



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES
INSTITUTO DE INGENIERÍA
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

**Análisis de un concentrador solar
secundario para un canal parabólico
con receptor circular**

TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniera en Energías Renovables

PRESENTA:

Jael Córdova Gallegos

DIRECTOR DE TESIS:

Camilo Alberto Arancibia Bulnes

Temixco, Mor., a 23 de septiembre del 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



OF/IER/LIER/107/2022
ASUNTO: Notificación de jurado y
fecha para examen profesional.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente.

Por medio de la presente le informo que el día viernes 23 de septiembre de 2022, a las 13:00 h, en el Instituto de Energías Renovables, la C. JAEL CORDOVA GALLEGOS, con número de cuenta 418071702 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

**“Análisis de un concentrador solar secundario para
un canal parabólico con receptor circular”**

Debido a que la alumna ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTA: DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES
VOCAL: DR. DAVID RIVEROS ROSAS
SECRETARIO: DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES
SUPLENTE: DRA. ARGELIA BALBUENA ORTEGA
SUPLENTE: DR. MANUEL IGNACIO PEÑA CRUZ

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 23 de agosto de 2022

Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp



Priv. Xochicalco s/n,
Col. Centro,
62580 Temixco, Morelos, México
T. 01 (777) 362 00 90
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

Agradecimientos

De forma especial, agradezco al Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes por guiarme con paciencia en la realización de mi tesis y por compartir sus consejos no sólo en el desarrollo del trabajo, sino también para mi crecimiento profesional. A la Dra. Heidi Isabel Villafán Vidales, la Dra. Argelia Balbuena Ortega, Dr. Manuel Peña Cruz y Dr. David Riveros Rosas por tomarse el tiempo de compartir su experiencia para el desarrollo de mi trabajo de titulación.

A todo el equipo de administración de la LIER, por siempre tenderme la mano y acompañarme a lo largo mi vida universitaria. Especialmente a la Lic. Maribel Fernández Pérez, la Mtra. Magali Nieto Ayala, la Lic. Claudia Ramírez Rosas, el Ing. Carlos Olvera Rodríguez, el Dr. Miguel Robles Pérez y el Dr. Jorge Alejandro Wong Loya.

Agradezco a mi familia, a mis padres y hermanos por siempre apoyarme, confiar en mí y poner a mi disposición todo lo necesario para lograr mis metas. Les agradezco infinitamente su apoyo, consejos y cariño, que me ha motivado para culminar esta etapa.

A aquellos amigos que conocí en el camino y me brindaron su cariño. A Jesús y su familia por permitirme conocerlos y compartir buenos recuerdos. A mis compañeros de la 7ma generación, en especial a Ale, Nacho, Dani, Marco, Sebas y Karla por haberme regalado su amistad y permitirme disfrutar de su compañía a lo largo de la carrera. Gracias por los momentos compartidos: tardes de risa, tareas, cansancio y memorables reuniones que hicieron de la universidad una gran etapa. En ustedes encontré una familia fuera de casa.

Gracias a la comunidad del IER, por recibirme con tanto cariño. Por permitirme disfrutar estos años rodeada de increíbles personas que integran su institución.

Por último, agradezco al Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE Sol), por proporcionar una beca para el desarrollo del presente trabajo.

Resumen

Al incorporar la energía de concentración solar en la operación de reactores hidrotérmicos, los cuales operan a alta presión, surgen distintas complicaciones (Xiao et al. 2019, Pearce et al. 2019), una de ellas es que la distribución de flujo radiativo sobre los receptores es extremadamente dispareja, es decir, existen zonas del receptor que reciben altos porcentajes de radiación concentrada en comparación con otras que básicamente no la reciben (He et al. 2019). Esta diferencia de radiación sobre la superficie del receptor ocasiona gradientes de temperatura significativos y zonas de altas temperaturas locales, lo cual ocasiona gradientes térmico y trae consigo retos importantes en la seguridad del sistema y su eficiencia de operación. En el caso de los sistemas de foco lineal, como lo es el Canal Parabólico (CP), la radiación es concentrada mayormente en la parte inferior de los receptores.

Existen distintas estrategias que pueden ayudar a mejorar la distribución de flujo sobre el receptor, una de ellas es el uso de concentradores secundarios que permitan concentrar radiación en la parte superior del receptor.

El presente trabajo evalúa la distribución de flujo radiativo sobre el receptor circular de un CP al acoplar un concentrador solar secundario. Se proponen dos concentradores secundarios para trabajar con el CP. El primer sistema acoplado al CP es un Concentrador Parabólico Compuesto (CP-CPC). En este caso se realiza una simulación de trazado de rayos sobre el sistema colocando el conjunto del tubo receptor y el CPC a distintas distancias del foco. El segundo sistema acoplado al CP es un Concentrador en V (CP-CV), donde se realiza trazado de rayos colocando el receptor a diferentes distancias del foco y con diferentes distancias al CV. En este caso, se utiliza adicionalmente un algoritmo de optimización evolutiva para determinar la configuración del segundo concentrador.

En ambos casos, se utiliza el Método Monte Carlo de Trazo de Rayos (MCTR) en 2 dimensiones y se presenta un estudio de las distintas configuraciones propuestas, analizando la distribución de flujo radiativo sobre el receptor, con lo que se determina la no uniformidad del flujo (U) y la pérdida de rayos (ζ). Entre menores sean los parámetros, mejor desempeño tiene el sistema en término de homogenización e intercepción de rayos en el receptor.

Un sistema convencional de CP con ángulo de borde de 80.3° tiene una $U = 0.854$ y un factor de pérdida $\zeta = 0.024$. En el sistema CP-CPC con ángulo de borde de 8.30° de ángulo de aceptación la configuración con menor U es el que tiene la apertura del CPC desplazada $-3R$ del foco, obteniendo $U = 0.698$, sin embargo la fracción de pérdida de rayos es del $\zeta = 0.518$. Un sistema convencional de CP con ángulo de borde de 45° tiene una $U = 1.318$ y un factor de pérdida $\zeta = 0.006$. Para la configuración CP-CPC con ángulo de borde de 45° el mejor desempeño es el que desplaza la apertura a $-8R$ el cual obtiene una pérdida de rayos de $\zeta = 0.480$ y $U = 0.774$.

En el sistema CP-CV se utilizó un CP con ángulo de borde de 45° . El mejor resultado obtenido de la optimización tiene un buen desempeño en la homogenización del sistema, con una $U = 0.339$ y la pérdida de rayos de $\zeta = 0.051$.

Tanto la configuración CP-CPC y CP-CV tienen un mejor desempeño en el parámetro de homogenización U en comparación con el sistema de CP convencional. Por lo anterior, se concluye que utilizar un concentrador secundario permite la homogeneización del flujo radiativo,

sin embargo hay que tomar en cuenta que es inevitable sacrificar una fracción de los rayos. En función de la configuración será el peso que tenga la pérdida de rayos. En nuestro caso, el mejor desempeño se obtuvo con el sistema CP-CV, obteniendo buenos factores de homogeneización y bajos porcentajes de pérdida de rayos.

Índice general

1. Introducción	12
1.1. Descripción del problema	14
1.2. Objetivos del trabajo	15
2. Antecedentes	16
2.1. Reactores hidrotermales con canal parabólico	16
2.2. Energía solar térmica	18
2.2.1. Baja temperatura	19
2.2.2. Media temperatura	21
2.2.3. Alta temperatura	25
2.3. Algunos fundamentos de concentradores solares	28
2.3.1. Concentración de radiación solar	29
2.3.2. Temperatura de operación en función de la concentración	29
2.3.3. Ley de reflexión	29
2.3.4. Errores ópticos	30
2.3.5. Análisis en 2D de canales reflectores	31
2.3.6. Geometría de algunos sistemas concentradores	32
2.4. Concentradores secundarios en sistemas de foco lineal	34
3. Metodología	43
3.1. Modelo del CP y coordenadas del sistema	44
3.2. Método Monte Carlo de trazado de rayos	45
3.2.1. Inicialización de la distribución de rayos	46
3.2.2. Reflexión del rayo	47
3.3. Distribución de flujo sobre el receptor	47
3.3.1. Incertidumbre e intervalos de confianza en el MCTR	48

3.4. Simulación CP-CPC	49
3.4.1. Código de simulación para sistema CP-CPC	50
3.4.2. Esquema de distancias en las simulaciones CP-CPC	53
3.5. Optimización del sistema CP-CV	54
3.5.1. Definición del CV como segundo concentrador	54
3.5.2. Método de optimización de Evolución Diferencial	55
3.5.3. Código de simulación para sistema CP-CV	58
3.5.4. Esquema de distancias en las simulaciones CP-CV	60
4. Resultados	62
4.1. Validación de códigos	62
4.1.1. Trazado de rayos sobre el CP	62
4.1.2. Trazado de rayos sobre el CPC	64
4.2. Efecto de calidad de malla en los resultados obtenidos	65
4.2.1. Dependencia del resultado de distribución de flujo en función del número de segmentos del CPC	65
4.2.2. Dependencia del resultado de distribución de flujo CPC en función del número de segmentos del receptor	66
4.3. Distribución de flujo sobre sistema CP-CPC	67
4.3.1. Ángulo de aceptación de 80.3°	68
4.3.2. Ángulo de aceptación de 45°	71
4.4. Distribución de flujo de las configuraciones del sistema CP-CV obtenidos de la optimización	75
5. Conclusión	80

Índice de figuras

1.1. Suministro mundial de energía primaria, 2019 (IEA 2021).	12
2.1. Esquema del receptor y canal parabólico utilizado en el trabajo de Pearce et al. (2019), Almond et al. (2019).	17
2.2. Esquema del canal parabólico utilizado en la experimentación de Xiao et al. (2019)	18
2.3. Esquema de colector solar de placa plana.	19
2.4. Tubo evacuado en un caolector solar de tubos evacuados.	20
2.5. Colector solar de placa plana (ModuloSolar n.d.) y de tubos evacuados (LuxEnergy n.d.).	21
2.6. Colectores de polipropileno (Habitissimo 2009).	21
2.7. Canal parabólico: (a) esquema y (b) aplicación comercial (Teoremambiental 2018).	22
2.8. Sistema de Generación de Energía Solar en el desierto de Mojave, California, Estados Unidos (Roca 2021).	23
2.9. Esquema de sistema Fresnel	23
2.10. Receptores en colector solar tipo Fresnel Lineal.	24
2.11. <i>Kimberlina Solar Thermal Energy Plant</i> , en Bakersfield, California (ProTender 2018).	24
2.12. Concentrador parabólico compuesto, (a) esquema y (b) prototipo para uso comercial (García 2015).	25
2.13. Gemasolar, Planta de Torre Central, España (SENEREnergy 2011).	26
2.14. Esquema de una planta de torre central con generación eléctrica y almacenamiento de calor (Merchán et al. 2021).	26
2.15. Disco parabólico “EuroDISH” de la plataforma solar de Almería, España (Ciemat n.d.).	27
2.16. Esquema de una planta de generación por concentradores solares de discos parabólicos (Reddy & Veershetty 2013)	27
2.17. Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del Instituto de Energías renovables (HOSIER) (Estrada et al. 2015).	28

2.18. Vectores en la ley de reflexión especular.	30
2.19. Proyección sobre el plano xy de la reflexión de un rayo.	32
2.20. Geometría de la parábola.	32
2.21. Configuración del CPC.	33
2.22. 4 principales zonas en la distribución de flujo radiativo sobre el receptor.	34
2.23. Razón de concentración local sobre la circunferencia del receptor tubular en un sistema de Fresnel Lineal.	35
2.24. Receptor de Fresnel de un sólo tubo con cavidad reflectora.	35
2.25. Razón de concentración en tubos de un sistema Fresnel con receptor de múltiples tubos.	36
2.26. Reflectores secundarios de múltiples espejos propuestos por Tang et al. (2021).	37
2.27. Distribución de flujo presentada en el trabajo de Tang et al. (2021) para los CPs convencionales y los CPs con segundo concentrador.	38
2.28. Sistema propuesto por Wang et al. (2014) y comparación de la distribución de flujo con CP convencional y CP con segundo concentrador.	39
2.29. Razón de concentración local de los CP's originales y con espejo plano sobre el receptor utilizando en el estudio de Rodriguez-Sanchez & Rosengarten (2015).	40
2.30. Sistema propuesto por Karathanassis et al. (2017) y comparación de la distribución de flujo con diferentes anchos para el segmento S.	41
2.31. Esquema de la propuesta de Grena & Tarquini (2011) para segundo concentrador en un sistema de Fresnel Lineal.	41
2.32. Sistema propuesto por Prasad et al. (2017) para segundo concentrador en un sistema de Fresnel Lineal y comparación de la distribución de flujo con Fresnel convencional y Fresnel con segundo concentrador.	42
3.1. Sistema convencional y sistema propuesto en el estudio.	43
3.2. Sistemas propuestos para su estudio.	44
3.3. Coordenadas del sistema.	45
3.4. Trazo de rayos sobre el CP.	47
3.5. Reflexión del rayo sobre la superficie del CP.	47
3.6. Esquema de configuración CP-CPC.	50
3.7. Diagrama de flujo del código de simulación de rayos sobre sistemas CP-CPC.	51
3.8. Intersección del rayo propagado con el receptor.	52
3.9. CPC aproximado con (n_p-1) segmentos.	52
3.10. Rayo con 6 rebotes sobre la superficie reflectora del CPC.	53
3.11. Esquema de configuración del sistema y desplazamiento del CPC.	53

3.12. Esquema de configuración CP-V.	54
3.13. Concentrador en V	55
3.14. Representación de la inicialización de vectores: (a) Gráfica de NP vectores en 2-D y (b) población de vectores objetivo de D dimensiones.	56
3.15. Esquema de la representación de cruza para un método que utiliza CR=0.4 y obtuvo $\text{rnbr}(i) = 4$ en esta cruza.	57
3.16. Diagrama de flujo del código de simulación de rayos sobre el sistema CP-CV. . .	59
3.17. Esquema de configuración del sistema y desplazamiento del CP-V.	60
4.1. Distribución de flujo sobre receptor cilíndrico de CP.	63
4.2. Intervalos de confianza al 95 % del flujo radiativo sobre receptor en los CPs simulados utilizando 1,000,000 de rayos.	64
4.3. Distribución de flujo sobre receptor cilíndrico de CPC.	65
4.4. Distribución de flujo radiativo sobre el receptor del CPC a diferentes valores de n_p	66
4.5. Distribución de flujo radiativo sobre el receptor del CPC a diferentes valores de n_p	67
4.6. Distribución de flujo sobre receptor cilíndrico utilizando un ángulo de aceptación de 80.3°	68
4.7. Trazo de rayos sobre sistema CP-CPC, utilizando un CP con ángulo de aceptación de 80.3° . Los rayos que llegan del CP al receptor son colocados en verde. Los que llegan del CP al CPC en amarillo. Los que rebotan del CPC al receptor en rojo. Los rayos pintados en azul son aquellos que han rebotado del CP pero no logran pasar la apertura del CPC y se consideran como perdidos.	70
4.8. Distribución de flujo sobre receptor cilíndrico utilizando un ángulo de aceptación de 45°	72
4.9. Trazo de rayos sobre sistema CP-CPC, utilizando un CP con ángulo de aceptación de 45° . Los rayos que llegan del CP al receptor son colocados en verde. Los que llegan del CP al CPC en amarillo. Los que rebotan del CPC al receptor en rojo. Los rayos pintados en azul son aquellos que han rebotado del CP pero no logran pasar la apertura del CPC y se consideran como perdidos.	74
4.10. Distribución de flujo radiativo sobre el receptor para sistema optimizado con distintos desplazamientos de y.	76
4.11. Trazo de rayos sobre sistemas CP-V con desplazamiento. Los rayos en verde llegan directamente del CP al receptor, los rayos amarillos llegan del CP al CV y los rayos rojos son los que rebotan del CV.	77
4.12. Uniformidad (línea azul) y factor de pérdida (línea morada) en función de la posición del receptor para el sistema CP-CV.	78

Índice de tablas

2.1. Dimensiones de la parábola usada por Tang et al. (2021).	37
2.2. Dimensiones de las parábolas utilizadas en el trabajo de Rodriguez-Sanchez & Rosengarten (2015).	39
3.1. Parámetros de los 2 colectores de canal parabólico utilizado en el trabajo.	45
3.2. Desplazamiento del centro del receptor en función del porcentaje de rayos interceptados.	61
4.1. Flujo de radiación promedio q_m , U y ζ para el sistema CP-CPC con ángulo de aceptación de 80.3°	71
4.2. Flujo de radiación promedio q_m , U y ζ para el sistema CP-CPC con ángulo de aceptación de 45°	75
4.3. Parámetros obtenidos de la optimización del CV para distintos desplazamientos del receptor en y	76
4.4. Flujo promedio q_m , U , ζ y F.O. para los los sistemas con desplazamientos en y de -0.07 , -0.077 y -0.08	77
5.1. Flujo de radiación promedio q_m , U y ζ de la mejor configuración en los sistemas estudiados.	80

Capítulo 1

Introducción

La creciente demanda de energía a lo largo de los últimos años ha provocado un consumo acelerado de los combustibles fósiles. Como consecuencia de lo antes mencionado se ha presentado un incremento acelerado de la emisión de gases de efecto invernadero. Lo anterior ha contribuido al cambio climático antropogénico, lo que genera graves consecuencias en el medio ambiente. Por lo anterior, el desarrollo de tecnología para la explotación de fuentes de energía no contaminante y sustentable es indispensable, por lo que las energía renovables se postulan como una solución.

De acuerdo con las cifras reportadas por la Agencia Internacional de energía en el en *World Energy Balances*, el suministro mundial de energía primaria para el 2019 alcanzó las 14,474.74 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) (IEA 2021). El recurso energético con mayor participación fue el crudo, con 30.9 % (Figura 1.1). Por otro lado, dado al interés mundial por la disminución de emisiones en el sector energético, las energía renovables van tomando cada vez una contribución más importante en la matriz energética mundial con el 14.1 % del suministro, representando 1.1 % más que el año 2018.

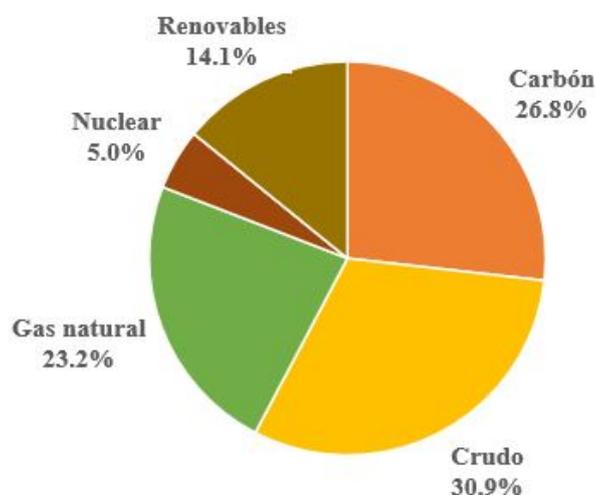


Figura 1.1: Suministro mundial de energía primaria, 2019 (IEA 2021).

Dentro de la fracción correspondiente a energías renovables el 66.7% es por energía prove-

niente de biomasa (biocombustibles, transformación de residuos, combustión de biomasa natural, entre otras), el 17.7 % es por hidroenergía y el 15.6 % restante incluye a energía solar fotovoltaica, solar térmica, geotermia y eólica.

La biomasa es el recurso renovable más común para la obtención de energía. Su uso es amplio en países de bajo desarrollo económico, ya que es usada como fuente de calor a través de su combustión. Se estima que el potencial total de la biomasa disponible anualmente es 1.08×10^{11} tep, lo que equivale a más de 7 veces el suministro mundial de energía (Kan et al. 2016). Recientemente se ha prestado mayor atención en el desarrollo de tecnología e identificación de biomasa que permita obtener altos rendimientos energéticos de forma sustentable (McKendry 2002). Por otro lado, el procesamiento de la biomasa es atractivo no sólo como fuente de energía, sino también por la obtención de productos químicos de alto valor agregado (Kan et al. 2016).

Los métodos de transformación de biomasa se clasifica en los siguientes grupos: biológica, química y termoquímica (Ayala-Cortés et al. 2020). El procedimiento más adecuado dependerá del tipo de biomasa utilizada, tomando en cuenta su composición y grado de humedad, así como el producto que se desea obtener al final del proceso. A diferencia de la conversión química y biológica, los métodos termoquímicos tiene una mayor eficiencia, menor tiempo de reacción y una mayor capacidad de transformar la mayoría de los componentes orgánicos (Zhang et al. 2010).

Dentro de los procesamientos de conversión termoquímica se encuentra la combustión, la pirólisis, la gasificación y el hidrotermal. Este último se caracteriza por utilizar agua como medio de reacción, por lo cual se emplea biomasa húmeda (Kruse et al. 2013). Por otro lado, los procesamientos de combustión, pirólisis y gasificaciones son de conversión seca, es decir, sólo pueden trabajar con altas eficiencias si la materia prima se encuentra seca (biomasa con un contenido de agua menor al 10 % de su peso) (Kruse et al. 2013, Ayala-Cortés et al. 2020). Si se quiere evitar la pérdida de energía por evaporación de agua en estos procesos es necesario emplear técnicas de secado, las cuales aumentan el costo y reducen la eficiencia global. Con la finalidad de aprovechar la biomasa húmeda para uso energético, sin someterla a un tratamiento de secado previo, se busca desarrollar tecnología de procesamiento hidrotermal.

El procesamiento hidrotermal es un procedimiento en el cual biomasa dentro de un ambiente acuoso reacciona en condiciones subcríticas o supercríticas, a altas temperaturas y presiones (típicamente entre 200-800°C y 5-30MPa) en ausencia de oxígeno (Kan et al. 2015). Bajo este estado se favorecen las reacciones de descomposición y despolimerización de la materia orgánica, obteniendo como resultado varios productos como biocurdo, biocarbón, biogas, químicos de alto valor agregado, entre otros (Castello et al. 2019). Dependiendo las condiciones en las cuales se opere el sistema se puede clasificar como carbonización hidrotermal (temperatura $\leq 250^\circ\text{C}$ y presión $\leq 2\text{MPa}$), licuefacción hidrotermal (180-370°C y 4-25MPa) y gasificación hidrotermal (400-800°C y 4.3-50MPa) (Strezov & Evans 2014).

A pesar de las múltiples ventajas que presentan las tecnologías hidrotermales en el procesamiento de la biomasa para obtener bioenergéticos es importante resaltar que también presenta grandes retos que no han permitido su desarrollo comercial. Dentro de los principales obstáculos que se tienen dentro del procesamiento hidrotermal es el alto consumo de energía que se requiere llevar la suspensión acuosa a condiciones críticas para su operación. Los procesos químicos convencionales suplen la demanda energética con los productos obtenidos del sistema o combustibles fósiles, lo cual reduce la eficiencia energética y la producción de los bioenergéticos (Hognon

et al. 2015). Para ello se proponen sistemas de recuperación de calor para pre-calentamiento del sistema y reducir el consumo energético (Strezov & Evans 2014).

Debido a lo anterior, se han dirigido esfuerzos en investigación enfocada a integrar la energía solar como fuente de calor con la finalidad de obtener un sistema más eficiente y sustentable. La tecnología de concentración solar permite alcanzar la temperatura requerida en el procesamiento hidrotermal. La incorporación de la energía solar al proceso se propone de dos principales configuraciones: el calentamiento de un fluido térmico con concentradores solares que posteriormente transfiera su calor a un reactor hidrotermal; en la segunda configuración se propone un receptor solar sobre el cual incida radiación solar concentrada con las características necesarias para que las reacciones se lleven ahí mismo (Ayala-Cortés et al. 2020).

Se han estudiado diversas tecnologías de energía solar térmica para suplir la energía de estos procesos químicos. Con base en las temperaturas requeridas para el procesamiento (200-800 °C) el canal parabólico puede proporcionar el calor requerido para carbonización y licuefacción hidrotérmica o como pretratamiento. Ejemplo de la anterior es el estudio realizado por Xiao et al. (2019) donde proponen la utilización de un canal parabólico (CP) con receptor tubular para pretratamiento a 170°C. Pearce et al. (2019) utilizan un CP modificado para operar a 320°C, en donde plantean el uso de varios receptores de diámetro menor para sustituir la configuración tradicional de un único receptor y además incorporan un concentrador secundario semicilíndrico. Algunos estudios muestran que la tecnología de concentración solar tiene la capacidad de proveer la energía demandada para procesos químicos como lo son los procesos hidrotermales, por lo cual incorporarlo como fuente de energía podría ser una solución atractiva (Giaconia et al. 2017).

1.1. Descripción del problema

Al incorporar la energía de concentración solar en la operación de reactores hidrotérmicos surgen distintas complicaciones, una de ellas es la manifestación de estreses térmicos debido a los gradientes de temperatura en la pared del receptor como producto de la no homogeneidad del flujo radiativo concentrado (Venkataraman et al. 2019).

Dentro del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) se han realizado estudios de un reactor de licuefacción hidrotermal utilizando como fuente de energía radiación solar concentrada del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER). Sin embargo, a partir de los estudios nos han permitido evidenciar algunos retos y limitaciones de esta tecnología. Con esta configuración, el reactor está sometido a grandes presiones internas, por lo que el estrés térmico exige el engrosamiento de la paredes para contrarrestar sus efectos. Esto implica aumento en el costo de reactor, mayores resistencias térmicas y peores eficiencias.

Actualmente en el Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol) se lleva a cabo el proyecto “Tecnología solar para obtención de productos con valor agregado mediante procesamiento hidrotermal”. Este proyecto interdisciplinario tiene como objetivo desarrollar tecnología de concentración solar para su aplicación en reactores de procesamiento hidrotermal que permita obtener materiales de alto valor agregado a partir de biomasa. De forma particular se estudian los sistemas de canal parabólico sobre reactores con configuraciones específicas, así como el diseño de plantas que implementen estas tecnologías para satisfacer las necesidades de

las industrias y sector energético.

Como parte del proyecto desarrollado por el CeMIE-Sol y con base en los retos antes mencionados, el presente trabajo propone el diseño de concentradores solares secundarios con la finalidad de fomentar la homogeneización del flujo radiativo sobre el receptor, es decir el reactor hidrotérmico. Al ser el canal parabólico una tecnología con una aplicación particular en este campo, el enfoque del análisis teórico se centra en esta tecnología. Se propone la utilización de un concentrador parabólico compuesto y un concentrador en V como posibles concentradores secundarios del sistema.

1.2. Objetivos del trabajo

Objetivo central de este trabajo es evaluar la distribución de flujo radiativo sobre el receptor circular de un canal parabólico al acoplar un concentrador solar secundario.

Los objetivos particulares:

- Desarrollar y validar un código de programación de trazado de rayos sobre un Canal Parabólico (CP) con receptor circular y obtener la distribución de flujo sobre el receptor.
- Desarrollar y validar un código de programación de trazado de rayos sobre un Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) y de un Concentrador en V (CV) con receptor circular y obtener la distribución de flujo sobre el receptor de cada uno.
- Realizar la simulación del canal parabólico acoplado con un CPC y un CV como concentrador secundario y obtener el análisis de flujo radiativo sobre el receptor circular para cada uno.
- Realizar un estudio paramétrico del CP con los concentradores secundarios y evaluar el desempeño de las distintas configuraciones en la homogeneización del flujo radiativo sobre el receptor circular.

A continuación se presenta el Capítulo 2: Antecedentes, donde se expone el marco sobre el cual se desarrolla el tema de tesis. En este capítulo se presenta un breve *review* de estudios sobre homogeneización de flujo en sistemas concentradores, así como su aplicación práctica en reactores hidrotermales. Además, se explican los principales conceptos utilizados en el área de concentración solar, los cuales son una base para desenvolver el trabajo. El Capítulo 3: Metodología, describe los sistemas ópticos utilizados, particularmente la configuración de los sistemas con los concentradores secundarios. En este capítulo se explica el desarrollo de los códigos de programación para las simulaciones de trazado de rayos sobre los sistemas, así como los parámetros arrojados por las simulaciones para realizar una comparación cuantitativa de la homogeneidad de flujo radiativo sobre los receptores. El Capítulo 4: Resultados, se presentan y analizan los resultados obtenidos de las simulaciones sobre los distintos sistemas ópticos en términos de homogeneidad de flujo y pérdida de rayos. En el Capítulo 5: Conclusiones, se realiza un resumen del desempeño de los diferentes sistemas probados, así como los principales aprendizajes obtenidos en el desarrollo del estudio.

