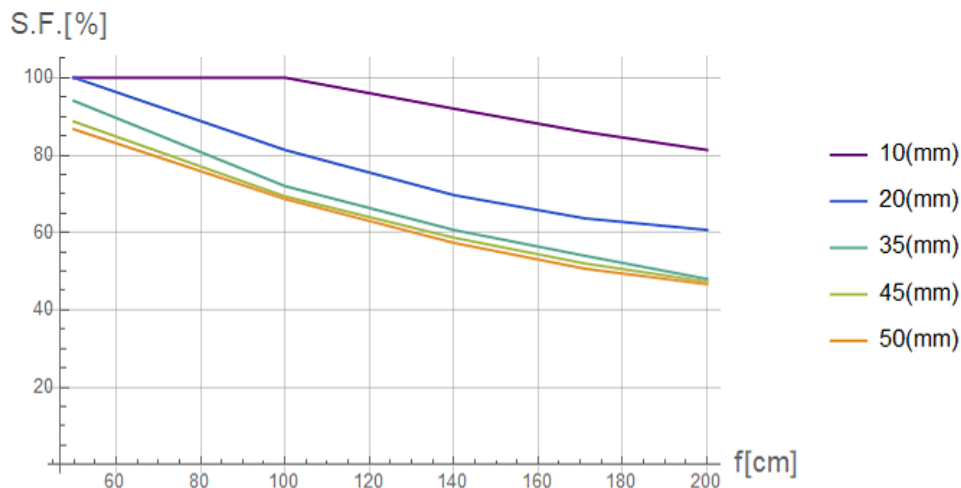


Figura 4.11: Porcentaje de superficie con flujo vs distancia focal para distintos valores de  $r$ .

Como se observa en la Figura 4.11, al ir aumentando la distancia focal, el porcentaje de superficie con flujo disminuye, eso se debe a que un aumento de  $f$  implica que el flujo energético se distribuye preferentemente en la parte inferior del receptor dejando a la parte superior sin concentración de flujo. Este comportamiento tiene la misma tendencia entre los diferentes radios, pero el valor S.F. aumenta al disminuir el radio. Para el radio  $r = 10mm$  el valor de S.F. no presenta variación en  $f = 50cm$  a  $f = 100cm$ .

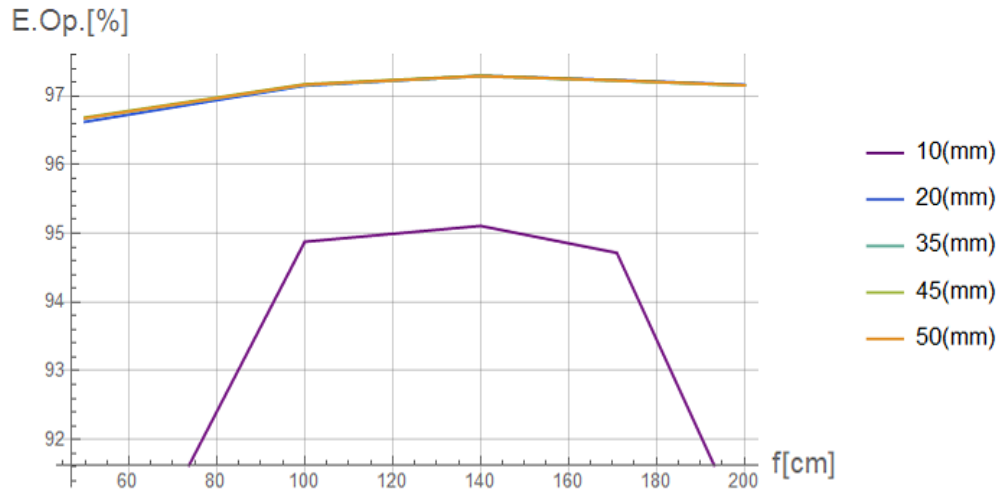


Figura 4.12: Eficiencia óptica vs distancia focal para distintos valores de  $r$ .

En la Figura 4.12 se puede observar que para radios de 20 a 50 mm, se obtienen valores similares de eficiencia óptica, con una tendencia parabólica, en donde se presenta un peak en  $f = 140$ . El radio  $r = 10mm$  muestra un comportamiento notoriamente diferente es los otros radios; presenta una eficiencia menor y su peak supera levemente el 95 %.

### 4.3. Variación del radio

Para este experimento se utilizan los resultados obtenidos al variar la distancia focal v/s el radio, pero se reportan y grafican los resultados de manera inversa, es decir, para diferentes valores  $f$  se evalúa y observa el comportamiento de la variación del radio del receptor. En la Figura 4.13, se muestra la variación de radio para los valores extremos de  $f$  (50 cm y 200 cm).

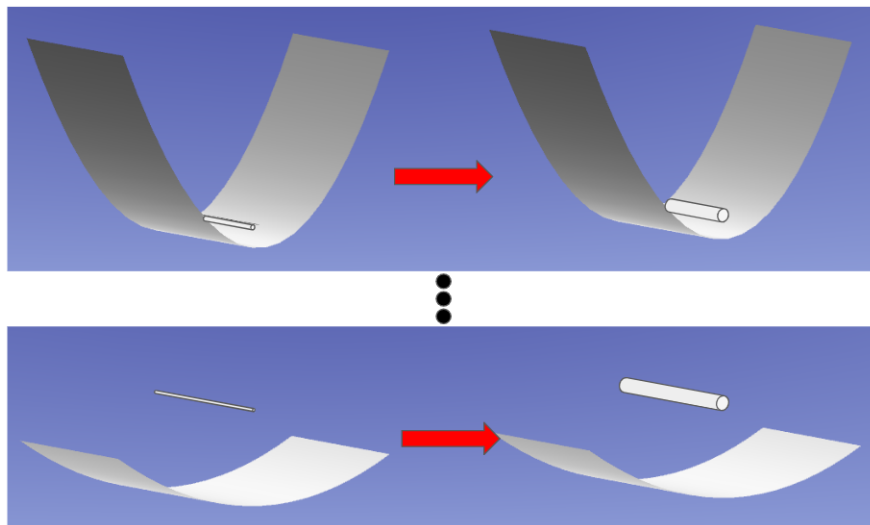


Figura 4.13: Variación de radio para distintos valores de  $f$   
 Arriba  $f = 50cm$  y abajo  $f = 200cm$ .  
 Izquierda  $r = 10mm$  y derecha  $r = 50mm$ .

La distribución del flujo energético en relación al ángulo  $\theta$  se evalúa independientemente para cada valor de  $f$  y se analiza la variación del radio del receptor. En la Figura 4.14 se muestran los perfiles del flujo energético en el receptor frente a la variación del radio del receptor para 2 valores de  $f$  (los valores extremos).

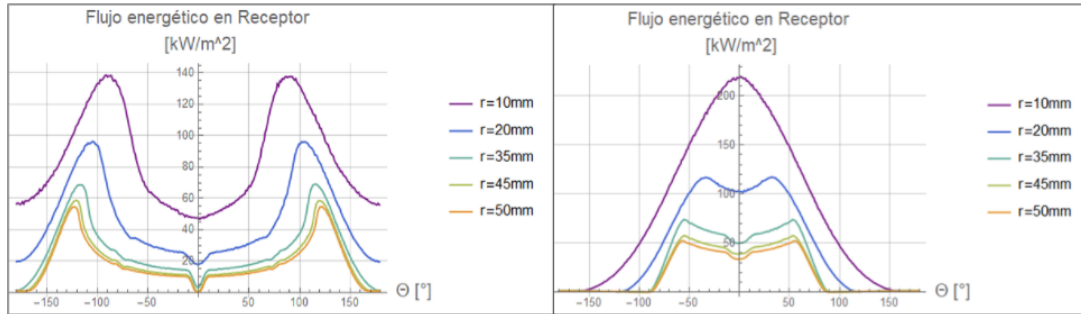


Figura 4.14: Flujo energético para diferentes valores de  $r$ . A la izquierda  $f = 50\text{cm}$  y a la derecha  $f = 200\text{cm}$ .

Como es posible notar en la Figura 4.14, para la distancia focal menor ( $f = 50\text{cm}$ ), los peaks simétricos de flujo energéticos son más notorios que en la distancia focal mayor y alcanzan un valor máximo menor.

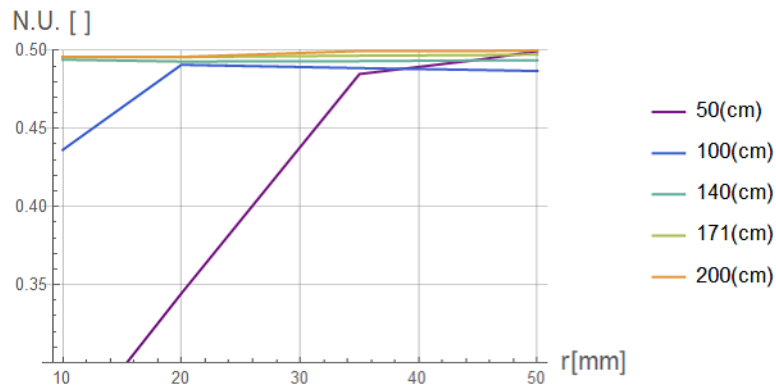


Figura 4.15: No uniformidad vs radio del receptor para diferentes valores de  $f$ .

La Figura 4.15 muestra que para valores de  $f$  por sobre los 140 cm, se obtiene un valor muy similar de N.U. y estos no siguen una tendencia de decrecimiento o crecimiento similar, mientras que para los valores de  $f = 100\text{cm}$  y  $f = 50\text{cm}$  al aumentar el valor mínimo del flujo el parámetro de N.U. disminuye.

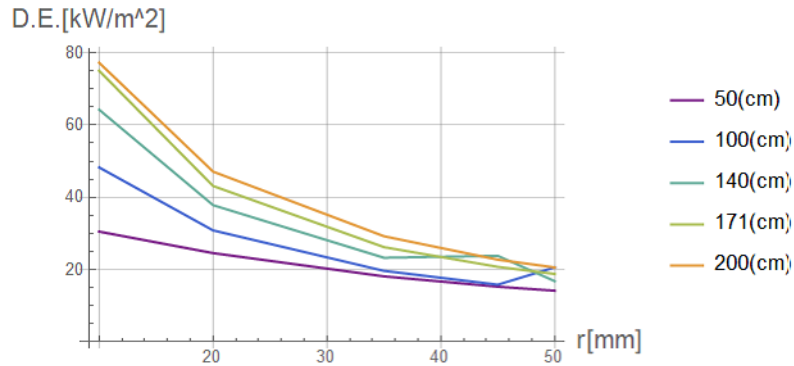


Figura 4.16: Desviación estándar vs radio del receptor para diferentes valores de  $f$

En la Figura 4.16 se puede observar que el valor de la desviación estándar decrece cuando se aumenta el valor del radio del receptor, pues el flujo se distribuye en una mayor superficie y este decrece su valor, lo que implica que exista una menor diferencia entre el flujo puntual y el flujo promedio. También se desprende de este resultado que al aumentar la distancia focal en los radios menores (10mm en mayor medida y 20 mm en menor medida) el valor de la desviación aumenta considerablemente con respecto a los otros radios evaluados.

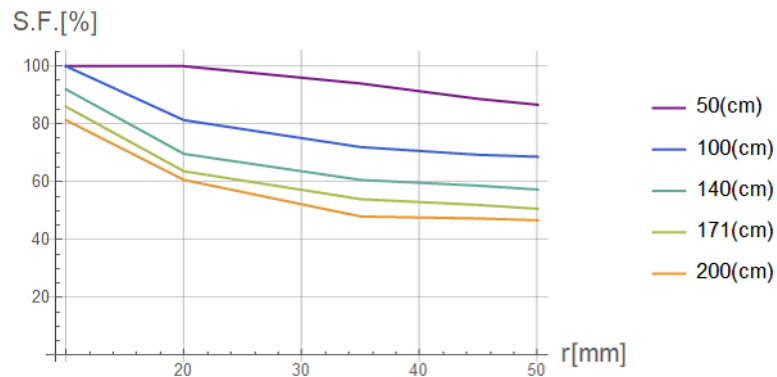


Figura 4.17: Porcentaje de superficie con flujo vs radio del receptor para diferentes valores de  $f$ .

La Figura 4.17 muestra que al aumentar el valor del radio de 10mm a 50 mm, el porcentaje de superficie con flujo disminuye gradualmente y para valores mayores de  $f$  el porcentaje es aún menor. Este comportamiento se debe principalmente a que al aumentar el radio del receptor, una parte de él no recibe flujo.

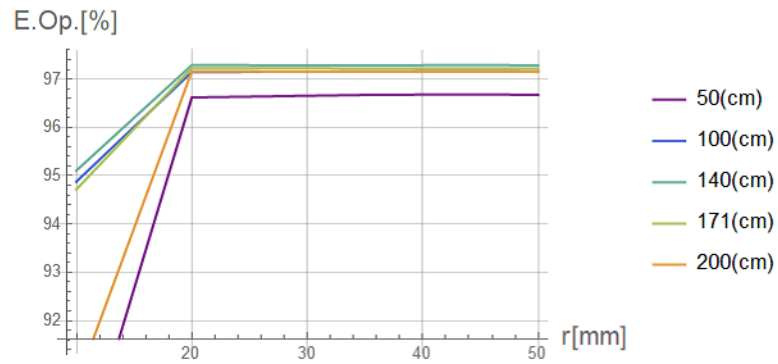


Figura 4.18: Eficiencia Óptica vs radio del receptor para diferentes valores de  $f$ .

El gráfico de la Figura 4.18 muestra que por los sobre valores de  $r = 20mm$  los valores de E.Op son constantes para cada valor de  $f$ , mientras que para  $r = 10mm$  el valor de la eficiencia decae considerablemente. Para La distancia focal  $f = 140cm$  se alcanza un máximo de eficiencia, levemente por sobre las otras distancias focales evaluadas.

## 4.4. Variación del ángulo cenital

En este experimento se desea analizar el comportamiento que tiene en la distribución del flujo energético del receptor la variación del ángulo del Zenit, que es descrito en el capítulo 2, sección 2.3. Se varía el ángulo cenital desde  $\Theta_z = 0^\circ$  hasta  $\Theta_z = 45^\circ$ , tal variación es representada en la Figura 4.19. En este experimento se mantiene fija la distancia focal en  $f = 171\text{cm}$  y el radio del receptor en  $r = 35\text{mm}$ .

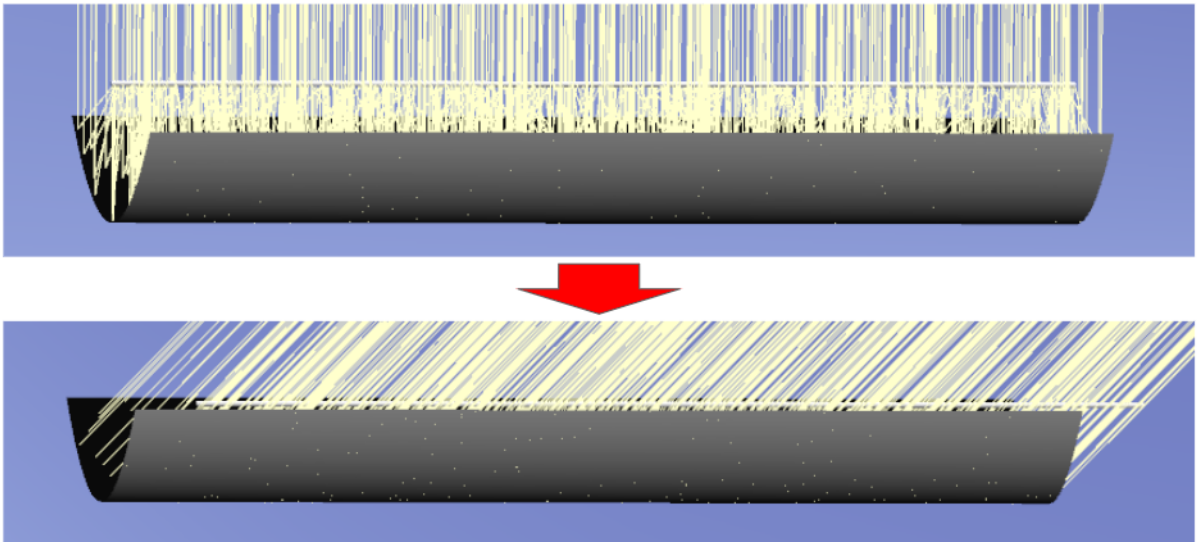


Figura 4.19: Variación del ángulo Cenital. Arriba  $\Theta_z = 0^\circ$  y abajo  $\Theta_z = 45^\circ$

A continuación, en la Figura 4.20, se muestra el flujo energético en el receptor para cada valor de  $\Theta_z$  (Ángulo cenital), en donde se puede observar de a modo general, que la variación del ángulo cenital no tiene mayor incidencia en la forma del perfil del flujo energético, pero sí en la magnitud del mismo.

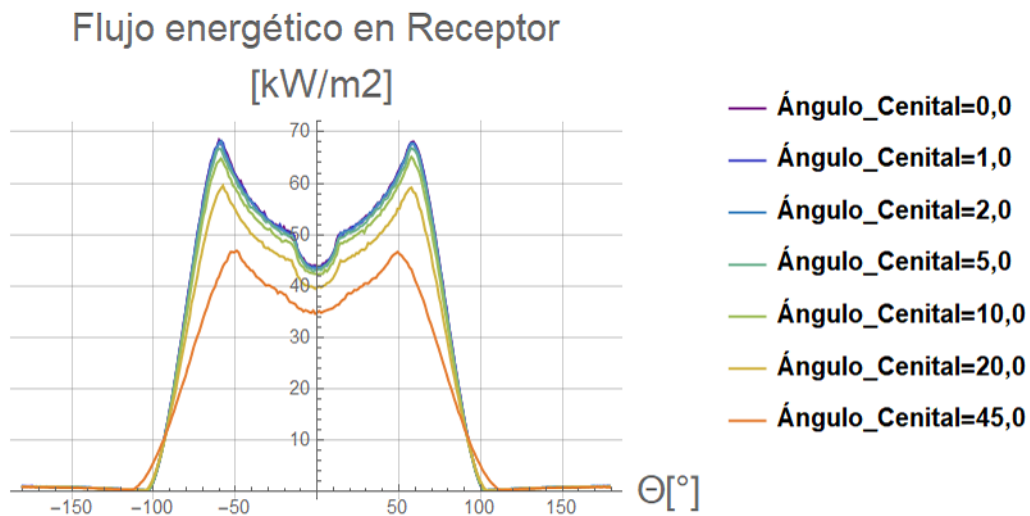


Figura 4.20: Flujo energético en el receptor para diferentes valores del ángulo cenital.

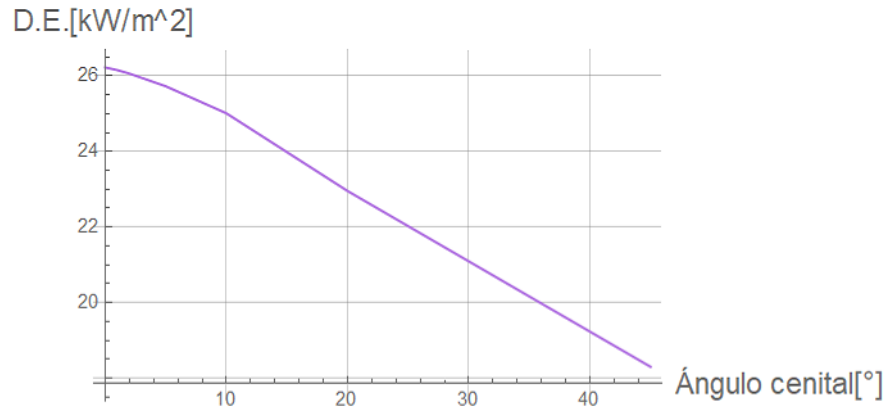


Figura 4.21: Desviación estándar vs ángulo cenital.

En la Figura 4.21 se puede notar que la desviación estándar del flujo disminuye al aumentar el valor de  $\Theta_z$ , pues al aumentar  $\Theta_z$  una parte del receptor no recibe flujo energético y además el ángulo de inclinación causa la pérdida o efecto del coseno. Lo anterior provoca que el receptor reciba una menor energía total lo que hace el flujo energético disminuya, sumado a que se mantiene la forma del perfil del flujo, la desviación estándar disminuye, provocando un flujo más uniforme.

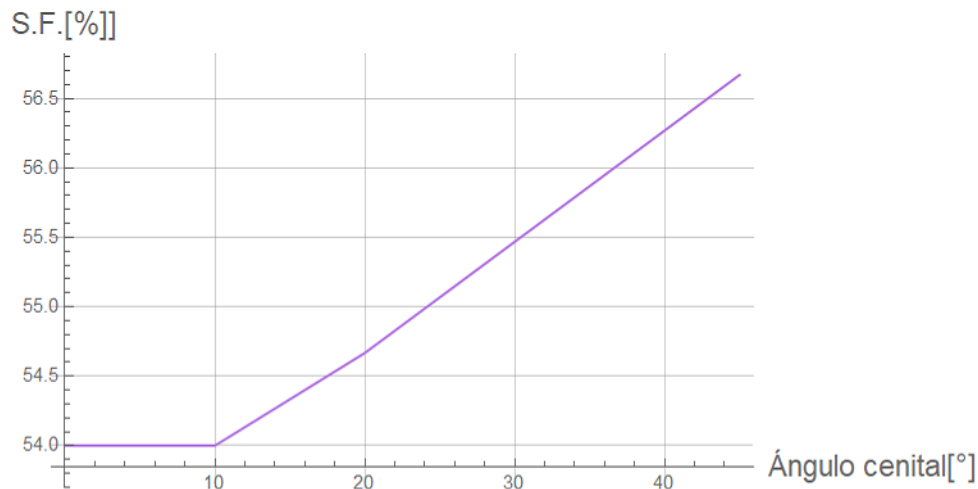


Figura 4.22: Porcentaje de superficie con flujo vs ángulo cenital.

En la Figura 4.22 se observa que el porcentaje de superficie con flujo aumenta al aumentar  $\Theta_z$  (excepto de  $0^\circ$  a  $10^\circ$ ), ese comportamiento se debe a que al incidir los rayos una inclinación, sumado a la forma parabólica del colector, se distribuyen de una manera diferente en el receptor. A pesar de esta tendencia, la diferencia del S.F. entre  $\Theta_z = 0^\circ$  y  $\Theta_z = 45^\circ$  es de solo 2.7%. Además al observar la Figura 4.19 se posible notar que para el valor de  $\Theta_z = 45^\circ$  el perfil difiere de los demás en cuanto a la forma en que decae el flujo en la parte central inferior, lo que sugiere que los rayos también inciden por debajo del receptor debido a la inclinación presente.



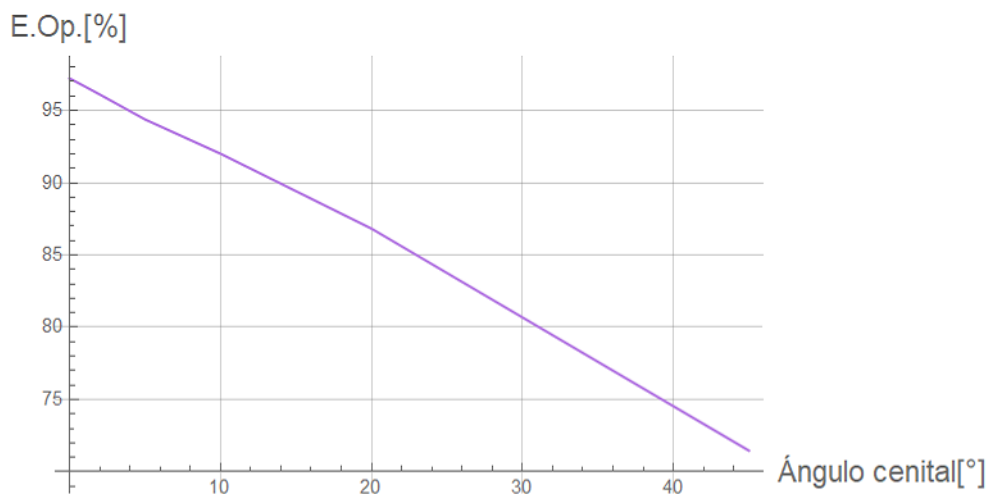


Figura 4.23: Eficiencia óptica vs ángulo cenital.

La inclinación de los rayos solares según la variación del ángulo cenital tiene asociada una pérdida de rayos que no llegan al receptor, por ello, la eficiencia óptica decae, como se muestra en la Figura 4.23. Cabe mencionar que para este experimento y la medición de esta variable, influye el largo del colector, pues, a mayor largo, menor será la pérdida de rayos porcentualmente.

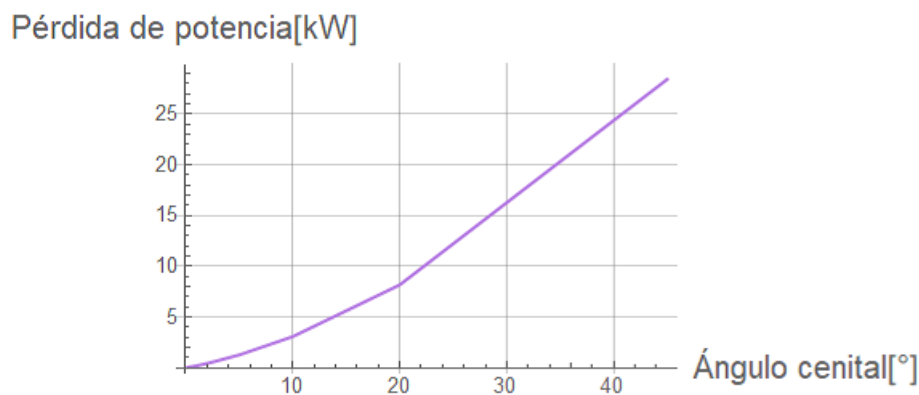


Figura 4.24: Pérdida de potencia vs ángulo cenital.

Debido a lo mencionado en el resultado anterior, se procede a medir cuando es la pérdida de potencia que llega al colector al variar el ángulo cenital, de tal manera que el largo del colector no sea una variable que tenga incidencia en el resultado. Como es de esperar, al aumentar el ángulo cenital hay un mayor pérdida de potencia, que está relacionada con la ausencia de rayos en un extremo del colector (ver Figura 4.25) adicionalmente de la pérdida o efecto del coseno producto de la inclinación de los rayos.

Como se tiene la pérdida total de potencia en el colector, se desea calcular cuanta corresponde a debido al coseno, entre el área de apertura y los rayos solares, y cuanta es por la falta de los rayos solares en el receptor. A continuación se muestran cada una de las pérdidas asociadas al ángulo cenital y la comparación entre el cálculo analítico y el valor entregado por el software.

Tabla 4.1: Cálculo de pérdida de potencia por coseno y por ausencia de rayos solares frente a la variación de  $\Theta_z$ .

Ángulo [°]	Cálculo analítico			Potencia final[kW]	Potencia en Simulación [kW]	Error
	Potencia perdida [kW]					
	Coseno	Porción del receptor sin rayos	Total			
0	0,00	0,00	0,00	69,10	69,10	0,0%
1	0,01	0,17	0,18	68,92	68,90	0,0%
2	0,04	0,34	0,39	68,71	68,67	0,1%
5	0,26	0,86	1,12	67,98	67,83	0,2%
10	1,05	1,71	2,76	66,34	66,03	0,5%
20	4,17	3,37	7,53	61,56	60,93	1,0%
45	20,24	6,96	27,20	41,90	40,66	3,0%

De la tabla anterior se puede desprender que hasta cierto ángulo ( $\Theta_z$  10) la pérdida por coseno es menor a la pérdida por la ausencia de los rayos solares en el receptor, pasado ese ángulo, la pérdida por el coseno es mayor.

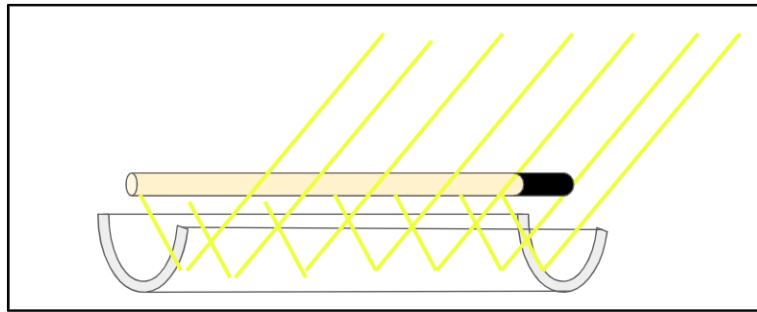


Figura 4.25: Pérdida de potencia en el receptor por ausencia de rayos solares (extremo negro).

## 4.5. Geometría Hexagonal

Este experimento tiene por objetivo medir y analizar el impacto que tiene el uso de un receptor de perfil hexagonal, en el colector cilindro parabólico. Este perfil, tal como se muestra en la Figura 4.26, corresponde a un hexágono regular, parametrizado con la variable  $a$ , que corresponde a la distancia del centro a un vértice. Se evalúa su performance variando el parámetro  $a$  de 10mm a 50mm y en 2 orientaciones: Horizontal y vertical. Además de comparar las 2 orientaciones, se compara con el perfil circular de radio similar.

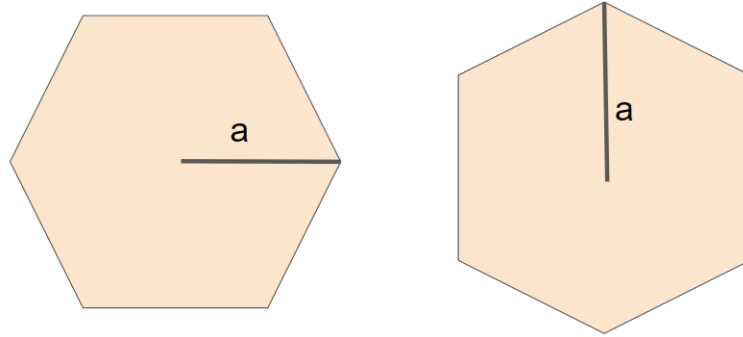


Figura 4.26: Perfil hexagonal en su orientación horizontal y vertical respectivamente.

Los perfiles del flujo energético en el receptor para la geometría Hexagonal en sus orientaciones horizontal y vertical, son mostrados en la Figura 4.27, en la cual se puede notar la diferencia de forma del perfil para cada valor de  $a$ , esta diferencia es más notoria en los valores de  $a = 10mm$  y  $a = 20mm$ . También es posible notar que para dichos radios, los puntos de inflexión en la forma del perfil del flujo corresponden los ángulos de los vértices del hexágono: para la orientación horizontal estos son en  $\Theta = 30^\circ, \Theta = 90^\circ$  y  $\Theta = 150^\circ$  mientras que para la orientación vertical corresponden a  $\Theta = 0^\circ, \Theta = 60^\circ$  y  $\Theta = 120^\circ$ .

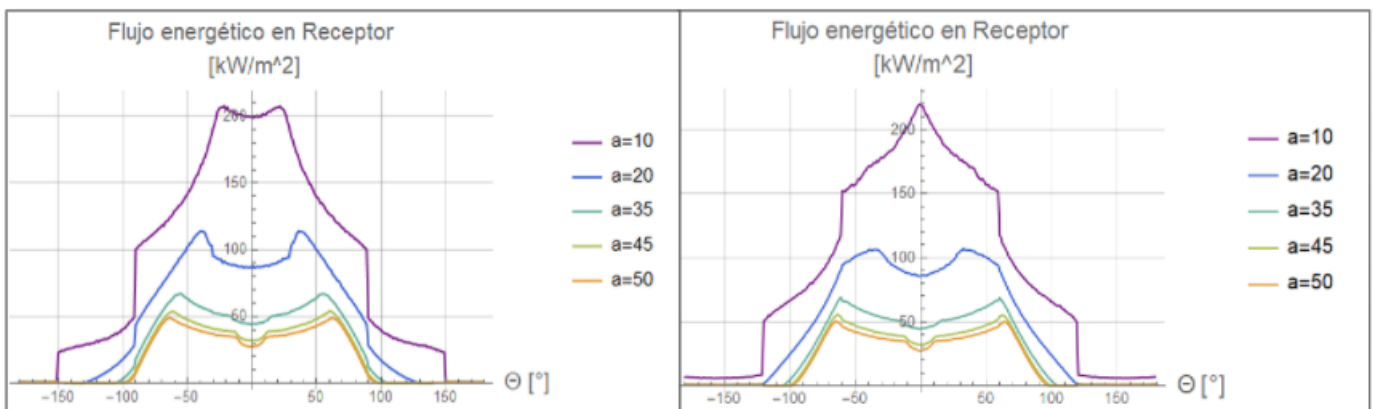


Figura 4.27: Perfiles del flujo energético para la geometría hexagonal en orientación horizontal(izquierda) y vertical(derecha).

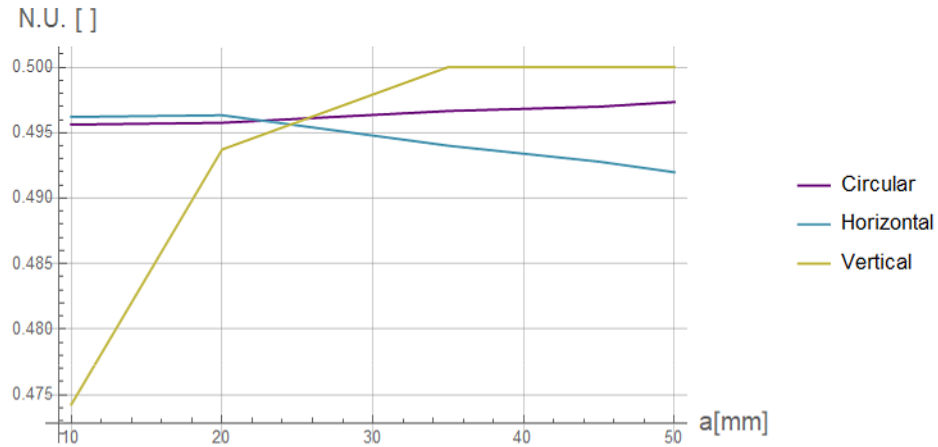


Figura 4.28: N.U. vs parámetro  $a$  para geometría hexagonal y circular.

La Figura 4.28 muestra que la variable N.U. presenta mayor variación en el rango evaluado en la orientación vertical que para la horizontal o el perfil circular. Además orientación Vertical muestra una tendencia creciente mientras que la orientación horizontal presenta una tendencia levemente decreciente. El menor valor de N.U. para  $a = 20\text{mm}$  y  $a = 10\text{mm}$  en la disposición vertical, se debe a que para dichos radios, hay un flujo presente en la parte superior del receptor para  $\Theta \geq 150^\circ$ .

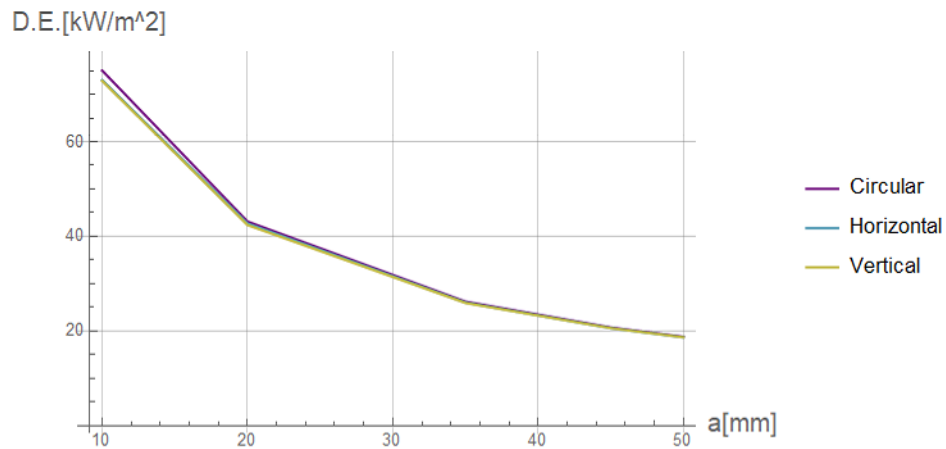


Figura 4.29: Desviación estándar vs parámetro  $a$  para geometría hexagonal y circular.

La Figura 4.29 muestra una tendencia decreciente estricta de la  $D.E.$  al aumentar el valor de  $a$  o  $r$ . La similitud entre el comportamiento del perfil hexagonal y el perfil circular, para esta variable, se debe a que, pese a que los flujos tienen leves diferentes formas, las magnitudes alcanzadas y los rangos angulares del flujo son similares.

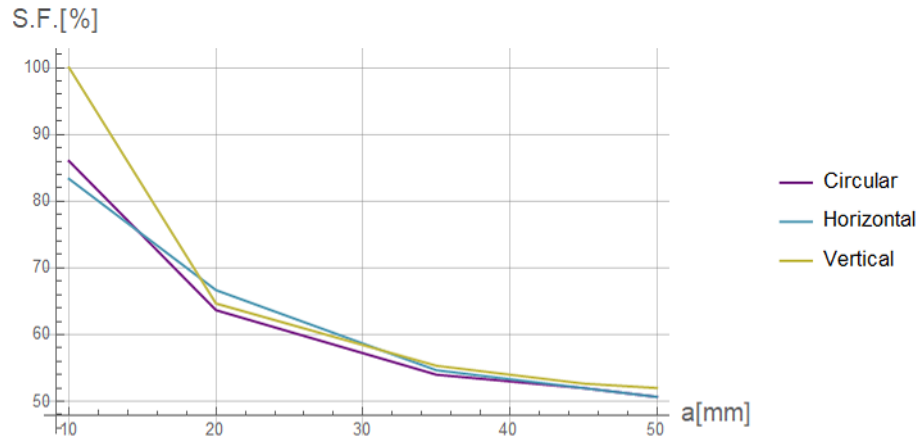


Figura 4.30: Porcentaje de superficie con flujo vs parámetro  $a$  para geometría hexagonal y circular.

El valor de S.F., como es mostrado en la Figura 4.30, disminuye al aumentar el tamaño de  $a$  y  $r$ . El comportamiento entre la disposición horizontal y la geometría circular es similar, mientras que en la disposición vertical, para el valor de  $a = 10\text{mm}$ . Como se muestra en Figura 4.26, para valores superiores a  $\Theta = 150^\circ$ , una parte del flujo concentrado llega al receptor.

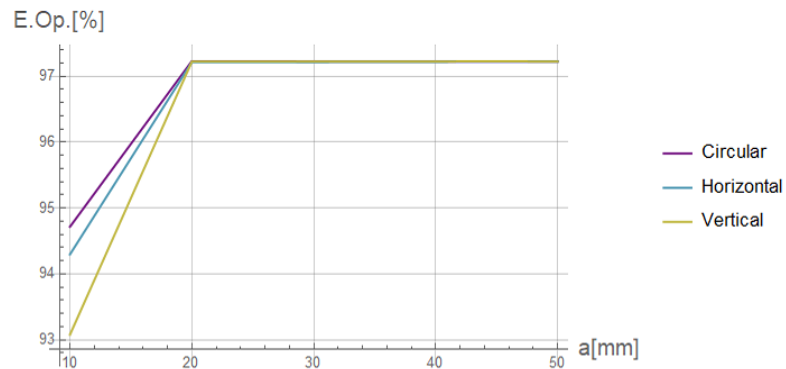


Figura 4.31: Eficiencia Óptica vs parámetro  $a$  para geometría hexagonal y circular

En la Figura 4.31, la cual muestra la eficiencia óptica vs la variación de  $a$ , es posible notar que para valores superiores a  $a = 20$  o  $r = 20$ , la eficiencia óptica es constante, mientras que para  $a = 10$  y  $r = 10$  esta decae y la forma circular tiene mayor eficiencia.

## 4.6. Geometría Elíptica

En este experimento se busca evaluar el comportamiento óptico de un perfil geométrico de forma no simétrica, como lo es un perfil de forma elíptica. Este perfil, como se muestra en la Figura 4.32 se parametriza con  $a$ , su semieje mayor y  $b$ , su semieje menor. Estos parámetros se varían de 10 a 35 mm, dejando uno fijo (en 35mm) y variando el otro.

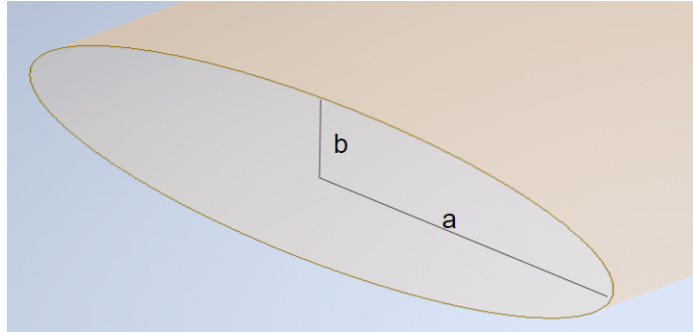


Figura 4.32: Perfil elíptico y sus parámetros  $a$  y  $b$  respectivamente.