Capítulo 2

Antecedentes

Las energías renovables son una fuente de energía inagotable a escala humana las cuales pueden ser transformadas para su aprovechamiento en las actividades realizadas por las personas. Al ser tecnologías que aprovechan recursos abundantes y no contaminantes se consideran parte fundamental para el desarrollo de sociedades más sustentables. Dentro de las distintas energías renovables se encuentra la energía solar térmica, la cual consiste en captar radiación solar para utilizarla como fuente de calor en su aplicación en diversos procesos energéticos. Dentro de las distintas aplicaciones estudiadas se encuentran los reactores hidrotermales para la producción de biocombustibles, sin embargo acoplar la energía solar térmica en este proceso implica retos importantes.

2.1. Reactores hidrotermales con canal parabólico

Como se mencionó anteriormente, el procesamiento hidrotermal es una tecnología que permite el aprovechamiento de biomasa y materia prima mixta para obtener varios productos como biocrudo, biocarbón, biogas y químicos de alto valor agregado (Castello et al. 2019). El proceso se lleva a cabo en condiciones subcríticas o supercríticas, a altas temperaturas y presiones (típicamente entre 200-800°C y 5-30MPa) en ausencia de oxígeno (Kan et al. 2015). Existen distintos tipos de tecnología de procesamiento hidrotermal, como lo es la carbonización hidrotermal (temperatura $\leq 250^{\circ}\text{C}$ y presión $\leq 2\text{MPa}$), licuefacción hidrotermal (180-370°C y 4-25MPa) y gasificación hidrotermal (400-800°C y 4.3-50MPa) (Strezov & Evans 2014).

La licuefacción hidrotermal ha sido probada a nivel laboratorio y su aplicación a nivel comercial para la generación de biocombustibles de tercera generación ha despertado gran interés. Pearce et al. (2019) presentan un estudio a escala pre-piloto en donde integra la energía solar de concentración a un sistema de licuefacción hidrotermal con la finalidad de mejorar la eficiencia energética y el impacto económico para el escalamiento de residuos en la producción de biocrudo. En este caso, los autores usaron un canal parabólico de seguimiento en un eje con una distancia focal de 120mm, una apertura de 690mm de ancho y 1960mm de largo. Sobre la superficie reflectora se colocó un polímero en forma de película delgada (Skyfuel ReflecTech Plus) para mejorar la reflectividad. El receptor original fue remplazado por uno capaz de resistir las altas temperaturas y presiones requeridas en el sistema de licuefacción

hidrotermal de biomasa. El receptor diseñado como reactor contaba con 4 tubos negros de 6mm de diámetro interno y 8mm de externo. Estos se encontraban en un arreglo “cuadrado” dentro de un tubo de borosilicato con un diámetro interno de 30mm, el cual tenía un segundo espejo para mejorar el desempeño óptico. Sobre la apertura del canal parabólico se colocó una cubierta de vidrio para facilitar la limpieza y evitar daños sobre el receptor y la superficie reflectiva (Almond et al. 2019).

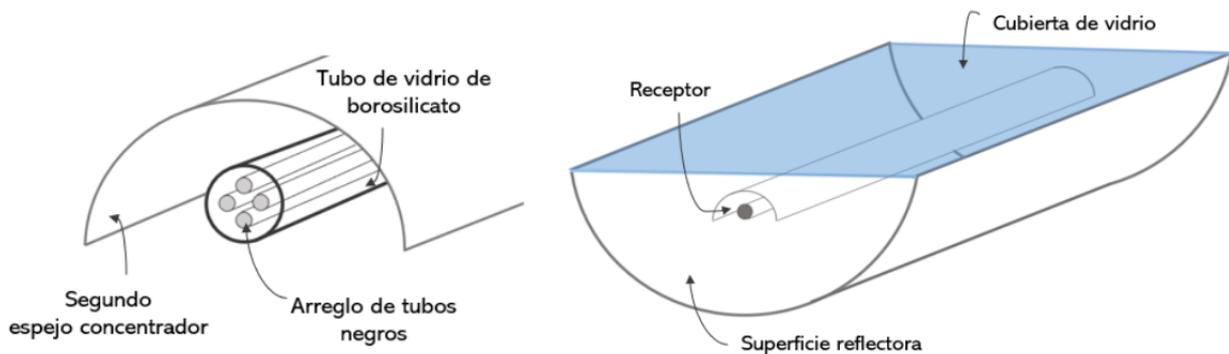


Figura 2.1: Esquema del receptor y canal parabólico utilizado en el trabajo de Pearce et al. (2019), Almond et al. (2019).

El sistema anteriormente descrito funciona por lotes y fue probado en la India con distintas composiciones de biomasa. La materia prima estaba compuestas por algas, plástico PET, bagazo de caña de azúcar y estiércol animal, utilizando 20 % de sólidos y 80 % de agua. Una vez que el sistema alcanzaba 320°C de temperatura, se mantenía durante 30 minutos y posteriormente se extraía la mezcla para su posterior análisis usando espectrometría de masas por cromatografía de gases.

Respecto al desempeño de la temperatura en el sistema, los resultados muestran que tanto en el seguimiento Norte-Sur como la orientación Este-Oeste del concentrador solar lograron obtener temperaturas promedio del receptor de 220 °C y 300 °C de octubre a febrero y de 320 °C a 350 °C de marzo a junio. La radiación solar registrada y las temperaturas máximas se encuentran dentro de los límites necesarios para el procesamiento de licuefacción hidrotermal. Por otro lado, las muestras experimentales extraídas indican que más del 80 % de la biomasa se transformó en un producto líquido de componentes orgánicos como hidrocarburos alifáticos y aromáticos.

Otro ejemplo se presenta en el trabajo realizado por Xiao et al. (2019) donde estudian la aplicación de tecnología solar para el pretratamiento hidrotermal de microalga. El pretratamiento hidrotermal se lleva a cabo a temperaturas menores a 180°C y a presiones menores a 2MPa y se utiliza para mejorar la hidrólisis y aumentar la producción de metano en los siguientes procesos de digestión anaeróbica. Sin embargo, el alto consumo de energía impide el enfoque de la comercialización. Los estudios han arrojado que la entrada de energía en el pretratamiento hidrotermal fue mayor que las ganancias de energía extras obtenidas por la digestión anaeróbica. Por lo anterior, Xiao et al. (2019) proponen un sistema de pretratamiento hidrotermal manejado por energía solar utilizando como biomasa lodos de microalgas.

El sistema está compuesto por un tanque de alimentación, una bomba, un colector solar tipo

canal parabólico con seguimiento, contenedores aislados térmicamente y enfriadores. Generalmente el calor es transferido del canal parabólico a la biomasa utilizando un intercambiador de calor, sin embargo en el estudio de Xiao et al. el lodo de microalga fluye directamente a través del CP, en donde las células de microalgas se hidrolizan mientras absorben energía solar. El CP utilizado en para el pretratamiento hidrotérmico es de un largo de 6m, una apertura de 2.55 y una distancia focal de 0.85m. El diseño del receptor es para condiciones de altas temperaturas y presiones, es decir, 200°C y 40 bar, con lo que su diámetro interno es de 32mm y externo de 38mm. El receptor se encuentra dentro de un tubo de vidrio al vacío que tiene 86mm y 90mm de diámetro interno y externo, respectivamente.

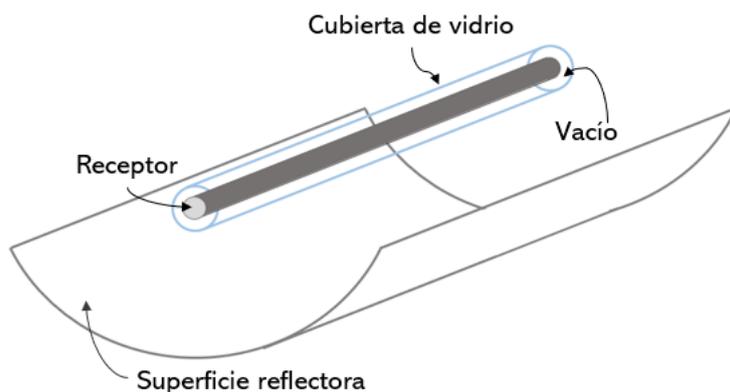


Figura 2.2: Esquema del canal parabólico utilizado en la experimentación de [Xiao et al. \(2019\)](#)

Dentro de los resultados obtenidos en el estudio se registraron temperaturas de salida al rededor de 135-170 °C y la producción de metano aumentó un 57% utilizando microalgas con pretratamiento hidrotérmico a comparación del procesamiento de microalgas cruda. Esto sugiere que el sistema de pretratamiento hidrotérmico manejado por energía solar puede ser usado exitosamente para el pretratamiento de biomasa de microalgas y proveer un enfoque alternativo para el pretratamiento hidrotérmico de biomasa.

En los estudios presentados anteriormente se obtienen buenos desempeños en la aplicación de energía solar para procesos hidrotérmicos. En ambos casos, bajo las mejoras necesarias, se obtienen las temperaturas requeridas para el desempeño del sistema y son capaces de trabajar a altas presiones. Es importante mencionar que siguen existiendo retos técnicos para la aplicación de estos sistemas, sin embargo los estudios ha permitido demostrar que la integración de energía solar en los procesamientos hidrotérmicos ha logrado ahorros energéticos significativos e impactos positivos en el costo del proceso.

2.2. Energía solar térmica

Un colector solar es un dispositivo que permite captar la energía solar y aprovecharla como energía térmica para realizar un trabajo. Existen diversos tipos de sistemas diseñados para coleccionar energía solar térmica y de acuerdo con las temperaturas demandadas en la aplicación será el tipo de tecnología que se requiera. Por lo anterior, estos sistemas podrían clasificarse en

función de la temperatura que logran proporcionar al fluido de trabajo como: baja (menos de 100 °C), media (entre 100 y 400 °C) alta temperatura (más de 400 °C).

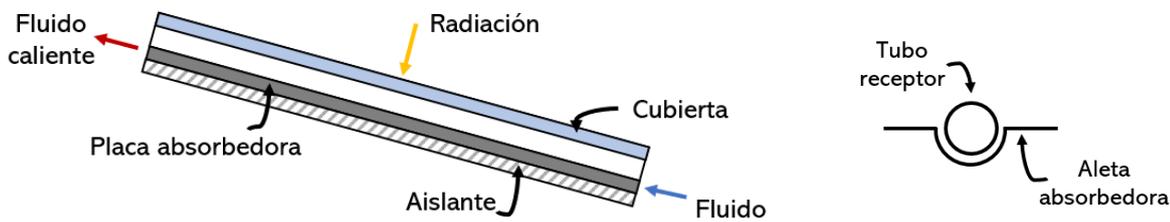
En el caso de los colectores de media y alta temperatura se alcanzan esos rangos ya que son sistemas de concentración. La energía solar de concentración capta la radiación solar y los dirige a una superficie absorbedora de menor tamaño conocida como receptor, con la finalidad de aumentar el flujo radiativo sobre este último y así obtener mayores temperaturas. A continuación se explican más a detalle los diferentes tipos de sistemas termosolares: baja temperatura, media temperatura y alta temperatura (Usón & Bribián 2010).

2.2.1. Baja temperatura

Los colectores de baja temperatura son aquellos con los cuales se pueden obtener temperaturas de hasta 100°C (Usón & Bribián 2010). La captación se realiza de forma directa, sin tener concentración de los rayos solares. Dentro de este tipo de tecnología se encuentran los colectores de placa plana, de tubos de vacío, de planos de polipropileno y estanques solares.

El colector de placa plana es una tecnología altamente comercial, compuesta principalmente por una cubierta transparente y una superficie plana absorbedora con un medio de transferencia de calor (Kalogirou 2013). La radiación pasa por la cubierta transparente para llegar a la superficie absorbedora con alta absorptividad, donde una gran porción de la energía es absorbida por el plano y posteriormente transferida como calor a un fluido que puede ser utilizado directamente o almacenado para su uso posterior.

Existen diferentes configuraciones que integran la superficie absorbedora y el sistema de transferencia de calor. Los sistemas más comunes utilizan una serie de tubos equidistantes que corren a lo largo de colector por donde circula el fluido. Estos tubos tienen aletas con las cuales forman el plano absorbedor.



(a) Detalles de colector solar de placa plana.

(b) Detalles del tubo receptor.

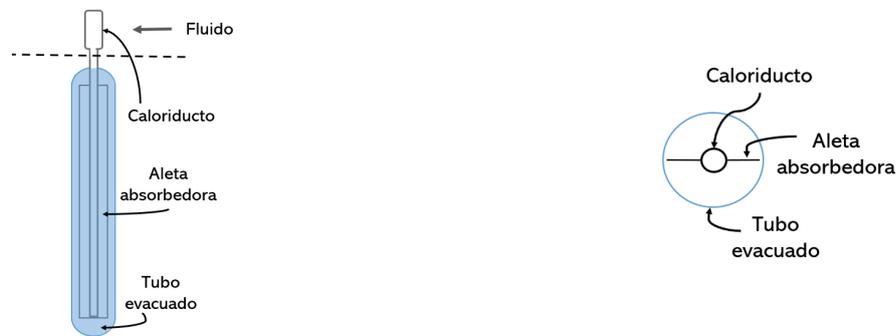
Figura 2.3: Esquema de colector solar de placa plana.

La cubierta transparente reduce las pérdidas de calor por convección y radiación, ya que

el vidrio es transparente a la radiación de onda corta que recibe del sol, pero es opaca a la radiación térmica de onda larga que se emite del plano absorbedor. Por lo anterior, entre el plano absorbedor y la cubierta transparente se genera un efecto invernadero.

Estos tipos de sistema no tienen seguimiento solar, son tecnologías estáticas. En el caso del colector plano y el de tubos evacuados, estos se colocan en la posición óptima según las coordenadas donde se encuentran que permita ganar la mayor cantidad de radiación a lo largo del año.

Los colectores solares de tubos evacuados, por su parte, son sistemas que están conformados por un tubo de vidrio evacuado que contiene a un tubo absorbedor interno donde se realiza el intercambio de calor con el fluido. El tubo de vidrio permite evitar las pérdidas de calor por convección y, además cuenta con una superficie selectiva que permite tener un buen desempeño reduciendo las pérdidas por radiación (Kalogirou 2013).



(a) Detalles de tubo evacuado en un colector solar.

(b) Corte transversal en tubo evacuado.

Figura 2.4: Tubo evacuado en un caolector solar de tubos evacuados.

Este tipo de tecnología, al igual que los calentadores planos, es ampliamente utilizada en el sector doméstico para calentamiento de agua sanitaria, sustituyendo los calentadores de gas o electricidad. Comúnmente estos sistemas trabajan con un tanque aislado bajo el principio de termosifón, en donde por diferencia de densidades, el agua o fluido caliente de la parte superior del captador fluye hacia el tanque de almacenamiento localizado por encima del captador, mientras que el agua o fluido menos caliente y con mayor densidad fluye por la parte inferior del tanque hacia la parte inferior del captador para completar el ciclo.



(a) Colector solar de placa plana.



(b) Colector solar de tubos evacuados.

Figura 2.5: Colector solar de placa plana ([ModuloSolar n.d.](#)) y de tubos evacuados ([LuxEnergy n.d.](#)).

Los colectores solares de polipropileno sin cubierta de vidrio son sistemas comúnmente utilizados para el calentamiento de albercas y son colocados en el techo sin una orientación preferente ni seguimiento solar. En el mercado hay muchas configuraciones de esta tecnología, comúnmente son de mallas conformadas por la unión de múltiples tubos pequeños de polipropileno. Estos sistemas tienen alta absorptividad y protección para evitar su degradación del plástico por la exposición solar. En el caso de los sistemas de calentamiento de alberca, estos sistemas utilizan una bomba para recircular el agua de la alberca por los colectores ([Zhao et al. 2018](#)).



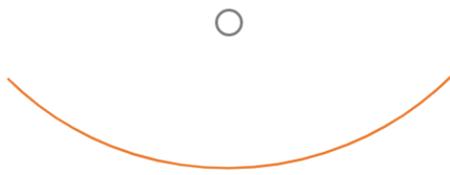
Figura 2.6: Colectores de polipropileno ([Habitissimo 2009](#)).

2.2.2. Media temperatura

Los colectores de media temperatura alcanzan temperaturas entre 100°C y 400°C ([Usón & Bribián 2010](#)). Ejemplo de sistemas termosolares de media temperatura son los colectores de canal parabólico, parabólico compuesto y Fresnel lineal con mecanismos de seguimiento solar en un eje.

Esta tecnología funciona por la concentración de rayos solares, por lo que consigue temperaturas mayores. Para ello se utilizan sistemas ópticos que dirigen la radiación solar hacia el receptor, el cual está diseñado para absorber la radiación concentrada y transferir la energía en forma de calor al fluido de trabajo.

El canal parabólico es la tecnología más madura y la más utilizada para la generación de energía eléctrica, alcanzando temperaturas mayores a 100°C (Moya 2012) y frecuentemente mayores a 300°C . El CP es un colector solar de foco lineal, compuesto básicamente por un canal concentrador en forma parabólica que refleja la radiación directa a un receptor colocado en la línea focal, a través del cual fluye un fluido caloportador. La radiación solar es transformada en energía térmica en forma de calor latente en el fluido. El calor obtenido del sistema puede ser usada para proporcionar energía térmica en procesos industriales, o para producir energía dentro de un ciclo Rankine.



(a) Esquema



(b) Prototipo para uso comercial.

Figura 2.7: Canal parabólico: (a) esquema y (b) aplicación comercial (Teoremambiental 2018).

El tubo receptor usado comúnmente se compone de dos tubos concéntricos. El tubo de adentro se le conoce como absorbedor ya que contiene el fluido de trabajo. Este generalmente es de acero y se encuentra recubierto por una película selectiva con alta absorción solar y baja emitancia de radiación infrarroja. El tubo exterior es de vidrio de borosilicato que generalmente cuenta con un recubrimiento antirreflejante para mejorar la transmitancia solar (Malan & Kumar 2021). Si es un sistema de tubo evacuado la sección anular entre los dos tubos se encuentra al vacío para reducir las pérdidas térmicas por convección.

Desde la década de los 80s esta tecnología se ha desarrollado comercialmente y ha sido aplicada para la generación eléctrica. Actualmente se utiliza en varios países como Estados Unidos, España, Australia, China, etc.



Figura 2.8: Sistema de Generación de Energía Solar en el desierto de Mojave, California, Estados Unidos (Roca 2021).

Por su parte, el colector tipo Fresnel Lineal es una tecnología muy atractiva debido a su bajo costo y la posibilidad de realizar concentración solar con un sistema de seguimiento menos complejo que en otros sistemas. Este sistema está formado por un conjunto de espejos largos y estrechos, que reflejan los rayos solares a un receptor lineal. Los espejos pueden tener una superficie plana o ligeramente curva (Mills 2012).

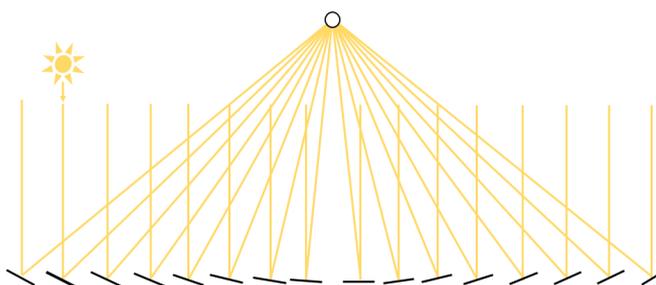
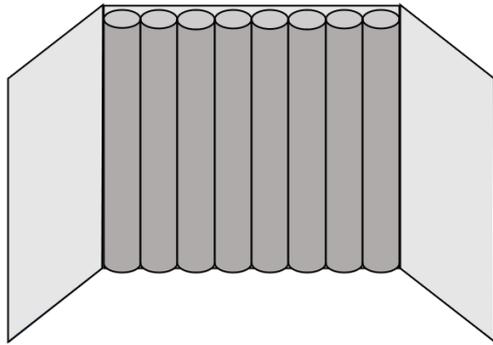
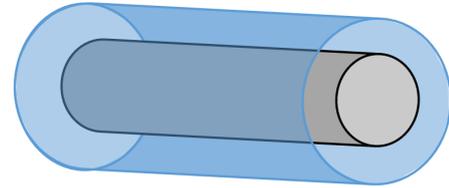


Figura 2.9: Esquema de sistema Fresnel

Existen diferentes configuraciones del receptor lineal, pero en general se podrían dividir en dos categorías principales: receptores de un solo tubo o receptores de múltiples tubos (Qiu et al. 2017). Los receptores de un solo tubo están conformado por un tubo absorbedor y, en algunos casos, por un tubo exterior de vidrio, al igual que el canal parabólico. Usualmente al receptor se le coloca un segundo reflector que permite aumentar el ángulo de aceptación y coleccionar un mayor número de rayos en la zona focal. En el caso de los receptores de múltiples tubos el receptor está conformado por una serie de tubos absorbedores sobre el plano focal del sistema.



(a) Receptor de múltiples tubos.



(b) Receptor de tubo único

Figura 2.10: Receptores en colector solar tipo Fresnel Lineal.

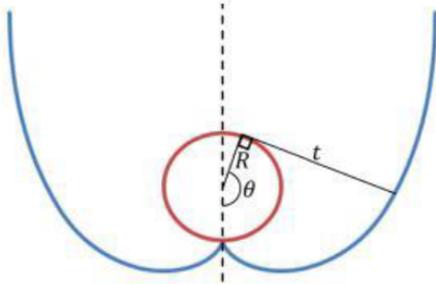
Existen pocas compañías que trabajan en la aplicación de este tipo de sistemas, ejemplo de ello es la compañía Areva Solar, la cual construyó una primera planta comercial de energía térmica en Bakersfield California. Este proyecto se llama *Kimberlina Solar Thermal Energy Plant*, el cual genera vapor sobrecalentado usando Fresnel Lineal como tecnología de concentración solar.



Figura 2.11: *Kimberlina Solar Thermal Energy Plant*, en Bakersfield, California ([ProTender 2018](#)).

Por otro lado, el CPC es un concentrador ideal no formador de imagen, es decir, alcanza la máxima concentración para las características geométricas del receptor y el ángulo de aceptación con el cual está diseñado ([Ustaoglu et al. 2016](#)). Los elementos principales del CPC son una superficie concentradora y un receptor. La superficie concentradora está compuesta por dos parábolas macrofocales y una involuta que se encuentra en la zona cercana al receptor. Por otro lado, los receptores cuentan con una superficie absorbidora y pueden tener distintas geometrías, entre las más comunes se encuentran los receptores planos y los tubulares ([Rabl 1976](#), [Baum & Gordon 1984](#)).

En particular, los CPC cilíndricos con absorbedor tubular tienen propiedades atractivas como la iluminación de todos los lados del absorbedor y la eliminación de la pérdida de calor en el lado trasero.



(a) Esquema



(b) Prototipo para uso comercial compuesto por múltiples CPC's.

Figura 2.12: Concentrador parabólico compuesto, (a) esquema y (b) prototipo para uso comercial (García 2015).

Dentro de sus aplicaciones está el calentamiento de agua, en actividades fotoquímicas e incluso acoplado a sistemas fotovoltaicos.

2.2.3. Alta temperatura

La tecnología de alta temperatura tienen grandes índices de concentración de radiación solar, por lo que alcanzan temperaturas entre 400°C y hasta 3500°C (Usón & Bribián 2010). Dichos sistemas se basan en tecnologías de concentración de foco puntual con seguimiento en dos ejes, como lo son las plantas solares de torre central (PTC), los discos parabólicos y los hornos solares.

Las Plantas de Torre central son un tipo de tecnología que en los últimos años ha tenido un gran desarrollo y aplicación. Del 2007 al 2009 la primera planta comercial de torre central fue construida en España. Actualmente es una tecnología que tiene presencia en la matriz de generación eléctrica de países como España, China, Estados Unidos, Australia, Alemania, entre otros (Ho 2017).



Figura 2.13: Gemasolar, Planta de Torre Central, España ([SENEREnergy 2011](#)).

Existen una gran variedad de configuraciones en las Plantas de Torre Central, sin embargo a grandes rasgos podemos identificar que consisten de un campo de helióstatos que refleja la radiación solar sobre un receptor donde se calienta un fluido. Ese mismo fluido caloportador, u otro obtenido calentado por él en un intercambiador de calor, es utilizado como fluido de trabajo para desarrollar un ciclo termodinámico que produce energía mecánica en una turbina, la cual es transformada en energía eléctrica a través de un subsistema eléctrico. La mayoría de las Plantas de Torre Central que están en operación utilizan vapor para accionar un ciclo Rankine, pero también las hay que operan con ciclo Brayton. Dependiendo la tecnología que se utilice, en el receptor pueden alcanzarse temperaturas superiores a los 1000K ([Merchán et al. 2021](#)).

Una gran ventaja de esta tecnología es la posibilidad de tener almacenamiento de calor, lo que permite rectificar la variabilidad que existe en la radiación solar a lo largo del día y producir energía eléctrica aun que no haya suficiente recurso. Las plantas comerciales almacenan energía térmica a través de tanques de sales fundidas ([Merchán et al. 2021](#)), ejemplo de ellos es la planta GemaSolar que se encuentra en Sevilla, España.

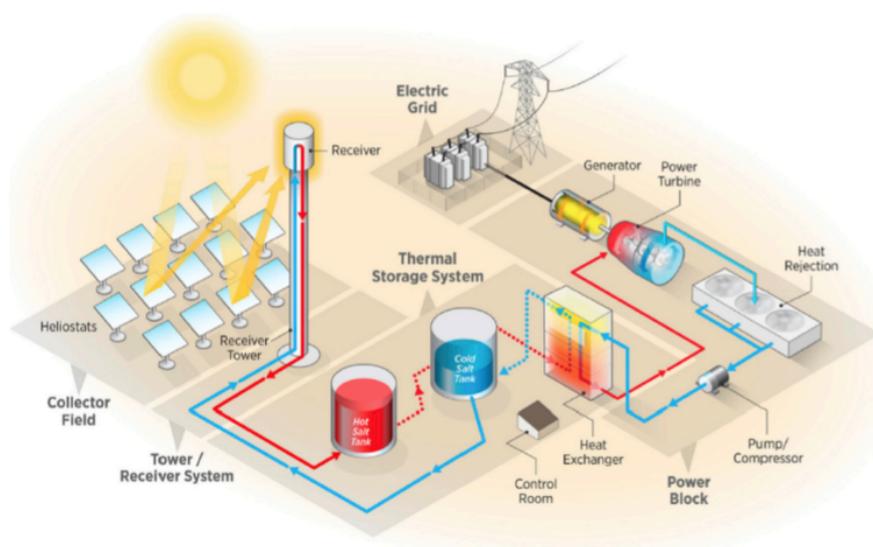


Figura 2.14: Esquema de una planta de torre central con generación eléctrica y almacenamiento de calor ([Merchán et al. 2021](#)).

Por su parte los discos o platos parabólicos, son una tecnología que utiliza espejos que forman una superficie paraboloide. El disco cuenta con un sistema de seguimiento solar y enfoca la radiación a un receptor donde se absorbe. La energía térmica puede ser utilizada con diferentes objetivos, como es la generación eléctrica utilizando varios discos en red o sistemas independientes para proveer bombeo de agua o plantas de destilación (Lokireddi et al. 2021, Zayed et al. 2021).



Figura 2.15: Disco parabólico “EuroDISH” de la plataforma solar de Almería, España (Ciemat n.d.).

En el caso de la generación de energía eléctrica, el calor absorbido es transferido directamente a un motor o generador térmico, o a un fluido de transferencia de calor que se utiliza en una planta de generación convencional.

Aunque un motor Brayton ha sido probado en la tecnología de disco, y algunas compañías han adaptado tecnología de microturbina, la mayor parte de la actividad comercial implica el uso de motores Stirling integrados en el receptor para la producción directa de electricidad. Los motores Stirling se acoplan con un generador, por lo que cada disco es un generador de energía autónomo, lo que permite su montaje en plantas que varían en tamaño (Schiel & Keck 2021).

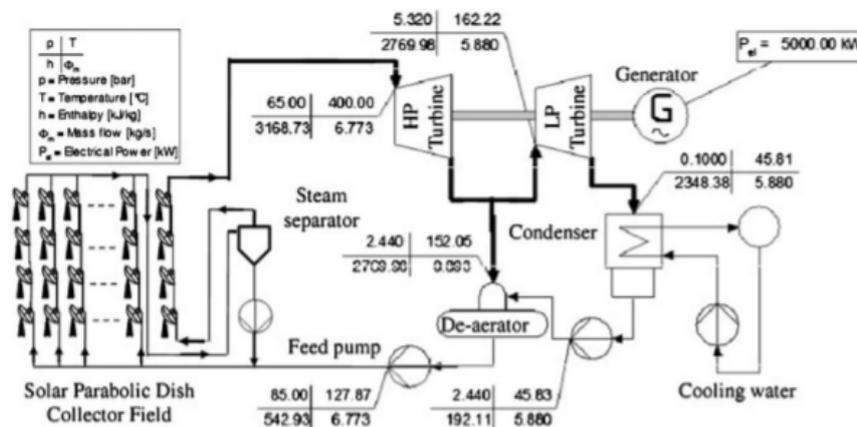


Figura 2.16: Esquema de una planta de generación por concentradores solares de discos parabólicos (Reddy & Veershetty 2013)

Finalmente los hornos solares, que son dispositivos que se utilizan principalmente con fines de investigación. Un horno solar consiste en un concentrador fijo que suele ser iluminado por un heliostato plano que hace el seguimiento solar. De este modo, la zona focal es fija y en ella se experimenta con reactores químicos solares y otros dispositivos que operan con altos flujos radiativos.