Para la variación de cada semieje se obtienen los perfiles del flujo energético en el receptor y los resultados se muestran en la Figura 4.33, en donde es posible notar ciertas diferencias al variar el  $a$  o  $b$ . Para la variación de  $a$  el reducir su valor, el flujo tiene a presentar una mayor agudez en los peaks simétricos, y aumentar el valor el rango angular que recibe flujo, mientras que para la variación de  $b$ , al disminuir su valor, este tiende a presentar más atenuación de los peaks simétricos y casi no se presenta un aumento en el rango angular que recibe flujo.

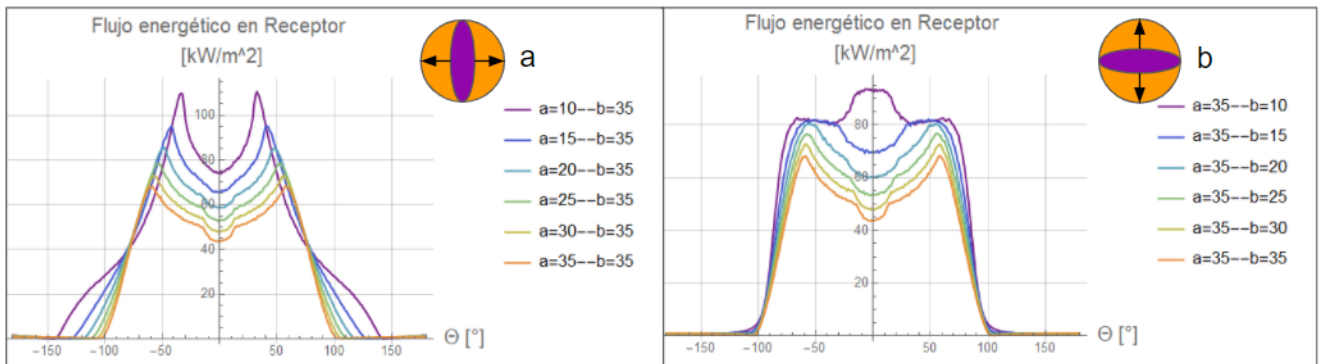


Figura 4.33: Perfil del flujo energético en receptor para las variaciones de  $a$  y  $b$ .

La primera variable a analizar es la desviación estándar, cuyo resultado se muestra en la Figura 4.34. Se puede notar que la  $D.E.$  disminuye su valor al aumentar el valor del semieje, este comportamiento se debe a que disminuye el valor del flujo, lo que causa una menor desviación. Al disminuir el valor de  $b$ , el flujo se concentra en una menor área por lo que el valor del flujo aumenta, y al no variar el rango angular donde este es distribuido, la desviación estándar aumenta.

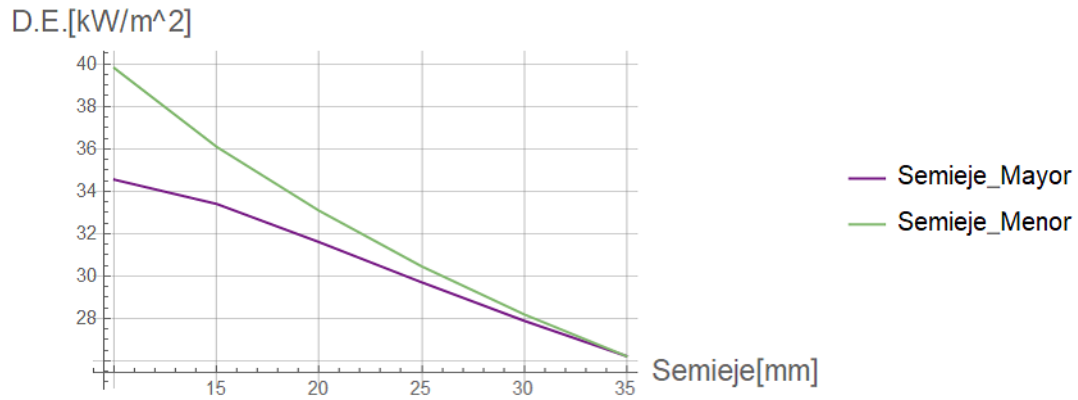


Figura 4.34: Desviación estándar vs semieje.

En donde se presenta una mayor diferencia en cuando al comportamiento óptico, es en el porcentaje de distribución del flujo, el cual se muestra en la Figura 4.35. Al disminuir el semieje mayor ( $a$ ) y teniendo en cuenta que por la distancia focal ( $f = 171$ ) los rayos provienen preferentemente de la parte inferior, se permite que al rango angular que recibe flujo aumente, abarcando una mayor superficie, comportamiento que no ocurre al variar  $b$ , pues se mantiene un ancho fijo del receptor.

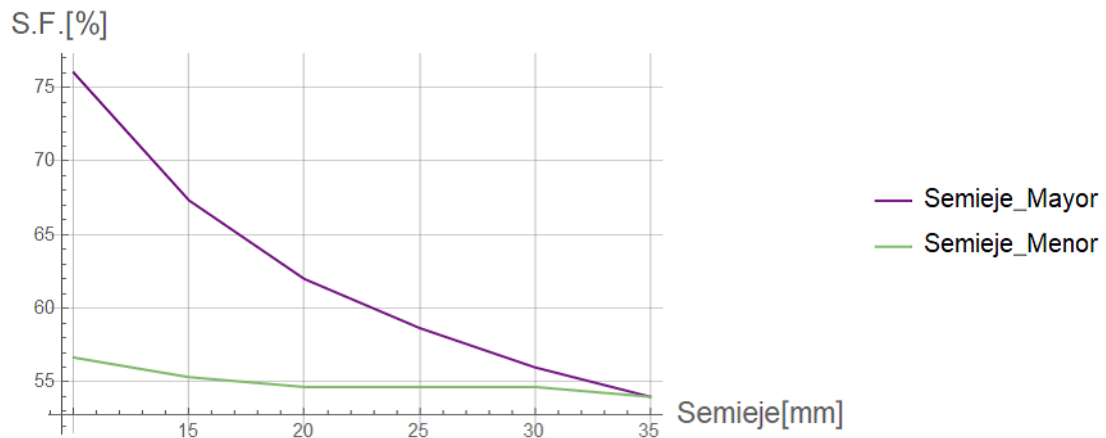


Figura 4.35: Porcentaje de superficie con flujo vs semieje.

Por último, en la Figura 4.36, en donde se muestra la Eficiencia óptica vs el valor del semieje, aprecia que para la variación del semieje mayor  $a$ , el valor es casi contante, mientras que para la variación de  $b$ , la eficiencia decae levemente (0,2 %) para  $b = 10mm$ .

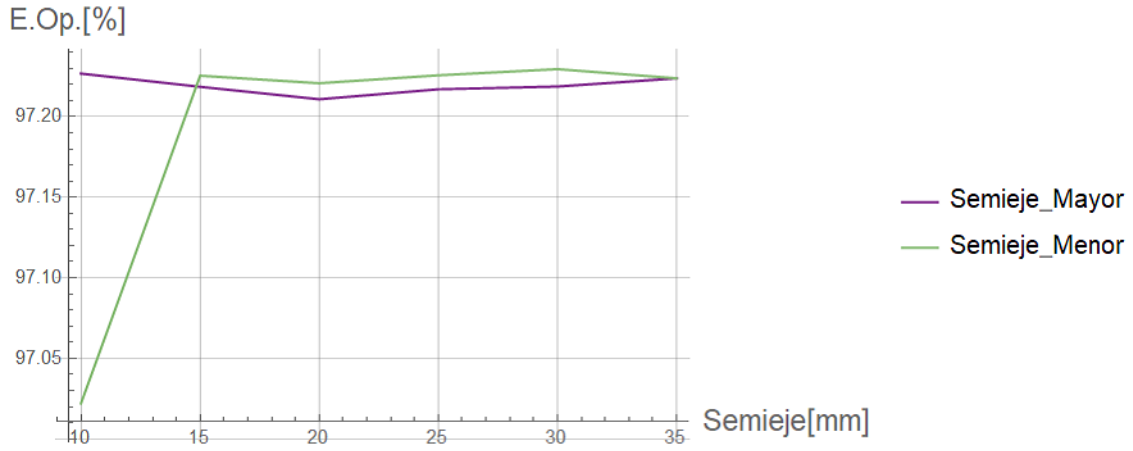


Figura 4.36: Porcentaje de superficie con flujo vs semieje.

## 4.7. Curvas de ajuste paramétrico de resultados

En los resultados expuestos en las secciones anteriores, correspondientes a los diferentes experimentos realizados, es notorio que el comportamiento de algunas variables dependientes v/s las variables independientes corresponde a uno lineal, parabólico, polinomial o bien, no sigue una tendencia marcada. Para aquellos, que presentan una tendencia de comportamiento marcada, se realiza un ajuste paramétrico con el fin de obtener una ecuación que represente dicho comportamiento y sea de utilidad para conocer el valor del indicador óptico sin necesidad de realizar el experimento.

A continuación se presentan algunos ajustes paramétricos interesantes y relevantes de mencionar para el experimento de la variación de la distancia focal acompañados de las curvas originales y las curvas de los ajustes realizados. Los ajustes de los demás experimentos se muestran en el Anexo A.

- Se realiza un ajuste polinomial de segundo grado para la evaluación de N.U. vs  $f$  (Figura 4.37), la curva obtenida es:

$$N.U.(f) = 0.4799 + 0.0094 \cdot f + 0.00001 \cdot f^2 \quad (4.1)$$

En donde se aprecia que el coeficiente que acompaña a  $f^2$  tiene un valor cercano a 0, por lo que la curva es más bien una recta.



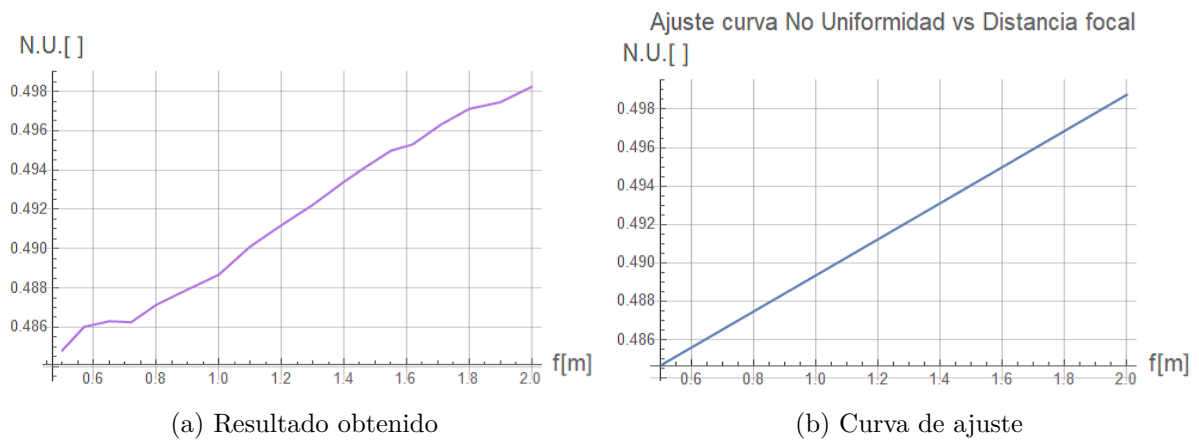


Figura 4.37: Ajuste para resultados obtenidos en N.U. vs distancia focal.

- Ajuste desviación estándar normalizada  $v/s$  distancia focal:

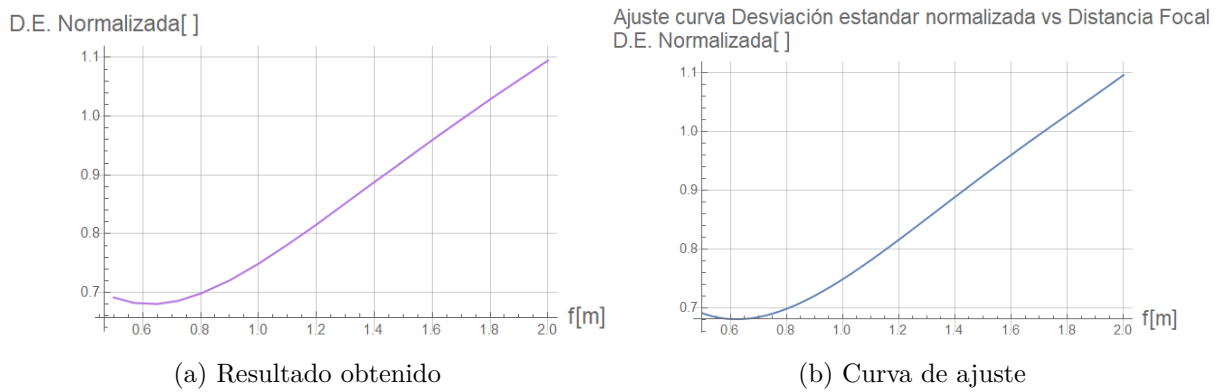


Figura 4.38: Ajuste para resultados obtenidos en N.U. vs distancia focal.

El valor de ajuste para curva mostrada en la Figura 4.38 es:

$$D.E.Normalizada(f) = 1.05834 - 1.45606 \cdot f + 1.79976^2 - 0.775976 \cdot f^3 + 0.122375 \cdot f^4 \quad (4.2)$$

Se ajusta una ecuación polinomial de cuarto grado para tener una mayor precisión de ajuste.

- Ajuste Eficiencia óptica vs distancia focal:

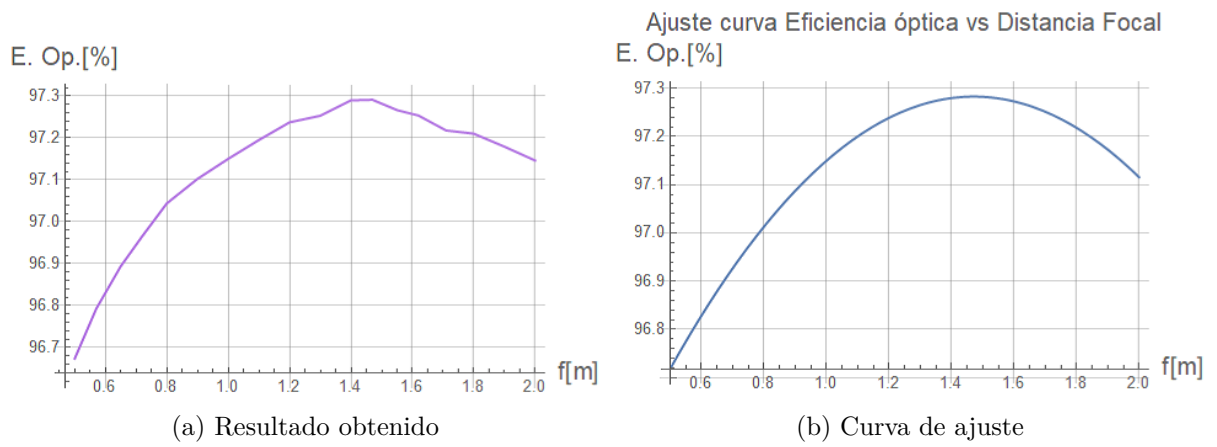


Figura 4.39: Ajuste para resultados obtenidos en E.Op. vs distancia focal.

La curva de ajuste mostrada en la Figura 4.39 corresponde a una parábola con la siguiente parametrización:

$$E.Op.(f) = 95.9882 + 1.75944 \cdot f - 0.597866 \cdot f^2 \quad (4.3)$$

Al obtener la parametrización anterior es posible encontrar el máximo de eficiencia óptica, que corresponde al vértice de la parábola, este valor se obtiene en  $f = 147cm$  y se alcanza una eficiencia de 97.28%. Si se compara con el valor de la eficiencia óptica para el valor de la distancia focal estándar ( $f = 171cm$ ) que es de 97.24% según el ajuste obtenido, corresponde a un aumento de 0.03% de eficiencia.

# Capítulo 5

## Discusión y conclusiones

### 5.1. Discusión de resultados

En esta sección se discuten y analizan de manera particular y general los resultados expuestos en el capítulo anterior.

Como primer punto a discutir está la eficiencia óptica frente a la variación de la distancia focal. En el resultado de la simulación y su posterior ajuste paramétrico, se calculó que el máximo de eficiencia óptica se encuentra en la distancia focal  $f = 147cm$ . Si se compara con la distancia focal del colector EuroTrough ( $f = 171cm$ ) existe un 16% de variación de la distancia focal. Para el experimento de la variación de radio del receptor en diferentes distancias focales, la distancia focal  $f = 140cm$  arrojó la eficiencia más alta. Si esto muestra que la distancia focal en la cual se alcanza una máxima eficiencia óptica difiere a la del colector EuroTrough, es importante mencionar que este último está diseñado y optimizado de forma global, tomando en cuenta aspectos ópticos, térmicos, dinámicos, monetarios, entre otros, en conjunto.

En el experimento de la evaluación de la geometría hexagonal y su posterior comparación de resultados con el receptor cilíndrico, es posible notar que pese a que los resultados no difieren significativamente entre las geometrías, la orientación horizontal se asemeja más que la orientación vertical al comportamiento del perfil cilíndrico.

Para el experimento de la evaluación de la geometría elíptica en donde se mostró que la variación de cada semieje implica un comportamiento distinto ya sea en la desviación estándar o en el porcentaje de superficie con flujo, se debe tener un punto importante a considerar. Los perfiles del flujo energético en el receptor se muestran en función de la coordenada angular de la geometría elíptica. Esta geometría no presenta una porción de perímetro (o arco) constante en relación a la coordenada angular es por ello que se debe tener precaución al interpretar los resultados, ya que no es lo mismo una distribución de flujo constante en relación al ángulo que con el perímetro.

En relación al experimento de la variación del ángulo cenital ( $\Theta_z$ ) en donde se puede notar que hay una menor desviación estándar al aumentar  $\Theta_z$  es necesario mencionar que este aumento de la uniformidad del flujo no necesariamente implica una mejor performance global, ya que por otro lado existe una pérdida de potencia asociada al ángulo de inclinación.

También es importante de mencionar los posibles errores de simulación o la relación que hay entre la calidad la geometría utilizar y los resultados obtenidos. Por ejemplo, en el gráfico de la Figura 4.6 es posible notar que en los radios de 20 a 50 mm casi no hay diferencia la Eficiencia óptica, mientras que para  $r = 10mm$  este valor difiere bastante. La geometría utilizada es de formato .STL, los que significa que está compuesta por pequeños triángulos, lo que a su vez implica que la geometría no es perfectamente parabólica. Esto puede ser la causa de dicha diferencia o bien, algún error de simulación o de código.

Como último punto a discutir se tiene la relación que hay entre la cantidad de mediciones realizadas los resultados obtenidos. Como se indicó en la sección anterior, para el experimento de la variación de la distancia focal con un radio del receptor de  $35mm$ , se establecieron 18 puntos de medición entre el mínimo y el máximo y los resultados obtenidos se muestran como curvas con una tendencia marcadas salvo algunas irregularidades, mientras que en los otros experimentos (variación de radio, geometría hexagonal, geometría elíptica y variación de ángulo cenital) la cantidad de mediciones es menor (aproximadamente 5 variaciones de distancias) y, a pesar de que es posible notar un comportamiento general de la curvas de resultados, estas poseen una menor suavidad o saltos más bruscos (en general para radios  $\sim 10$  mm), lo que sugiere que puede haber puntos de interés ocultos (máximos, mínimos, puntos de inflexión, etc.). Lo anterior puede repercutir en la calidad y certeza de los ajustes paramétricos calculados.

## 5.2. Conclusiones

En el trabajo realizado se cumplió el objetivo principal propuesto de caracterizar la concentración solar en el receptor de un colector cilindro parabólico mediante el ajuste de curvas que permiten conocer valores estadísticos de la distribución del flujo en el receptor frente a variaciones geométricas del colector, incluyendo diferentes formas de receptor, sin la necesidad de la realización de experimentos o simulaciones.

Los parámetros a variar fueron la distancia focal, tamaño del receptor de diferentes perfiles (circular, hexagonal y elíptico) y el ángulo cenital. Las variables a medir fueron la No uniformidad del flujo, desviación estándar, porcentaje de superficie del receptor con flujo, eficiencia óptica y potencia recibida.

En relación a la evaluación de la distancia focal, se calculó un punto de máxima eficiencia óptica de  $f = 147cm$ , que difiere con el valor de distancia focal establecida para el colector estandarizado EuroTrough ( $f = 171$ ). Lo que sugiere comparar ambos valores en una performance global. Además se calculó que el punto de mínima desviación estándar de flujo en el receptor es de  $f = 60cm$ .

En relación a la variación del radio del receptor, al disminuir este, aumenta el valor del flujo energético en el receptor y pese aumentar el porcentaje de superficie que recibe flujo, también se incrementa valor de la desviación estándar del flujo en el receptor para todas las distancias focales evaluadas. Además con un radio de  $r = 10mm$  para distancias focales de  $f = 50cm$  y  $f = 200cm$  la eficiencia óptica decae entre un 4% a 6% en relación a otra

distancias focales ( 100, 140 y 171 cm).

En relación a la evaluación del receptor de perfil hexagonal, en donde se evaluó en posición horizontal y vertical (véase Fig. 4.26), su performance es similar a la del perfil circular en todas la distancias evaluadas, excepto por pequeñas diferencias en cuanto al porcentaje de superficie con flujo y eficiencia óptica para  $a = 10mm$ .

En cuanto a la evaluación de la geometría elíptica, en donde se comparó la variación del semieje mayor contra el semieje menor, la principal diferencia está en el porcentaje de superficie con flujo (S.F.). La S.F. aumenta un 19 % para el valor de  $SemiejeMayor = 10mm$  en relación a la distancia  $SemiejeMenor = 10mm$ . Pese a presentar una mayor S.F.(76 %) no supera al receptor cilíndrico para aquella distancia focal (81 %).

Para la variación del ángulo cenital ( $\Theta_z$ ), al aumentar el ángulo, la desviación estándar disminuye. También se presenta una disminución de la eficiencia óptica y una pérdida de potencia relacionada con el aumento de  $\Theta_z$ . Hasta cierto valor de  $\Theta_z$  ( $\sim 10^\circ$ ) el factor principal de esta pérdida se debe a la porción del colector que no recibe flujo y en menor efecto a la pérdida del coseno. Cabe mencionar que el largo del colector afecta al porcentaje de pérdida por la ausencia de los rayos en el receptor pero no al porcentaje de pérdida debido al coseno de  $\Theta_z$ .

Para obtener una comparación más completa, se sugiere evaluar la geometría elíptica y hexagonal en diferentes distancias focales, así como incorporar más puntos de medición para obtener resultados más confiables.

En relación a la motivación de contribuir al estudio térmico de un colector solar de concentración, en especial para evitar grandes gradientes de temperatura que puedan ocasionar fallas por estrés térmico, mediante los resultados de los experimentos realizados, se sugiere evaluar la correlación entre la desviación estándar del flujo con el gradiente térmico en el receptor. Según los resultados obtenidos, a grandes rasgos, la desviación estándar del flujo disminuye al disminuir la distancia focal y al aumentar el radio del receptor, se esperaría que el gradiente térmico presente un comportamiento similar.

El trabajo realizado permitió desarrollar y profundizar el comportamiento óptico de los colectores solares. Con los resultados obtenidos se busca aportar a los antecedentes de los indicadores estadísticos de la distribución del flujo en el receptor los colectores solares frente a la variación geométrica de sus componentes.

# Bibliografía

- [1] IRENA. Trends in Renewable Energy. [Recurso en línea]. <https://public.tableau.com/views/IRENARETimeSeries/Charts?:embed=y&:showVizHome=no&publish=yes&:toolbar=no>
- [2] Md Tasbirul Islama, Nazmul Huda, A. B. Abdullah & R. Saidur. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 91, Pages 987-1018. 2018.
- [3] Srikanth Madala & Robert F. Boehm. A review of nonimaging solar concentrators for stationary and passive tracking applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 71, Pages 309-322. 2017.
- [4] V. Lakshminarayanan. Overview of non-imaging optics. [Recurso en línea]. <http://indico.ictp.it/event/a09136/session/60/contribution/41/material/0/0.pdf>
- [5] Esquema una panta termosolar de cilindro parabólico. [Recurso en línea]. [https://www.mdpi.com/energies/energies-12-03832/article\\_deploy/html/images/energies-12-03832-g001.png](https://www.mdpi.com/energies/energies-12-03832/article_deploy/html/images/energies-12-03832-g001.png)
- [6] American Galvanizers Association. Stirling Solar Array. [Recurso en línea]. <https://galvanizeit.org/project-gallery/stirling-solar-array-tooele-army-depot> 2018
- [7] Helios CSP .Reliance commissions 100 MW concentrated solar power plant in Rajasthan, India. 2018. [Recurso en línea]. <https://helioscsp.com/reliance-commissions-100-mw-concentrated-solar-power-plant-in-rajasthan-india/>
- [8] Helios CSP .Linear Fresnel systems and the future for Concentrated Solar Power. 2017. [Recurso en línea]. <https://helioscsp.com/linear-fresnel-systems-and-the-future-for-concentrated-solar-power/>
- [9] Cerro Dominador. Planta termosolar Cerro Dominador. [Recurso en línea]. <https://cerrodominador.com/proyectos/>
- [10] TSK FLAGSOL, History. 2018. [Recurso en línea]. <https://www.heliotrough.com/english/history/history.html>
- [11] Jiaxiang Chena, Luwei Yang, Zhentao Zhanga, Juan Wei & Junling Yang. Optimization of a uniform solar concentrator with absorbers of different shapes. *Solar Energy*. Volume 158, Pages 396-406. 2017.
- [12] Xiangtao Gong, Fuqiang Wang, Haiyan Wang, Jianyu Tan, Qingzhi Lai & Huaizhi Han. Heat transfer enhancement analysis of tube receiver for parabolic trough solar collector

- with pin fin arrays inserting. Solar Energy. Volume 144, Pages 185-202. 2017
- [13] William B. Stine & Michael Geyer. Libro Power from the sun.[Recurso en línea].  
<https://www.powerfromthesun.net/Book/chapter05/chapter05.html>
- [14] Nafisa Noor, Sadid Muneer. Concentrating Solar Power (CSP) and Its Prospect in Bangladesh.[Recurso en línea].  
[https://www.researchgate.net/publication/224133530\\_Concentrating\\_Solar\\_Power\\_CSP\\_and\\_its\\_prospect\\_in\\_Bangladesh/figures?lo=1&utm\\_source=google&utm\\_medium=organic](https://www.researchgate.net/publication/224133530_Concentrating_Solar_Power_CSP_and_its_prospect_in_Bangladesh/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic)
- [15] Amita Ummadisingua & M.S. Sonib. Concentrating solar power – Technology, potential and policy in India. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 15, Pages 5169-5175. 2011.
- [16] Eckhard Lüpfer & Eduardo Zarza-Moya. EURO TROUGH COLLECTOR QUALIFICATION COMPLETE - PERFORMANCE TEST RESULTS FROM PSA. [Recurso en línea].  
[https://elib.dlr.de/99768/1/EuroTrough\\_Ises2003\\_O523\\_final\\_.pdf](https://elib.dlr.de/99768/1/EuroTrough_Ises2003_O523_final_.pdf)
- [17] Michael Geyer , Eckhard Lüpfer , Rafael Osuna , Antonio Esteban & Wolfgang Schiel. EURO TROUGH - Parabolic Trough Collector, Developed for Cost Efficient Solar Power Generation. [Recurso en línea].  
<http://www.fika.org/jb/resources/EuroTrough.pdf>
- [18] Aula Facil. Ángulo cenital y la elevación solar. [Recurso en línea].  
<https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-solar-termica-1/angulo-cenital-y-la-elevacion-solar-137810>
- [19] David Jafrancesco, Joao P. Cardoso , Amaia Mutuberriac, Erminia Leonardid , Iñigo Lesc , Paola Sansonia, Franco Francinia & Daniela Fontani. Optical simulation of a central receiver system: Comparison of different software tools. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 94, Pages 792-803. 2018.

Anexos

# Anexos

## Anexo A

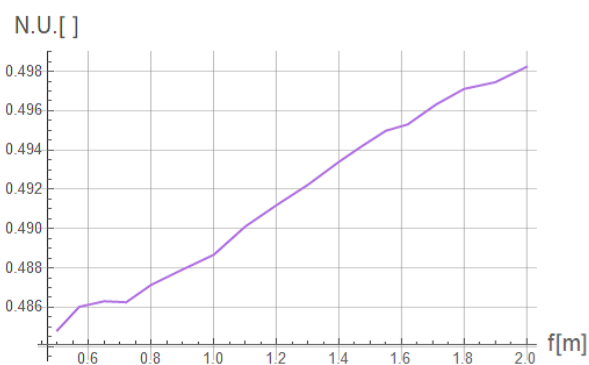
### Resultados y ajustes paramétricos

#### A.1. Variación distancia focal

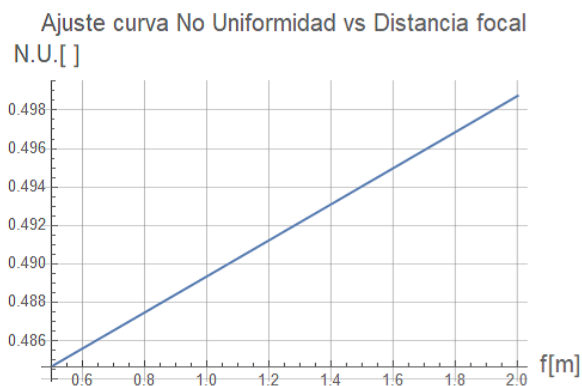
Resultados del experimento de la variación de la distancia focal. Se mantiene el radio del receptor en  $r = 35\text{mm}$ .



(a) Flujos energéticos en el receptor.



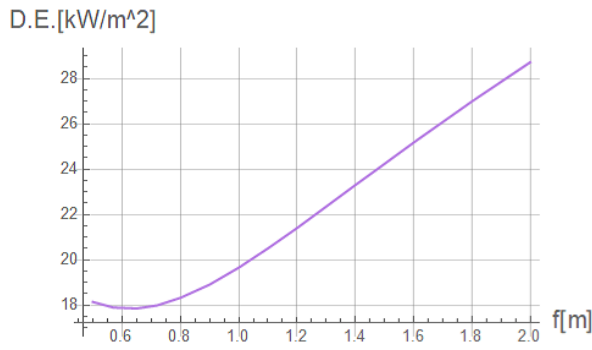
(b) Resultado obtenido N.U vs f



(c) Curva de ajuste N.U vs f

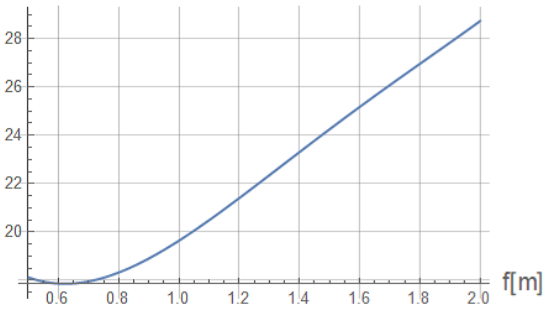
Figura A.1: Resultados experimento variación de la distancia focal [1/3]



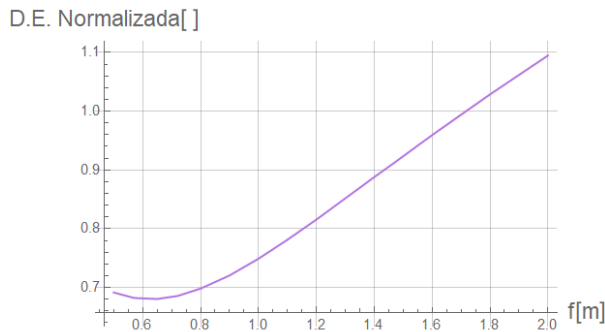


(a) Resultado obtenido  
D.E. vs f

Ajuste curva Desviación estandar vs Distancia focal  
D.E. [kW/m^2]

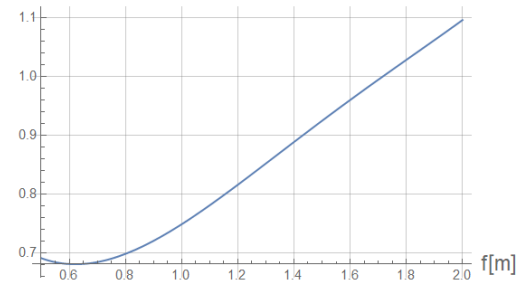


(b) Curva de ajuste D.E.  
vs f

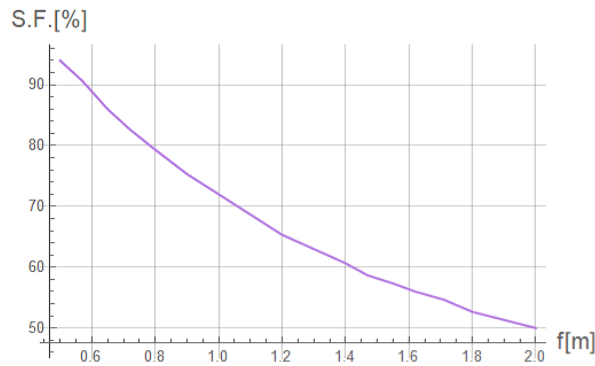


(c) Resultado obtenido  
D.E.N vs f

Ajuste curva Desviación estandar normalizada vs Distancia Focal  
D.E. Normalizada [ ]

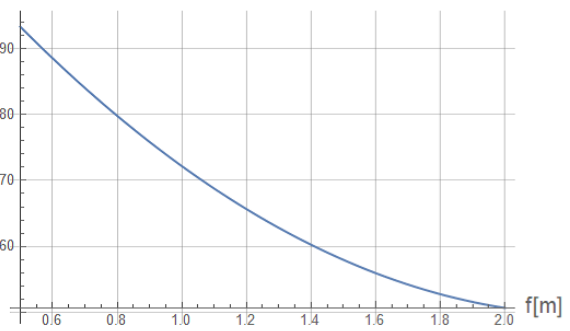


(d) Curva de ajuste D.E.N  
vs f

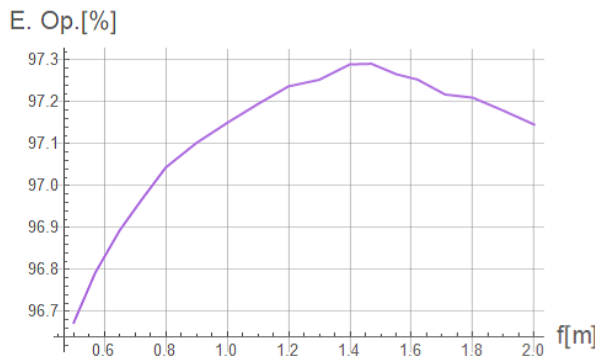


(e) Resultado obtenido  
S.F vs f

Ajuste curva Porcentaje superficie con flujo vs Distancia Focal  
S.F. [%]

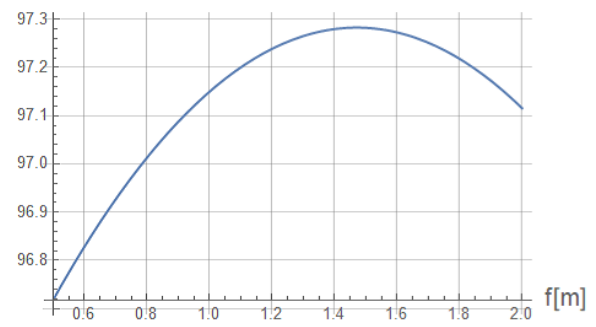


(f) Curva de ajuste S.F vs  
f



(g) Resultado obtenido  
E.Op vs f

Ajuste curva Eficiencia óptica vs Distancia Focal  
E. Op. [%]



(h) Curva de ajuste E.Op  
vs f

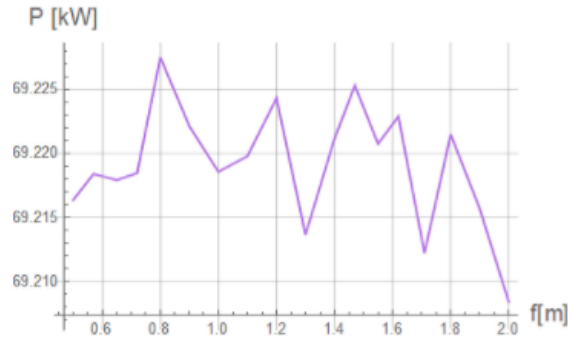


Figura A.3: Resultados experimento variación de la distancia focal [3/3]

A continuación se muestran los ajustes de las curvas realizadas

- No Uniformidad (N.U.)

$$N.U.(f) = 0.4799 + 0.0094 \cdot f + 0.00001 \cdot f^2 \quad (\text{A.1})$$

- Desviación Estándar (D.E.)

$$D.E.(f) = 27.7358 - 38.0979 \cdot f + 47.0787 \cdot f^2 - 20.2784 \cdot f^3 + 3.19386 \cdot f^4 \quad (\text{A.2})$$

- Desviación estándar Normalizada (D.E. Normalizada)

$$D.E.Normalizada(f) = 1.05834 - 1.45606 \cdot f + 1.79976 \cdot f^2 - 0.775976 \cdot f^3 + 0.122375 \cdot f^4 \quad (\text{A.3})$$

- Superficie con flujo (S.F.)

$$S.F.(f) = 121.47 - 63.1395 \cdot f + 13.8641 \cdot f^2 \quad (\text{A.4})$$

- Eficiencia óptica (E.Op)

$$E.Op.(f) = 95.9882 + 1.75944 \cdot f - 0.597866 \cdot f^2 \quad (\text{A.5})$$

## A.2. Variación distancia focal diferentes en radios

Resultados del experimento de la variación de la distancia focal en donde se evalúa para diferentes radios.

### A.2.1. Flujos energéticos en el receptor

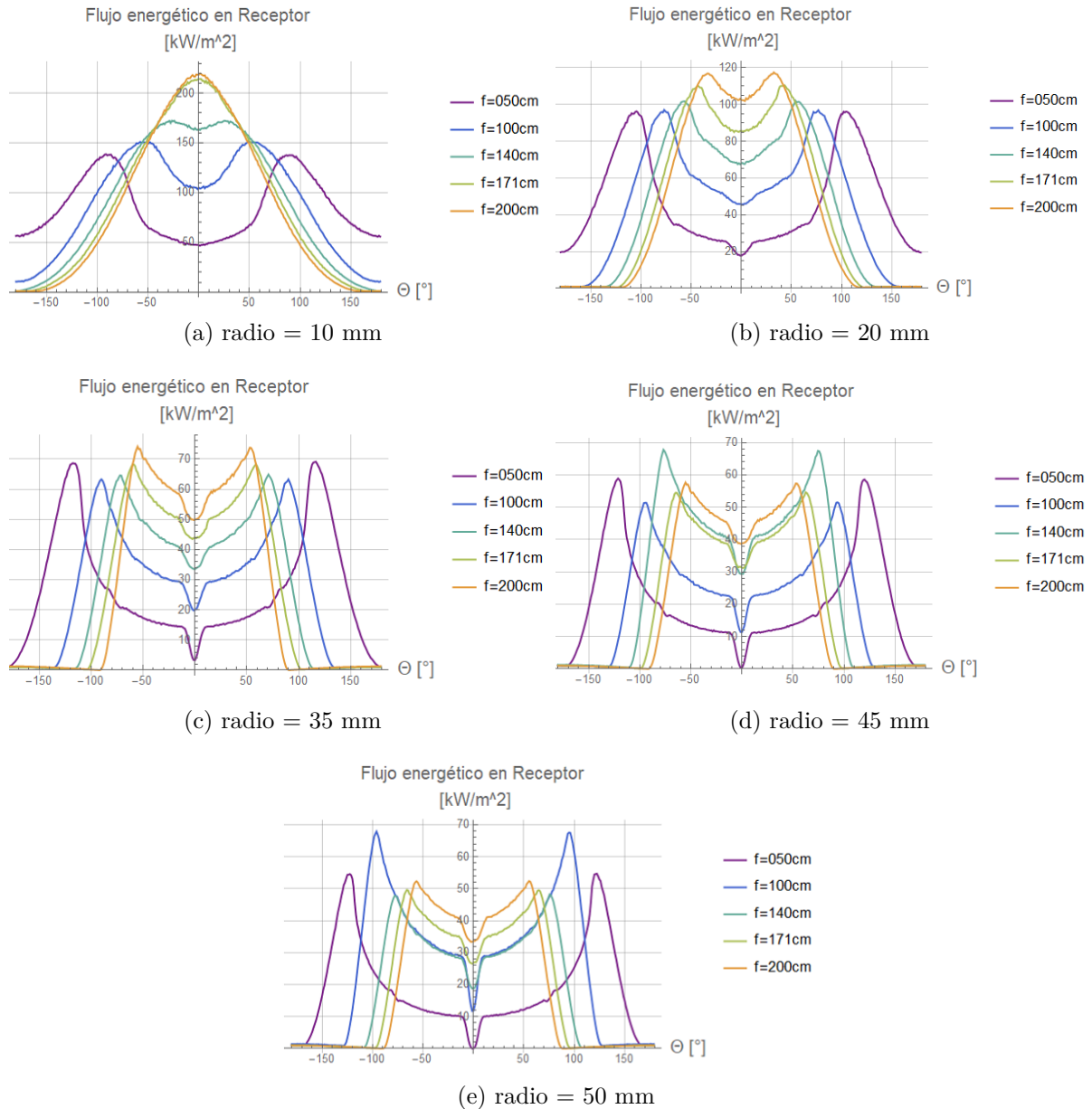
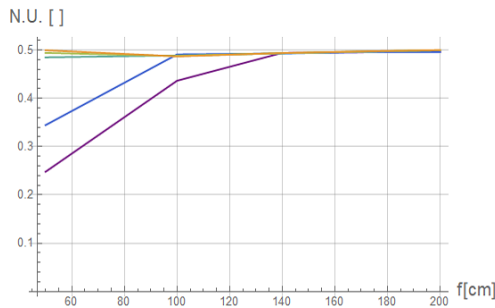
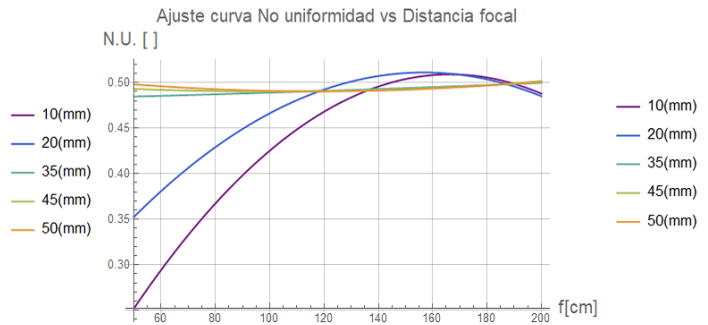