El concentrador típicamente se conforma por facetas en una superficie paraboloide, como lo es el horno solar que se encuentra en el Centro Nacional de Investigaciones Científicas en Odeillo, Francia de 1000kW. Sin embargo existen diferentes geometrías utilizadas, ejemplo de ello es el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo desarrollado en México, donde el concentrador es tiene un arreglo esférico por 409 facetas, diseñado para concentrar una potencia de alrededor de 30 kW y con un pico de concentración superior a 10,000 soles ([Riveros-Rosas et al. 2010](#)).



Figura 2.17: Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del Instituto de Energías renovables (HoSIER) ([Estrada et al. 2015](#)).

2.3. Algunos fundamentos de concentradores solares

Como se mencionó anteriormente, dentro de los sistemas de energía solar térmica se encuentran los sistemas de concentración. La tecnología de concentración incrementa el flujo de radiación solar en una determinada área y la dirige a una más pequeña conocida como receptor, el cual está diseñado para absorberla. La energía de concentración solar es una tecnología capaz suministrar energía térmica para la industria o ser transformada en energía mecánica o eléctrica. Una gran ventaja de estos sistemas, es que puede incorporarse almacenamiento térmico, lo que permite diferir la generación de energía eléctrica acorde a la demanda, otorgando flexibilidad y seguridad en el suministro.

En el área de concentración de radiación solar es importante definir algunos conceptos y leyes que son muy útiles, como lo es la razón de concentración, la ley de reflexión, los errores ópticos, entre otros. A continuación se presentan brevemente estos conceptos, para su desarrollo más amplio se invita a consultar la bibliografía.

2.3.1. Concentración de radiación solar

Uno de los parámetros principales que caracteriza a un concentrador solar es la razón de concentración geométrica (RC), la cual se basa únicamente en la geometría del sistema, y se encuentra definida como la razón entre el área de apertura y el área de la superficie de absorción (Rabl 1985).

$$C = C_{geo} = \frac{A_{ap}}{A_{abs}} \quad (2.1)$$

A partir del desarrollo de la ecuación anterior podemos obtener la concentración máxima para un sistema de canal en 2D que tiene un semiángulo de aceptación θ_a es

$$C_{ideal, 2D} = \frac{1}{\sin \theta_a} \quad (2.2)$$

En el caso de un sistema con seguimiento, la concentración ideal es

$$C_{ideal, 2D} = \frac{1}{\sin \Delta_s} \quad (2.3)$$

donde Δ_s es el semiángulo del cono solar.

2.3.2. Temperatura de operación en función de la concentración

El conocer la razón de concentración nos permite obtener otros parámetros importantes, como la temperatura teórica de operación del sistema. Para obtener este parámetro es necesario suponer que el sol y el universo se comportan como un cuerpo negro, la temperatura de la superficie del sol es T_{sun} y el resto se denomina ambiente y tiene una temperatura de $T_{amb} = 0$. A partir de estas suposiciones se hace un desarrollo matemático y se obtiene que

$$T_{abs} = T_{sun} \left[(1 - \eta) \tau \frac{\alpha}{\epsilon} \frac{C}{C_{ideal}} \right] \quad (2.4)$$

donde

$$\tau = (1 - \text{pérdidas ópticas en la atmósfera y el colector}) \quad (2.5)$$

α es la absorptancia del absorbedor para la radiación solar, ϵ es la emitancia del absorbedor en la región infrarroja correspondiente a T_{abs} y η es la fracción de radiación solar que es extraída como calor útil o pérdida por convección o conducción (Rabl 1985).

2.3.3. Ley de reflexión

La reflexión especular en las superficies es descrita por la ley de reflexión. La reflexión especular es aquella donde el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión con respecto

a la normal de la superficie, como puede observarse en la figura 2.18. Para nuestro problema la ley de reflexión se describe de forma vectorial en dos dimensiones y tiene la forma:

$$\hat{i} \cdot \hat{n} = \hat{r} \cdot \hat{n} \quad (2.6)$$

donde \hat{i} es el vector de propagación del rayo incidente, \hat{n} es la normal de la superficie reflector y \hat{r} es el vector del rayo reflejado. Desarrollando la ecuación, obtenemos que el vector reflejado se expresa como

$$\hat{r} = \hat{i} - 2(\hat{i} \cdot \hat{n})\hat{n} \quad (2.7)$$

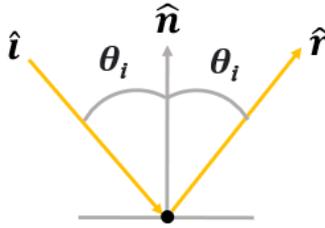


Figura 2.18: Vectores en la ley de reflexión especular.

2.3.4. Errores ópticos

En concentración solar, varios factores independiente a la estadística del fenómeno contribuyen a los errores ópticos: errores debido a que la superficie no es perfectamente especular, errores de seguimiento, errores de deformación y desplazamiento del receptor, entre otras. En otras palabras, los errores ópticos son aquellos factores que no permiten que el sistema cumpla perfectamente la ley de reflexión, lo que hacen que el sistema óptico no sea ideal. Debido a los errores, la reflexión promedio producida crea un cono de error, cuya intensidad máxima se encuentra en la dirección especular, pero disminuye típicamente de forma Gaussiana al desviarse de esta dirección.

En general, el error óptico global del sistema puede expresarse en términos de factores microscópicos, macroscópicos, pendiente y seguimiento, como se muestra en la siguiente ecuación

$$\sigma_{error}^2 = \sigma_{micro}^2 + \sigma_{macro}^2 + 4\sigma_{pendiente}^2 + 2\sigma_{seguimiento}^2 \quad (2.8)$$

El error producido a nivel microscópico hace referencia a la rugosidad que presentan los materiales en su acabado, lo cual genera esparcimiento del haz reflejado. El error macroscópico hace referencia a los problemas macroscópicos que pueden encontrarse en una superficie reflectora, como lo son rayaduras, dobleces, etc. El error de pendiente abarca aquellos que tienen fallo en el canteo u orientación de la superficie reflectora, también aquellos que tuvieron errores en la forma al momento de su fabricación. El error de seguimiento son los que tienen que ver con el sistema de seguimiento mecánico del sistema y su operación.

Como se mencionó, el rayo será reflejado en un cono que tiene la distribución de tipo Gaussiana. La desviación estándar de la distribución se relaciona al tamaño del cono solar y al tamaño del cono del error

$$\sigma_{reflejado}^2 = \sigma_{solar}^2 + \sigma_{error}^2 \quad (2.9)$$

Esta combinación de errores ópticos con el tamaño del disco solar se conoce como “Sol degradado”, ya que desde el punto de vista práctico, los errores ópticos se traducen en un agrandamiento del tamaño aparente del sol, visto desde el receptor. Es importante tener en cuenta que σ_{solar} no es igual al tamaño del cono solar Δ_s . Se sugieren valores de

$$\sigma_{solar} = \begin{cases} 3.6 - 5.6 \text{ mrad} & \text{foco puntual} \\ 2.6 - 4 \text{ mrad} & \text{foco lineal} \end{cases} \quad (2.10)$$

2.3.5. Análisis en 2D de canales reflectores

En el presente trabajo se desarrolla un estudio en 2 dimensiones de canales reflectores como el CP, CPC y CV. Es posible utilizar 2 dimensiones sobre este tipo de sistemas, incluso para radiación incidente no normal. Supongamos que el canal está colocado paralelo al eje z. Las proyecciones $\theta_{i, xy}$ y $\theta_{r, xy}$ de los ángulos de incidente y reflexión (θ_i y θ_r) sobre el plano xy se representan en la figura 2.19 y están dadas por

$$\cos \theta_{i, xy} = \hat{i}_{xy} \cdot \hat{n}_{xy} = \frac{\hat{i} \cdot \hat{n} - i_z n_z}{\sqrt{(1 - i_z^2)(1 - n_z^2)}} \quad (2.11)$$

y similar

$$\cos \theta_{r, xy} = \frac{\hat{r} \cdot \hat{n} - r_z n_z}{\sqrt{(1 - r_z^2)(1 - n_z^2)}} \quad (2.12)$$

Si $n_z = 0$ por la ecuación 2.7 $r_z = i_z$. Incluso, utilizando la relación $\hat{i} \cdot \hat{n} = \hat{r} \cdot \hat{n}$ en las ecuaciones 2.11 y 2.12 obtenemos que

$$\cos \theta_{i, xy} = \cos \theta_{r, xy}, \text{ si } n_z = 0 \quad (2.13)$$

Por lo tanto, en cualquier reflector de canal alineado a lo largo del eje z, los rayos incidentes pueden ser propagados utilizando únicamente 2D. en el plano xy .

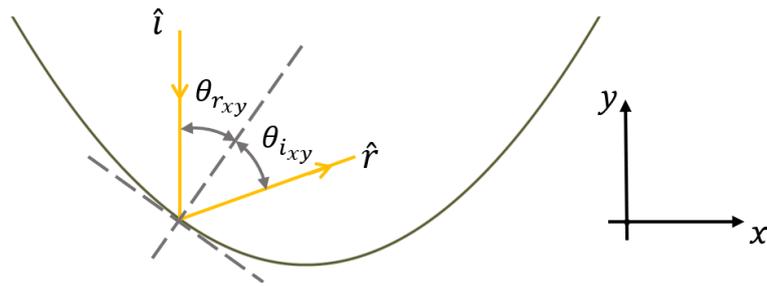


Figura 2.19: Proyección sobre el plano \$xy\$ de la reflexión de un rayo.

2.3.6. Geometría de algunos sistemas concentradores

A continuación se presenta brevemente la geometría de dos sistemas muy utilizados en el área de concentración solar: el Concentrador Parabólico y el Concentrador Parabólico Compuesto.

Concentradores Parabólicos

Como se mencionó anteriormente, los concentradores parabólicos son tecnologías de uso común que se componen de una superficie parabólica reflectora que concentra la radiación en un receptor. La siguiente ecuación representa una parábola con su eje focal paralela el eje \$x\$

$$y = ax^2 - f \tag{2.14}$$

donde \$f\$ es la distancia focal. Definiendo la ecuación con el punto focal sobre el origen y realizando el desarrollo algebraico obtenemos que la ecuación de la parábola puede escribirse como

$$y = \frac{x^2}{4f} - f \tag{2.15}$$

Los concentradores parabólicos puede tener diferentes configuraciones focales (foco puntual o lineal) y distintos receptores (plano o cilíndrico). Los sistemas de foco puntual se conocen como platos parabólicos y los sistemas de foco lineal se conocen como canal parabólicos.

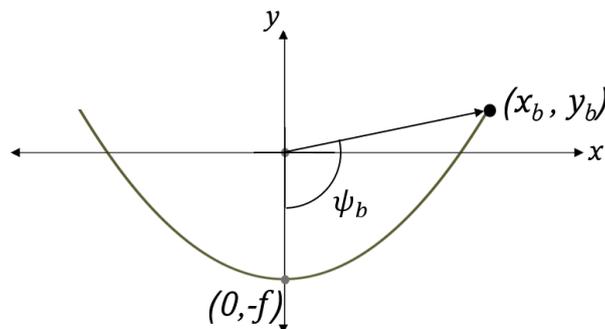


Figura 2.20: Geometría de la parábola.

Las características para el receptor pueden conocerse a partir de los parámetros geométricos de la parábola. Para un canal parabólico con receptor cilíndrico el diámetro adecuado para el receptor está definido como

$$D = \frac{4\Delta_r f}{1 + \cos \psi_b} \quad (2.16)$$

donde Δ_r es el cono solar reflejado por la superficie y ψ_b es el ángulo de borde de la parábola. Es importante mencionar que aunque se puede conocer el diámetro adecuado para el concentrador, en los sistemas reales el diseño se ajusta a la disponibilidad del mercado

Concentrador Parabólico Compuesto

El CPC es un sistema de concentración de no imagen, es decir, es un concentrador que no reproduce la imagen del sol ya que sus rayos llegan de forma “desordenada”. Los concentradores de no imagen son capaces de alcanzar razones de concentración cercanas al límite termodinámico Rabl (1976). Los CPCs están compuestos por un receptor, dos parábolas truncadas y una zona de involuta. Es posible diseñar un CPC para cualquier tipo de receptor, pero en este caso presentaremos el CPC con receptor cilíndrico. Las ecuaciones para la geometría del CPC con receptor cilíndrico con origen en el centro del cilindro se pueden definir como

$$x = R \sin \theta - t \cos \theta \quad (2.17)$$

$$y = -R \cos \theta - t \sin \theta \quad (2.18)$$

donde la distancia t está dada por

$$t(\theta) = \begin{cases} R\theta & 0 < \theta < \pi/2 + \theta_a \\ R \frac{(\theta + \theta_a + \pi/2) - \cos(\theta - \theta_a)}{1 + \sin(\theta - \theta_a)} & \pi/2 + \theta_a < \theta < 3\pi/2 - \theta_a \end{cases}$$

donde θ es el ángulo medido desde el eje negativo de y , R es el radio del cilindro y θ_a es el ángulo de aceptación

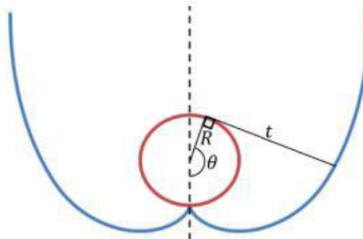


Figura 2.21: Configuración del CPC.

2.4. Concentradores secundarios en sistemas de foco lineal

Dentro de los principales retos que tienen los sistemas de concentración solar es que la distribución de flujo radiativo sobre los receptores es extremadamente dispareja, es decir, existen zonas del receptor que reciben altos porcentajes de la radiación concentrada en comparación con otras que básicamente no la reciben (He et al. 2019).

Esta diferencia de radiación sobre la superficie del receptor ocasiona gradientes de temperatura significativos y zonas de altas temperaturas locales, lo cual trae consigo retos importantes en la seguridad del sistema y su eficiencia de operación. En el caso de los sistemas de foco lineal, como es el canal parabólico y el Fresnel de foco lineal, la radiación es concentrada mayormente en la parte inferior de los receptores.

En un estudio presentado por Jeter (1986) sobre la distribución de flujo en colectores de canal parabólico con distintos parámetros geométricos, se puede observar que la distribución de flujo se puede dividir en 4 partes principales: área de efecto de sombra, área de aumento del flujo de calor, área de reducción del flujo de calor y área de radiación directa. Las zonas anteriormente mencionadas se representan en la imagen 2.22, como puede observarse existen un alto flujo de radiación en la zona 2, sin embargo en la zona 4 la aportación es básicamente nula. Por otro lado, He et al. (2011) presentan un estudio de transferencia de calor en colectores tipo canal parabólico con receptores cilíndrico en el cual se desarrolla un modelo óptico basado en el método Monte Carlo de Trazo de Rayos para calcular la distribución de flujo solar sobre la superficie del receptor. Sus resultados demuestran que la distribución del flujo de calor en la superficie exterior del tubo absorbente es significativamente heterogénea en dirección circular pero uniforme en dirección axial, la superficie inferior del tubo puede llegar a tener hasta 6 veces mayor flujo de calor que en la superficie superior.

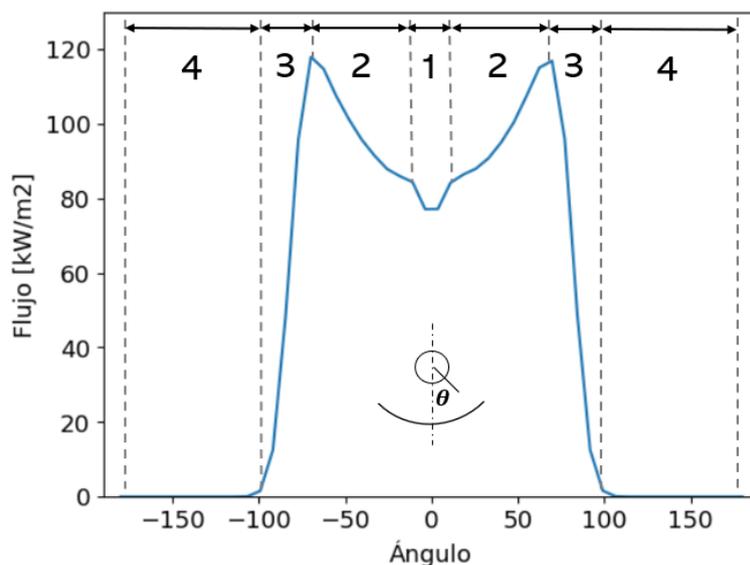


Figura 2.22: 4 principales zonas en la distribución de flujo radiativo sobre el receptor.

Como se mencionó anteriormente, el colector Fresnel Lineal suele tener un receptor de un solo tubo o un receptor de múltiples tubos. Existen diferentes configuraciones del colector solar tipo Fresnel Lineal, por lo que la distribución de flujo solar sobre el receptor es particular de cada sistema, sin embargo, diversos estudios han demostrado que tiende a ser no uniforme. [Sootha & Negi \(1994\)](#) presenta un estudio de la radiación concentrada sobre un absorbedor tubular en un sistema Fresnel Lineal, el cual muestra que la distribución de flujo es mayor en la zona inferior del receptor (figura 2.23).

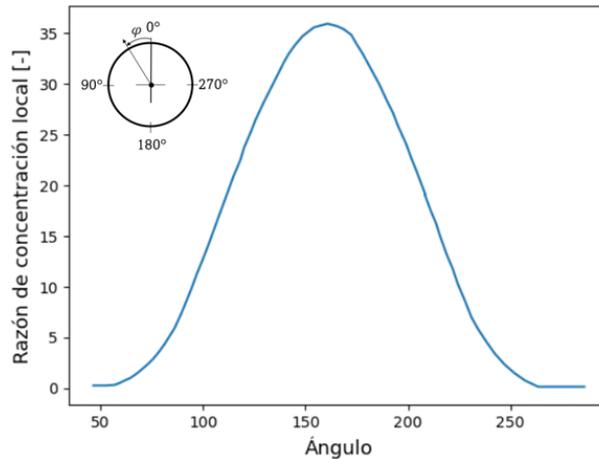


Figura 2.23: Razón de concentración local sobre la circunferencia del receptor tubular en un sistema de Fresnel Lineal.

En el caso de un sistema con un sólo tubo, comúnmente se tiene una cavidad reflectora sobre el tubo absorbedor, para ampliar el ángulo de aceptación, es decir, aquellos rayos que podrían perderse porque van muy abiertos son reconcentrados por el segundo reflector, como se ve en la figura 2.24. [Qiu et al. \(2015\)](#) presentan una serie de estudios para este tipo de sistemas. Los resultados muestran que sólo 23% de la potencia llega a la mitad superior del tubo después de la concentración por el reflector secundario y el flujo de radiación es significativamente no uniforme en la parte inferior del tubo, el cual es directamente golpeado por los rayos del campo de espejos.

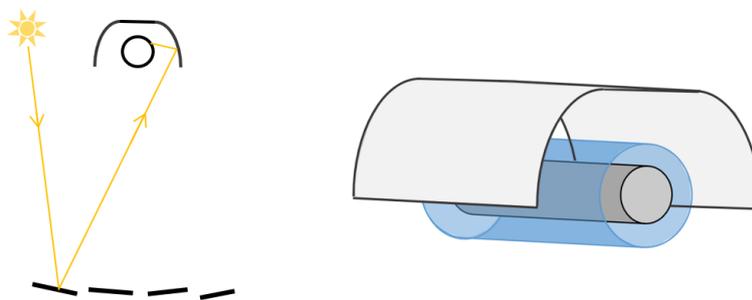


Figura 2.24: Receptor de Fresnel de un sólo tubo con cavidad reflectora.

En el caso de los sistemas con múltiples tubos, los espejos Fresnel reflejarán los rayos del sol sobre los tubos absorbedores directamente. Los estudios presentados por [Qiu et al. \(2017\)](#)

señalan que la distribución de flujo en un sistema típico de múltiples tubos es de tipo no uniforme. La radiación no es homogénea tanto en la propia circunferencia de los tubos como entre los tubos que conforman el receptor, ya que los espejos se dirigen a la zona central del arreglo. Se observa en sus datos una irradiancia ocho veces superior en el tubo central, en su zona más irradiada, en comparación a los tubos de las orillas. En la figura 2.25 se presenta la razón de concentración local en la circunferencia del tubo 3 y 4 del receptor de múltiple tubos.

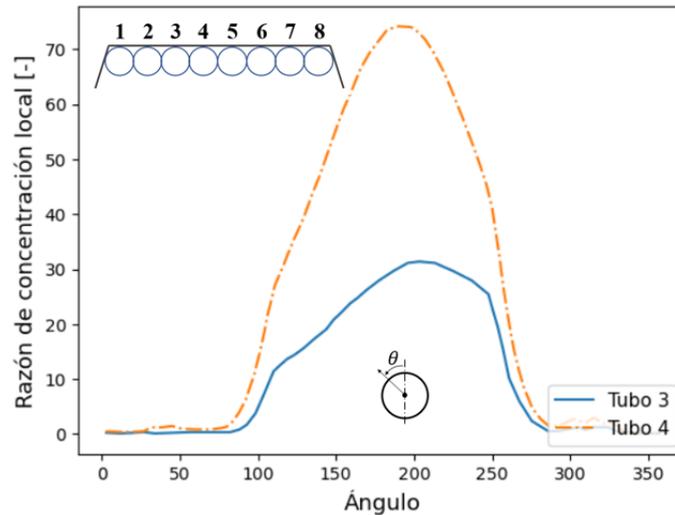


Figura 2.25: Razón de concentración en tubos de un sistema Fresnel con receptor de múltiples tubos.

Uno de los problemas asociados a los gradientes de flujo radiativo es que se traducen en gradientes de temperatura en la circunferencia del receptor, que pueden resultar en la deformación de los mismos. Debido a la deformación, las pérdidas ópticas también pueden aumentar ya que el absorbedor se desplaza del foco lineal del concentrador. Por otro lado, en caso de tener un receptor de tubo al vacío, la deformación del tubo puede maltratar e incluso romper la cubierta del vidrio, haciendo que se pierda el vacío que evita las pérdidas de calor por convección. Por su parte, el recubrimiento selectivo que se coloca en el absorbedor se degrada también por los picos de temperatura.

Para evitar los problemas anteriores, es necesario homogeneizar la distribución de temperaturas sobre la superficie del receptor. Para ello existen diferentes soluciones propuestas que buscan aplanar los picos temperatura y obtener una disminución de los gradientes más pronunciados. He et al. (2019) clasifica a las estrategias en 2 tipos: pasivas y activas. Las estrategias pasivas son aquellas que buscan mejorar la habilidad de transferencia de calor en el fluido de trabajo de tal forma que permita un desempeño óptimo del sistema con la distribución de flujo solar que se tiene sobre el receptor. Las estrategias activas son las que buscan homogeneizar la distribución de flujo solar sobre el receptor para empatar con la habilidad de transferencia de calor que tiene el fluido de trabajo.

Para fines del trabajo se explican únicamente las estrategias activas. En el caso del CP existen diversos estudios que proponen segundos concentradores con configuraciones novedosas para la homogeneización del flujo. Tal es el caso del estudio presentado por Tang et al. (2021),

donde plantean el diseño de reflectores secundarios utilizando un método de optimización sobre el sistema de canal parabólico los cuales se muestran en la figura 2.26. El centro del absorbedor se posiciona abajo del foco del canal parabólico. La segunda superficie reflectora se coloca sobre el absorbedor para capturar y reflejar rayos sobre la parte superior del tubo receptor. El segundo reflector está compuesto por múltiples espejos planos. Cada segmento de espejo está descrito por una posición y ángulo en específico. El reflector secundario y la ubicación adecuada del receptor, permite que el flujo de calor entre las superficies superior e inferior del tubo absorbedor esté bien equilibrado.

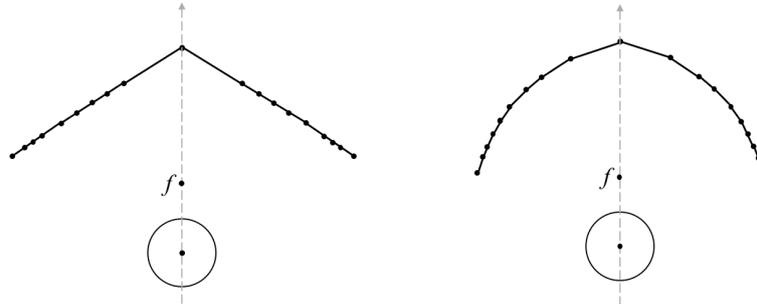
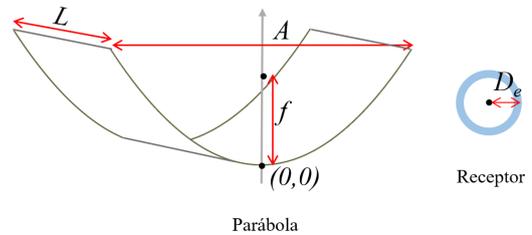


Figura 2.26: Reflectores secundarios de múltiples espejos propuestos por Tang et al. (2021).

La optimización la hacen sobre 2 geométricas comunes de canal parabólico, con lo cual obtienen 2 reflectores secundarios. La configuración del canal parabólico 1 y 2 se muestra a continuación.

Tabla 2.1: Dimensiones de la parábola usada por Tang et al. (2021).

Dimensión	Medida (m)	
	Parábola 1	Parábola 2
Apertura (A)	5	8
Distancia focal (f)	1.84	2.5
Largo (L)	4	4
Diámetro externo (D_e)	0.07	0.07



En ambos casos, la uniformidad mejoró significativamente como puede observarse en los resultados de distribución de flujo con y sin segundo concentrador (figura 2.27). En el caso del canal parabólico 1 con segundo reflector, se presentó una reducción del 3 % de la eficiencia óptica en comparación con el sistema convencional debido al inevitable efecto de sobra. En cambio, en el canal parabólico 2 con segundo reflector la eficiencia óptica mejoró 6 % en comparación con el sistema convencional gracias a recuperación de rayos perdidos.

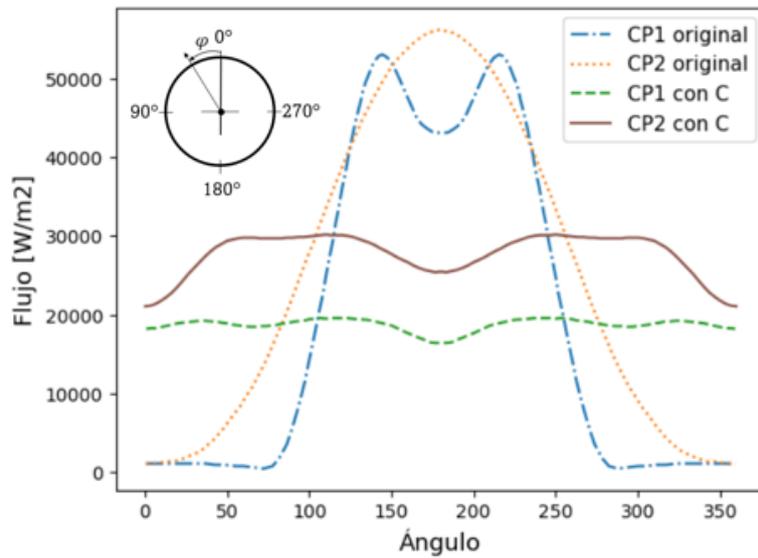
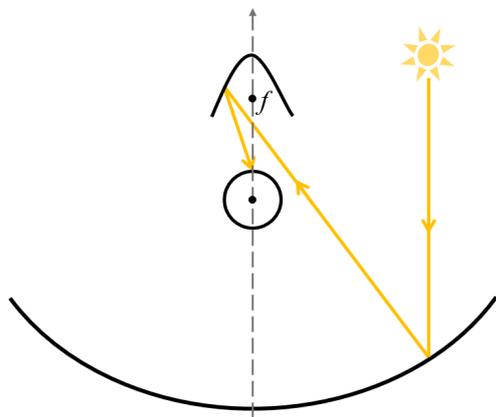
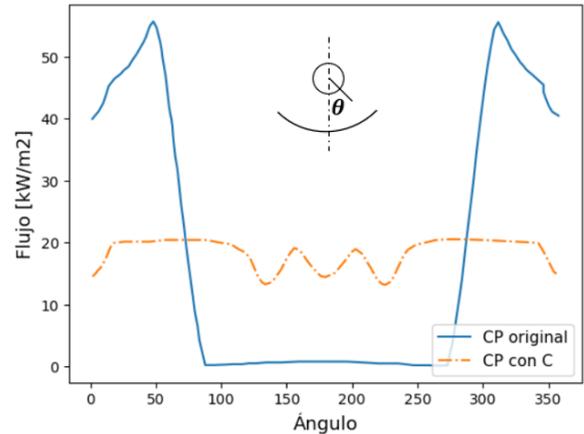


Figura 2.27: Distribución de flujo presentada en el trabajo de [Tang et al. \(2021\)](#) para los CPs convencionales y los CPs con segundo concentrador.