Figura A.4: Resultados experimento variación de la distancia focal en diferentes radios [1/2]

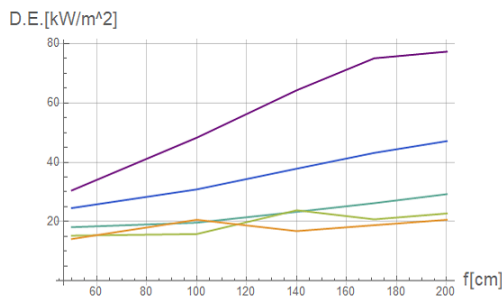
## A.2.2. Gráficos de variables estadísticas del flujo



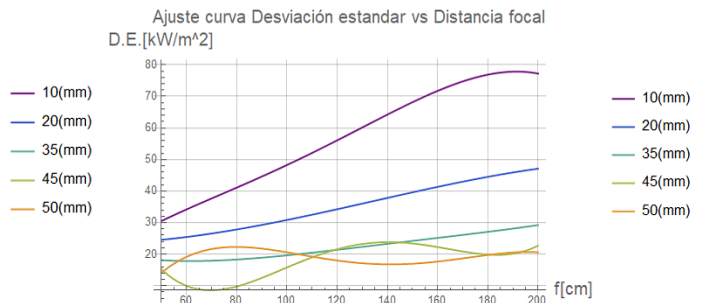
(a) Resultado obtenido N.U vs f



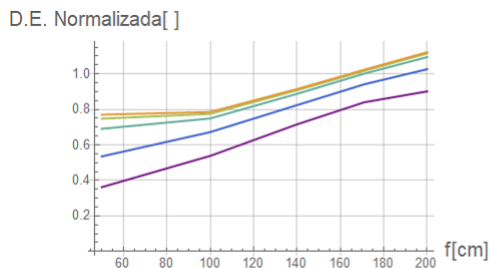
(b) Curva de ajuste N.U vs f



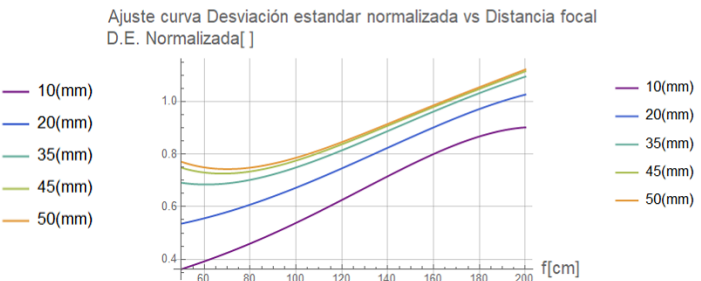
(c) Resultado obtenido D.E. vs f



(d) Curva de ajuste D.E. vs f



(e) Resultado obtenido D.E.N vs f



(f) Curva de ajuste D.E.N vs f

Figura A.5: Resultados experimento variación de la distancia focal en diferentes radios [1/2]

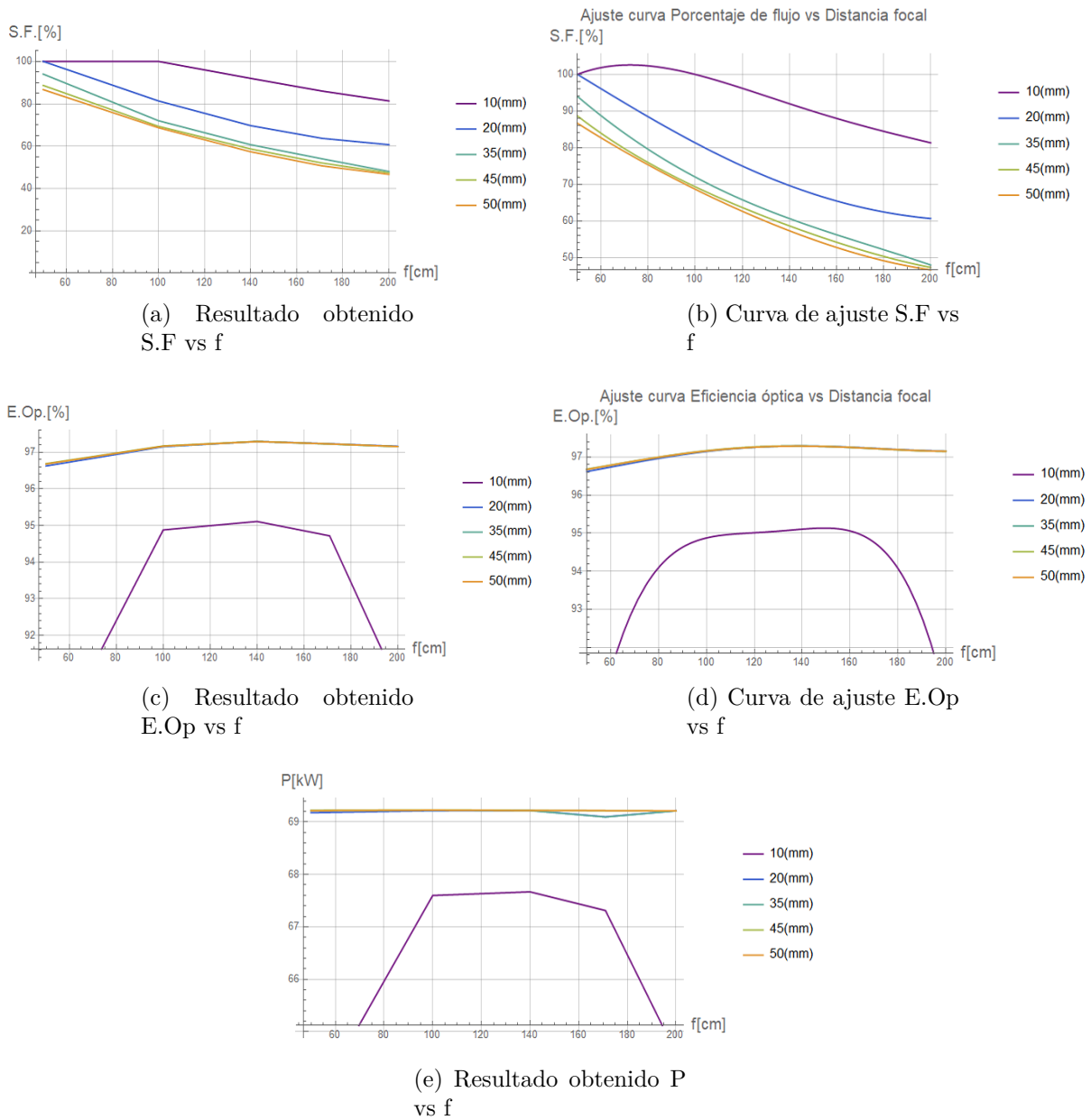


Figura A.6: Resultados experimento variación de la distancia focal en diferentes radios[2/2]

Las curvas de ajuste para cada radio poseen la siguiente forma:

- No Uniformidad (N.U.)

$$N.U.(f) = a + b \cdot f + c \cdot f^2 \quad (A.6)$$

- Desviación Estándar (D.E.)

$$D.E.(f) = a + b \cdot f + c \cdot f^2 + d \cdot f^3 + e \cdot f^4 \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (A.7)$$

- Desviación estándar Normalizada (D.E. Normalizada)

$$D.E.Normalizada(f) = a + b \cdot f + c \cdot f^2 + d \cdot f^3 + e \cdot f^4 \quad (A.8)$$

- Superficie con flujo (S.F.)

$$S.F.(f) = a + b \cdot f + c \cdot f^2 + d \cdot f^3 + e \cdot f^4 [\%] \quad (\text{A.9})$$

- Eficiencia óptica (E.Op)

$$E.Op.(f) = a + b \cdot f + c \cdot f^2 + d \cdot f^3 + e \cdot f^4 [\%] \quad (\text{A.10})$$

La siguiente tabla indica los coeficientes numéricos que forman las curvas de ajustes mostradas anteriormente para el experimento de variación de distancia focal en diferentes radios.

Tabla A.1: Coeficientes de curvas de ajuste para evaluar la variación de la distancia focal en diferentes radios.

Radio [mm]	Parámetro	coeficiente				
		a	b	c	d	e
10	N.U.	-0.0157917	0.00630312	-0.0000189217	0	0
	D.E.	0.178192	0.969084	-0.010536	0.0000750059	1.84609*10 <sup>-7</sup>
	D.E.N	0.178192	0.969084	-0.010536	0.0000750059	-1.84609*10 <sup>-7</sup>
	S.F.	63.867	1.33079	0.0151169	0.0000639471	9.72466*10 <sup>-8</sup>
	E.Op	48.1825	1.47944	0.0175459	0.0000923615	1.81536*10 <sup>-7</sup>
20	N.U.	0.169119	0.00436483	0.0000139235	0	0
	D.E.	24.0166	-0.0659591	0.00171827	-3.44316*10 <sup>-6</sup>	-3.06754*10 <sup>-9</sup>
	D.E.N	0.494412	-0.000200215	0.0000196821	2.88767*10 <sup>-8</sup>	-2.79044*10 <sup>-10</sup>
	S.F.	118.284	-0.314005	0.00160294	0.0000122955	1.81641*10 <sup>-8</sup>
	E.Op	96.3265	-0.0043988	0.000309964	-2.34398*10 <sup>-6</sup>	5.04098*10 <sup>-9</sup>
35	N.U.	0.481122	0.0000650296	1.41308*10 <sup>-7</sup>		
	D.E.	28.4104	-0.413107	0.00524455	0.000023994	4.10127*10 <sup>-8</sup>
	D.E.N	0.960303	-0.0104883	0.000123159	-4.50945*10 <sup>-7</sup>	5.70784*10 <sup>-10</sup>
	S.F.	127.759	-0.806114	0.00269134	-8.48642*10 <sup>-7</sup>	-1.21255*10 <sup>-8</sup>
	E.Op	96.4124	-0.00453238	0.000293877	-2.21768*10 <sup>-6</sup>	4.76937*10 <sup>-9</sup>
45	N.U.	0.501253	-0.000217037	1.0741*10 <sup>-6</sup>	0	0
	D.E.	159.066	-5.84519	0.0787078	-0.000427166	8.13579*10 <sup>-7</sup>
	D.E.N	1.17263	-0.0159205	0.000183516	-7.54302*10 <sup>-7</sup>	1.13755*10 <sup>-9</sup>
	S.F.	123.573	-0.949031	0.0061955	0.0000258009	4.50963*10 <sup>-8</sup>
	E.Op	96.4615	-0.00622479	0.000319856	-2.38016*10 <sup>-6</sup>	5.11321*10 <sup>-9</sup>
50	N.U.	0.513662	-0.000394344	1.67479*10 <sup>-6</sup>	0	0
	D.E.	-82.0098	3.66219	0.0452749	0.000230672	-4.15133*10 <sup>-7</sup>
	D.E.N	1.21502	-0.0163901	0.00018484	-7.50705*10 <sup>-7</sup>	1.12305*10 <sup>-9</sup>
	S.F.	110.149	-0.544086	0.0017624	-6.25084*10 <sup>-6</sup>	1.55283*10 <sup>-8</sup>
	E.Op	96.3405	-0.00173428	0.000257682	-2.02463*10 <sup>-6</sup>	4.40565*10 <sup>-9</sup>

### A.3. Variación de Radio en diferentes distancia focales

Resultados del experimento de la variación del radio en diferentes distancias focales.

#### A.3.1. Flujos energéticos en el receptor

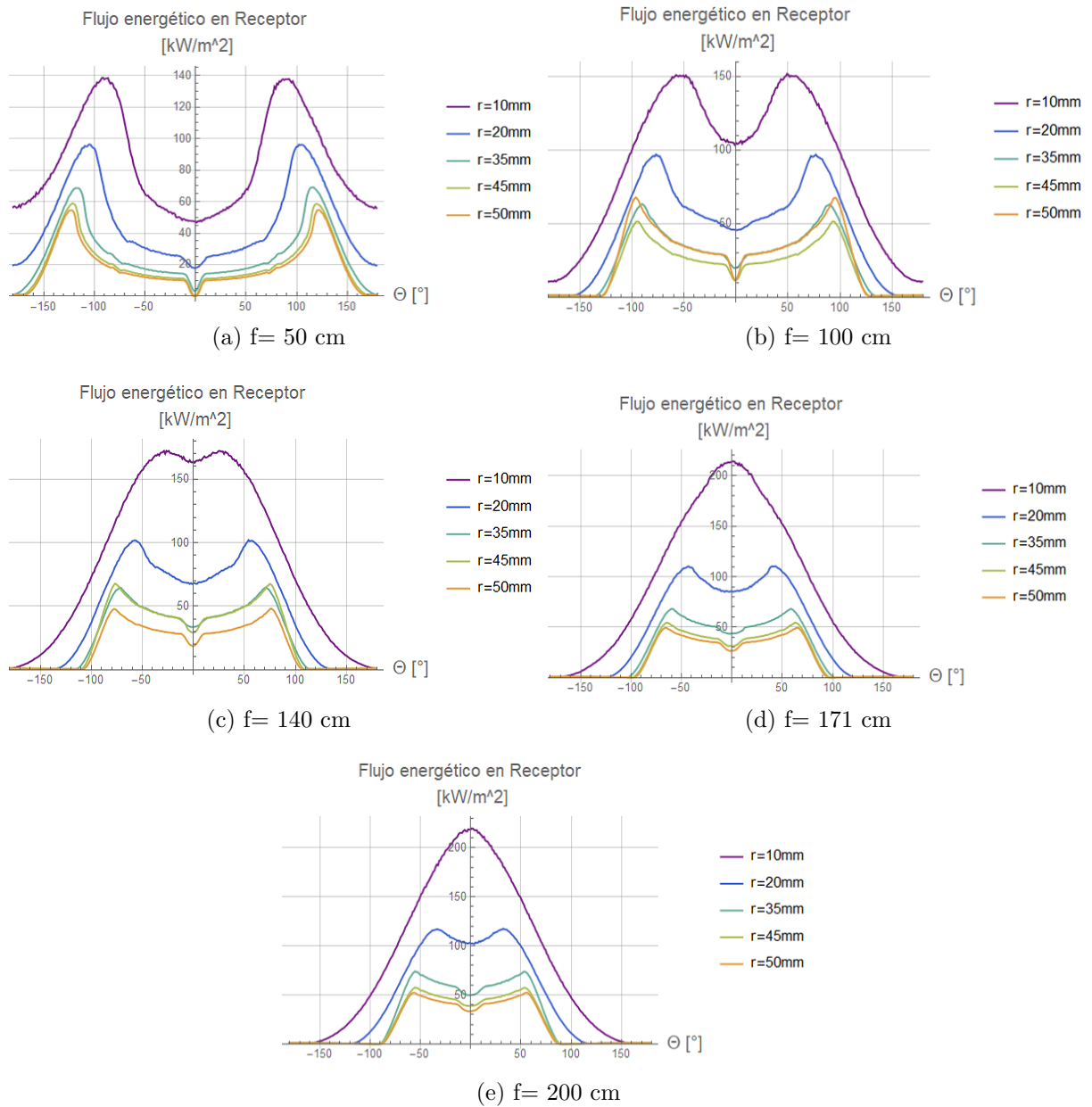
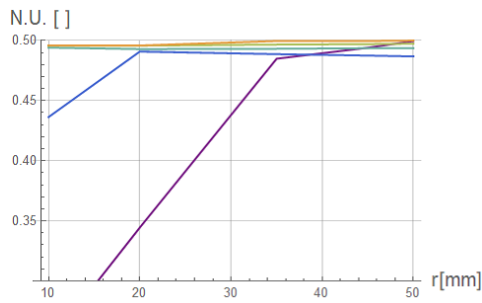
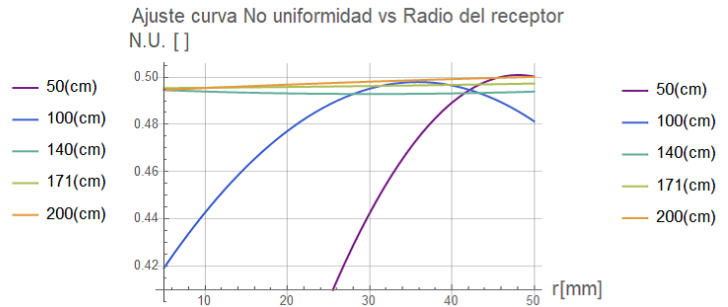


Figura A.7: Resultados experimento variación del radio en diferentes distancias focales.

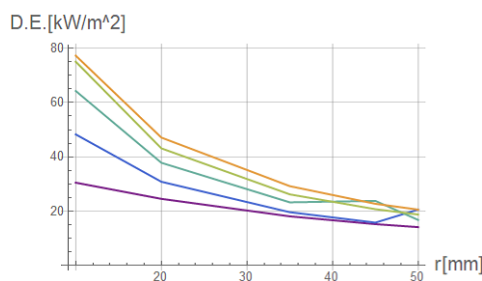
### A.3.2. Gráficos de variables estadísticas del flujo



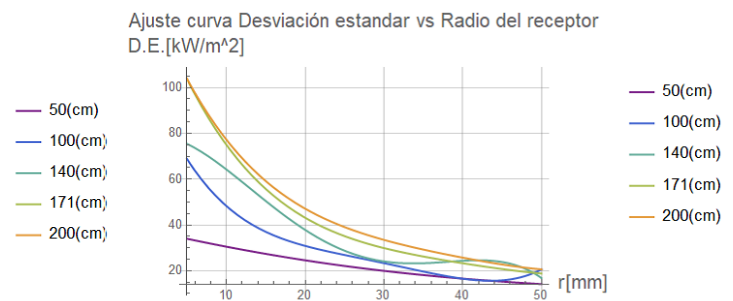
(a) Resultado obtenido N.U. vs r



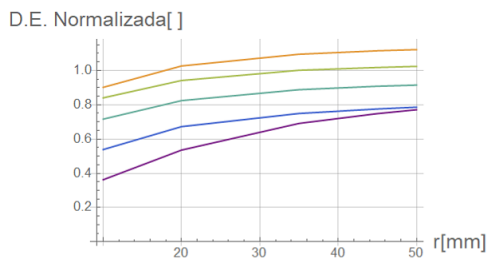
(b) Curva de ajuste N.U. vs r



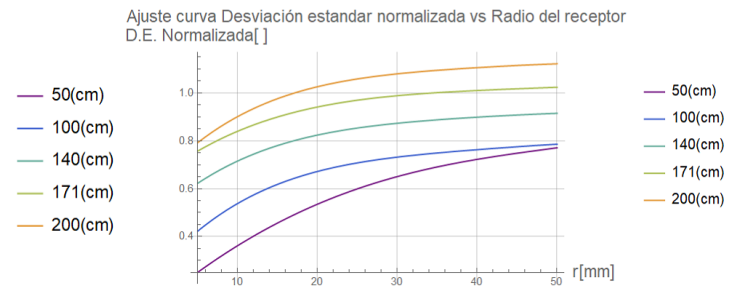
(c) Resultado obtenido D.E. vs r



(d) Curva de ajuste D.E. vs r



(e) Resultado obtenido D.E.N vs r



(f) Curva de ajuste D.E.N vs r

Figura A.8: Resultados experimento variación del radio para diferentes distancias focales [1/2].



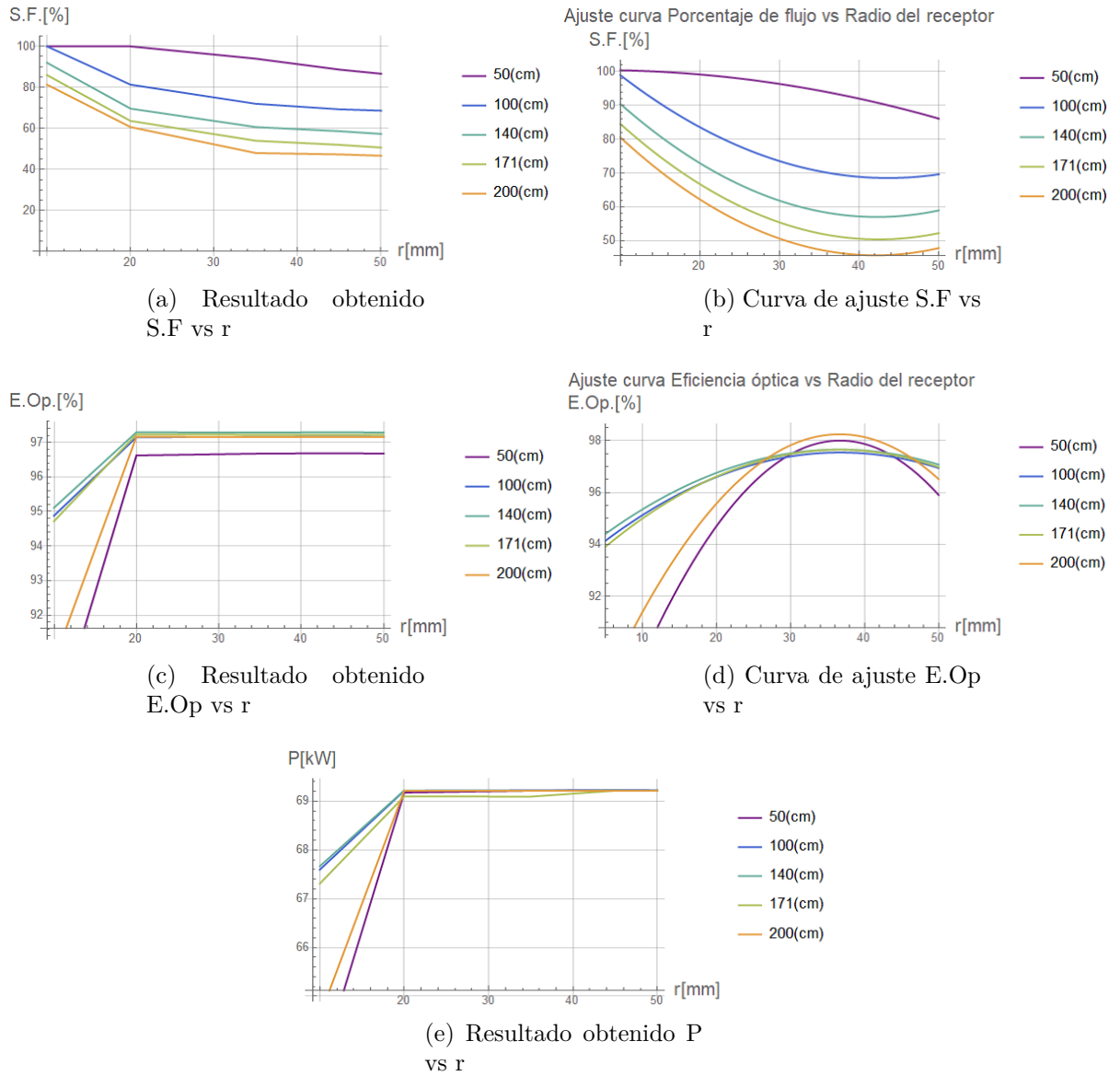


Figura A.9: Resultados experimento variación del radio para diferentes distancias focales[2/2].

Las curvas de ajuste para cada distancia focal poseen la siguiente forma:

- No Uniformidad (N.U.)

$$N.U.(r) = a + b \cdot r + c \cdot r^2 \quad (A.11)$$

- Desviación Estándar (D.E.)

$$D.E.(r) = a + b \cdot r + c \cdot r^2 + d \cdot r^3 + e \cdot r^4 \quad [kW/m^2] \quad (A.12)$$

- Desviación estándar Normalizada (D.E. Normalizada)

$$D.E.Normalizada(r) = a + b \cdot r + c \cdot r^2 + d \cdot r^3 + e \cdot r^4 \quad (A.13)$$

- Superficie con flujo (S.F.)

$$S.F.(r) = a + b \cdot r + c \cdot r^2 \text{ [%]} \quad (\text{A.14})$$

- Eficiencia óptica (E.Op)

$$E.Op.(r) = a + b \cdot r + c \cdot r^2 \text{ [%]} \quad (\text{A.15})$$

La siguiente tabla indica los coeficientes numéricos que forman las curvas de ajustes mostradas anteriormente para el experimento de variación de radio para diferentes radios.

Tabla A.2: Coeficientes de curvas de ajuste para evaluar la variación de la distancia focal en diferentes radios.

Dist. focal [cm]	Parámetro	Coeficiente				
		a	b	c	d	e
50	N.U.	0.0871608	0.0172042	-0.000178832	0	0
	D.E.	37.7573	-0.783465	0.005512	0.0000471194	-6.56345*10 <sup>-7</sup>
	D.E.N	0.121839	0.0275859	-0.000358868	2.48301*10 <sup>-7</sup>	2.17277*10 <sup>-8</sup>
	S.F.	100.087	0.109588	0.00778188	0	0
	E.Op	82.0938	0.867299	0.0118218	0	0
100	N.U.	0.391505	0.00594232	0.0000829148	0	0
	D.E.	104.096	-8.93668	0.42325	-0.00958814	0.0000805997
	D.E.N	0.260641	0.0379296	-0.00118328	0.0000178405	-1.02873*10 <sup>-7</sup>
	S.F.	119.735	-2.34643	0.0268941	0	0
	E.Op	92.9845	0.248352	-0.00338414	0	0
140	N.U.	0.495251	-0.000154907	2.56249*10 <sup>-6</sup>	0	0
	D.E.	78.7977	0.533332	-0.288001	0.00987666	-0.0000965195
	D.E.N	0.492419	0.0304713	-0.000949469	0.0000144915	-8.62338*10 <sup>-8</sup>
	S.F.	114.427	-2.71845	0.032184	0	0
	E.Op	114.427	-2.71845	0.032184	0	0
171	N.U.	0.495312	0.0000207437	3.93283*10 <sup>-7</sup>	0	0
	D.E.	145.035	-9.75016	0.322997	-0.00513861	0.0000313767
	D.E.N	0.645007	0.0258158	-0.000719179	9.40922*10 <sup>-6</sup>	-4.64311*10 <sup>-8</sup>
	S.F.	108.846	-2.75432	0.0324468	0	0
	E.Op	92.6368	0.273614	-0.0037371	0	0
200	N.U.	0.493827	0.000168902	-8.47888*10 <sup>-7</sup>	0	0
	D.E.	141.897	-8.97962	0.296778	-0.00485588	0.0000308355
	D.E.N	0.638836	0.0360204	-0.00113792	0.0000172987	-1.01684*10 <sup>-7</sup>
	S.F.	105.716	-2.85369	0.0339216	0	0
	E.Op	85.2929	0.707523	-0.00966156	0	0

## A.4. Geometría hexagonal

Resultados del experimento de la variación de la geometría hexagonal. La distancia focal es de  $f = 171[cm]$ .

### A.4.1. Flujo energético en el receptor

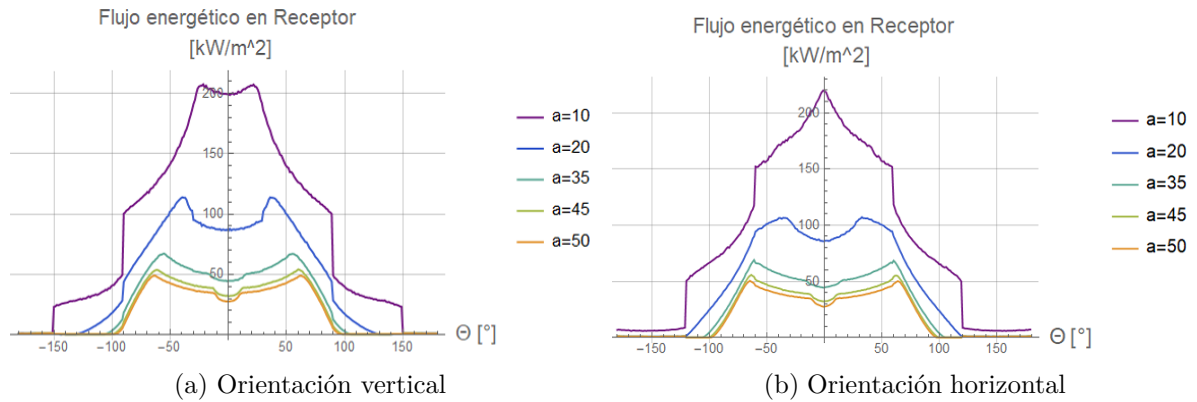


Figura A.10: Flujo energético en el receptor hexagonal para su orientación horizontal y vertical.

### A.4.2. Gráficos de variables estadísticas del flujo

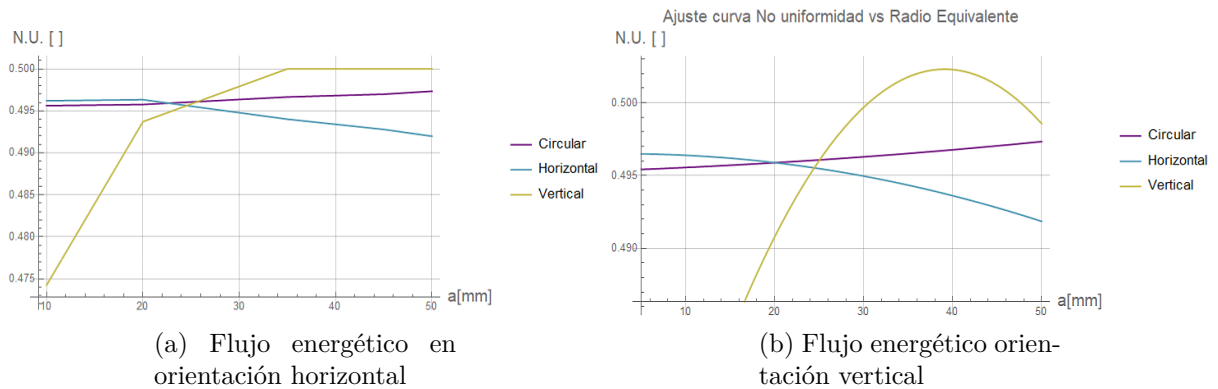
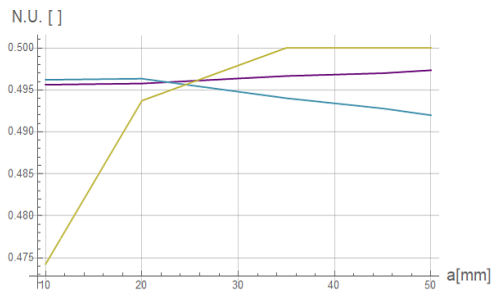
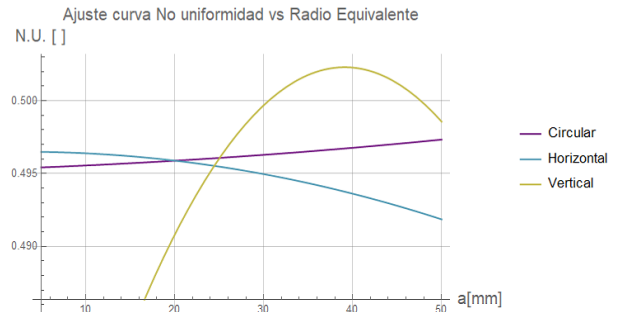


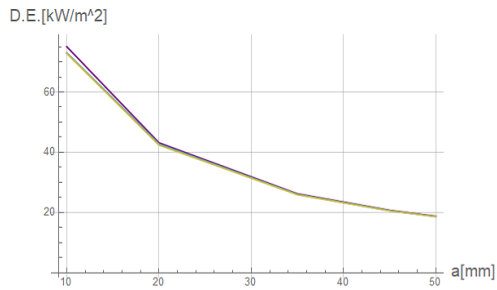
Figura A.11: Resultados experimento de variación de la geometría hexagonal. [1/3]



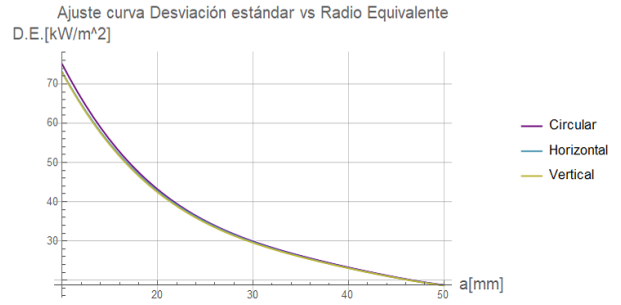
(a) Resultado obtenido N.U. vs a



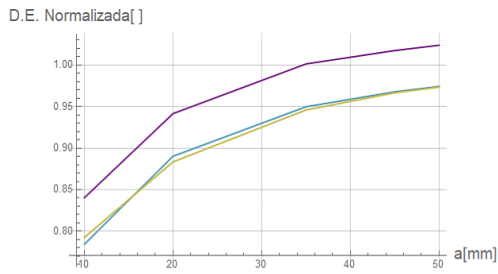
(b) Curva de ajuste N.U. vs a



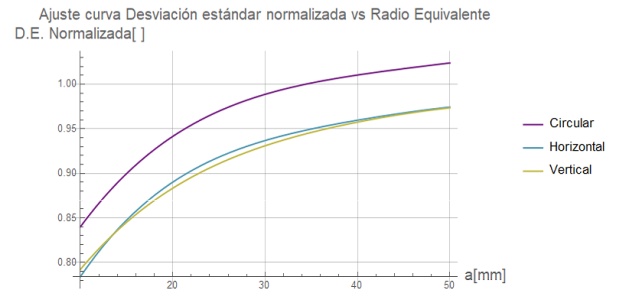
(c) Resultado obtenido D.E. vs a



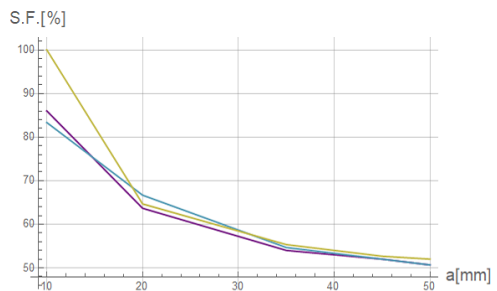
(d) Curva de ajuste D.E. vs a



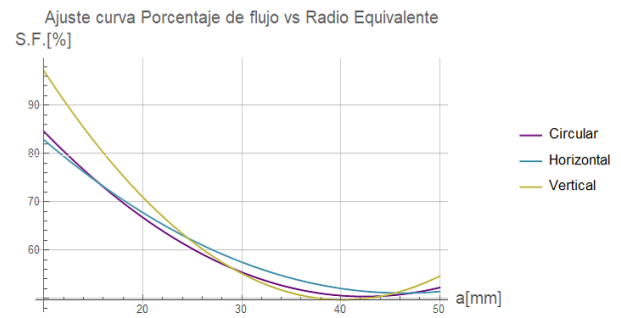
(e) Resultado obtenido D.E.N vs a



(f) Curva de ajuste D.E.N vs a



(g) Resultado obtenido S.F. vs a



(h) Curva de ajuste S.F. vs a

Figura A.12: Resultados experimento de variación de la geometría hexagonal. [2/3]

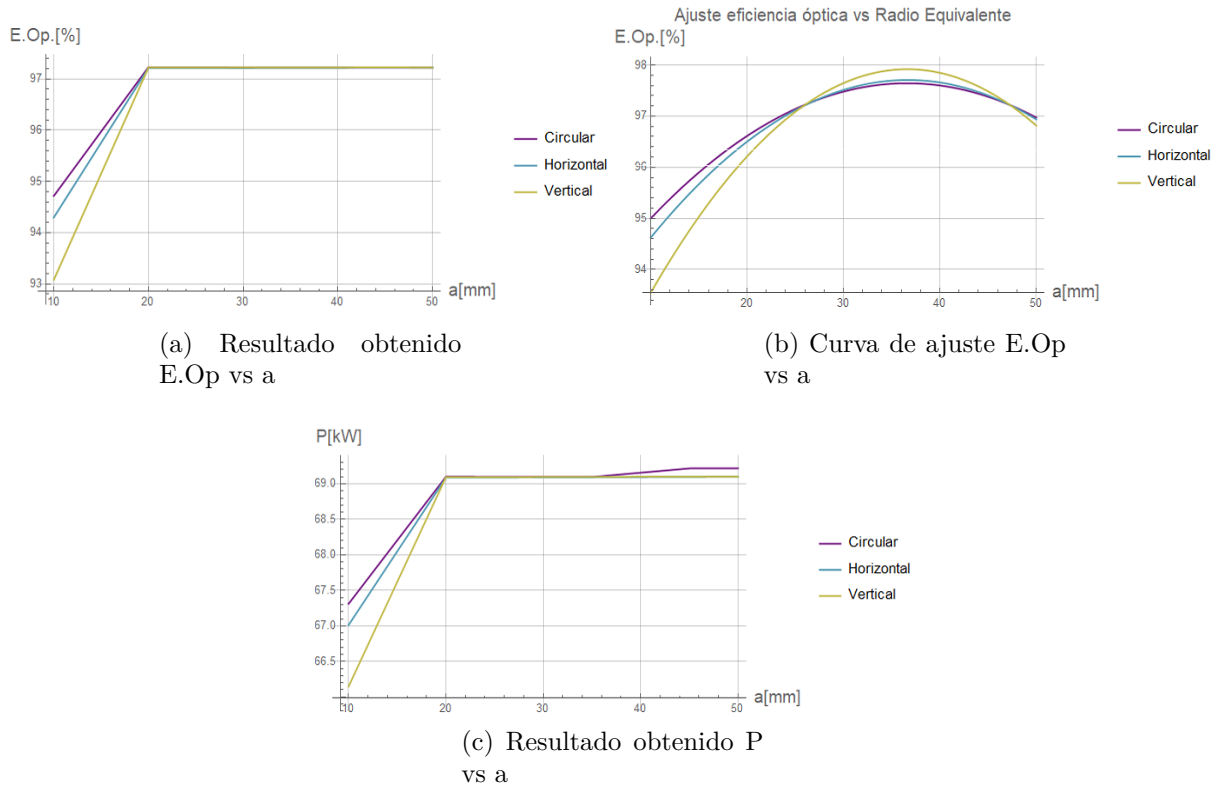


Figura A.13: Resultados experimento de variación de la geometría hexagonal. [3/3]

Las curvas de ajuste para valor de  $a$  poseen la siguiente forma:

- No Uniformidad (N.U.)

$$N.U.(a) = a_0 + b_0 \cdot a + c_0 \cdot a^2 \quad (A.16)$$

- Desviación Estándar (D.E.)

$$D.E.(a) = a_0 + b_0 \cdot a + c_0 \cdot a^2 + d_0 \cdot a^3 + e_0 \cdot a^4 \quad [kW/m^2] \quad (A.17)$$

- Desviación estándar Normalizada (D.E. Normalizada)

$$D.E.Normalizada(a) = a_0 + b_0 \cdot a + c_0 \cdot a^2 + d_0 \cdot a^3 + e_0 \cdot r^4 \quad (A.18)$$

- Superficie con flujo (S.F.)

$$S.F.(a) = a_0 + b_0 \cdot a + c_0 \cdot a^2 \quad [\%] \quad (A.19)$$

- Eficiencia óptica (E.Op)

$$E.Op.(a) = a_0 + b_0 \cdot a + c_0 \cdot a^2 \quad [\%] \quad (A.20)$$

La siguiente tabla indica los coeficientes numéricos que forman las curvas de ajustes mostradas anteriormente para el experimento de variación de la geometría hexagonal.