[Wang et al. \(2014\)](#) propusieron colocar un segundo concentrador sobre el receptor, el cual se encuentra fuera de foco. El receptor se desplaza por debajo de la distancia focal de tal forma que exista un desbordamiento de los rayos (ver figura 2.28). El reflector secundario se coloca de tal forma que los rayos que han sido reflejados por el CP y no llegaron al absorbedor puedan ser reflejados hacia la parte superior del receptor. La distribución del flujo solar concentrado se calculó utilizando el método de Trazado de Rayos de Monte Carlo y se simuló el proceso de transferencia de calor acoplado dentro del receptor. Los resultados mostraron que la distribución de flujo puede ser homogeneizada significativamente, ya que la distribución de temperaturas se aplanó y la diferencia de temperatura circunferencial fue reducida de 25 a 3 K y la temperatura máxima se redujo de 667 a 661K. Sin embargo, es importante mencionar que con esta configuración de sistema la eficiencia tendía a disminuir ligeramente (alrededor del 4%) debido a la pérdida óptica inevitablemente aumentada.



(a) Segundo concentrados propuesto.



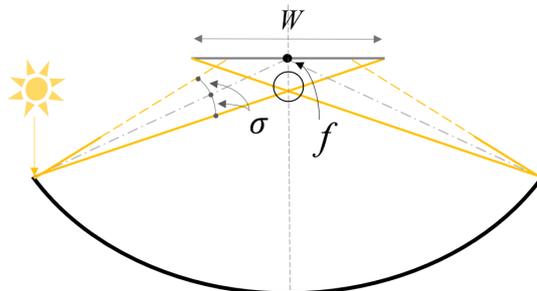
(b) Comparación de distribución de flujo.

Figura 2.28: Sistema propuesto por Wang et al. (2014) y comparación de la distribución de flujo con CP convencional y CP con segundo concentrador.

Por otro lado, Rodríguez-Sánchez & Rosengarten (2015) presentan un estudio para incrementar la razón de concentración geométrica en sistemas de CP comercial sin aumentar el área de apertura. Aunque la finalidad no es propiamente mejorar la distribución de flujo de energía al rededor del tubo para que sea más uniforme, el diseño del sistema tiene esa ventaja adicional. Para ello, proponen colocar un espejo plano en el foco de la parábola y desplazar el absorbedor abajo del foco de tal forma que los rayos se reflejen sobre este. El espejo plano se diseña de tal forma que el diámetro del absorbedor se reduzca. El espejo plano es perpendicular al eje de simetría de la parábola y lo suficientemente grande para recibir todos los rayos procedentes del primer espejo. Para su diseño, se toma en cuenta el rayo de la orilla del CP y su máxima desviación, como se muestra en la figura de la tabla 2.2. A continuación se muestran las dimensiones de 2 de los sistemas utilizados en el estudio, como lo son la apertura de la parábola, el ancho del espejo, el diámetro del receptor inicial y el diseñado.

Tabla 2.2: Dimensiones de las parábolas utilizandas en el trabajo de Rodríguez-Sánchez & Rosengarten (2015).

Dimensión	Medida (m)	
	Parábola 1	Parábola 2
Apertura	1.208	5.760
Distancia focal (f)	0.647	1.710
Ancho espejo (W)	0.042	0.386
Diámetro original	0.014	0.013
Diámetro diseñado	0.0226	0.0378



La razón de concentración para el CP 1 era de 13.7, las modificaciones en el sistema aumentaron la concentración a 16.4, incrementando un 19.7%. En el caso del CP2, la concentración era de 26.2, ahora aumentó un 73.4% a 45.2. En la figura 2.29 se puede observar que no la razón de concentración local sobre el receptor para cada uno de los receptores ha cambiado,

se han disminuido algunas zonas de alta concentración y la radiación ha llegado sobre espacios que anteriormente no tenían concentración.

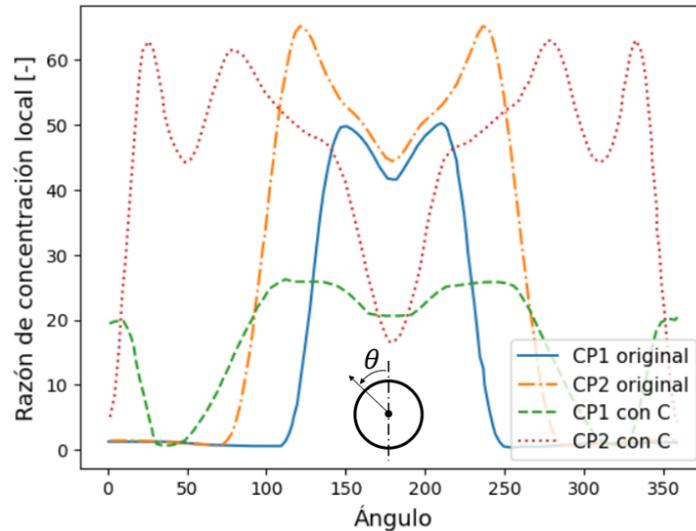


Figura 2.29: Razón de concentración local de los CP's originales y con espejo plano sobre el receptor utilizando en el estudio de [Rodríguez-Sánchez & Rosengarten \(2015\)](#).

[Karathanassis et al. \(2017\)](#) presentan el diseño y evaluación de un sistema de canal parabólico de concentración fotovoltaica/térmica. En estos sistemas el receptor son celdas fotovoltaicas que tienen un sistema de refrigeración integrado, por lo cual es posible obtener energía eléctrica y un fluido a mayor temperatura. El sistema está compuesto por una estructura de metal rígido con forma de parábola donde se amolda una lámina reflectiva. La forma en que se construyó el marco parabólico fue fabricando dos parábolas separadas y simétricas que se soldaron sobre el eje principal del marco, el pequeño desplazamiento por la soldadura provoca distorsión en la parábola. Debido a lo anterior, el vértice de la parábola no era un sólo punto, sino un segmento plano denotado como S, como puede verse en la figura 2.30, lo que resultaba en la existencia de dos puntos focales.

Sin tomar en cuenta el segmento S, el canal parabólico tiene un área de apertura de 2 m^2 y una distancia focal de 0.69 m . El ángulo de aceptación es de 71.9° . Las celdas fotovoltaicas con refrigeración son colocadas a lo largo de toda la zona focal con un ancho de 40 mm . Se presenta la distribución de flujo para diferentes medidas del segmento S, como puede observarse ahora se tienen 2 picos de radiación sobre el receptor plano.

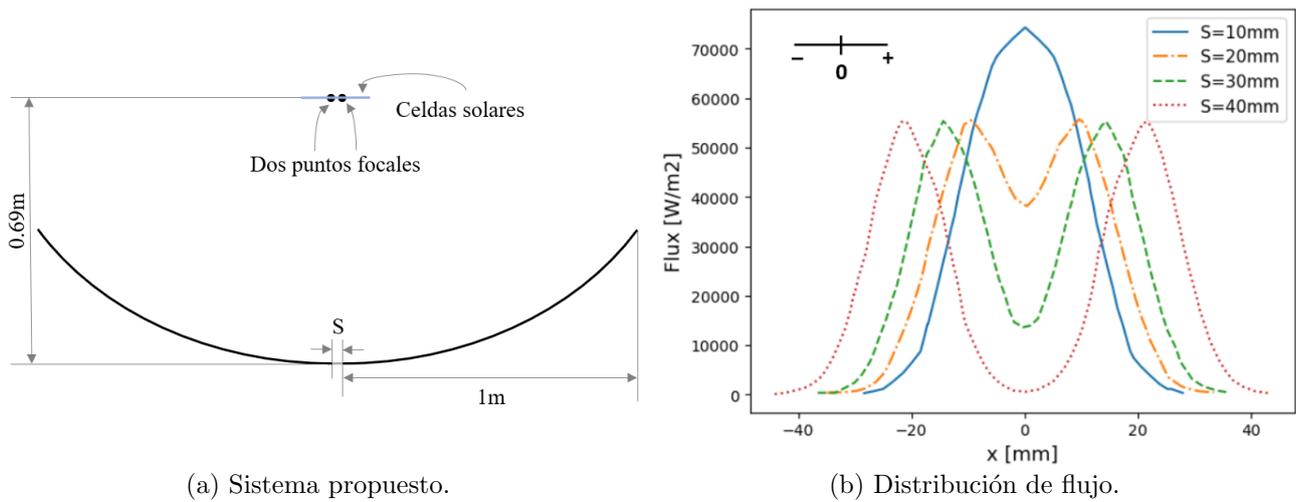


Figura 2.30: Sistema propuesto por [Karathanassis et al. \(2017\)](#) y comparación de la distribución de flujo con diferentes anchos para el segmento S.

En el caso del colector Fresnel lineal, [Grena & Tarquini \(2011\)](#) propusieron un segundo reflector colocado sobre el receptor de tubo único. El reflector propuesto es de dos alas, las cuales tienen cada una forma de parábola asimétrica como se muestra en la figura 2.31. Las parábolas tienen su eje focal inclinado hacia de tal forma que abarque el ángulo de aceptación del sistema y el foco se encuentre en el receptor.

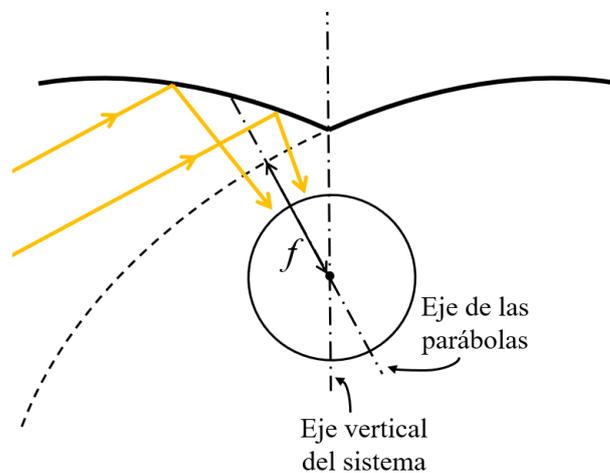


Figura 2.31: Esquema de la propuesta de [Grena & Tarquini \(2011\)](#) para segundo concentrador en un sistema de Fresnel Lineal.

La distribución de flujo solar en el sistema de Grena y Tarquini sigue siendo no uniforme, sin embargo es importante mencionar que gracias al segundo concentrador la parte superior del receptor presenta flujo radiativo, lo cual implica una mejora importante. En comparación con los sistemas convencionales en donde la radiación absorbida en la parte alta del tubo es casi nula, esta configuración permite que el 37% de la radiación absorbida se encuentra en la zona superior de la circunferencia del tubo receptor. Por otro lado, esta geometría limita el diámetro

de la cubierta de vidrio y la región cercana al vértice del espejo secundario es una parte casi inactiva (está sombreada por el receptor).

Prasad et al. (2017) presentan el diseño de un reflector secundario para la homogenización del flujo radiativo sobre el receptor. Se propone un concentrador secundario parabólico segmentado, es decir, similar a una cavidad trapezoidal pero las secciones del trapecio son formadas por 3 segmentos parabólicos rotados (ver figura 2.32). Los segmentos de parábola rotada permiten que incluso la radiación reflejada por los espejos extremos del Fresnel sea dirigida de tal forma que pueda ser enfocada en la parte superior del absorbedor. El desempeño del segundo reflector se probó aunado a una adecuada estrategia de desenfoque de los espejos, en donde tanto los ángulos de inclinación como los radios de curvatura de los espejos Fresnel individuales se modifican para obtener una mejor uniformidad de flujo. Los resultados presentan una mejora en la uniformidad de la radiación sobre el receptor y en la eficiencia óptica del sistema.

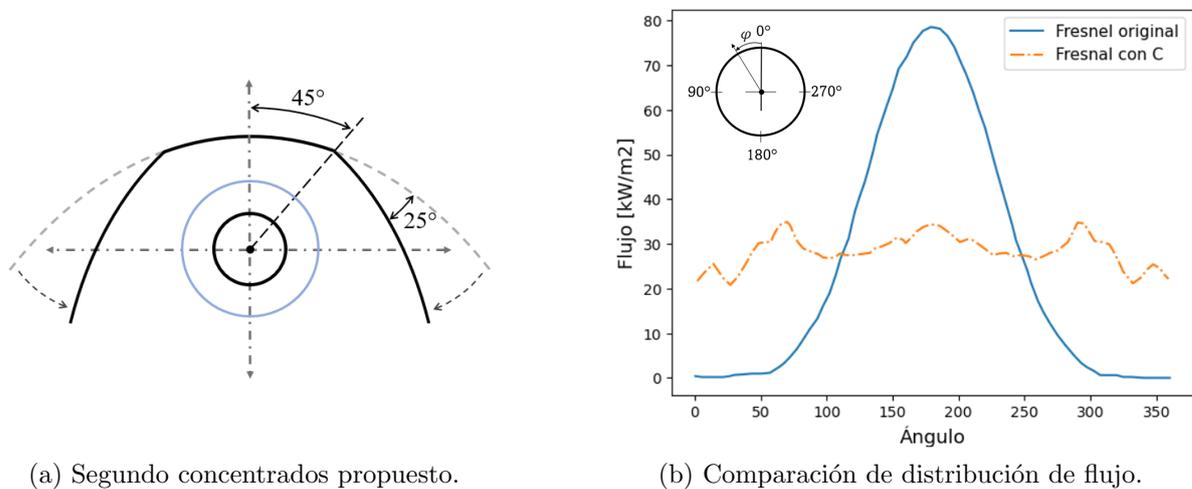


Figura 2.32: Sistema propuesto por Prasad et al. (2017) para segundo concentrador en un sistema de Fresnel Lineal y comparación de la distribución de flujo con Fresnel convencional y Fresnel con segundo concentrador.

En el presente trabajo también se presentan estrategias activas para mejorar la distribución de flujo radiativo sobre el receptor de un CP. Al igual que los trabajos expuestos anteriormente, el receptor se saca de foco y el segundo concentrador se coloca sobre este. Además, se utilizan métodos de optimización para obtener la configuración geométrica del segunda concentrador que permita tener mejor desempeño en el sistema. A continuación se describen los sistemas propuestos y el trabajo desarrollado para obtener una distribución de flujo radiativo más uniforme en el receptor.

Capítulo 3

Metodología

Como se ha explicado anteriormente, en un sistema convencional de canal parabólico, la trayectoria del rayo puede describirse en la siguiente manera (ver Fig. 3.1a): primero, la radiación solar es colectada en la apertura del canal parabólico y posteriormente es reflejada hacia la parte inferior del tubo absorbedor, en donde es absorbida como energía térmica. Dentro del tubo absorbedor circula un fluido al que se le transfiere la energía térmica para ser usada posteriormente. Como se mencionó, en el sistema convencional la distribución de flujo radiativo sobre el receptor es muy heterogénea, por lo que en este trabajo se propone colocar un segundo concentrador sobre el receptor y desplazarlos sobre el eje focal del CP a distintas distancias, de tal forma que una fracción de la radiación tenga la siguiente trayectoria (ver Fig. 3.1b): primero, ser colectada en la apertura del canal parabólico y posteriormente reflejada al segundo concentrador, de tal forma que éste lo refleje una o más veces hasta llegar a la parte superior del tubo absorbedor.

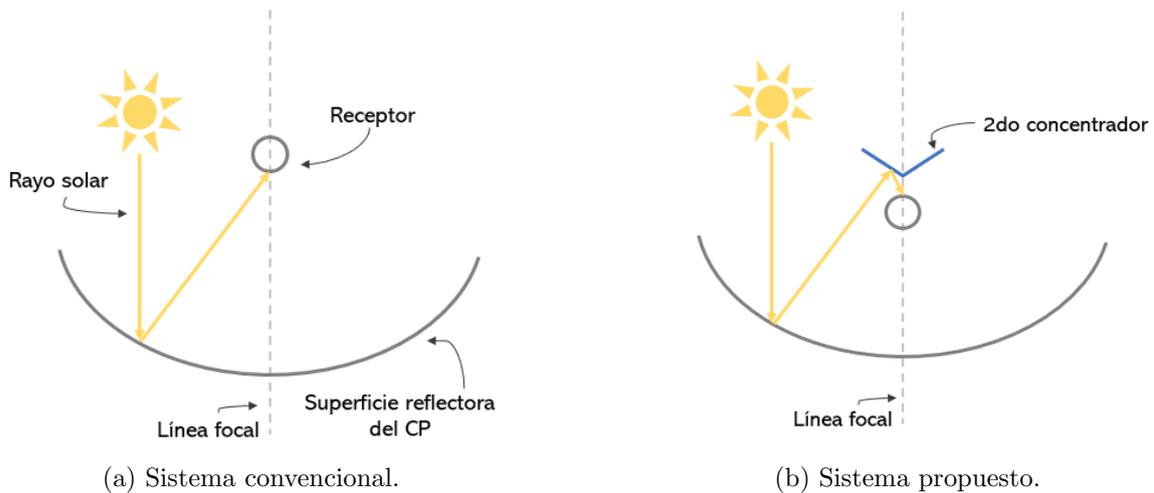


Figura 3.1: Sistema convencional y sistema propuesto en el estudio.

En este trabajo se proponen dos concentradores secundarios para trabajar con el CP. El primer sistema acoplado al CP es un CPC (CP-CPC). En este caso se realiza una simulación de trazado de rayos sobre el sistema colocando el conjunto del tubo receptor y el CPC a

distintas distancias del foco. El segundo sistema acoplado al CP es un CV (CP-CV), donde se realiza trazado de rayos colocando el receptor a diferentes distancias del foco y con diferentes distancias al CV. En este caso, se utiliza adicionalmente un algoritmo de optimización evolutiva para determinar la configuración del segundo concentrador.

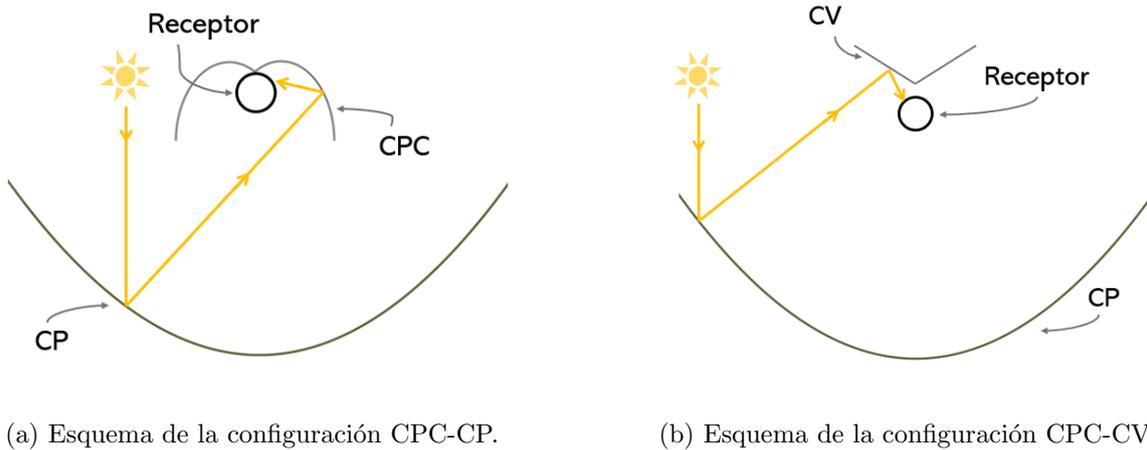


Figura 3.2: Sistemas propuestos para su estudio.

En ambos casos, se utiliza el Método Monte Carlo de Trazo de Rayos (MCTR) en 2 dimensiones y se presenta un estudio de las distintas configuraciones propuestas, analizando la distribución de flujo radiativo sobre el receptor, con lo que se determina la uniformidad y la pérdida de energía. Los fundamentos del código de simulación se explican a continuación, el cual incluye la generación de rayos por MCTR, la interacción de estos con las superficies reflectoras y la optimización evolutiva, entre otras cosas.

3.1. Modelo del CP y coordenadas del sistema

El estudio se realiza en 2 dimensiones y se emplea un CP con una superficie con reflectividad de 0.92 (Canavaro et al. 2016) El receptor no se considera rodeado por un tubo al vacío, a diferencia de los sistemas de CP convencionales, por lo que únicamente se hace el estudio sobre el tubo absorbedor. Para el estudio se consideran 2 CP. Los parámetros se presentan en la tabla 3.1. El sistema CP1 es de tipo comercial (Canavaro et al. 2016) y el CP2 se obtuvo recortando el sistema CP1 a un ángulo de borde de 45° .

Tabla 3.1: Parámetros de los 2 colectores de canal parabólico utilizado en el trabajo.

Parámetro	CP1	CP2
Apertura	5.77	2.83
Largo	6.4 m	6.4 m
Distancia focal	1.71 m	1.71 m
ψ_b	80.3°	45°
Radio de receptor	0.035	0.035

En este estudio se utilizan dos sistemas de coordenadas. Para el código de trazo de rayos por MCTR y el desplazamiento del receptor se utiliza el sistema de coordenadas Cartesianas. El origen del sistema se encuentra en el punto focal de la parábola. En la sección transversal del tubo absorbedor se utiliza el sistema de coordenadas cilíndricas para contabilizar la distribución de flujo radiativo. En este caso, el rango utilizado para este sistema es de 0° a 360°, donde 0° corresponde a la parte inferior del tubo creciendo en dirección de las manecillas del reloj, por lo que 180° corresponde a la parte superior, como se muestra en la figura 3.3.

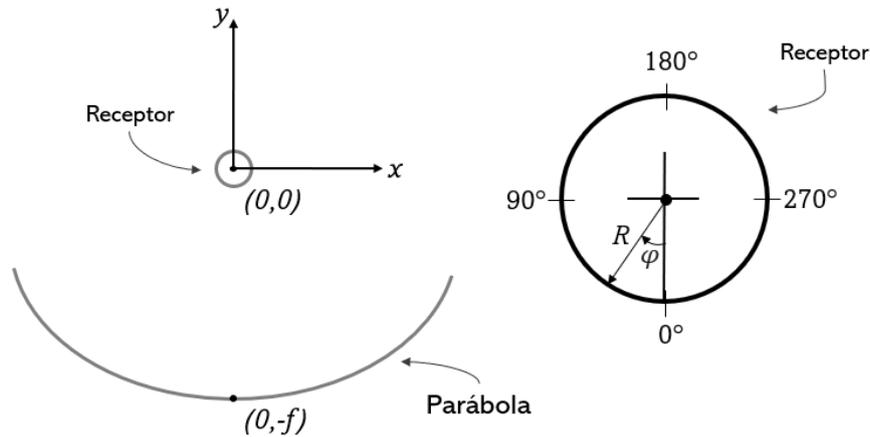


Figura 3.3: Coordenadas del sistema.

3.2. Método Monte Carlo de trazado de rayos

La simulación se llevó a cabo con base en el método Monte Carlo descrito en el libro de Mahan (2019). En dicho método se simula un gran número de rayos, cuyas trayectorias se siguen a lo largo de su propagación en el sistema óptico. Al final, la propiedad que se quiere evaluar se puede obtener como un promedio de los resultados obtenidos para cada uno de los rayos individuales. Los rayos son creados como eventos independientes con una posición y dirección basadas en distribuciones de probabilidad que describen el fenómeno físico que se quiere representar. Así, cada rayo es una posibilidad dentro de las infinitas combinaciones existentes, por lo que al simular un gran número de rayos se obtiene una representación del comportamiento macroscópico del sistema.

Los rayos se propagan desde la apertura del CP y para cada uno sigue la interacción con los

diferentes componentes del sistema: el reflector del CP, el reflector del segundo concentrador y la superficie absorbedora del receptor.

El peso de energía de cada rayo es w , es un parámetro de energía adimensional, que tiene un valor de 1. Este valor es importante ya que al reflejarse en cada superficie es castigado por la reflectancia espectral de la superficie.

A continuación se describen la inicialización del rayo y la descripción de las distribuciones de probabilidad utilizadas para la propagación de estos.

3.2.1. Inicialización de la distribución de rayos

La inicialización de la distribución del rayo decide la locación en que el rayo es lanzado sobre el CP y la dirección en la que se dirige. El primer paso es calcular la coordenada inicial \vec{r}_0 del rayo sobre la apertura del CP.

Físicamente se recibe una irradiancia uniforme sobre la apertura del concentrador, en términos de la simulación esto se traduce en que un rayo individual puede iniciar su propagación con igual probabilidad en cualquier punto de un frente de onda paralelo a la apertura. Al ser una simulación en 2D, sólo se toma en cuenta la coordenada a lo ancho del área de apertura del CP (perpendicular al eje focal) y no en la dirección longitudinal (paralela al eje focal). De acuerdo con estas consideraciones, las coordenadas donde inicia la propagación del rayo están dadas por:

$$\vec{r}_0 = (\xi_{sig} \xi_r x_b, y_b) \quad (3.1)$$

donde ξ_{sgn} es una función aleatoria que toma los valores -1 o 1 con la misma probabilidad, ξ_r es un número aleatorio distribuido uniformemente de 0 a 1, x_b e y_b son las coordenadas del borde de la parábola. De este modo, la coordenada inicial del rayo estará con igual probabilidad distribuida entre los puntos $(-x_b, y_b)$ y (x_b, y_b) . A partir de la coordenada obtenida, se propagan los rayos de forma paralela el eje focal del CP (incidencia normal en la apertura) y se obtiene la coordenada del punto de impacto sobre el espejo resolviendo la intersección de la recta del rayo con la parábola. Posteriormente, se calcula el ángulo θ_d de desviación con respecto a la vertical con el cual incide el rayo en este punto.

$$\theta_d = \xi_n \sigma_e \quad (3.2)$$

donde el número aleatorio ξ_n con distribución Gaussiana tiene una media de 0 y una desviación estándar de 1. σ_e es la desviación estándar del error de reflexión, con valor de 7 mrad. Este valor contempla el “Sol degradado”, de acuerdo a la ecuación 2.9. Utilizando θ_d se calcula el vector de incidencia $\hat{r}_i = (\sin \theta_d, -\cos \theta_d)$.

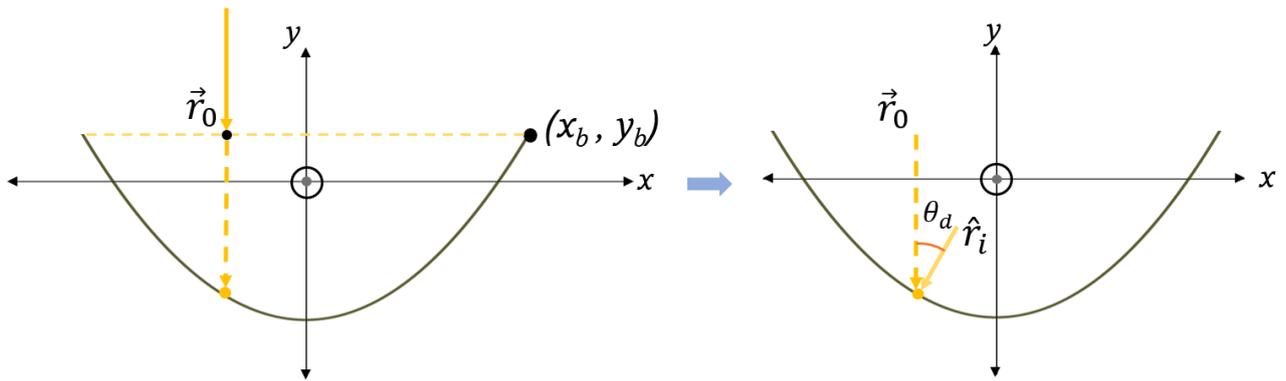


Figura 3.4: Trazo de rayos sobre el CP.