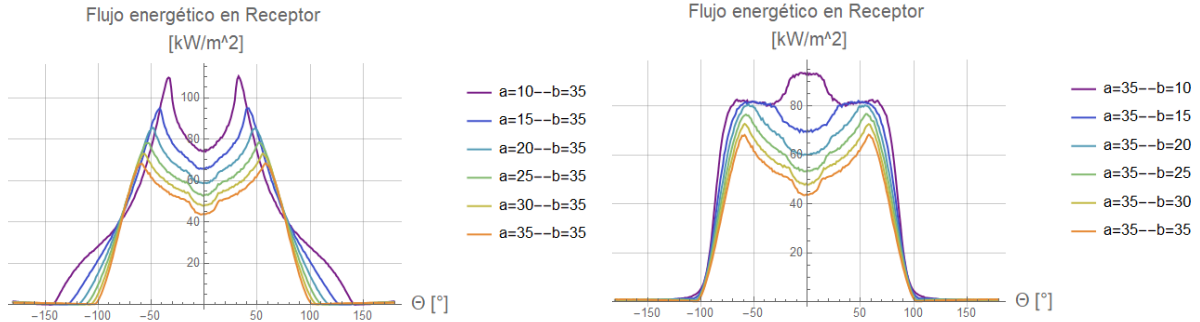
Tabla A.3: Coeficientes de curvas de ajuste para evaluar la variación del parámetro  $a$  en la geometría hexagonal.

		Coeficiente				
Orientación	Parámetro	$a_0$	$b_0$	$c_0$	$d_0$	$e_0$
Horizontal	N.U.	0.496481	0.000012	$2.0937 \cdot 10^{-6}$	0	0
	D.E.	138.154	-9.01367	0.293007	0.00460408	0.0000278759
	D.E.N	0.563415	0.0301679	0.000942307	0.0000142021	$-8.27215 \cdot 10^{-8}$
	S.F.	102.649	-2.22496	0.0240129	0	0
	E.Op	91.8774	0.317974	-0.004335	0	0
Vertical	N.U.	0.454176	0.00246073	-0.000031	0	0
	D.E.	138.875	-9.16494	0.3003	-0.004738	0.0000287
	D.E.N	0.623769	0.0221879	-0.000613738	$8.66117 \cdot 10^{-6}$	$-4.92859 \cdot 10^{-8}$
	S.F.	133.563	-4.16522	0.0517259	0	0
	E.Op	89.6431	0.451909	-0.0061686	0	0

## A.5. Geometría Elíptica

Resultados del experimento de la variación de la geometría elíptica. La distancia focal es de  $f = 171[cm]$ .

### A.5.1. Flujo energético en el receptor

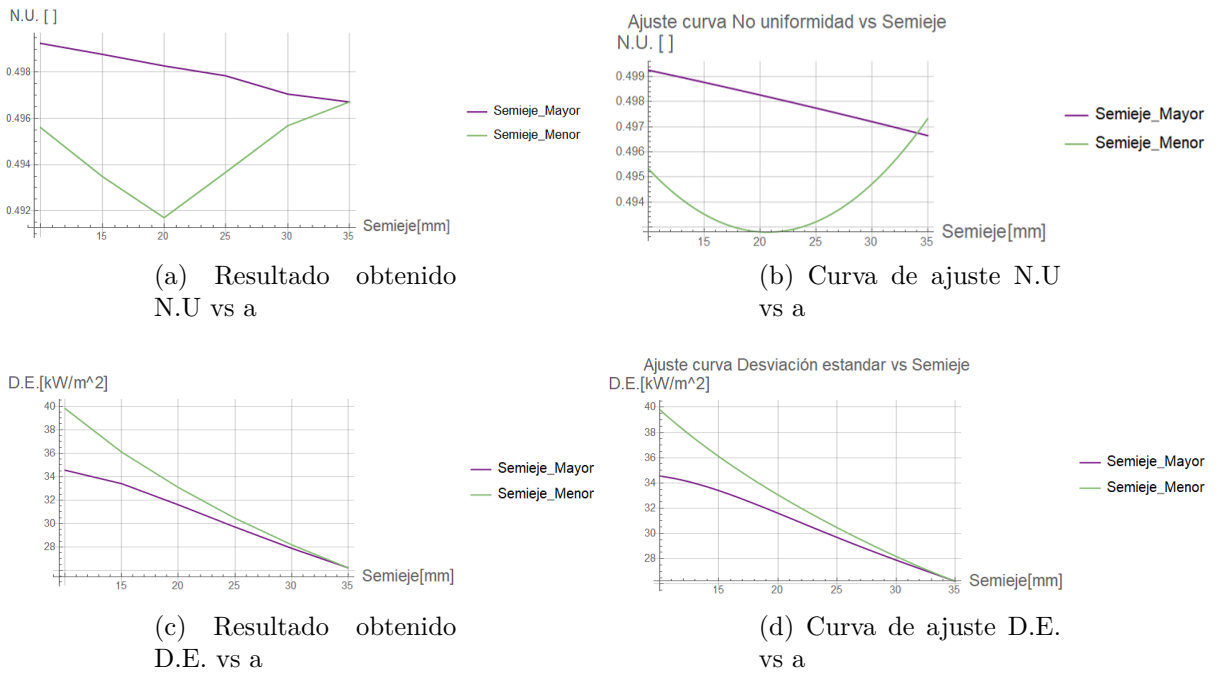


(a) Flujo energético variación del semieje mayor

(b) Flujo energético variación del semieje menor

Figura A.14: Flujos energéticos en el receptor elíptico en variación del semieje mayor y semieje menor

### A.5.2. Gráficos de variables estadísticas del flujo



(a) Resultado obtenido N.U vs a

(b) Curva de ajuste N.U vs a

(c) Resultado obtenido D.E. vs a

(d) Curva de ajuste D.E. vs a

Figura A.15: Resultados experimento de variación de la geometría elíptica. [1/2]

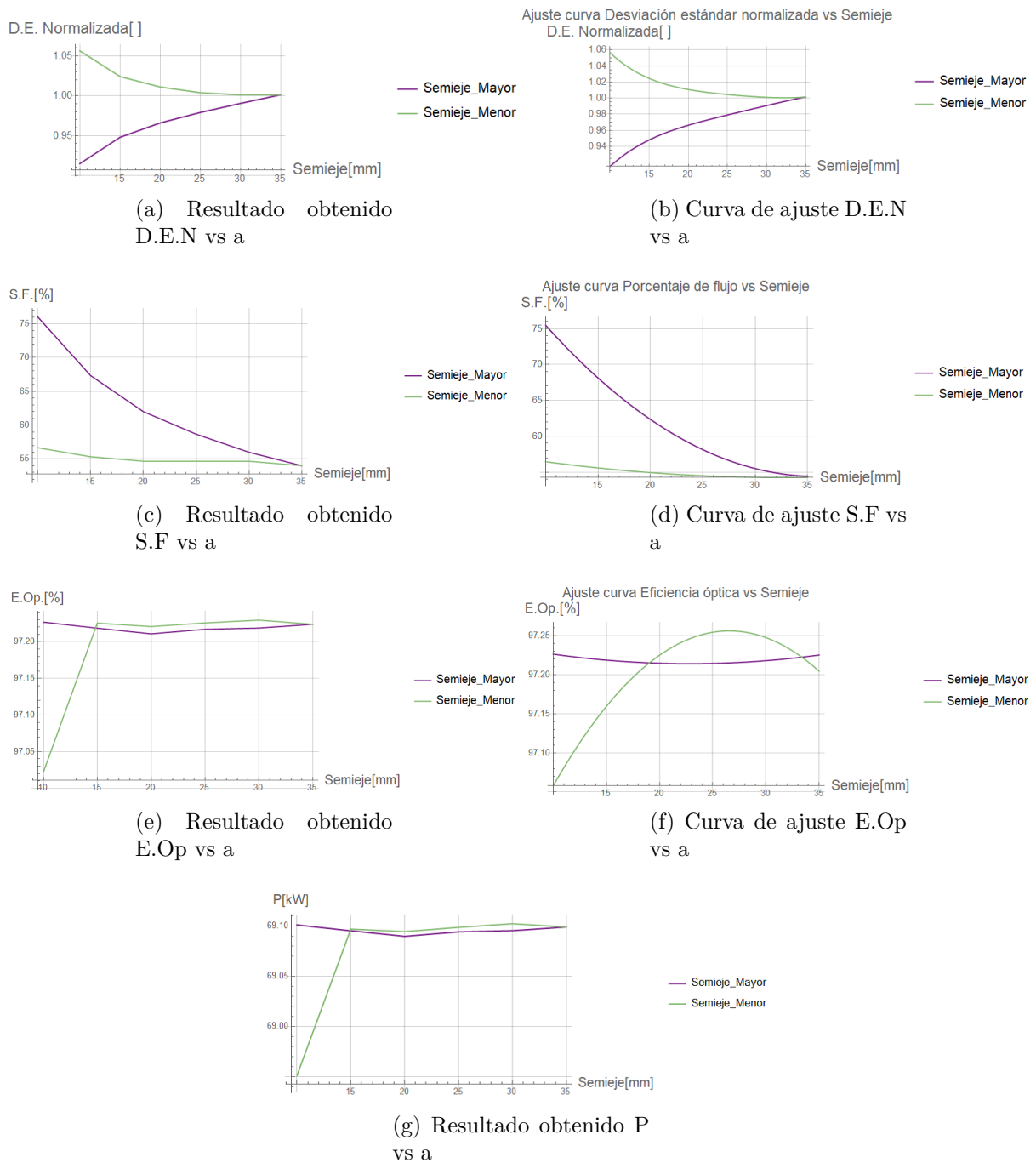


Figura A.16: Resultados experimento de variación de la geometría elíptica. [2/2]



Las curvas de ajuste para valor de  $s$  (semieje) poseen la siguiente forma:

- No Uniformidad (N.U.)

$$N.U.(s) = s + s \cdot s + c \cdot s^2 \quad (A.21)$$

- Desviación Estándar (D.E.)

$$D.E.(s) = a + b \cdot s + c \cdot s^2 + d \cdot s^3 + e \cdot s^4 [kW/m^2] \quad (A.22)$$

- Desviación estándar Normalizada (D.E. Normalizada)

$$D.E.Normalizada(s) = a + b \cdot s + c \cdot s^2 + d \cdot s^3 + e \cdot r^4 \quad (A.23)$$

- Superficie con flujo (S.F.)

$$S.F.(s) = a + b \cdot s + c \cdot s^2 [\%] \quad (A.24)$$

- Eficiencia óptica (E.Op)

$$E.Op.(s) = a + b \cdot s + c \cdot s^2 [\%] \quad (A.25)$$

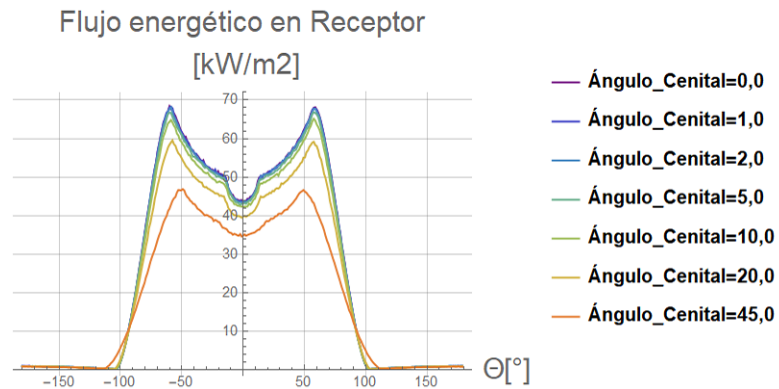
La siguiente tabla indica los coeficientes numéricos que forman las curvas de ajustes mostradas anteriormente para el experimento de variación de la geometría elíptica.

Tabla A.4: Coeficientes de curvas de ajuste para evaluar la variación del parámetro  $s$  en la geometría elíptica.

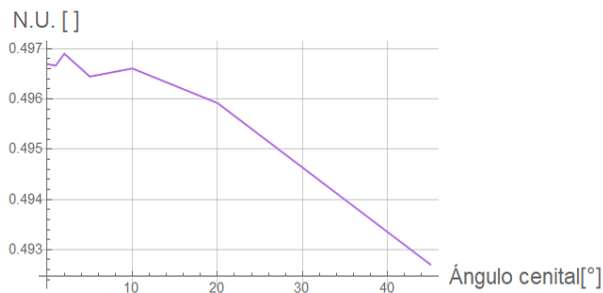
		Coeficiente				
Variación	Parámetro	$a_0$	$b_0$	$c_0$	$d_0$	$e_0$
Semieje mayor	N.U.	0.500182	-0.0000886165	$-3.5058 \cdot 10^{-7}$	0	0
	D.E.	31.7125	0.838724	-0.072153	0.00183029	-0.000016616
	D.E.N	0.746322	0.0275466	-0.00136966	0.0000331178	$-3.00681 \cdot 10^{-7}$
	S.F.	94.8952	-2.25619	0.0314286	0	0
	E.Op	97.2527	-0.00339657	0.0000744571	0	0
Semieje menor	N.U.	0.502235	-0.000913138	0.000022079	0	0
	D.E.	50.9135	-1.46294	0.043641	-0.00092526	$8.47706 \cdot 10^{-6}$
	D.E.N	1.24634	0.0321148	0.0016871	-0.0000412877	$3.88237 \cdot 10^{-7}$
	S.F.	58.8286	-0.280476	0.00428571	0	0
	E.Op	89.6431	0.451909	-0.0061686	0	0

## A.6. Variación del ángulo cenital

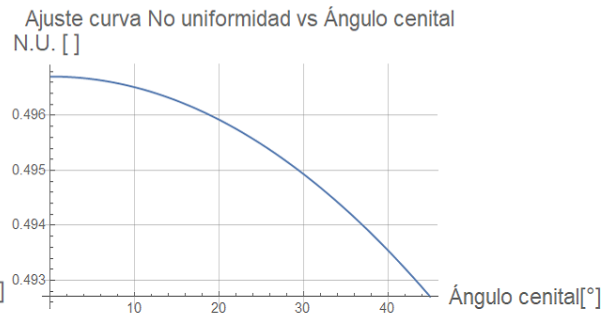
Resultados del experimento de la variación del ángulo cenital. La distancia focal es de  $f = 171$  [cm] y el radio es del 35 [mm]



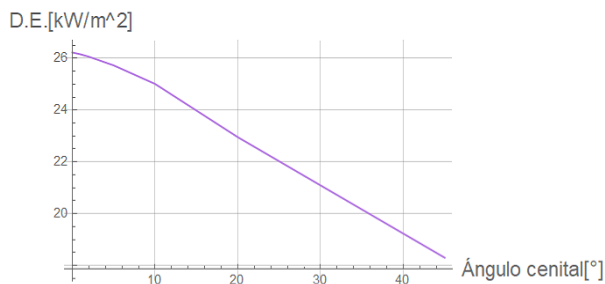
(a) Flujos energéticos en el receptor



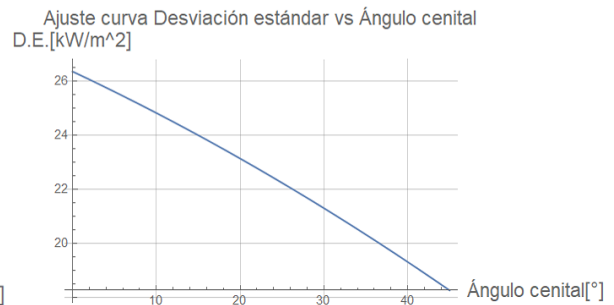
(b) Resultado obtenido N.U vs  $\Theta_z$



(c) Curva de ajuste N.U vs  $\Theta_z$



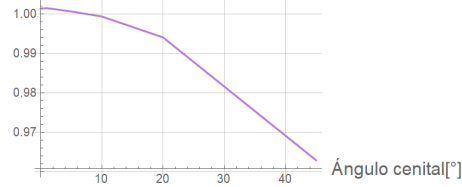
(d) Resultado obtenido D.E. vs  $\Theta_z$



(e) Curva de ajuste D.E. vs  $\Theta_z$

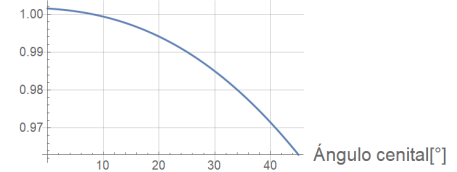
Figura A.17: Resultados experimento Variación del ángulo cenital [1/2].

Desviación estandar normalizada del flujo[ ]



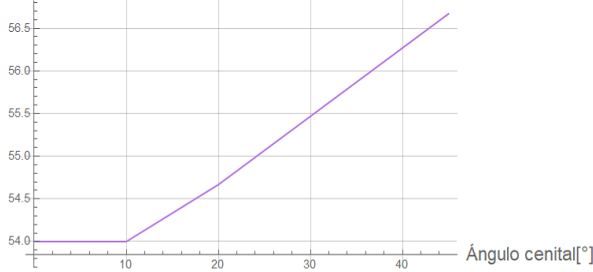
(a) Resultado obtenido  
D.E.N vs  $\Theta_z$

Ajuste curva Desviación estandar normalizada de la distribución de flujo vs Ángulo cenital  
Desviación estandar normalizada del flujo[ ]



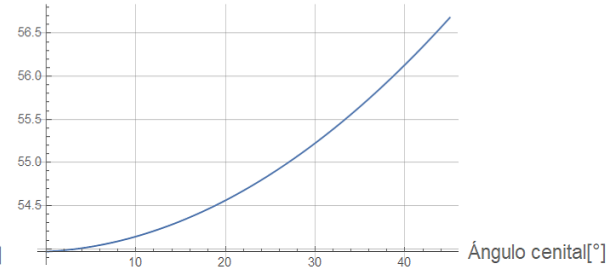
(b) Curva de ajuste D.E.N  
vs  $\Theta_z$

S.F.[%]



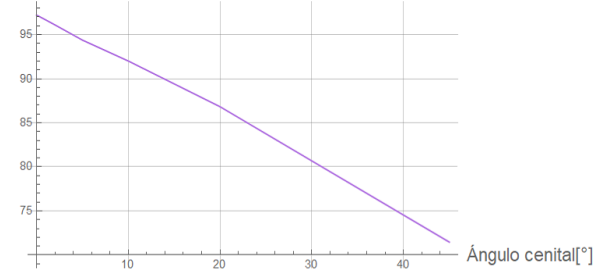
(c) Resultado obtenido  
S.F vs  $\Theta_z$

Ajuste curva Porcentaje de flujo vs Ángulo cenital  
S.F.[%]



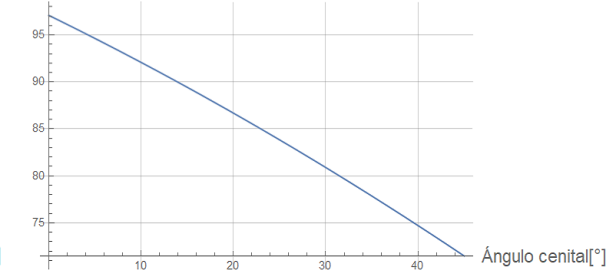
(d) Curva de ajuste S.F vs  
 $\Theta_z$

E.Op.[%]



(e) Resultado obtenido  
E.Op vs  $\Theta_z$

Ajuste curva Eficiencia óptica vs Ángulo cenital  
E.Op.[%]



(f) Curva de ajuste E.Op  
vs  $\Theta_z$

Figura A.18: Resultados experimento Variación del ángulo cenital [2/2].

A continuación se muestran los ajustes de las curvas realizadas:

- No Uniformidad (N.U.)

$$N.U.(\Theta_z) = 0.496708 + 4.37693 \cdot 10^{-7} \cdot \Theta_z - 1.98585 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta_z^2 \quad (A.26)$$

- Desviación Estándar (D.E.)

$$D.E.(\Theta_z) = 26.3423 - 0.145333 \cdot \Theta_z - 0.000755163 \cdot \Theta_z^2 \quad (A.27)$$

- Desviación estándar Normalizada (D.E. Normalizada)

$$D.E.Normalizada(\Theta_z) = 1.00151 - 0.0000900171 \cdot \Theta_z - 0.0000106243 \cdot \Theta_z^2 - 1.91631 \cdot 10^{-7} \cdot \Theta_z^3 + 1.08311 \cdot 10^{-9} \cdot \Theta_z^4 \quad (A.28)$$

- Superficie con flujo (S.F.)

$$S.F.(\Theta_z) = 53.9673 + 0.00532339 \cdot \Theta_z + 0.0012213 \cdot \Theta_z^2 \quad (\text{A.29})$$

- Eficiencia óptica (E.Op)

$$E.Op.(\Theta_z) = 97.0822 - 0.481087 \cdot \Theta_z - 0.00194907 \cdot \Theta_z^2 \quad (\text{A.30})$$

# Anexo B

## Código Mathematica

A continuación se adjunta el código de los archivos tipos descritos en la sección de Metodología. Específicamente se adjunta el código para el procesamiento del experimento de la geometría elíptica.

```

(*-----ARCHIVO TIPO 1-----*)

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

Out[*]:= D:\benja\Desktop\tonatiuh\Cilindro Parabólico\Variación Forma elíptica\PB-a10-b35

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

In[*]:= file=FileNames["receptor_*.dat"]

Out[*]:= {Receptor_10.dat, Receptor_1.dat, Receptor_2.dat, Receptor_3.dat, Receptor_4.dat,
Receptor_5.dat, Receptor_6.dat, Receptor_7.dat, Receptor_8.dat, Receptor_9.dat}

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

Out[*]:= 10

```

## Parámetros geométricos

```

In[*]:= a=0.010; (*m*)
b=0.035; (*m*)
rReceptor=(a+b)/(2); (*m*)
lReceptor=12; (*m*)
nElementsTHETA=300;
nElementsYZ=1;
dsTHETA=360/(nElementsTHETA); (*grados*)
dsArco=(2*Pi*rReceptor)/(nElementsTHETA); (*metros*)
dsYZ=lReceptor/nElementsYZ;
elementAreaTHETA=dsArco*dsYZ (*m2*);

```

## Calculo flujo energético en superficie

```

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

In[*]:= totalNumberOfPhotons=0;
nRayos=10000000;
powerPerPhoton=0.00710719;

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];(*Cic
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*)
(*Print[Length[fileValidPhoton]];*)
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}];(*Para cada elemento angular, se cue
(*Print["Polares: ",Length[Polares]];
Print[Length[Conteo]];
Print[Length[conteoAngulos]];*)
Conteo=Conteo+conteoAngulos;
Clear[fileValidPhoton];
]
Angulo=Range[-180.,180.-dsTHETA,dsTHETA];
FluxDistribution=conversionFactor* Conteo;
PolarCounts=Transpose[{Angulo,FluxDistribution}];
estimatedPowerAtReceiver=powerPerPhoton * totalNumberOfPhotons/1000 ;(*kW*)

```

```

Iteration # 1. Processing file: Receptor_10.dat
Iteration # 2. Processing file: Receptor_1.dat
Iteration # 3. Processing file: Receptor_2.dat
Iteration # 4. Processing file: Receptor_3.dat
Iteration # 5. Processing file: Receptor_4.dat
Iteration # 6. Processing file: Receptor_5.dat
Iteration # 7. Processing file: Receptor_6.dat
Iteration # 8. Processing file: Receptor_7.dat
Iteration # 9. Processing file: Receptor_8.dat
Iteration # 10. Processing file: Receptor_9.dat

```

```
In[ ]:= PorcRayos=totalNumberOfPhotons/nRayos*100.
```

```
Out[ ]:= 97.2269
```

```
In[ ]:= (*Evaluación de la no uniformidad*)
(*Creación de una nueva lista(FILTRO), que contenga solo los valores que superan cierto umbral en
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 Receptor Elíptico*)

(*e=  $\frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a}$ ;
L=4*a*  $\int_0^{\pi/2} \sqrt{1-e^2*\sin[\theta]^2} d\theta$ *)
L=  $\pi(3*(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)})$ ;
LargoReceptor=12.0;
SuperficieReceptor=L*LargoReceptor;

(*Valores estadísticos*)
Maximo=Max[FlujoValido];
Minimo=Min[FlujoValido];
Promedio=Mean[FlujoValido];
Desviacion=StandardDeviation[FlujoValido];
DesviacionNorm=Desviacion/(estimatedPowerAtReceiver*SuperficieReceptor);
NoUnin=(Maximo-Minimo)/(2*(Maximo+Minimo));
EficOptica=totalNumberOfPhotons/nRayos*100.;

Print["Valor de No uniformidad : ", NoUnin]
Print["Desviación estandar : ", Desviacion,"[kW/m]"]
Print["Desviación estandar Normalizada : ", DesviacionNorm]
Print["Porcentaje de superficie que recibe flujo: ", PorcFlujo, "%"]
Print["Porcentaje de rayos que llegan al receptor: ",EficOptica,"%"]
Print["Potencia estimada en el receptor : ", estimatedPowerAtReceiver, "[kW]"]
```



4 | Receptor Elíptico-a10-b35.nb

Valor de No uniformidad : 0.499249  
Desviación estandar : 34.5474 [kW/m]  
Desviación estandar Normalizada : 0.273202  
Porcentaje de superficie que recibe flujo: 76. %  
Porcentaje de rayos que llegan al receptor: 97.2269 %  
Potencia estimada en el receptor : 69.101 [kW]

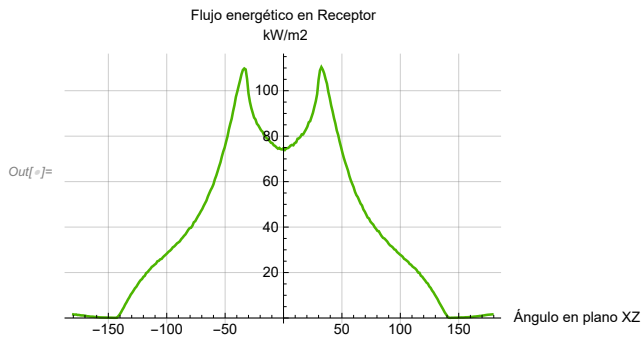
```
In[ ]:= PrependTo[PolarCounts, {"a=10--b=35", NoUnin, Desviacion, DesviacionNorm, PorcFlujo, EficOptica, estimat  
SetDirectory["D:\\benja\\Desktop\\tonatiuh\\Cilindro Parabólico\\Variación Forma elíptica\\Resulta  
Export["Rec-elip-a10-b35.dat", PolarCounts, "Table"]  
PolarCounts=Drop[PolarCounts, 1];
```

```
Out[ ]:= D:\benja\Desktop\tonatiuh\Cilindro  
Parabólico\Variación Forma elíptica\Resultados semieje mayor
```

```
Out[ ]:= Rec-elip-a10-b35.dat
```

```
In[ ]:= PolarCounts = Drop[PolarCounts, 1];
```

```
In[ ]:= ListPlot[PolarCounts, Joined->True, PlotStyle->■, AxesLabel->{"Ángulo en plano XZ", "Flujo energético e  
kW/m2"}, GridLines->Automatic]
```



```
In[ ]:=
```

```
In[ ]:=
```

(\*-----Archivo tipo 2-----\*)

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

```
Out[*]:= D:\benja\Desktop\tonatiuh\Cilindro  
Parabólico\Variación Forma elíptica\Resultados semieje mayor
```

```
In[*]:= file=FileNames["Rec-elip*.dat"]
```

```
Out[*]:= {Rec-elip-a10-b35.dat, Rec-elip-a15-b35.dat, Rec-elip-a20-b35.dat,  
Rec-elip-a25-b35.dat, Rec-elip-a30-b35.dat, Rec-elip-a35-b35.dat}
```

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

```
Out[*]:= 6
```

```
In[*]:= Encabezados
```

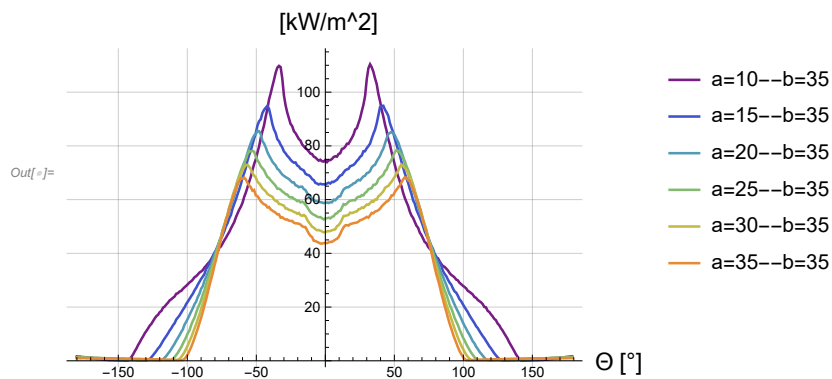
```
Out[*]:= {a=10--b=35, a=15--b=35, a=20--b=35, a=25--b=35, a=30--b=35, a=35--b=35}
```

```

In[ ]:= Encabezados=ConstantArray[0,nFiles];(*Lista vacía para guardar los encabezados de los archivos*)
NonUniform=ConstantArray[0,nFiles];
Desviacion=ConstantArray[0,nFiles];
DesviacionNorm=ConstantArray[0,nFiles];
PorcFlujo=ConstantArray[0,nFiles];
PorcRayos=ConstantArray[0,nFiles];
PotenciaEstimada=ConstantArray[0,nFiles];
Listas=ConstantArray[0,nFiles];(*Lista vacía para guardar los datos de flujo de cada archivo*)
For[i=1,i≤nFiles,++i,(**
(*Print["archivo:",i];*)
archivo=Import[file[[i]]];(**)
Encabezados[[i]]=archivo[[1,1]];(**)
NonUniform[[i]]=archivo[[1,2]];(**)
Desviacion[[i]]=archivo[[1,3]];(**)
DesviacionNorm[[i]]=archivo[[1,4]];(**)
PorcFlujo[[i]]=archivo[[1,5]];(**)
PorcRayos[[i]]=archivo[[1,6]];(**)
PotenciaEstimada[[i]]=archivo[[1,7]];(**)
Listas[[i]]=Drop[archivo,1];(**)
])
(*ListPlot[Table[Listas[[i]],{i,Range[nFiles]}],Joined→True,AxesLabel→{"Ángulo en plano XZ","Flu
kW/m^2"},GridLines→Automatic,PlotLegends→Table[Encabezados[[k]],{k,Range[nFiles]}]]
*)
ListPlot[Table[Listas[[i]],{i,Range[nFiles]}],Joined→True,AxesLabel→{Style["θ [°]",15],Style["
kW/m^2",15]},GridLines→Automatic,PlotLegends→Table[Encabezados[[k]],{k,Range[nFiles]}],PlotSt

```

Flujo energético en Receptor



```

In[ ]:= SemiEjemayor={10.0,15.0,20.,25.,30.,35.};
Variable=SemiEjemayor;

```

```

In[ ]:= (*No uniformidad v/s Semieje mayor *)
ListNonUniform=Transpose[{Variable,NonUniform}];
ListPlot[ListNonUniform,Joined→True,PlotStyle→#,AxesLabel→{Style["a [mm]",15],Style["Valor de no
(*Ajuste Polinomial a la No uniformidad*)
CurvaAjusteNonUn= Fit[ListNonUniform, {1, x,x^2}, x];

```

```

Print["Curva de ajuste paramétrico: ",CurvaAjusteNonUn]
Plot[CurvaAjusteNonUn,{x,10,35},PlotLabel→Style["Ajuste curva No uniformidad vs Semieje mayor",15
AxesLabel→{Style["a[mm]",15],Style["Valor de no uniformidad[ ]",15]},GridLines→Automatic]
(*-----*)
(*Desviación estandar v/s Semieje mayor *)
ListDesviacion=Transpose[{Variable,Desviacion}];
ListPlot[ListDesviacion,Joined→True,PlotStyle→■,AxesLabel→{Style["a[mm]",15],Style["Desviación e
(*Ajuste Polinomial a la Desviación estandar*)
CurvaAjusteDesv= Fit[ListDesviacion, {1, x,x^2,x^3,x^4}, x];
Print["Curva de ajuste paramétrico: ",CurvaAjusteDesv]
Plot[CurvaAjusteDesv,{x,10,35},PlotLabel→Style["Ajuste curva Desviación estandar de la distribuci
AxesLabel→{Style["a[mm]",15],Style["Desviación estandar del flujo[kw/m^2]",15]},GridLines→Automa

(*Desviación estandar Normalizada*)
ListDesviacionNorm=Transpose[{Variable,DesviacionNorm}];
ListPlot[ListDesviacionNorm,Joined→True,PlotStyle→■,AxesLabel→{Style["a[mm]",15],Style["Desviaci
(*Ajuste Polinomial a la Desviación Estandar normalizada*)
CurvaAjusteDesvNorm= Fit[ListDesviacionNorm, {1, x, x^2,x^3,x^4}, x];
Print["Curva de ajuste paramétrico: ",CurvaAjusteDesvNorm]
Plot[CurvaAjusteDesvNorm,{x,10,35},PlotLabel→"Ajuste curva Desviación estandar normalizada de la
AxesLabel→{Style["a[mm]",15],Style["Desviación estandar normalizada del flujo[ ]",15]},GridLines-

(*-----*)
(*Porcentaje de Flujo v/s Semieje mayor *)
ListPorcFlujo=Transpose[{Variable,PorcFlujo}];
ListPlot[ListPorcFlujo,Joined→True,PlotStyle→■,AxesLabel→{Style["a[mm]",15],Style["Porcentaje de

(*Ajuste Polinomial al porcentaje de Flujo*)
CurvaAjustePorcFlujo= Fit[ListPorcFlujo, {1, x, x^2}, x];
Print["Curva de ajuste paramétrico: ",CurvaAjustePorcFlujo]
Plot[CurvaAjustePorcFlujo,{x,10,35},PlotLabel→"Ajuste curva Porcentaje de flujo vs Semieje mayor"
(*-----*)

(*Eficiencia óptica v/s Semieje mayor *)
ListPorcRayos=Transpose[{Variable,PorcRayos}];
ListPlot[ListPorcRayos,Joined→True,PlotStyle→■,AxesLabel→{Style["a[mm]",15],Style["Eficiencia ó
(*Ajuste Polinomial a la Eficiencia óptica*)
CurvaAjustePorcRayos= Fit[ListPorcRayos, {1, x, x^2}, x];
Print["Curva de ajuste paramétrico: ",CurvaAjustePorcRayos]
Plot[CurvaAjustePorcRayos,{x,10,35},PlotLabel→Style["Ajuste curva Eficiencia óptica vs Semieje ma

(*-----*)
(*Potencia Estimada v/s Semieje mayor *)
ListPotenciaEst=Transpose[{Variable,PotenciaEstimada}];
ListPlot[ListPotenciaEst,Joined→True,PlotStyle→■,AxesLabel→{Style["a[mm]",15],Style["Potencia Es

(*Exportacion de datos*)

SetDirectory["D:\\benja\\Desktop\\tonatiuh\\Cilindro Parabólico\\Variación Forma elíptica\\Compare
Export["Semiejemayor.dat",{ "Semieje_Mayor",ListNonUniform,CurvaAjusteNonUn,ListDesviacion,CurvaAji
ListPorcRayos,CurvaAjustePorcRayos,ListPotenciaEst
},"Table"];

```

( \*-----Archivo Tipo 3----- )

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

```
Out[ ]:= D:\benja\Desktop\tonatiuh\Cilindro Parabólico\Variación Forma elíptica\Comparación
```

```
In[ ]:= files=FileNames["Semieje*.dat"]
nFiles=Length[files];
Encabezados=ConstantArray[0,nFiles];
noUniform=ConstantArray[0,nFiles];
AjusteNonUn=ConstantArray[0,nFiles];
Desviacion=ConstantArray[0,nFiles];
AjusteDesviacion=ConstantArray[0,nFiles];
DesviacionNorm=ConstantArray[0,nFiles];
AjusteDesvNorm=ConstantArray[0,nFiles];
PorcFlujo=ConstantArray[0,nFiles];
AjustePorcFlujo=ConstantArray[0,nFiles];
PorcRayos=ConstantArray[0,nFiles];
AjustePorcRayos=ConstantArray[0,nFiles];
PotenciaEstimada=ConstantArray[0,nFiles];

For[i=1,i<=nFiles,++i,(**
(*Print["archivo:",i];*)
lista=ToExpression[Import[files[[i]],"TSV"]];(**)
Encabezados[[i]]=lista[[1,1]];(**)
noUniform[[i]]=lista[[2]];(**)
AjusteNonUn[[i]]=lista[[3]];
Desviacion[[i]]=lista[[4]];
AjusteDesviacion[[i]]=lista[[5]];
DesviacionNorm[[i]]=lista[[6]];
AjusteDesvNorm[[i]]=lista[[7]];
PorcFlujo[[i]]=lista[[8]];
AjustePorcFlujo[[i]]=lista[[9]];
PorcRayos[[i]]=lista[[10]];
AjustePorcRayos[[i]]=lista[[11]];
PotenciaEstimada[[i]]=lista[[12]];
(*Print[AjusteDesviacion[[i]];*)
])
```

```
Out[ ]:= {Semiejemayor.dat, Semiejemenor.dat}
```

```

In[*]:= (*Gráficos*)
(*Plot No Uniformidad*)
ListPlot[Table[noUniform[i], {i, Range[nFiles]}], Joined→True, AxesLabel→{Style["Semieje [mm]", 15],
PlotLegends→Table[Encabezados[[k]], {k, Range[nFiles]}], PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nF
(*Plot Ajuste No Uniformidad*)
Plot[{AjusteNonUn[[1]], AjusteNonUn[[2]]}, {x, 10, 35}, PlotLabel→Style["Ajuste curva No uniformidad
AxesLabel→{Style["Semieje [mm]", 15], Style["N.U. [ ]", 15]}, GridLines→Automatic, PlotLegends→Table[
PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nFiles)], {i, 0, nFiles}}]

(*Plot Desviación estándar*)
ListPlot[Table[Desviacion[[i]], {i, Range[nFiles]}], Joined→True, AxesLabel→{Style["Semieje [mm]", 15]
PlotLegends→Table[Encabezados[[k]], {k, Range[nFiles]}], PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nF
(*Plot Ajuste Desviación*)
Plot[{AjusteDesviacion[[1]], AjusteDesviacion[[2]]}, {x, 10, 35}, PlotLabel→Style["Ajuste curva Desvi
AxesLabel→{Style["Semieje [mm]", 15], Style["D.E. [kW/m^2]", 15]}, GridLines→Automatic, PlotLegends→Tab
PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nFiles)], {i, 0, nFiles}}]

(*Plot Desviación Norm*)
ListPlot[Table[DesviacionNorm[[i]], {i, Range[nFiles]}], Joined→True, AxesLabel→{Style["Semieje [mm]"
PlotLegends→Table[Encabezados[[k]], {k, Range[nFiles]}], PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nF
(*Plot Ajuste Desviación Norm*)
Plot[{AjusteDesvNorm[[1]], AjusteDesvNorm[[2]]}, {x, 10, 35}, PlotLabel→Style["Ajuste curva Desviació
AxesLabel→{Style["Semieje [mm]", 15], Style["D.E. Normalizada [ ]", 15]}, GridLines→Automatic, PlotLege
PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nFiles)], {i, 0, nFiles}}]

(*Plot Porcentaje de Flujo*)
ListPlot[Table[PorcFlujo[[i]], {i, Range[nFiles]}], Joined→True, AxesLabel→{Style["Semieje [mm]", 15],
PlotLegends→Table[Encabezados[[k]], {k, Range[nFiles]}], PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nF
(*Plot Ajuste Porcentaje de Flujo*)
Plot[{AjustePorcFlujo[[1]], AjustePorcFlujo[[2]]}, {x, 10, 35}, PlotLabel→Style["Ajuste curva Porcent
AxesLabel→{Style["Semieje [mm]", 15], Style["S.F. [%]", 15]}, GridLines→Automatic, PlotLegends→Table[Er
PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nFiles)], {i, 0, nFiles}}]

(*Plot Eficiencia Óptica*)
ListPlot[Table[PorcRayos[[i]], {i, Range[nFiles]}], Joined→True, AxesLabel→{Style["Semieje [mm]", 15],
PlotLegends→Table[Encabezados[[k]], {k, Range[nFiles]}], PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nF
(*Plot Ajuste Eficiencia Óptica*)
Plot[{AjustePorcRayos[[1]], AjustePorcRayos[[2]]}, {x, 10, 35}, PlotLabel→Style["Ajuste curva Eficien
AxesLabel→{Style["Semieje [mm]", 15], Style["E.Op. [%]", 15]}, GridLines→Automatic, PlotLegends→Table[E
PlotStyle→Table[ColorData["Rainbow", i/(nFiles)], {i, 0, nFiles}}]

(*Plot Potencia Estimada*)
ListPlot[Table[PotenciaEstimada[[i]], {i, Range[nFiles]}], Joined→True, AxesLabel→{Style["Semieje [mm]
PlotLegends→Table[Encabezados[[k]], {k, Range[nFiles]}], PlotRange→All, PlotStyle→Table[ColorData["F

```