3.2.2. Reflexión del rayo

Con base a la ley de reflexión en forma vectorial que se explicó anteriormente, el vector del rayo reflejado se conoce utilizando la ecuación 2.7, tomando $\hat{i} = \hat{r}_i$ y $\hat{r} = \hat{r}_r$, de acuerdo con la figura 3.5.

La propagación de los rayos reflejados por la parábola se simula tomando como punto de partida el punto de impacto en la parábola \vec{r}_p y como dirección de propagación el vector reflejado \hat{r}_r . A partir de estos datos se busca la intersección de la línea recta del rayo con la curva del concentrador secundario o con el receptor, lo que ocurra primero. Una vez encontrado el punto de intersección, las reflexiones sobre la superficie del segundo concentrador se calculan utilizando la ley de reflexión mencionada anteriormente. Se considera que todos los rayos que llegan a la superficie reflectora del CP, del CPC y del CV, son reflejados.

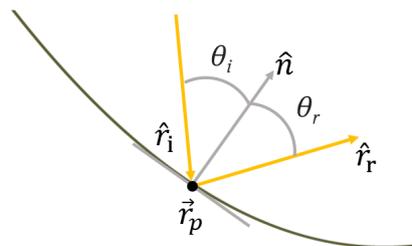


Figura 3.5: Reflexión del rayo sobre la superficie del CP.

3.3. Distribución de flujo sobre el receptor

Se contabilizan los rayos que son interceptados sobre la superficie del tubo absorbedor utilizando una malla que divide la circunferencia en 360 partes. Se considera que todos los rayos que llegan al receptor son absorbidos. Cuando un rayo llega al receptor se identifica en qué sección de la malla golpeó. Cada sección de malla guarda los pesos de energía de todos los

rayos que golpearon sobre ella en un arreglo p , de i elementos donde $1 \leq i \leq 361$. El área de cada segmento de malla está dada por:

$$A_{sm} = \frac{2 \pi R L}{360} \quad (3.3)$$

donde R es el radio del tubo absorbedor, y L el largo.

Cada sección de malla tiene la información de la cantidad de rayos, pero esto no representa la distribución de flujo radiativo. Para conocer la distribución de flujo radiativo sobre la superficie del receptor se debe tomar en cuenta que la potencia de cada rayo al interceptar el receptor es:

$$P_r = w \frac{G_b A_p L}{N_r \cdot 1000} \quad (3.4)$$

donde G_b es la irradiancia directa normal, A_p la apertura del CP, N_r la cantidad de rayos simulados. Las unidades de cada factor están en el sistema internacional. El factor 1000 es para pasar la potencia P_r de W a kW.

Con base en lo anterior, el flujo de potencia solar que hay en cada segmento se determina de la siguiente manera:

$$q[i] = p[i] \frac{P_r}{A_{sm}} \quad (3.5)$$

donde i es un segmento dentro del rango de elementos de la malla y q tiene unidades de kW/m^2 .

Dada la distribución de flujo de potencia sobre el receptor cilíndrico se define los tres parámetros γ , ζ y U . γ se conoce como factor de intercepción y describe la fracción de rayos que llegan al receptor en función del total de rayos generados, mientras que ζ la fracción de rayos perdidos (desbordamiento).

$$\gamma = \frac{\text{Rayos que interceptan el receptor}}{\text{Total de rayos generados}} \quad (3.6)$$

$$\zeta = 1 - \gamma \quad (3.7)$$

El parámetro U se conoce como uniformidad, y es el cociente entre la desviación estándar de los datos obtenidos de flujo de potencia q (σ_q) y su media (q_m). Entre menor sea este parámetro la heterogeneidad del flujo es menor.

$$U = \frac{\sigma_q}{q_m} \quad (3.8)$$

3.3.1. Incertidumbre e intervalos de confianza en el MCTR

Como se mencionó anteriormente, el MCTR busca emular el comportamiento de la radiación dentro de un sistema basándose en funciones de probabilidad que describen el fenómeno. Los

valores reales están basados en una población infinita de eventos aleatorios, mientras que los valores estimados están basados en una muestra de población grande, pero finita. Se busca que el comportamiento estadístico de la muestra refleje el comportamiento de la población de la cual se ha extraído. Por lo anterior, al ser un método de probabilidad, los resultados obtenidos tienen cierta incertidumbre asociada la cual puede ser calculada. En términos generales la incertidumbre podría definirse como la diferencia entre el valor real y el observado, sin embargo el valor real es desconocido. Por lo tanto, se busca un procedimiento que dé un valor estimado, con un nivel de confianza, de la incertidumbre de un resultado obtenido usando el MCRT. Esta sección se basa en el contenido de [Mahan \(2019\)](#), para profundizar en el desarrollo matemático se recomienda consultarlo.

Las propiedades que caracterizan la distribución de la población son el promedio μ , la desviación estándar σ y la proporción π . La propiedad de proporción es una probabilidad. Si pensamos en los rayos como paquetes de energía emitidos, se dividen 2 grupos: los que son absorbidos por una superficie o elemento y los que no se absorbieron. La proporción es la división entre los rayos absorbidos por el elemento entre el total emitido. El verdadero valor de la proporción π (que no se conoce) es la probabilidad que un paquete de energía emitido sea absorbido en un elemento del sistema. Por lo tanto la proporción muestral p es una estimación de la proporción poblacional π .

La inferencia estadística nos permite usar una muestra de la población para obtener el valor de p que tenga una diferencia con π que esté encerrada por un nivel de confianza conocido. La confianza es la probabilidad de que el parámetro estimado se encuentre dentro de nuestro intervalo estimado y el grado de confianza se declara en términos de intervalos de confianza. El nivel de confianza se define como $(1 - \alpha)$, por ejemplo, un 95 % de nivel de confianza ($\alpha = 0.05$) hace referencia a que es 0.95 probable de que el valor del parámetro se encuentre en un intervalo especificado.

El intervalo de confianza para la proporción de la población π se define como

$$p - W_c \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \leq \pi \leq p + W_c \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \quad (3.9)$$

donde N es el número de rayos y $W_c = 1.960$ para casos con $N > 30$ y con un 95 % de grado de confianza. El desarrollo para llegar a la ecuación anterior se encuentra descrito en el libro de [Mahan \(2019\)](#).

3.4. Simulación CP-CPC

Como se explicó anteriormente, el sistema CP-CPC propone utilizar un canal parabólico con receptor cilíndrico desplazado sobre el eje focal y acoplado a un CPC como segundo concentrador, de tal forma que permita concentrar radiación sobre la parte superior del tubo absorbedor. El esquema del sistema CP-CPC se muestra en la figura [3.6](#).

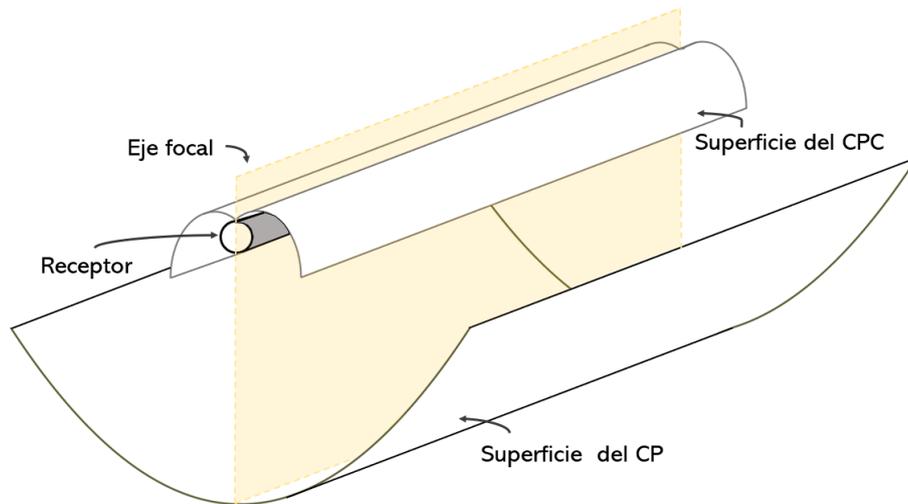


Figura 3.6: Esquema de configuración CP-CPC.

A continuación se explica el código realizado en lenguaje de programación *Julia* con el cual hizo el trazado de rayos sobre el sistemas CP-CPC y las consideraciones más importantes para determinar la distribución de flujo solar sobre el receptor.

3.4.1. Código de simulación para sistema CP-CPC

En la figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo utilizado en el código de simulación de rayos sobre el sistema CP-CPC. Primero se generan los rayos sobre la apertura del CP, como se explicó anteriormente, con una posición y dirección de propagación. En función de la geometría del CPC se determina si el rayo está dentro de la zona sombreada, de ser así la propagación del rayo se termina y es contado como rayo perdido. Si el rayo no es sombreado, se propaga y refleja sobre la superficie del CP, como se explicó anteriormente.

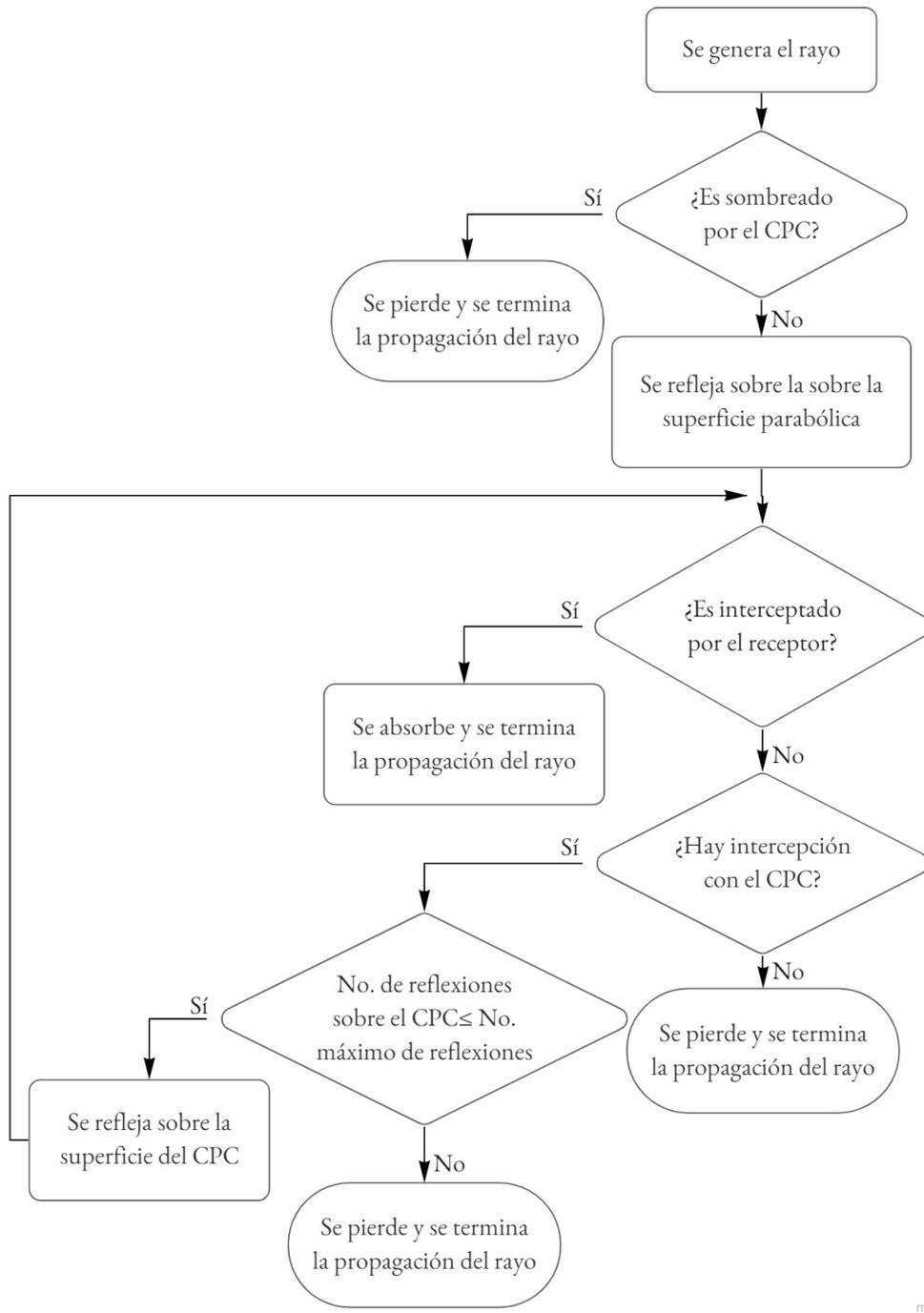


Figura 3.7: Diagrama de flujo del código de simulación de rayos sobre sistemas CP-CPC.

Los rayos reflejados por el CP se propagan y se determina si golpea el receptor cilíndrico. Si el vector del rayo llega al receptor puede definirse como

$$\vec{r}_{ir} = \vec{r}_0 + d_r \hat{r}_r \quad (3.10)$$

donde \vec{r}_0 es el vector que determina el punto de impacto del rayo sobre el CP, \hat{r}_r vector

unitario del rayo reflejado y d_r es la distancia de propagación del vector \hat{r}_r para que se cumpla la intersección con el receptor.

$$d_r = -(\vec{r}_0 \cdot \hat{r}_r) \pm \sqrt{(\vec{r}_0 \cdot \hat{r}_r)^2 + R^2 - |\vec{r}_0|^2} \quad (3.11)$$

La intersección real \vec{r}_{ir} del rayo con el receptor sólo ocurre cuando el argumento de la raíz es positivo, de lo contrario la solución es compleja y significa que no hay intercepción. Para el vector resultante se toma la distancia d_r más corta, eso se da cumple con el signo negativo que multiplica la raíz, como se muestra en la siguiente figura.

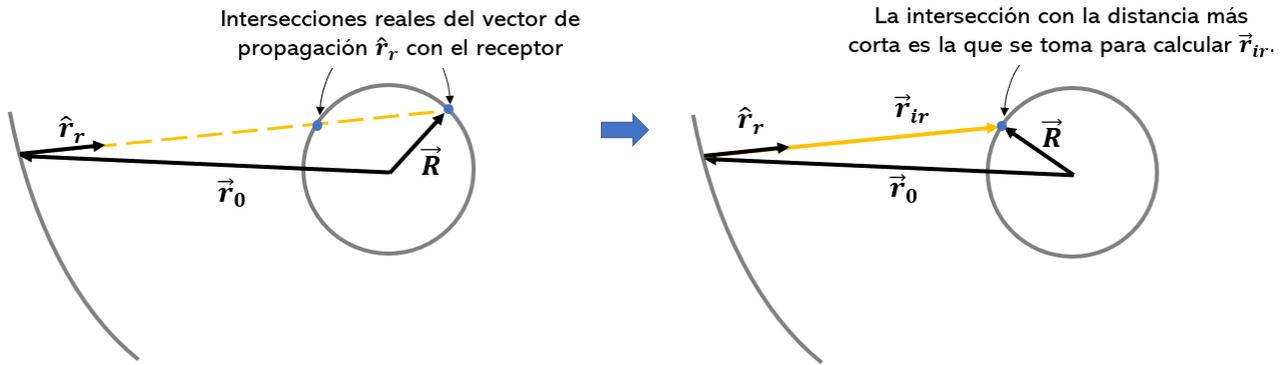


Figura 3.8: Intersección del rayo propagado con el receptor.

Si la intersección del rayo con el receptor es verdadera y no cruza primero la superficie del CPC, la trayectoria del rayo se termina y se considera una absorción completa de la energía proveniente de cada haz.

Para determinar el punto de impacto de los rayos sobre la superficie reflectora del CPC, ésta se aproxima a una serie de segmentos rectos sobre los cuales se calcula la intersección. La cantidad de segmentos se definen como (n_p-1) , donde n_p es el número de puntos que lo conforman y se determinan utilizando las ecuaciones 2.17 y 2.18. Si la intercepción es verdadera, el rayo reflejado en la superficie del CPC se calcula utilizando la ley de reflexión descrita anteriormente, para lo cual se considera la normal al segmento recto donde ocurre la intercepción.

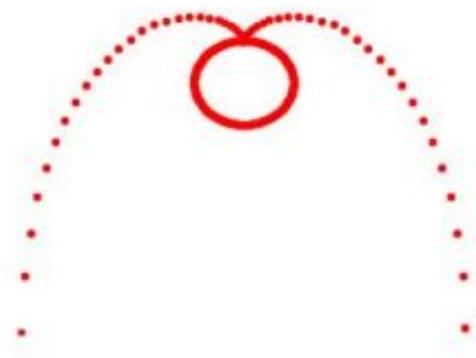


Figura 3.9: CPC aproximado con (n_p-1) segmentos.

Debido a las características geométricas del CPC, el rayo puede tener varios rebotes sobre la superficie del mismo antes de llegar al receptor. La intersección con el receptor se calcula cada vez que se refleja. En el código de programación se permiten hasta 10 rebotes antes de que la interacción con el receptor ocurra y si no se desecha el rayo, esto debido a la capacidad computacional y evitar tener un rayo con botes infinitos. En cada rebote el peso w del rayo es castigado por la reflectancia espectral de la superficie. Con las ecuaciones de Fresnel podemos encontrar la reflectancia espectral en función del ángulo de incidencia, sin embargo, para este trabajo se tomó 0.9 como valor constante de la reflectancia espectral en una superficie de aluminio (Ustaoglu et al. 2016).

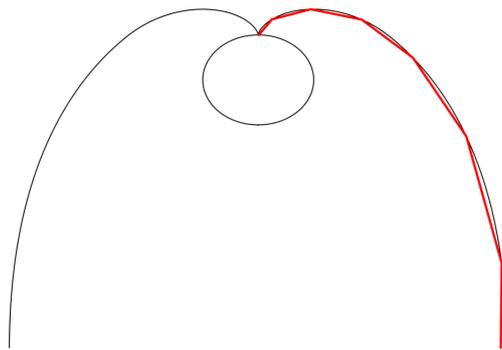


Figura 3.10: Rayo con 6 rebotes sobre la superficie reflectora del CPC.

3.4.2. Esquema de distancias en las simulaciones CP-CPC

Como se mencionó anteriormente, se desplaza el receptor y el CPC con la finalidad de mejorar la homogeneidad de flujo sobre el receptor. El desplazamiento se realiza sobre el eje focal de la parábola, moviendo la apertura del CPC en múltiplos de R a partir del foco de la parábola (el cual se encuentra situado en el origen). En la figura 3.11 se presenta un esquema de la configuración.

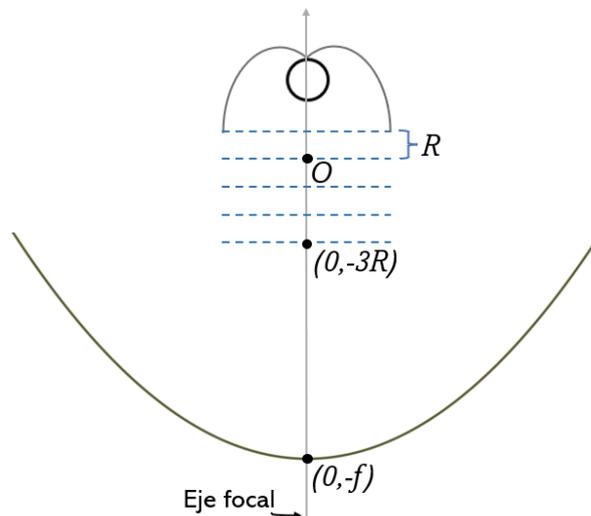


Figura 3.11: Esquema de configuración del sistema y desplazamiento del CPC.

Los CPC utilizados en la simulación tenían un ángulo de aceptación igual al ángulo de borde del CP, es decir, de 80.3° y 45° . Tomando como radio de receptor 0.035m y el largo de 6.4m , como se mencionó anteriormente. En el caso del canal parabólico con 80° de ángulo de aceptación, la apertura del CPC se simula a distancias de $-3R$, $-2R$, $-R$, 0 , R , $2R$ y $3R$ del foco. El canal parabólico de aceptación de 45° con $-10R$, $-8R$, $-6R$, $-4R$ y 0 . En ambos casos se eligieron estas distancias ya que permitían posicionar el receptor antes y después del foco. Es importante mencionar que en las simulaciones se considera una irradiancia de 1000 W/m^2 y se simulan $1,000,000$ de rayos, como se definió en el estudio de incertidumbre (sección 3.3.1).

3.5. Optimización del sistema CP-CV

La configuración del sistema CP-CV plantea acoplar un segundo reflector en forma de V sobre el receptor cilíndrico del CP. Se considera que el CV es de aluminio, con una reflectancia espectral constante de 0.9 (Ustaoglu et al. 2016). El receptor cilíndrico se traslada a lo largo del eje focal por debajo del foco, permitiendo que algunos rayos se desborden del receptor y lleguen al CV para ser reflejados en la parte superior del tubo absorbedor.

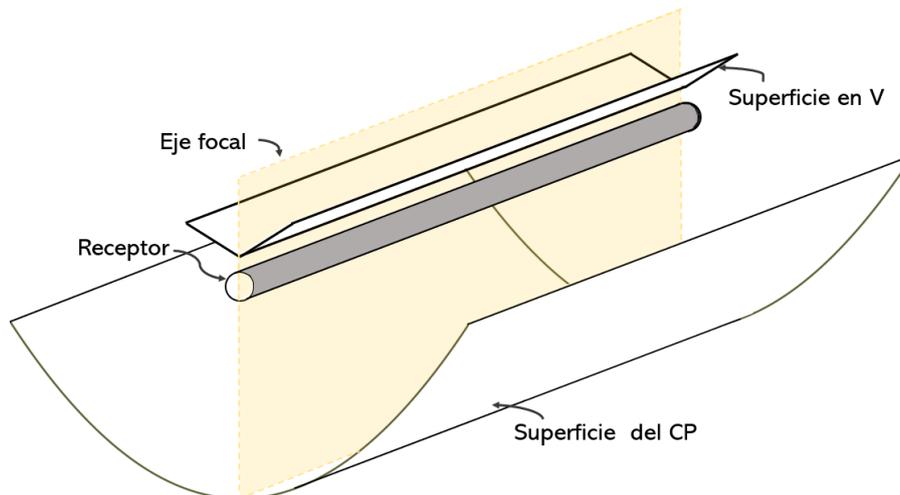


Figura 3.12: Esquema de configuración CP-V.

En este caso se utiliza un algoritmo de optimización evolutiva para determinar una configuración que permita tener mejoras en la distribución de flujo solar sobre el receptor. En esta sección se explica la optimización realizada sobre la geometría del CV.

3.5.1. Definición del CV como segundo concentrador

El CV se conforma por dos secciones simétricas rectas. A pesar de ser una geometría simple, es necesario obtener la adecuada configuración de sus parámetros para obtener reconcentración de los rayos sobre el receptor. El CV se define respecto al origen como

$$y(x) = \begin{cases} m x + d & -x_e < x < 0 \\ -m x + d & 0 < x < x_e \end{cases} \quad (3.12)$$

donde x_e es valor extremo del sistema en x , m es la pendiente de la recta en función del ángulo de inclinación θ_v , d es la distancia entre el centro del receptor y el punto central más bajo del reconcentrador, como se muestra en la figura 3.13.

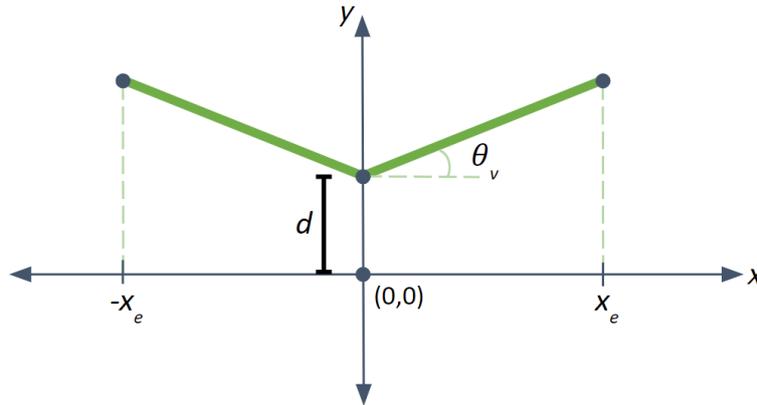


Figura 3.13: Concentrador en V

Los parámetros del CV pueden tener infinitas configuraciones, por lo tanto se utilizó un método de optimización numérica para conocer los valores del concentrador que permitieran obtener las menores pérdidas y la mayor uniformidad sobre el receptor.

3.5.2. Método de optimización de Evolución Diferencial

Se requiere conocer la configuración que permita obtener mejoras en la distribución de flujo radiativo sobre el receptor. Al ser un problema que no está descrito por una función diferenciable, se propone utilizar el Método de Evolución Diferencial (MED) para realizar la optimización del sistema. Este es un método estocástico que se clasifica dentro de la rama de computación evolutiva, desarrollado por [Storn & Price \(1997\)](#).

En general, se deben optimizar ciertas propiedades de un sistema a través de parámetros elegidos que son representados como vectores. La tarea de optimización requiere una función objetivo para minimizar a través de la transformación de los vectores de parámetros. El MED mantiene una población de soluciones candidatas, las cuales se recombinan y mutan para producir nuevos individuos los cuales serán elegidos de acuerdo al valor de la función objetivo.

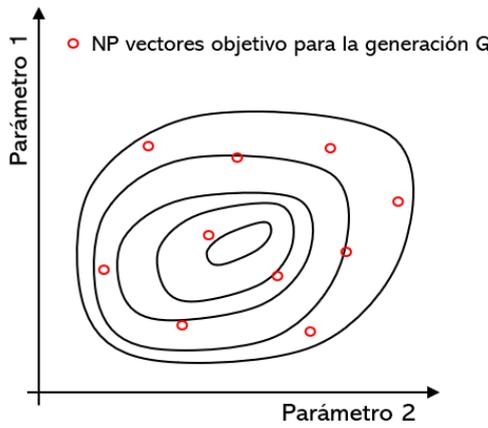
La estructura general del método es:

- Inicialización.
- Mutación.

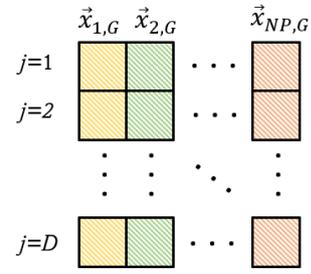
- Cruza.
- Selección.

La inicialización comienza con la determinación de los individuos de población inicial, la cual está compuesta por NP (Número de padres) vectores parámetro (conocidos también como vectores objetivo). Los vectores parámetro tienen una dimensión (D) igual al número de variables del problema. Un vector está definido como $x_{i,G}$, donde i es el índice que le corresponde dentro de la población y G la generación. Es importante mencionar que NP no cambia en el proceso de minimización.

La primera generación de vectores objetivo se elige aleatoriamente dentro de las restricciones de cada variable. Se asume una distribución de probabilidad uniforme para todas las variables del vector objetivo al menos que se indique lo contrario.



(a) Gráfica de NP vectores en 2-D



(b) Población de vectores objetivo de D dimensiones

Figura 3.14: Representación de la inicialización de vectores: (a) Gráfica de NP vectores en 2-D y (b) población de vectores objetivo de D dimensiones.

La mutación genera nuevos vectores (vectores mutados) a partir de los individuos de la población inicial. Por cada individuo se crea un vector mutado \vec{V} . Para ello, a un vector aleatorio de la población se le añade la diferencia ponderada entre 2 vectores elegidos de forma aleatoria.

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (3.13)$$

donde $r1, r2, r3$ existen dentro del rango $[1, NP]$ y $r1 \neq r2 \neq r3 \neq i$. F es una constante que controla la amplificación de la diferencia, y de acuerdo a estudios de convergencia F se define entre 0 y 2.

La cruza tiene la finalidad de aumentar la diversidad de los vectores. A los vectores obtenidos de la cruza se les conoce como vectores de prueba. Cada individuo de la familia, es decir, cada vector objetivo, tiene un vector prueba con la forma:

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{si } [\text{rand}(j) \leq \text{CR}] \text{ o } j = \text{rnbr}(i) \\ x_{ji,G} & \text{si } [\text{rand}(j) > \text{CR}] \text{ y } j \neq \text{rnbr}(i) \end{cases}$$

donde el subíndice j representa la dimensión j -ésima, $\text{rand}(j)$ es la evaluación de un número aleatorio generado uniformemente dentro del rango $[0,1]$ para cada dimensión del vector. CR es la constante de cruce que puede tomar valores dentro de $[0,1]$. $\text{rnbr}(i)$ es un valor aleatorio elegido dentro del número de dimensiones, es decir, $\in [1,2,\dots,D]$.

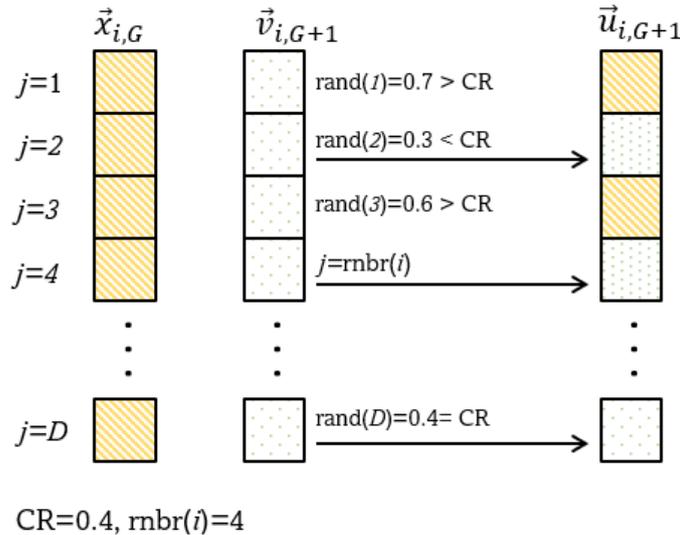


Figura 3.15: Esquema de la representación de cruce para un método que utiliza CR=0.4 y obtuvo $\text{rnbr}(i) = 4$ en esta cruce.

Una vez obtenido el vector prueba su desempeño debe compararse al del individuo principal al que se encuentra asociado. El vector prueba pasa a la generación $G+1$ si obtiene un valor menor de la función objetivo que el vector objetivo $x_{i,G}$. De no ser así, el vector $x_{i,G}$ pasa a la siguiente generación. Con la población de vectores que sobrevivieron se vuelve a repetir el proceso hasta cumplir con el criterio de término (número máximo de evaluaciones, tiempo máximo de simulación, un valor mínimo de la F.O, entre otros).

Los desarrolladores del MED han realizado estudios de convergencia para conocer los mejores valores para las variables de control NP, F y CR. Aunque el valor más adecuado dependerá del comportamiento del problema, de acuerdo con la experiencia de los desarrolladores un valor razonables para NP es entre $5 \cdot D$ o $10 \cdot D$ para asegurarse de habrá suficientes vectores de mutación con los cuales trabajar; para el parámetro F se recomienda usar 0.5; y se puede elegir un CR=0.1 (Storn & Price 1997).

En nuestro caso, se busca una configuración del sistema que permita tener una mejor distribución del flujo radiativo sin tener importantes pérdidas de los rayos. Los parámetros a optimizar son las dimensiones del concentrador: la distancia del origen del receptor al concentrador d , el ancho del sistema x_e y el ángulo de la superficie reflectora θ_v . El rango de los parámetros se definió de la siguiente forma

$$\begin{aligned}d &\in [0.04, 1.05] \\x_e &\in [0.01, 0.05] \\ \theta_v &\in [0, 90]\end{aligned}\tag{3.14}$$

La función objetivo a minimizar está definida como

$$\text{F.O.} = U + \zeta\tag{3.15}$$

es decir, buscamos minimizar U lo que implica una mejor uniformidad, y menores valores de ζ , es decir, disminuir la pérdida de rayos. Para la optimización se utilizó el MED que viene definido en la librería *BlackBoxOptim* de *Julia* (Felt 2013-2021). A continuación se explica el código utilizado para la optimización del sistema.

3.5.3. Código de simulación para sistema CP-CV

En la figura 3.16 se muestra el diagrama de flujo utilizando el código de simulación de rayos sobre el sistema CP-CV (casillas en blanco) integrado con el MED (casillas en gris). Primero se inicializan la familia de vectores parámetros para la configuración del sistema en V utilizando como dimensiones d , x_e y θ_v .

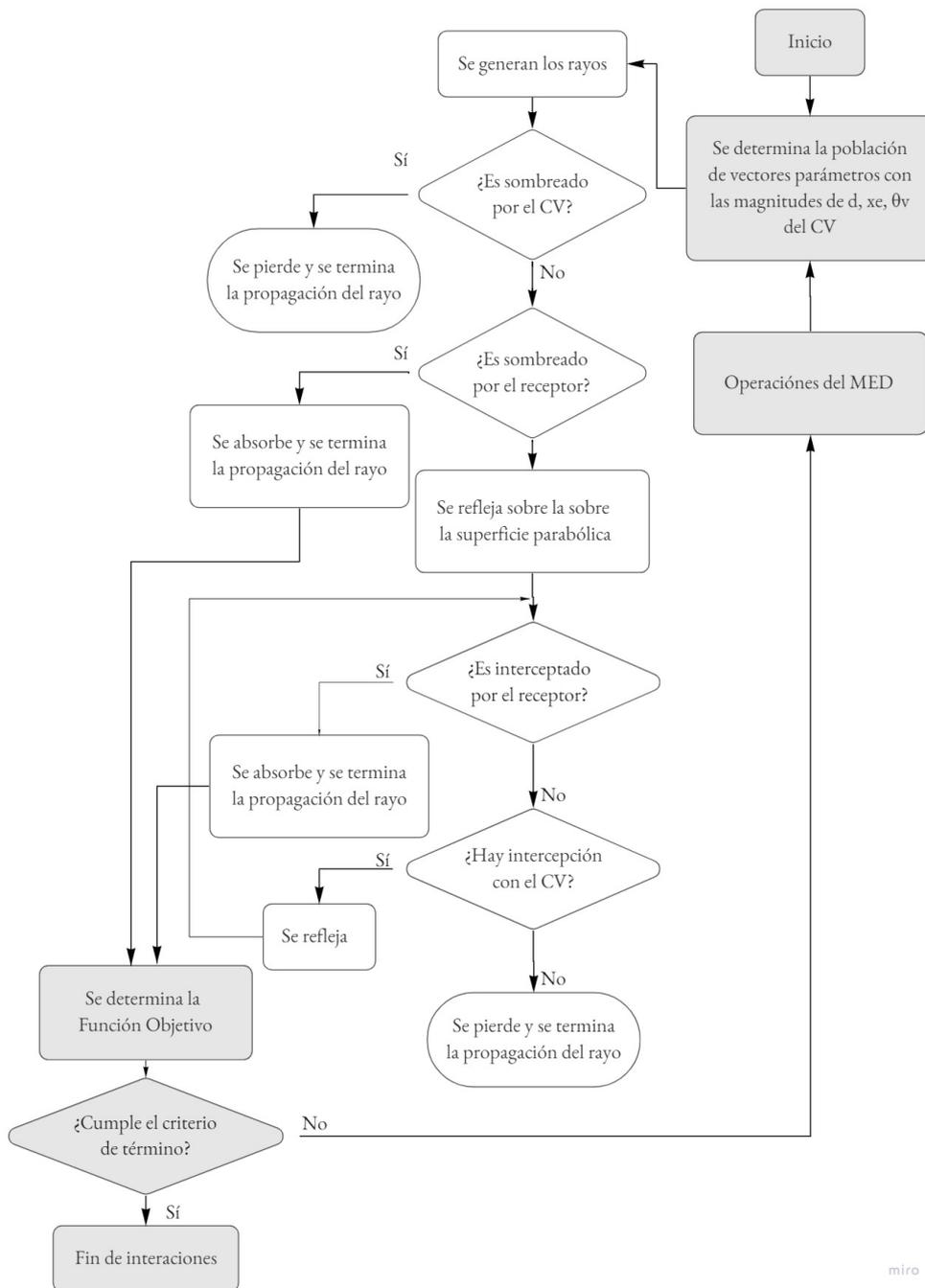


Figura 3.16: Diagrama de flujo del código de simulación de rayos sobre el sistema CP-CV.

Se generan los rayos y con base a la geometría simulada se determina si el rayo es sombreado por el CV, de ser así el rayo es contado como perdido y termina su propagación. Si el rayo no es sombreado por el CV, se determina el sombreado por el receptor, de ser así estos se absorben en el receptor y termina su propagación.

Los rayos que no están dentro de la zona sombreada se reflejan sobre la superficie del CP con base a la ley de reflexión explicada anteriormente. Posterior a eso se determina se el rayo reflejado por el CP intercepta al receptor cilíndrico utilizando la ecuación 3.11. Si la intersección

es verdadera, el rayo es absorbido. De lo contrario, se determina si existe intersección con la superficie del CV. Si el rayo llega al segundo concentrador, es reflejado por la ley de reflexión, de no ser así es contado como perdido y termina su propagación. El rayo reflejado por el segundo concentrador es propagado y se determina si llega al receptor o no.

Con base en los rayos absorbidos por el receptor se determina la distribución de flujo radiativo sobre el receptor y se resuelve la Función Objetivo antes mencionada. Si no se cumple el criterio de término para lo optimización, se continua con el MED para obtener la siguiente generación de vectores parámetro. Si el criterio de término se cumple se terminan las operaciones y se presenta el mejor candidato de la última generación simulada.

3.5.4. Esquema de distancias en las simulaciones CP-CV

La optimización de los distintos parámetros que definen el CV se realizó para distintas posiciones del receptor. El desplazamiento del receptor se hace sobre el eje focal de la parábola y se mide desde el punto focal al centro del receptor. Las posiciones del receptor se eligieron en función del porcentaje de rayos interceptados. Es decir, en foco el porcentaje de rayos interceptados en el CP convencional es cercano al 100 %, pero al sacar el receptor de foco el porcentaje de rayos interceptado disminuye. En la figura 3.17 se presenta un esquema de la configuración.

Es importante recordar que la distancia del segundo al receptor fue un parámetro a optimizar y los resultados obtenidos para este parámetro se miden a partir del centro del receptor de cada caso simulado.

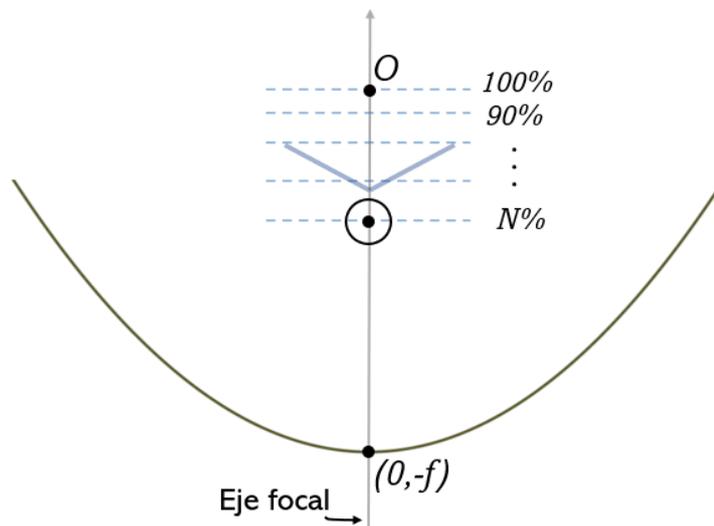


Figura 3.17: Esquema de configuración del sistema y desplazamiento del CP-V.

El desplazamiento se realizó únicamente hacia abajo del punto focal, ya que en esta zona los rayos convergen en el foco, con lo cual la forma en V permite reconcentrarlos en el receptor. Si se desplazara sobre el foco los rayos divergen, por lo que el concentrador tendría que invertirse. Además, debido al cono solar, los rayos se encuentran más abiertos sobre el foco, con lo cual el ancho del concentrador requiere ser más grande, generando mayor pérdida de rayos por sombra.

Los casos que se optimizaron fueron a 75 %, 70 %, 65 %, 60 %, 55 % y 50 % de rayos interceptados. En la siguiente tabla se presentan las coordenadas en y para cada porcentaje, a partir del origen (el cual coincide con el punto focal) al centro del receptor.

Tabla 3.2: Desplazamiento del centro del receptor en función del porcentaje de rayos interceptados.

Porcentaje de intercepción de rayos	Coordenadas en y [m]
75 %	-0.060
70 %	-0.066
65 %	-0.070
60 %	-0.077
55 %	-0.080
50 %	-0.090

Aunque es verdad que en la práctica es imposible tener desplazamientos del receptor tan precisos, se toman estos valores para conocer el comportamiento del segundo concentrador y su configuración al irse desplazando sobre el eje focal. Es importante mencionar que sólo se realizó la simulación con el canal de 45° de aceptación. En las simulaciones se considera una irradiancia de 1000 W/m^2 , se simulan 1,000,000 de rayos, como se mencionó en el estudio de incertidumbre. El criterio de término utilizado fue el número máximo de evaluaciones es cual se determinó en 300 (100 veces las dimensiones) ya que en con las primeras pruebas se notó que en al rededor de esta generación ya no se tenían cambios en los valores arrojados.

Capítulo 4

Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados de la distribución de flujo de los sistemas CP-CPC y CP-CV conforme a lo que describió en el capítulo anterior. Además, se muestra la validación de los códigos utilizados para cada configuración, así como un estudio de calidad de malla en el CPC y el receptor.

4.1. Validación de códigos

A continuación se presenta la validación de los códigos realizados para los sistemas CP y CPC por separado. Para ello se compara la distribución de flujo radiativo sobre un receptor para ambas tecnologías contra otras fuentes de información que proporcionan estos resultados.

4.1.1. Trazado de rayos sobre el CP

El programa de trazado de rayos sobre el CP se validó simulando en *Soltrace* un sistema con las mismas características que el analizado en el código desarrollado en este trabajo. El CP simulado tiene un ángulo de borde de $\psi_b = 80.3^\circ$, una distancia focal de 1.71 m y un $\sigma_e = 7\text{mrad}$. El canal tiene una longitud de 6.4 m y el radio del receptor es de 0.035 m. Para el trazado de rayos se generan 10^6 rayos de forma aleatoria sobre el área de apertura. La radiación incidente se asume como 1000W/m^2 . Para obtener la distribución de flujo sobre el receptor en 2D, se utiliza una malla que divide en 50 partes la circunferencia, tanto en el código como en *Soltrace*.

En la figura 4.1 se presenta la distribución de flujo radiativo sobre el receptor cilíndrico obtenido del código de simulación y de *SolTrace*. Como se observa, existe gran similitud en los resultados alcanzados. Las gráficas coinciden a lo largo de toda la distribución.

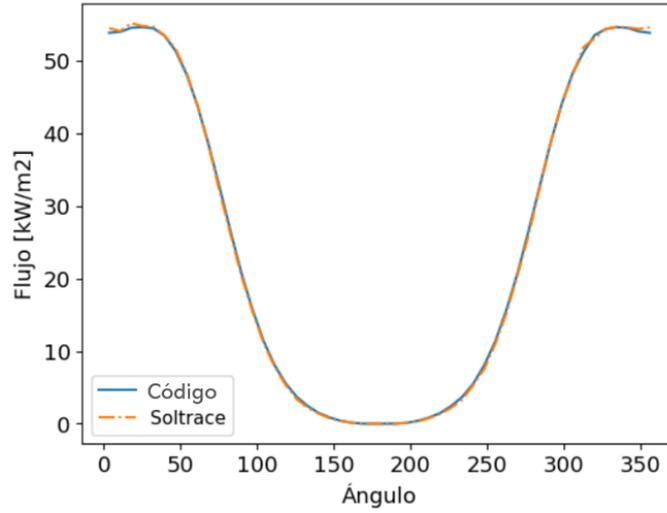


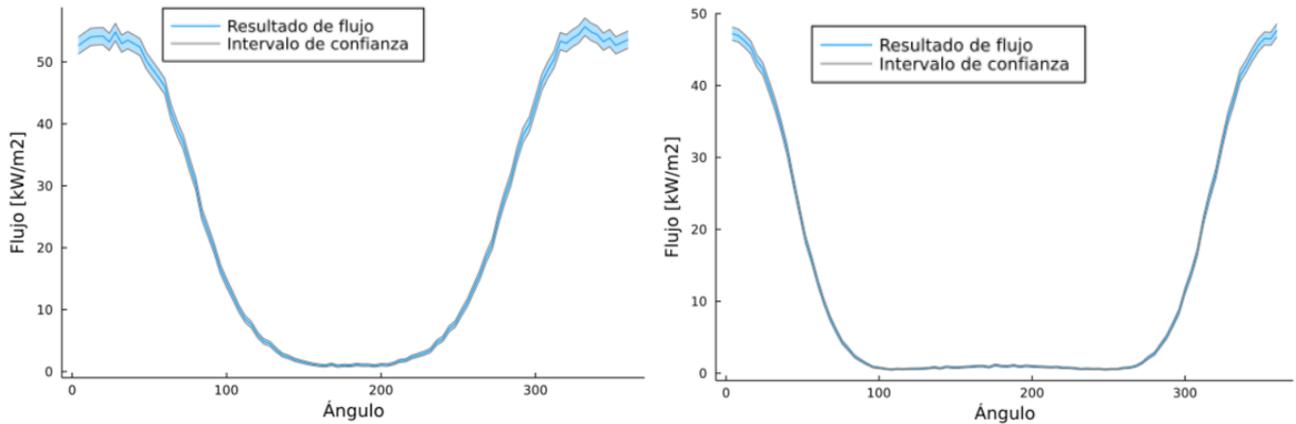
Figura 4.1: Distribución de flujo sobre receptor cilíndrico de CP.

El intervalo de confianza de los resultados obtenidos de la distribución de flujo sobre el receptor de los CP's simulados se calcula utilizando la ecuación 3.9. Para ello se utilizan 1,000,000 rayos, la malla del receptor es de 360 segmentos de arco y se declara un nivel de confianza de 95 % ($W_c = 1.960$). Los resultados se presentan en unidades de flujo de potencia radiativa, por lo que la proporción p (que es un parámetro adimensional) se multiplica por el siguiente factor de conversión

$$\text{Factor de conversión} = \frac{G_b A_p L}{1000 \cdot A_{sm}} \quad (4.1)$$

donde G_b es la irradiancia directa normal, A_p la apertura del CP, L la longitud, A_{sm} el área de segmento de malla y el factor 1000 es para pasar de W/m^2 a kW/m^2 . Con base en las dimensiones de los sistemas utilizados (tabla 3.1), el factor de conversión para el CP a 45° es de 4638.01 kW/m^2 y para el CP de 80.3° es de 9445.61 kW/m^2 .

Los intervalos de confianza de los resultados obtenidos se presentan en la siguiente figura.



(a) Intervalos de confianza del flujo en el CP de 80.3° . (b) Intervalos de confianza del flujo en el CP de 45° .

Figura 4.2: Intervalos de confianza al 95 % del flujo radiativo sobre receptor en los CPs simulados utilizando 1,000,000 de rayos.

En las zonas inferiores del receptor se puede observar que el intervalo es más amplio en comparación con las zonas más altas, ya que la proporción en esa zona es mucho mayor. El máximo intervalo de confianza en el sistema de 80.3° es de 2.5 %, el cual ocurre en el segmento con mayor flujo de radiación, es decir, $55.7 \text{ kW/m}^2 \pm 2.5 \%$. De la misma manera, en el sistema de 45° el mayor intervalo de confianza ocurre en la zona con mayor radiación y es de 1.9 %, es decir, $47.7 \text{ kW/m}^2 \pm 1.9 \%$. Se considera que los intervalos de confianza a 95 % y $N=1,000,000$ son bastante buenos, por lo que se decide que un millón de rayos simulados es adecuado para obtener los resultados.

4.1.2. Trazado de rayos sobre el CPC

El programa del CPC se validó simulando un concentrador con las mismas características reportadas por Ustaoglu et al. (2016). En el trabajo reportado, el CPC tiene un ángulo de aceptación de 23.5° , un receptor de diámetro exterior de 0.02m y un largo de 1m. Para el trazado de rayos se generan 5000 rayos uniformemente distribuidos a lo largo del área de apertura con un ángulo de incidencia de 0° . La radiación incidente se asume como 1000 W/m^2 . El trabajo de Ustaoglu et al. utiliza una superficie reflectora de aluminio, con una reflectividad espectral en función de su ángulo de incidencia. En nuestra simulación se utiliza una reflectividad espectral de 0.9 para cualquier ángulo de incidencia. El receptor se divide en 360 segmentos para obtener la distribución de flujo y el CPC se aproxima con $n_p=800$.

En la figura 4.3 se presenta la distribución de flujo radiativo sobre el receptor cilíndrico obtenidos del código de simulación y de la referencia de Ustaoglu et al. (2016). El artículo de referencia no aporta datos específicos de la malla de la superficie del CPC para la simulación, ni mucha información sobre el método utilizado. Por lo anterior, no es posible reproducir una simulación idéntica, pero visualmente la coincidencia con los resultados del presente trabajo es muy buena. Esto nos da una validación aceptable, tomando en cuenta la gran cantidad y lo estrecho de los picos que aparecen. Como se puede observar, los principales picos y valles

coinciden en altura y anchos. En las siguientes secciones se examina el efecto de las mallas utilizadas en los resultados del presente trabajo.

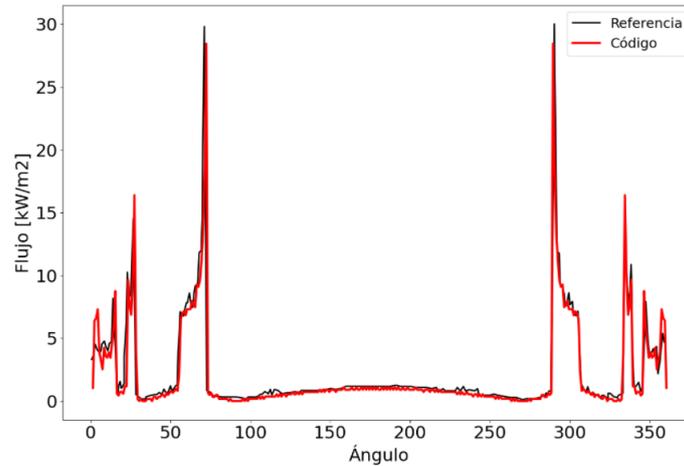


Figura 4.3: Distribución de flujo sobre receptor cilíndrico de CPC.

4.2. Efecto de calidad de malla en los resultados obtenidos

4.2.1. Dependencia del resultado de distribución de flujo en función del número de segmentos del CPC

Como se mencionó anteriormente, el programa de trazado de rayos sobre el CPC aproxima la superficie reflectora en una serie de $(n_p - 1)$ segmentos rectos. Esto es con la finalidad de facilitar el cálculo de la intersección del rayo con el CPC y disminuir el tiempo de cómputo. Sin embargo, es importante resaltar que la cantidad de segmentos en los cuales se aproxima el CPC tiene un efecto significativo sobre los resultados obtenidos de la distribución de flujo en el receptor. En la siguiente figura se presenta la distribución de flujo a distintos valores de n_p para la superficie del CPC. Como podemos observar en la figura 4.4.a, al simular con 50 puntos las alturas de los picos más grandes no coinciden con los resultados de referencia. Cuando se tienen $n_p = 100$, como en la figura 4.4.b la tendencia de los picos es bastante clara, aunque las magnitudes mayores son la mitad de lo esperado. Al tener n_p a 500 y 800 los principales picos y valles tienen el comportamiento esperado. Con valores de n_p mayores de 800 los cambios en la magnitud son insignificantes, por lo que se elige como un valor adecuado para realizar las simulaciones.

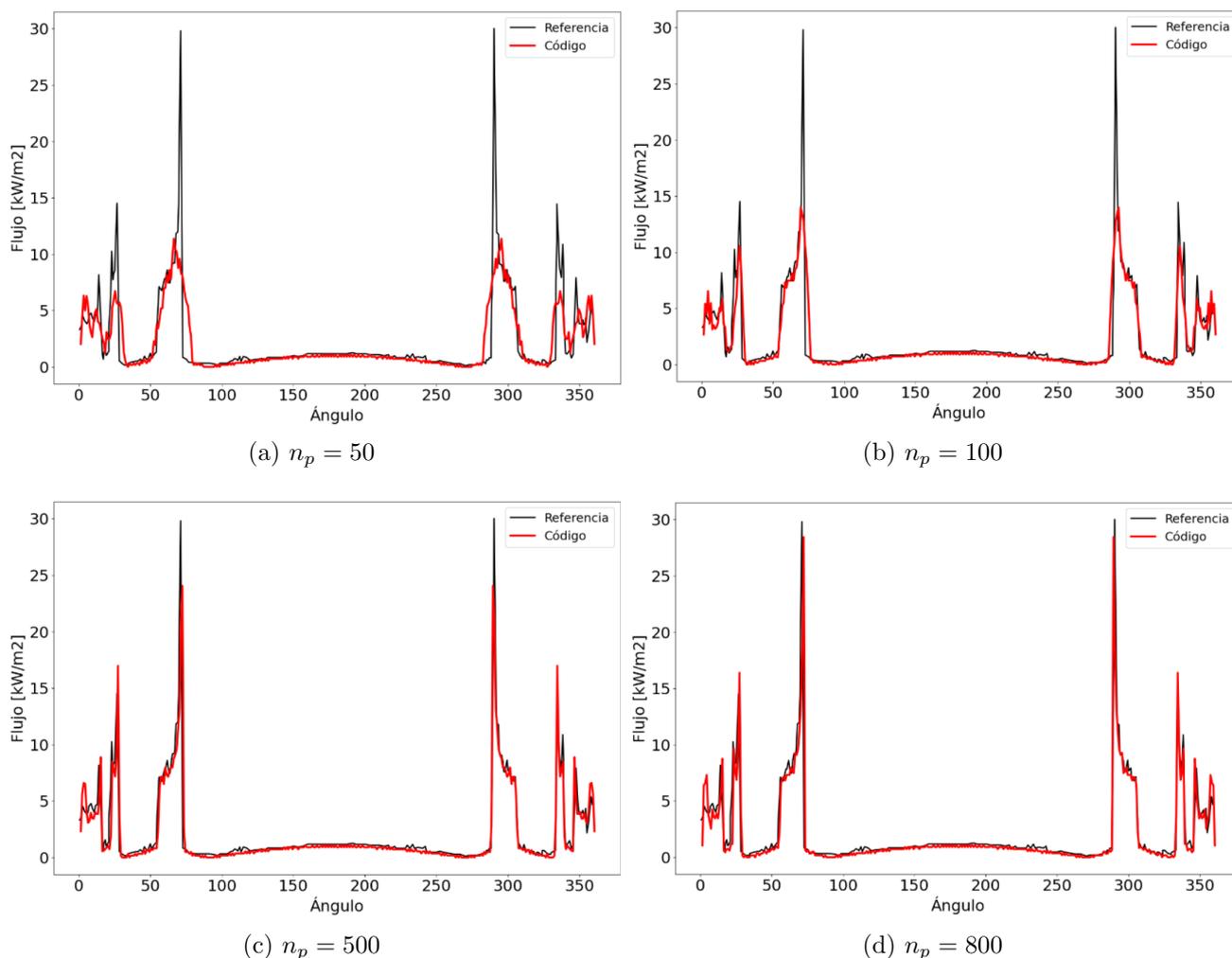


Figura 4.4: Distribución de flujo radiativo sobre el receptor del CPC a diferentes valores de n_p .

4.2.2. Dependencia del resultado de distribución de flujo CPC en función del número de segmentos del receptor

Para determinar la distribución de flujo sobre el receptor, en función del ángulo radial se dividió la circunferencia en n_r segmentos de arco. La cantidad de segmentos de circunferencia tiene un efecto importante en los resultados, por lo que en la siguiente figura se presenta la distribución de flujo a distintos valores de n_r . Al utilizar 40 segmentos, como se presenta en la figura 4.5.a, las magnitudes y principales picos no son representativos. Con 90 y 180 segmentos podemos ver que si sigue la tendencia del resultado esperado, sin embargo las magnitudes son mucho menores. Al utilizar 360 segmentos, como en la figura 4.5.c los picos y las magnitudes tienen comportamientos muy cercanos a los esperados, por lo tanto se determina que 360 segmentos son un valor apropiado para realizar las simulaciones.

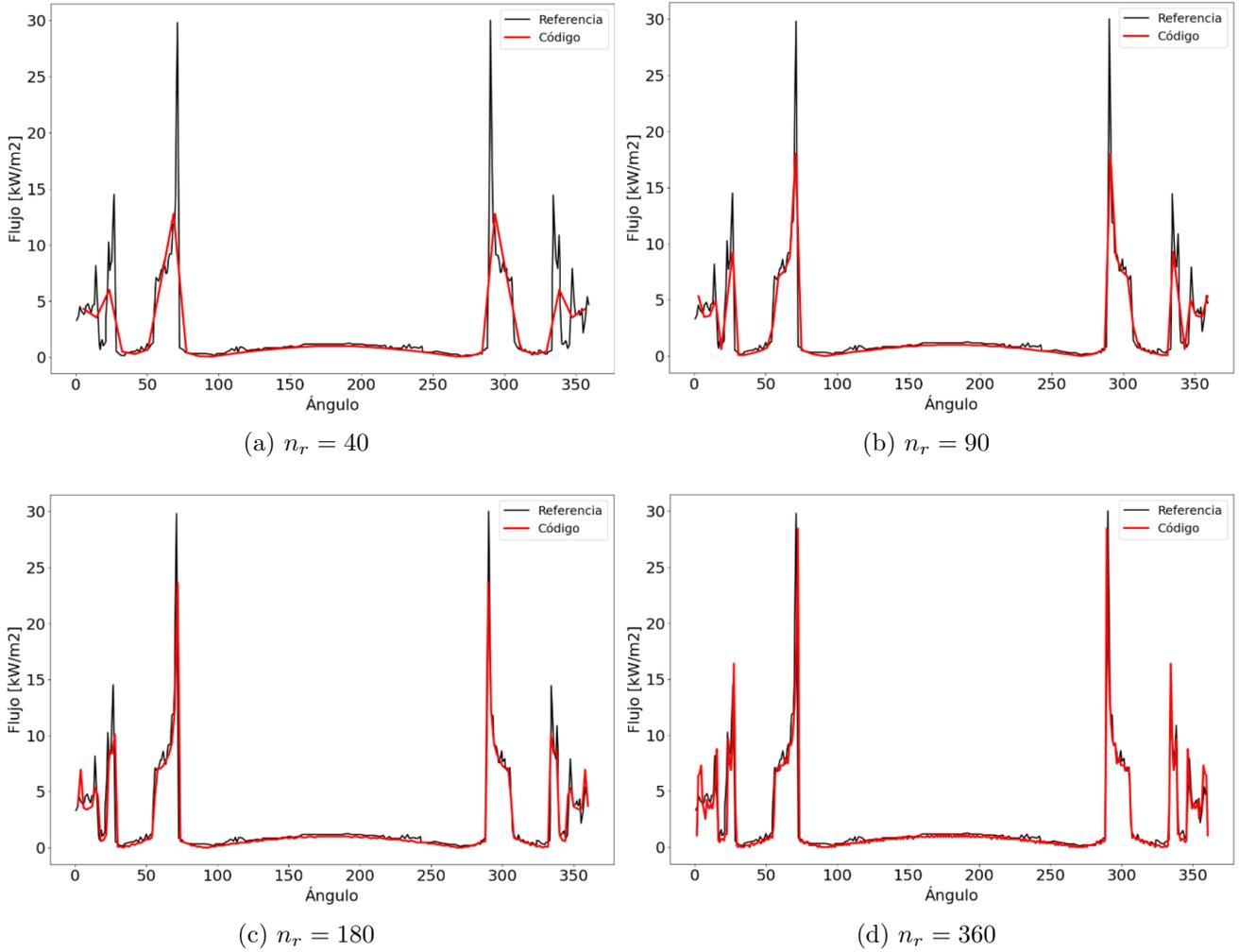


Figura 4.5: Distribución de flujo radiativo sobre el receptor del CPC a diferentes valores de n_p .

4.3. Distribución de flujo sobre sistema CP-CPC

Como se mencionó anteriormente, las simulaciones se realizan utilizando CPC con ángulos de aceptación iguales al ángulo de borde del CP. En este caso, un sistema CP-CPC a 80.3° y otro a 45° . Se analizó la posibilidad de utilizar CPC con diferentes ángulos de aceptación, sin embargo era evidente que no tenía sentido. El trabajar con un CPC que aceptara ángulos mayores a los provistos por el CP no aportaba efecto sobre el flujo radiativo del receptor, ya que no hay una fracción de rayos significativa que sobrepase el ángulo de borde del CP. Por otro lado, el trabajar con CPC que aceptara ángulos menores a los provistos por el CP únicamente reducía de forma importante el flujo radiativo sobre el receptor, sin aportar algún efecto significativo en la homogenización de radiación sobre el mismo (además de los causados por la propia pérdida de rayos). Con base en lo anterior, la configuración y la apertura del CPC quedó sujeta al ángulo de borde del CP y el radio del receptor.

Es importante recordar que se desplazó el receptor y el CPC sobre el eje focal de la parábola.

Como se explicó en la sección 3.4.2, la distancia de desplazamiento se mide del foco de la parábola al plano de apertura del CPC. El esquema del sistema se muestra en la figura 3.11.

4.3.1. Ángulo de aceptación de 80.3°

La distribución de flujo radiativo sobre el receptor para el CP-CPC con 80.3° de ángulo de aceptación se presentan en las figuras 4.6, donde también aparece el caso del CP convencional sin concentrador secundario con fines de comparación.

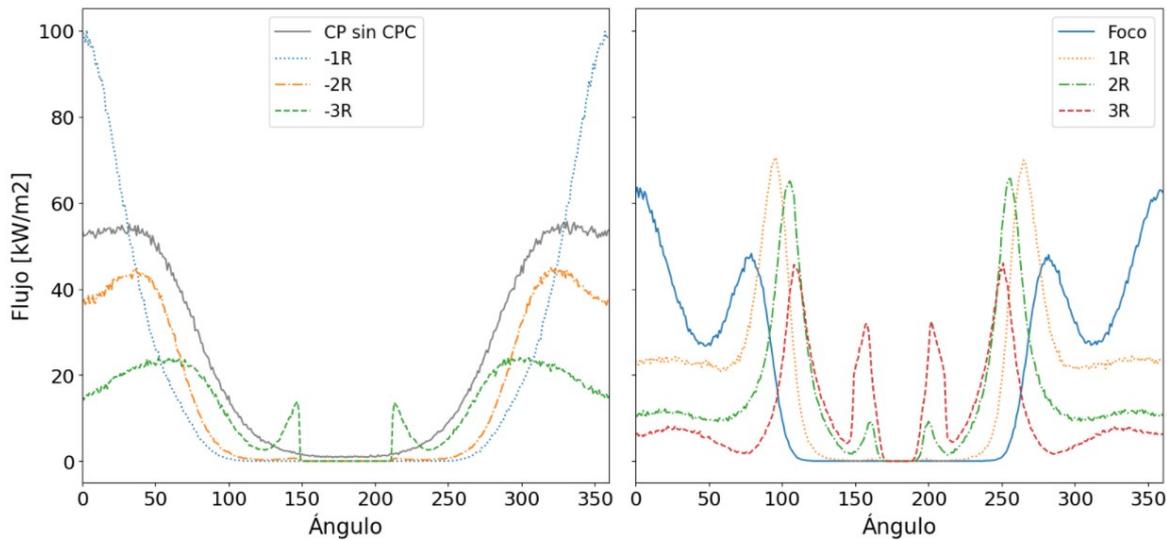


Figura 4.6: Distribución de flujo sobre receptor cilíndrico utilizando un ángulo de aceptación de 80.3°

Con la finalidad de comprender de forma más amplia el desempeño de cada configuración, en la figura 4.7 se presenta el trazo de rayos sobre los sistemas CP-CPC a 80.3° de ángulo de aceptación. Los rayos que llegan del CP al receptor son colocados en verde. Los que llegan del CP al CPC en amarillo. Los que rebotan del CPC al receptor en rojo. Los rayos pintados en azul son aquellos que han rebotado del CP pero no logran pasar la apertura del CPC y se consideran como perdidos.

En la figura 4.6 se observa que cuando la apertura del CPC se encuentra -3R por debajo del punto focal se obtiene una importante atenuación en los picos de concentración de flujo. Una importante cantidad de rayos se pierde por la sombra del CPC, disminuyendo significativamente el flujo radiativo. La mayor parte de los rayos absorbidos viene directamente del CP al receptor, distribuyéndose sobre la mitad inferior del receptor. Algunos rayos llegan a la involuta del CPC y son concentrados en la parte alta del absorbedor (ver figura 4.7a), alrededor de 140° y 220°.

Cuando la apertura del CPC se encuentra en -2R el receptor se encuentra muy cercano de la zona focal, por lo que el CPC tiene un desempeño significativo en término de reconcentración. Sin embargo, el CPC sombrea una gran cantidad de rayos (ver figura 4.7b), lo cual tiene un peso importante en la pérdida de flujo radiativo.

La figura 4.6 muestra que la apertura del CPC desplazada -1R tiene picos de concentración

mucho mayores que los encontrados en el CP convencional. Este efecto se debe principalmente a que el punto focal se encuentra prácticamente en la zona más baja del receptor. Algunos rayos que vienen de los extremos del CP son reconcentrados por el CPC sobre la mitad inferior del receptor, aportando más radiación en esta zona ver (figura 4.7c). Es importante mencionar que el CPC sombrea los rayos más externos, lo cual tiene una disminución en la energía obtenida y una acentuación de la no uniformidad.

Para la configuración donde la apertura del CPC está en foco se tiene picos de concentración en la zona de 0° , 80° y 260° . La concentración que se encuentra en la parte más baja del receptor proviene del CP directamente, sin embargo, los picos de concentración que están en los costados del receptor se deben a la reconcentración del CPC. En este caso, una fracción de los rayos perdidos es debido al sombreado, pero algunos que no son sombreados pasan por debajo del CPC y no alcanzan a ser recolectados por la apertura del mismo (ver figura 4.7d).

Cuando el CPC está desplazado $1R$ los picos de concentración se encuentran en 90° y 270° . Estos rayos provienen del CPC, principalmente. Es importante notar que en $-2R$, $-1R$, en foco y $1R$, la influencia de la parte más alta de la involuta es básicamente nula, lo cual no permite reconcentrar rayos en la parte superior del receptor.

Para el desplazamiento a $2R$ y $3R$ se observa una distribución de flujo con 4 picos entre los ángulos 90° y 260° . Para estos casos, el CPC reconcentra la mayoría de los rayos absorbidos. Los rayos que llegan a los costados del receptor rebotaron una vez sobre el CPC. Por otro lado, los rayos que se absorben en la parte más alta del receptor tienen 2 rebotes sobre el CPC. En este caso la involuta juega un papel importante en la reconcentración de rayos en la parte superior del receptor.

Cuando el CPC está por arriba del punto focal la pérdida de flujo se debe mayormente a que los rayos más externos no logran ser recolectados, es decir, el área de apertura del CPC es muy pequeña en comparación con la apertura de los rayos en ese plano (ver figura 4.7 e, f y g). Esto se traduce en una importante pérdida de energía.

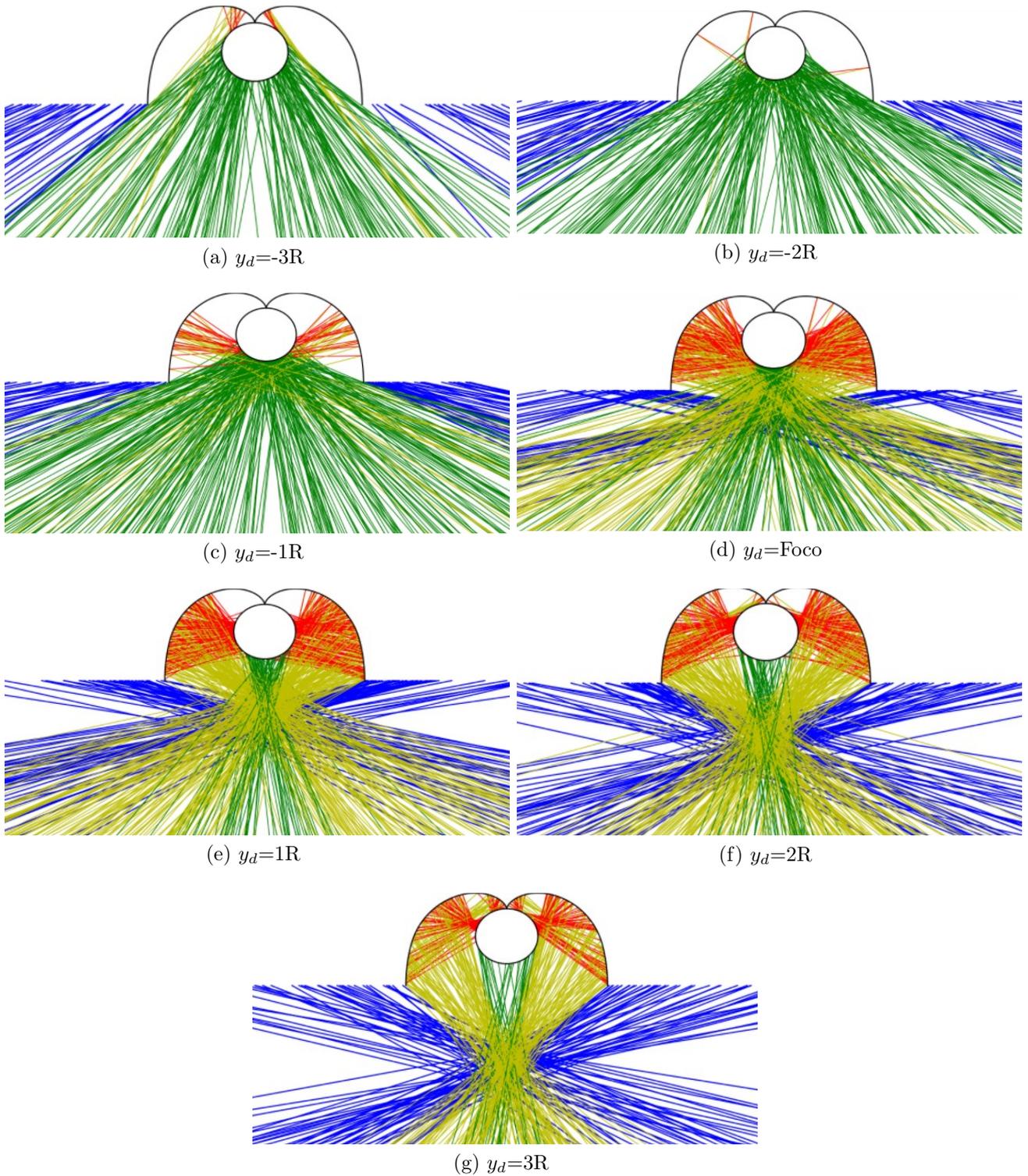


Figura 4.7: Trazo de rayos sobre sistema CP-CPC, utilizando un CP con ángulo de aceptación de 80.3° . Los rayos que llegan del CP al receptor son colocados en verde. Los que llegan del CP al CPC en amarillo. Los que rebotan del CPC al receptor en rojo. Los rayos pintados en azul son aquellos que han rebotado del CP pero no logran pasar la apertura del CPC y se consideran como perdidos.

En la tabla 4.1 se presentan los parámetros de energía y uniformidad para los sistemas CP-CPC con ángulo de aceptación de 80.3° . El caso con desplazamiento de -3R tiene el menor valor de U , con un valor de 0.698. No obstante, la pérdida de rayos es la mayor, con un ζ de 0.518. En este caso el 91 % de los rayos absorbidos llegan directamente del CP, la distribución de flujo más homogénea se debe principalmente a la influencia del desplazamiento y la pérdida de rayos por sombreado. El otro 9 % de rayos absorbidos provienen de rebotar en la parte alta de la involuta del CPC, lo que permite obtener rayos sobre la parte alta del receptor.

Con excepción del sistema a -3R, todos los demás tienen parámetros de U mayores al del CP convencional. El que obtuvo mayor valor es a -1R, con $U=1.470$. La base del receptor se encuentra básicamente el punto focal del sistema, por lo que 84 % de los rayos absorbidos llegan en un área pequeña en el inferior del receptor. Adicionalmente, el CPC reconcentra el 16 % de los rayos restantes sobre la mitad baja del receptor. Gracias a esto, se crea un pico de concentración incluso mayor al obtenido en el CP convencional. Por otro lado, la apertura del CPC sombrea los rayos más extremos lo que restringe la entrada de rayos que vienen de la zona central del CP. Lo anterior tiene por consecuencia una desviación estándar mayor.

Tabla 4.1: Flujo de radiación promedio q_m , U y ζ para el sistema CP-CPC con ángulo de aceptación de 80.3° .

Desplazamiento en y	q_m [kW/m ²]	U [-]	ζ [-]
CP sin CPC	25.542	0.854	0.024
-3R	12.477	0.698	0.518
-2R	16.457	1.100	0.370
-1R	20.864	1.470	0.189
Foco	21.817	0.963	0.114
1R	19.646	0.942	0.186
2R	15.133	1.019	0.368
3R	11.329	0.987	0.517

4.3.2. Ángulo de aceptación de 45°

Los resultados alcanzados para el CP con ángulo de aceptación de 45° se describen a continuación. La distribución de flujo se presentan en la figura 4.8.

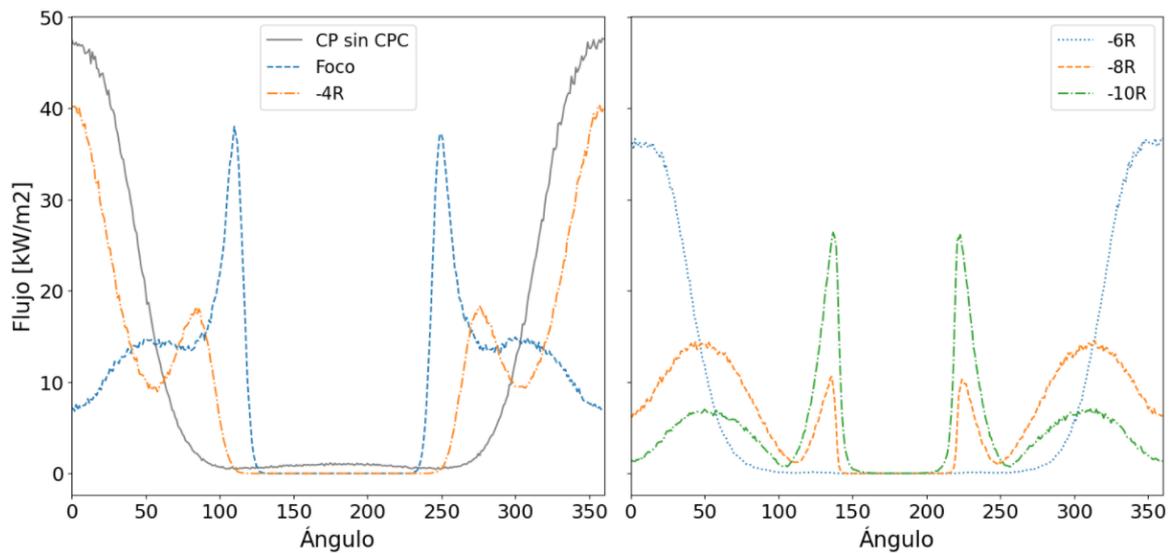


Figura 4.8: Distribución de flujo sobre receptor cilíndrico utilizando un ángulo de aceptación de 45° .

En la figura 4.9 se presenta el trazo de rayos sobre los diferentes casos del sistema CP-CPC a 45° . Los rayos que llegan del CP al receptor son colocados en verde, los que llegan al CPC en amarillo y los que rebotan del CPC al receptor en rojo. Los rayos pintados en azul son aquellos que han rebotado del CP pero no entran al CPC y se consideran como perdidos. En la figura se puede observar que al aumentar el desplazamiento de la apertura, aumenta la fracción de rayos que no logran entrar al CPC y se pierden (rayos azules).

En la figura 4.8, cuando la apertura se coloca en el foco del CP se obtiene una notable disminución en la flujo radiativo de la parte inferior del tubo receptor. Esto se debe a que una fracción de los rayos llegan primero a la superficie del CPC y rebotan en los costados del receptor (ver figura 4.9a), provocando los picos de concentración en 110° y 250° .

Cuando la apertura del CPC se desplaza $-4R$ del foco se tienen altos flujos de radiación en la parte baja del tubo, ya que el receptor se encuentra cercano al foco y casi se comporta como un CP sin segundo concentrador. Sin embargo, hay una fracción de rayos que llega a los lados del receptor gracias al CPC (ver figura 4.9b), formando picos de concentración en 80° y 280° .

Cuando la apertura del CPC se desplaza $-6R$ el receptor está básicamente en foco y la radiación únicamente se concentra en la parte baja del receptor, con lo cual el CPC no realiza trabajo de reconcentración. Sin embargo, el flujo radiativo se ve atenuado debido a la sombra que provoca la superficie del CPC (ver figura 4.9c).

Es importante notar que en foco, a $-4R$ y a $-6R$ los rayos no llegan a la parte más alta de la involuta, por lo que no hay reconcentración en la parte superior del receptor. Para el caso donde la apertura está en $-8R$ una importante fracción de rayos llega directamente sobre el receptor, no obstante, el CPC reconcentra algunos rayos en las partes altas del receptor (ver figura 4.9d), causando picos de concentración en 140° y 220° . Un alto porcentaje de rayos es sombreado por el CPC, con lo que el flujo radiativo se ve disminuido.

Para el sistema donde la apertura se coloca a $-10R$ del foco, el porcentaje de rayos sombreado

por el CPC es mucho mayor, lo que lleva a tener una gran pérdida de energía. Los pocos rayos que logran entrar al CPC son en su mayoría reconcentrados en las partes altas del receptor (ver figura 4.9e), alrededor de 140° y 220° .

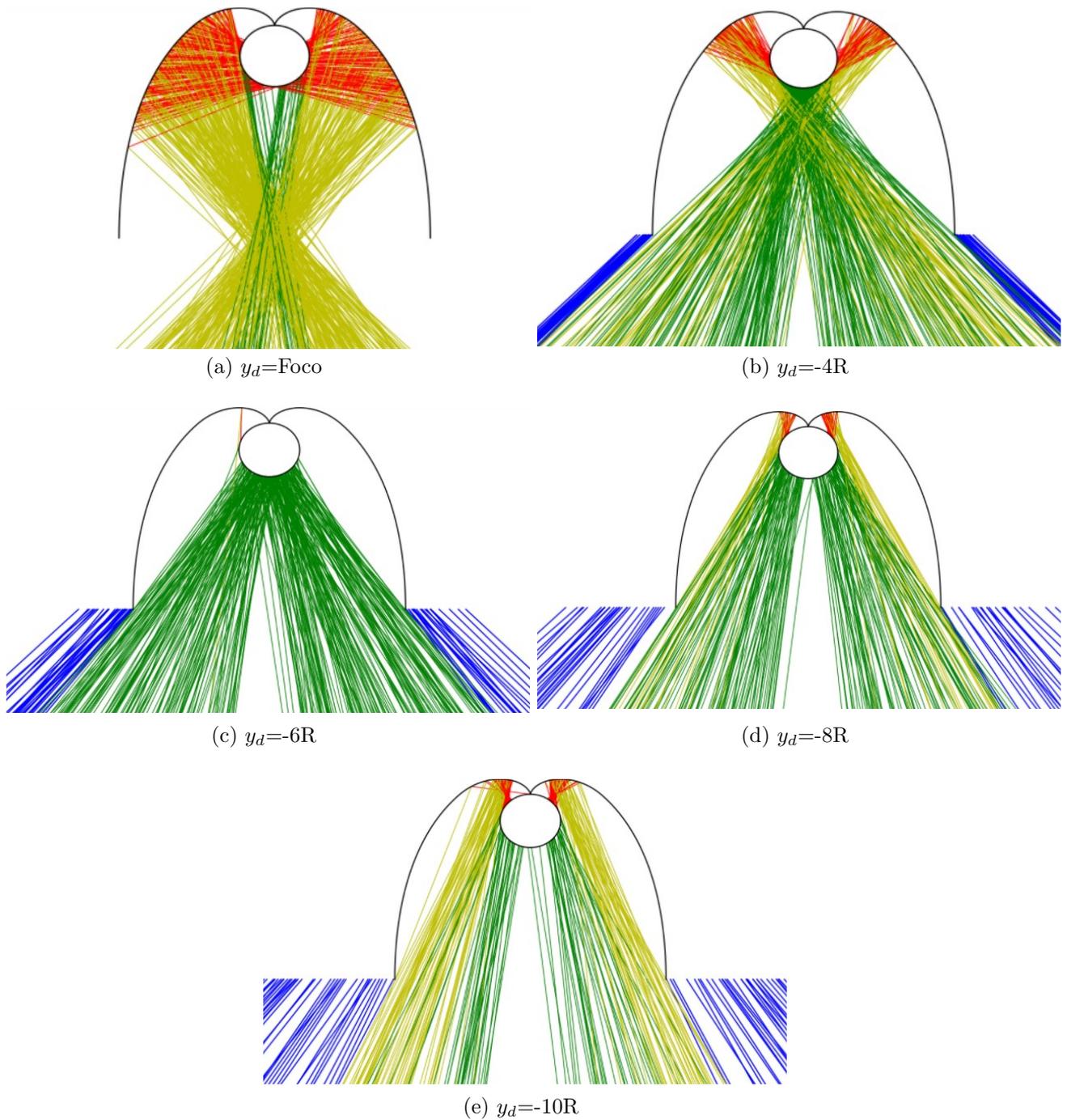


Figura 4.9: Trazo de rayos sobre sistema CP-CPC, utilizando un CP con ángulo de aceptación de 45° . Los rayos que llegan del CP al receptor son colocados en verde. Los que llegan del CP al CPC en amarillo. Los que rebotan del CPC al receptor en rojo. Los rayos pintados en azul son aquellos que han rebotado del CP pero no logran pasar la apertura del CPC y se consideran como perdidos.

En la siguiente tabla se presentan distintos parámetros obtenidos para cada configuración.

Los sistemas que presentan un menor parámetro U son en $-8R$ y en el foco, obteniendo valores de 0.774 y 0.887, respectivamente.

En el caso con desplazamiento $-8R$ el valor del parámetro U se atribuye la combinación entre la pérdida de rayos y a la fracción de rayos reconcentrados por el CPC. En este caso, se compromete la cantidad de rayos que llega al receptor, obteniendo un ζ de 0.480, lo que atenúa el flujo de radiación sobre el receptor. Por otro lado, el receptor se encuentra antes del foco de la parábola, a una distancia donde el 14% de los rayos que llegan al receptor son reconcentrados por el CPC en las parte altas de la circunferencia. El 86% restante llega al receptor directamente del CP. Estos rayos no se concentran en el punto más bajo, sino que se distribuyen sobre la mitad inferior del receptor.

Por otro lado, cuando la apertura del CPC está en foco el valor del parámetro U se atribuye a la fracción de rayos reconcentrados por el CPC. La pérdida de rayos en este caso es baja, ζ es de 0.125. En esta configuración el receptor está a una distancia donde el 11% de los rayos absorbidos llega directamente del CP. Debido a que el receptor se encuentra después del foco, estos rayos no se concentran en el punto más bajo del receptor, sino distribuidos sobre la mitad inferior. El 89% de los rayos restantes llegan a la superficie del CPC y rebotan a los costados del receptor creando picos de concentración.

En el sistema desplazado $-6R$ se obtuvo un parámetro U mayor al del sistema convencional aunado a una fracción significativa de rayos perdidos. El CPC sombrea los rayos más externos que vienen del CP, lo que descarta a aquellos rayos que llegaban a los costados del receptor. Lo anterior tiene por consecuencia una desviación estándar del flujo mayor. Es decir, los rayos que logran pasar al CPC son restringidos a una zona más pequeña de concentración, lo cual acentúa más la no uniformidad en la circunferencia del receptor, aunque el flujo sea menor.

Tabla 4.2: Flujo de radiación promedio q_m , U y ζ para el sistema CP-CPC con ángulo de aceptación de 45° .

Desplazamiento en y	q_m [kW/m ²]	U [-]	ζ [-]
CP sin CPC	12.771	1.318	0.006
Foco	10.243	0.887	0.125
$-4R$	10.729	1.098	0.133
$-6R$	8.892	1.495	0.307
$-8R$	6.577	0.774	0.480
$-10R$	4.935	1.109	0.594

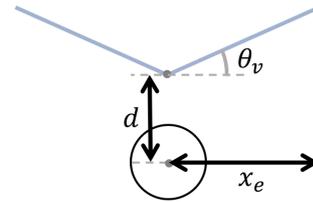
4.4. Distribución de flujo de las configuraciones del sistema CP-CV obtenidos de la optimización

Como se explicó en la sección 3.5.4, se realizó la optimización del sistema CP-CV desplazando el centro del receptor a diferentes distancias del foco. El movimiento fue sobre el eje focal de la parábola. La distancia de desplazamiento se determinó en función del porcentaje de rayos interceptados. Puede verse el esquema en la figura 3.17. La posición del receptor en función del porcentaje de rayos se presenta en la tabla 3.2.

Como se mencionó anteriormente, los parámetros optimizados son: la distancia del origen del receptor al concentrador d , el ancho del sistema x_e y el ángulo de la superficie reflectora θ_v (ver figura 3.13). En la siguiente tabla se presentan los resultados de estos, así como la Función Objetivo en cada caso, comparado con el sistema convencional de CP:

Tabla 4.3: Parámetros obtenidos de la optimización del CV para distintos desplazamientos del receptor en y .

Coordenadas en y	d [m]	x_e [m]	θ_v	F.O.
CP sin CV	-	-	-	1.324
-0.060	0.040	0.045	0.968°	0.487
-0.066	0.052	0.032	23.023°	0.481
-0.070	0.044	0.045	12.441°	0.390
-0.077	0.050	0.049	8.967°	0.390
-0.080	0.051	0.047	16.543°	0.389
-0.090	0.085	0.021	19.159°	0.632



Como podemos observar, comparando la Función Objetivo de los sistemas fuera de foco con el sistema convencional, se logra una disminución significativa en cualquiera de los casos. Incluyendo el desempeño más ineficiente con una Función Objetivo de 0.630, se obtiene un valor menor de la mitad del sistema convencional. En los casos donde el desplazamiento es -0.070, -0.077 y -0.080 se tiene el mejor desempeño del sistema. A continuación se presentan las distribuciones de flujo para las distintas configuración de acuerdo al desplazamiento en y (y_d).

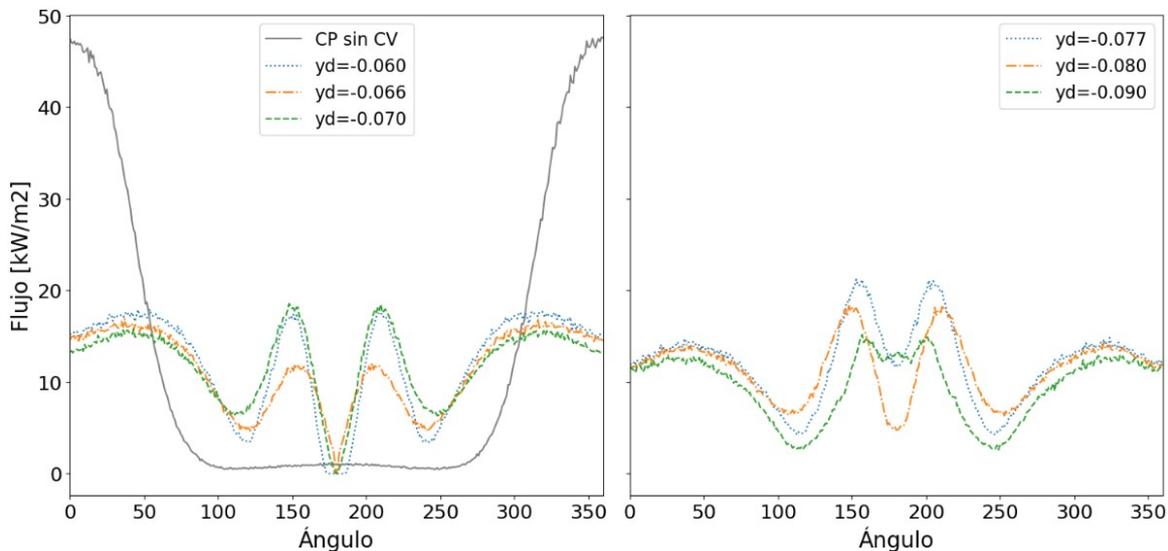


Figura 4.10: Distribución de flujo radiativo sobre el receptor para sistema optimizado con distintos desplazamientos de y .

Con la finalidad de apoyar la interpretación de la distribución de flujo, en la figura 4.11 se presenta el trazo de los rayos para los sistemas con desplazamiento en y de -0.070, -0.077 y -0.80. Los rayos en verde llegan directamente del CP al receptor, los rayos amarillos llegan del CP al CV y los rayos rojos son los que rebotan del CV.

Como se puede observar de la figura 4.10 el sacar de foco el receptor disminuye de forma significativo el pico de concentración en la parte inferior del receptor. Una fracción de los rayos provenientes del CP interceptan directamente al receptor, sin embargo, la fracción restante llega del CP al CV para posteriormente ser rebotados a la parte superior del receptor. Es decir, los rayos desbordados por el desplazamiento son reconcentrados en la parte alta del receptor gracias al CV. Para -0.060 , -0.066 , -0.070 y -0.080 los CV no logra reconcentrar en 180° , por lo que hay un valle muy pronunciado en esta zona.

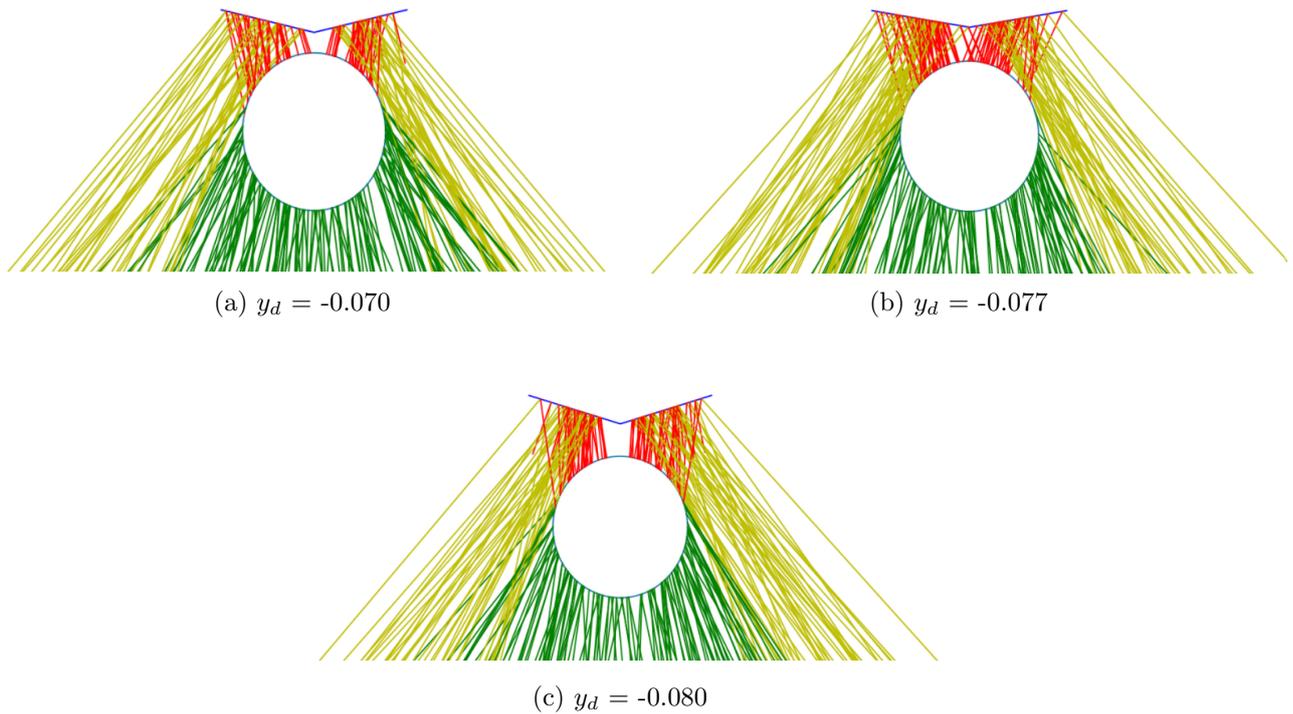


Figura 4.11: Trazo de rayos sobre sistemas CP-V con desplazamiento. Los rayos en verde llegan directamente del CP al receptor, los rayos amarillos llegan del CP al CV y los rayos rojos son los que rebotan del CV.

En la tabla 4.4, se despliegan los valores de flujo de radiación promedio (F_{prom}), U , ζ y su Función Objetivo para las mejores configuraciones.

Tabla 4.4: Flujo promedio q_m , U , ζ y F.O. para los los sistemas con desplazamientos en y de -0.07 , -0.077 y -0.08 .

Coordenadas en y	F_{prom} [kW/m ²]	U [-]	ζ [-]	F.O. [-]
CP sin CV	12.771	1.318	0.006	1.324
-0.070	12.081	0.330	0.060	0.390
-0.077	12.191	0.339	0.051	0.390
-0.080	11.505	0.285	0.105	0.389

Los resultados de la tabla anterior muestran que los sistemas CP-CV reducen el parámetro U hasta valores al rededor de 0.3 y las pérdidas rondan de 0.060 a 0.105. En el sistema CP-CV no es necesario sacrificar grandes porcentajes de energía para obtener buenos valores de F.O. Con lo anterior, los flujos promedio de los sistemas CP-CV se encuentran cercanos al del sistema convencional.

El caso a -0.080 tiene el menor valor U , pero tiene el más alto en ζ . El caso a -0.077 tiene el mayor valor de U , pero el menor en ζ . En ambas configuraciones, el 60 % de los rayos absorbidos llegar directamente del CP al receptor, los cuales son distribuidos de forma suave sobre la parte media baja del receptor. El resto de rayos son reconcentrados por el CV sobre la media superior del receptor, sin embargo el efecto que tiene el CV en cada caso es distinto. La diferencia entre los valles y los picos del flujo radiativo son mayores para -0.077.

Por lo anterior, podría suponerse que existe una relación inversa en los parámetros U y ζ . Por ello, en la siguiente gráfica se presentan los valores de U y ζ de los sistemas optimizados en función de sus coordenadas en y .

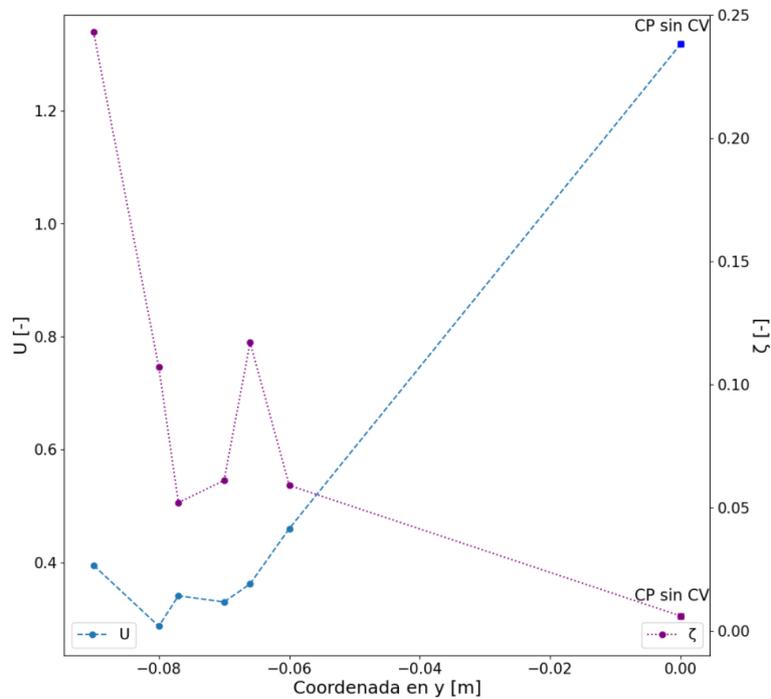


Figura 4.12: Uniformidad (línea azul) y factor de pérdida (línea morada) en función de la posición del receptor para el sistema CP-CV.

Aunque es complicado encontrar una tendencia de los parámetros U y ζ en función del desplazamiento del receptor, los resultados presentados en la figura 4.12 nos permiten ver que las pérdidas en el sistema CP-V son mayores entre más nos alejamos del foco. Por otro lado, el parámetro U disminuye (mejora) significativamente en las zonas de donde y es -0.065 a -0.080.

Al comparar los resultados obtenidos con el sistema de CP sin CV, en cualquiera de las configuraciones la uniformidad disminuyó sustancialmente. Por otro lado, aunque la pérdida de rayos aumentó, se tienen configuraciones donde se mantiene abajo de 10 %. Con base en el

comportamiento de los valores de la gráfica 4.12, es probable que los mejores valores de U y ζ se encuentran en la configuración dada para el desplazamiento en y de -0.065 a -0.080m.

Capítulo 5

Conclusión

En el trabajo presentado se llevó a cabo el análisis de flujo sobre el receptor circular de CP con concentrador secundario. Como segundo concentrador se utilizó un CPC y un CV. Para ello, se realizaron simulaciones con trazado de rayos por método Monte Carlo sobre los sistemas ópticos y se obtuvieron las distribuciones de flujo radiativo sobre el receptor. En la siguiente tabla se presenta un resumen de los parámetros en la mejor configuración para cada sistema.

Tabla 5.1: Flujo de radiación promedio q_m , U y ζ de la mejor configuración en los sistemas estudiados.

Sistema	Desplazamiento en y	q_m [kW/m ²]	U [-]	ζ [-]
CP-CPC $\psi_b=80.3$	CP convencional sin CPC	25.542	0.854	0.024
	-3R	12.477	0.698	0.518
CP-CPC $\psi_b=45$	CP convencional sin CPC	12.771	1.318	0.006
	-8R	6.577	0.774	0.480
CP-CV $\psi_b=45$	CP convencional sin CV	12.771	1.318	0.006
	-0.077	12.191	0.339	0.051

■ Sistema CP-CPC

Se observó que las configuraciones de CP-CPC a 80.3° no presentaron mejoras significativas de la homogeneidad de flujo radiativo sobre el receptor. Únicamente el sistema desplazado a -3R presentó un parámetro mejor uniformidad comparado al sistema convencional (tabla 4.1). Sin embargo, esto se atribuye directamente a la pérdida de rayos y el efecto provocado por sacar de foco el receptor, no por la influencia del CPC. Exceptuando este caso, los demás presentaron menor homogeneidad y más de 4 veces la pérdida de rayos comparado con el sistema convencional.

Es importante notar que en ningún caso hubo rayos que rebotaran más de 2 veces y la involuta tuvo poco desempeño. Por lo anterior, muy pocas configuraciones de CP-CPC a 80.3° presentaron una buena reconcentración en la parte superior del receptor. Esto se

debe principalmente a que los rayos llegaban muy inclinados al CPC y esto no les permitía llegar a la involuta. Únicamente las configuraciones donde el desplazamiento era grande, los rayos lograban entrar en la involuta para rebotar en la parte superior del receptor.

En el sistema CP-CPC a 45° algunas configuraciones mejoraron la homogeneidad del flujo radiativo. La menor homogeneidad de flujo radiativo fue obtenido para el desplazamiento $-8R$ (tabla 4.2), ya que el CPC reconcentra algunos rayos en las partes altas del receptor, logrando una mejor distribución sobre el mismo.

En la mayoría de los sistemas CP-CPC a 45° las paredes del CPC no reconcentran. A pesar de ello, debido a la inclinación de los rayos, ningún rayo tiene más de un rebote, por lo que se complica llegar a las zonas más altas del receptor.

Tanto en el sistema CP-CPC 80.3° , como en el de 45° se pierden una gran cantidad de rayos. Esto se atribuye a 3 razones principales (figuras 4.7 y 4.9): la sombra que genera el CPC sobre los rayos que van al CP; los rayos que vienen del CP son sombreados por la superficie externa del CPC; existe una fracción de rayos que pasan por debajo del CPC y no logran entrar en su apertura.

Del estudio realizado sobre el sistema CP-CPC podemos concluir que no tiene un buen desempeño como un segundo concentrador en conjunto de un CP con receptor circular. El CP refleja rayos con ángulos de propagación pronunciados y las características del CPC no son las ideales para hacer una homogenización de flujo.

■ Sistema CP-CV

El sistema CP-CV homogeneiza de forma significativa el flujo radiativo sobre el receptor. En todas las configuraciones se obtuvieron Funciones Objetivo menores de la mitad del sistema convencional (tabla 4.4). En los sistemas CP-CV, no es necesario sacrificar gran cantidad de rayos. La configuración con mejor desempeño fue aquella que se desplazó -0.077 , ya que tiene buena homogeneidad sin sacrificar gran pérdida de energía.

Como se observa en la tabla 5.1, el sistema CP-CV tuvo un mejor desempeño que el sistema CP-CPC, ya que no tiene gran pérdida de rayos y el parámetro U es significativamente mejor que en los otros casos.

El sistema de optimización fue una herramienta que nos permitió obtener un reconcentrador tipo CV con las características adecuadas para tener un buen desempeño. Sin embargo, el utilizar una librería ya definida en *Julia*, por razones de tiempo y por no ser el tema principal de la tesis, limitó el control que se tenía sobre la simulación y la información que podía obtenerse de ella (variable de control, inicialización de vectores, valores probados, entre otros). Desarrollar un código de optimización propio permitiría tener más información del comportamiento del sistema y mayor control de las simulaciones.

Por otro lado, debido a la capacidad computacional para realizar la optimización, se restringió el número de evaluaciones sea 300. Es decir, cada vez que se realizaba optimización se limitaba el número de generaciones permitidas a 300. Probablemente es posible obtener mejores resultados si se realizan simulaciones con más evaluaciones ya que tendrá la oportunidades de llegar el mínimo de la función.

A partir de lo concluido en este trabajo, se propone estudiar el sistema CP-CPC a 45° recortando los extremos del CPC o probando un CPC con ángulos de aceptación más grandes, de tal forma que se pierdan menos rayos por sombreamiento.

Los métodos de optimización son una gran herramienta para la mejora del flujo radiativo, por lo que en próximos trabajos se recomienda profundizar en ellos probando variantes del CV.

Por otro lado, es importante comentar que la uniformidad de flujo fue analizada únicamente por la superficie del receptor. Debido a esto, en trabajos futuro se propone realizar un estudio de transferencia de calor en el absorbedor, ya que este nos permitiría ver de forma más clara la influencia que se tiene sobre los gradientes de temperatura al modificar la distribución del flujo sobre el receptor.

Bibliografía

- Almond, H., Tonnellier, X., Sansom, C., Pearce, M. & Sengar, N. (2019), The design and modification of a parabolic trough system for the hydrothermal liquefaction of waste, *in* ‘AIP Conference Proceedings’, Vol. 2126, AIP Publishing LLC, p. 120001.
- Ayala-Cortés, A., Arcelus-Arrillaga, P., Millan, M., Arancibia-Bulnes, C. A., Valadés-Pelayo, P. J. & Villafán-Vidales, H. I. (2020), ‘Solar integrated hydrothermal processes: A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* p. 110575.
- Baum, H. & Gordon, J. (1984), ‘Geometric characteristics of ideal nonimaging (cpc) solar collectors with cylindrical absorber’, *Solar Energy* **33**(5), 455–458.
- Canavarro, D., Chaves, J. & Collares-Pereira, M. (2016), ‘A novel compound elliptical-type concentrator for parabolic primaries with tubular receiver’, *Solar Energy* **134**, 383–391.
- Castello, D., Haider, M. S. & Rosendahl, L. A. (2019), ‘Catalytic upgrading of hydrothermal liquefaction biocrudes: Different challenges for different feedstocks’, *Renewable Energy* **141**, 420–430.
- Ciemat (n.d.), ‘Eurodish’, <https://www.psa.es/es/instalaciones/discos/eurodish.php>.
- Estrada, C., Arancibia, C., Vazquez, S., Pérez-Rábago, C. A., Riveros, D., Perez-Enciso, R., Quiñones, J., Castrejón, R., Montiel, M. & Granados2, F. (2015), ‘A new high-flux solar furnace at cie-unam in temixco, méxico. first stage’, http://www.concentracionesolar.org.mx/images/pdf/memorias/04_sp11_ceg.pdf.
- Felt, R. (2013-2021), ‘Blackboxoptim.jl’, <https://github.com/robertfeldt/BlackBoxOptim.jl>.
- García, O. (2015), ‘Concentrador parabólico compuesto’, http://www.fordecyt.ier.unam.mx/html/concentradorParab%C3%B3licoCompuesto_1.html.
- Giaconia, A., Caputo, G., Ienna, A., Mazzei, D., Schiavo, B., Scialdone, O. & Galia, A. (2017), ‘Biorefinery process for hydrothermal liquefaction of microalgae powered by a concentrating solar plant: A conceptual study’, *Applied Energy* **208**, 1139–1149.
- Grena, R. & Tarquini, P. (2011), ‘Solar linear fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid’, *Energy* **36**(2), 1048–1056.
- Habitissimo (2009), ‘Panel solar para alberca’, https://fotos.habitissimo.com.mx/foto/panel-solar-para-alberca_83550.

-
- He, Y.-L., Wang, K., Qiu, Y., Du, B.-C., Liang, Q. & Du, S. (2019), ‘Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: non-uniform features, challenges, and solutions’, *Applied Thermal Engineering* **149**, 448–474.
- He, Y.-L., Xiao, J., Cheng, Z.-D. & Tao, Y.-B. (2011), ‘A mcrt and fvm coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector’, *Renewable energy* **36**(3), 976–985.
- Ho, C. K. (2017), ‘Advances in central receivers for concentrating solar applications’, *Solar energy* **152**, 38–56.
- Hognon, C., Delrue, F. & Boissonnet, G. (2015), ‘Energetic and economic evaluation of chlamydomonas reinhardtii hydrothermal liquefaction and pyrolysis through thermochemical models’, *Energy* **93**, 31–40.
- IEA (2021), ‘World energy balances: Overview’, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>.
- Jeter, S. M. (1986), ‘Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation’, *Solar Energy* **37**(5), 335–345.
- Kalogirou, S. A. (2013), *Solar energy engineering: processes and systems*, Academic press.
- Kan, T., Strezov, V. & Evans, T. J. (2016), ‘Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters’, *Renewable and sustainable energy reviews* **57**, 1126–1140.
- Kan, T., Strezov, V. et al. (2015), ‘Hydrothermal processing of biomass’, *Biomass Processing Technologies. CRC Press Taylor & Francis Group* pp. 155–176.
- Karathanassis, I., Papanicolaou, E., Belessiotis, V. & Bergeles, G. (2017), ‘Design and experimental evaluation of a parabolic-trough concentrating photovoltaic/thermal (cpvt) system with high-efficiency cooling’, *Renewable Energy* **101**, 467–483.
- Kruse, A., Funke, A. & Titirici, M.-M. (2013), ‘Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials’, *Current opinion in chemical biology* **17**(3), 515–521.
- Lokireddi, V. G. R., Satyanarayana, V. & Kumar, D. P. (2021), ‘Design and fabrication of a parabolic solar water desalination system’, *Materials Today: Proceedings* .
- LuxEnergy (n.d.), <https://luxenergy.com.mx/>.
- Mahan, J. R. (2019), *The Monte Carlo Ray-Trace Method in Radiation Heat Transfer and Applied Optics*, John Wiley & Sons.
- Malan, A. & Kumar, K. R. (2021), ‘A comprehensive review on optical analysis of parabolic trough solar collector’, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **46**, 101305.
- McKendry, P. (2002), ‘Energy production from biomass (part 1): overview of biomass’, *Biore-source technology* **83**(1), 37–46.
-

-
- Merchán, R., Santos, M., Medina, A. & Hernández, A. C. (2021), ‘High temperature central tower plants for concentrated solar power: 2021 overview’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* p. 111828.
- Mills, D. (2012), Linear fresnel reflector (lfr) technology, *in* ‘Concentrating solar power technology’, Elsevier, pp. 153–196.
- ModuloSolar (n.d.), <http://www.modulosolar.com.mx/AXOL/>.
- Moya, E. Z. (2012), Parabolic-trough concentrating solar power (csp) systems, *in* ‘Concentrating solar power technology’, Elsevier, pp. 197–239.
- Pearce, M., Tonnellier, X., Sengar, N. & Sansom, C. (2019), Fuel from hydrothermal liquefaction of waste in solar parabolic troughs, *in* ‘AIP Conference Proceedings’, Vol. 2126, AIP Publishing LLC, p. 180015.
- Prasad, G. C., Reddy, K. & Sundararajan, T. (2017), ‘Optimization of solar linear fresnel reflector system with secondary concentrator for uniform flux distribution over absorber tube’, *Solar Energy* **150**, 1–12.
- ProTender (2018), ‘Kimberlina solar thermal energy plant’, <https://www.protenders.com/projects/kimberlina-solar-thermal-energy-plant>.
- Qiu, Y., He, Y.-L., Cheng, Z.-D. & Wang, K. (2015), ‘Study on optical and thermal performance of a linear fresnel solar reflector using molten salt as htf with mcr and fvm methods’, *Applied energy* **146**, 162–173.
- Qiu, Y., Li, M.-J., Wang, K., Liu, Z.-B. & Xue, X.-D. (2017), ‘Aiming strategy optimization for uniform flux distribution in the receiver of a linear fresnel solar reflector using a multi-objective genetic algorithm’, *Applied Energy* **205**, 1394–1407.
- Rabl, A. (1976), ‘Solar concentrators with maximal concentration for cylindrical absorbers’, *Applied optics* **15**(7), 1871–1873.
- Rabl, A. (1985), *Active solar collectors and their applications*, Oxford University Press on Demand.
- Reddy, K. & Veershetty, G. (2013), ‘Viability analysis of solar parabolic dish stand-alone power plant for indian conditions’, *Applied energy* **102**, 908–922.
- Riveros-Rosas, D., Herrera-Vázquez, J., Pérez-Rábago, C., Arancibia-Bulnes, C., Vázquez-Montiel, S., Sánchez-González, M., Granados-Agustín, F., Jaramillo, O. & Estrada, C. (2010), ‘Optical design of a high radiative flux solar furnace for mexico’, *Solar energy* **84**(5), 792–800.
- Roca, J. (2021), ‘La instalación termosolar más antigua del mundo cierra la mayor parte de su capacidad’, <https://elperiodicodelaenergia.com/la-instalacion-termsolar-mas-antigua-del-mundo-cierra-la-mayor-parte-de-su-capacidad/>.
- Rodriguez-Sanchez, D. & Rosengarten, G. (2015), ‘Improving the concentration ratio of parabolic troughs using a second-stage flat mirror’, *Applied Energy* **159**, 620–632.
-

-
- Schiel, W. & Keck, T. (2021), Parabolic dish concentrating solar power systems, in ‘Concentrating solar power technology’, Elsevier, pp. 311–355.
- SENEREnergy (2011), ‘Planta solar térmica gemasolar’, <https://www.energy.sener/es/proyecto/gemasolar#:~:text=Gemasolar%2C%20planta%20de%20torre%20central,de%20Andaluc%C3%ADa%2C%20Sevilla%2C%20Espa%C3%B1a.&text=Es%20la%20primera%20planta%20comercial,t%C3%A9rmico%20de%20muy%20larga%20duraci%C3%B3n>.
- Sootha, G. & Negi, B. (1994), ‘A comparative study of optical designs and solar flux concentrating characteristics of a linear fresnel reflector solar concentrator with tubular absorber’, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **32**(2), 169–186.
- Storn, R. & Price, K. (1997), ‘Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces’, *Journal of global optimization* **11**(4), 341–359.
- Strezov, V. & Evans, T. J. (2014), *Biomass processing technologies*, CRC Press.
- Tang, X., Yang, W., Yang, Y., Jiao, Y. & Zhang, T. (2021), ‘A design method for optimizing the secondary reflector of a parabolic trough solar concentrator to achieve uniform heat flux distribution’, *Energy* **229**, 120749.
- Teoremambiental (2018), ‘Tecnología mexicana en concentrador solar’, <http://www.teorema.com.mx/energia/tecnologia-mexicana-concentrador-solar/>.
- Usón, A. A. & Bribián, I. Z. (2010), *Energía solar térmica (Serie Energías renovables)*, Vol. 149, Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Ustaoglu, A., Alptekin, M., Okajima, J. & Maruyama, S. (2016), ‘Evaluation of uniformity of solar illumination on the receiver of compound parabolic concentrator (cpc)’, *Solar Energy* **132**, 150–164.
- Venkataraman, M. B., Asselineau, C.-A., Rahbari, A. & Pye, J. (2019), Modelling of a 50 mwth on-sun reactor for scwg of algae: Understanding the design constraints, in ‘AIP Conference Proceedings’, Vol. 2126, AIP Publishing LLC, p. 180017.
- Wang, K., He, Y. & Cheng, Z. (2014), ‘A design method and numerical study for a new type parabolic trough solar collector with uniform solar flux distribution’, *Science China Technological Sciences* **57**(3), 531–540.
- Xiao, C., Liao, Q., Fu, Q., Huang, Y., Chen, H., Zhang, H., Xia, A., Zhu, X., Reungsang, A. & Liu, Z. (2019), ‘A solar-driven continuous hydrothermal pretreatment system for biomethane production from microalgae biomass’, *Applied Energy* **236**, 1011–1018.
- Zayed, M. E., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Li, W., Sadek, S. & Aboelmaaref, M. M. (2021), ‘A comprehensive review on dish/stirling concentrated solar power systems: Design, optical and geometrical analyses, thermal performance assessment, and applications’, *Journal of Cleaner Production* **283**, 124664.
- Zhang, L., Xu, C. C. & Champagne, P. (2010), ‘Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass’, *Energy conversion and management* **51**(5), 969–982.
-

Zhao, J., Bilbao, J. I., Spooner, E. D. & Sproul, A. B. (2018), 'Experimental study of a solar pool heating system under lower flow and low pump speed conditions', *Renewable Energy* pp. 320–335.