



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

**Modificación del Diseño del DEFAC Para Acoplar un
Reactor Químico Solar**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

ENERGÍA – SOLAR FOTOTÉRMICA

P R E S E N T A:

Ulises Dehesa Carrasco

Director de tesis: **Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes**



2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca

Secretario: Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes

Vocal: Dr. Sergio Vasquez Montiel

1^{er}. Suplente: Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado

2^{do}. Suplente: Dr. José Rubén Dorantes Rodríguez

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA, TEMIXCO MORELOS.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes

FIRMA

Esta tesis esta dedicada:

A mis padres

Abel Dehesa Nieto.
Martha Carrasco Felipe.

Gracias por el apoyo en todos mis proyectos.

Al amor de mi vida
Anita Antonio Gómez.

Gracias por apoyarme amor.

A mi abuelo
José Dehesa Cruz.

A mis hermanas y sus esposos
Claudia y Raymundo.
Patricia y Saul.
Mariana y Oswaldo.

Agradecimientos

Al Dr. Camilo A. Arancibia Bulnes, por su valiosa dirección durante el desarrollo de la investigación y corrección de la tesis. Le agradezco también sus enseñanzas, su apoyo y amistad.

A los miembros del jurado, Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca, Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado, Dr. Rubén José Dorantes Rodríguez, Dr. Sergio Vasquez Montiel les agradezco por sus valiosas observaciones y sugerencias las cuales hicieron posible la mejora de éste documento.

Al M.I. Carlos Alberto Pérez Rábago por el apoyo técnico brindado durante la elaboración y validación del código de trazado de rayos. Así mismo agradezco al Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar quien me ayudo durante el modelado del DEFRAC con CIRCE2.

A los responsables de la biblioteca del CIE, Carlos Alberto Ramírez Vázquez, Bertha Cuevas Pinzon, Patricia García y al Lic. Fernando García Pérez por sus finas atenciones durante la realización de la tesis.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Jorge A. Andaverde Arredondo por su invaluable ayuda durante todo el proceso de realización de esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico durante la realización de esta tesis.

Al Centro de Investigación en Energía por el uso de las instalaciones que fue de vital importancia en la realización de este trabajo.

A mis amigos Ruth P. Esteva, José A. López, Saira L. Orozco, Orlando Hernández, Juan M. Sierra, Seth Bejar, Ivan Salgado, David y Magda de Montiel, Mario Carrasco, Eduardo Venegas, Heidi I. Villafán, Jorge Andaverde, Eva y Oscar Laguna, Lorena Rodríguez, Sarah R. Messina, Sergio U. Llamas, Carlos A. Bustamante, José D. Gama, Amilcar Fuentes, Gabriela Hernández, Carlos A. Ramírez, Bertha Cuevas, Patricia

García, Carlos A. Pérez, David Riveros, Oscar Armijo, Rubén Salgado, Hna. Raquel y familia, LÍi y Hugo (si me falta alguno, mil disculpas).

Contenido

	I
Agradecimientos	II
RESUMEN	IV
1. Introducción	1
1.1. El Sol y el recurso solar	2
1.1.1. <i>El Sol</i>	2
1.1.2. <i>Recurso Solar</i>	3
1.2. Geometría de concentradores	6
1.3. Concentración solar y Límite termodinámico	7
1.4. Química solar de alta temperatura	9
1.5. Hornos Solares	10
1.6. El concentrador DEFRAC	16
1.7. Objetivos generales y específicos	18
2. Conceptos Generales	20
2.1. Distribución angular de la radiación directa	21
2.1.1. Representacion Gaussiana de la forma solar	24
2.2. Reflexión de la radiacion en superficies ideales	24
2.2.1. Representacion vectorial de la ley de reflexión	25
2.3. Estadística de superficies	26
2.3.1. Efectos de errores en rayos reflejados	26
2.3.2. Interpretacion de los errores de superficie	29
2.4. Fuente efectiva (sol degradado)	31
2.4.1. Espejos parabólicos y esféricos.	32
2.4.2. Representacion vectorial de líneas y superficies.	34

<i>Contenido</i>	vi
3. Trazado de rayos	37
3.1. Algoritmo básico del modelado	38
3.2. Método de Monte Carlo	38
3.3. Incidencia rayos sobre un casquete esférico	40
3.4. Rayo reflejado	45
3.5. Cono de probabilidades	47
3.6. Espejo secundario esférico	48
3.7. Intersección del rayo reflejado con un plano	50
3.8. Características del espejo secundario	52
3.9. Determinación de concentración del flujo sobre el receptor	55
4. Validación y resultados	57
4.1. Validación del código TRECSol-E con el CIRCE2.	58
4.1.1. Espejo centrado en el eje optico	58
4.1.2. Espejos fuera de eje	60
4.2. Espejo secundario.	63
4.2.1. Característica del espejo secundario.	66
4.3. Simulaciones con espejo secundario.	67
5. Conclusiones	74
A. Temperatura sobre el receptor	80
B. Región paraxial	82
C. Generación de números aleatorios con distribuciones dadas	83
D. Diferencial de área	85
E. Cono de error	88
F. Algoritmo de TRECSol-E	92

RESUMEN

En esta tesis se analiza la incorporación de un espejo secundario al concentrador solar de foco puntual, denominado DEFRA_C (Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Altamente Concentrados). El objetivo de incluir este espejo sería el de trasladar el foco del sistema al centro del plano de espejos primarios, para posibilitar la ubicación de un micro reactor termoquímico solar. Como parte del desarrollo, se estudia la distribución de flujos concentrados y picos de concentración sobre el receptor del sistema modificado.

Para el estudio fue necesaria la elaboración de un código de trazado de rayos, usando el lenguaje de programación Fortran 90, al cual se le ha denominado TRECSOL-E (Trazado de Rayos Estocástico para Concentradores Solares caso Esférico). En el código se considera la radiación solar como un proceso aleatorio y para simular la física de este fenómeno, se ha usado el método de Monte Carlo. Como resultado, el código permite evaluar los flujos concentrados sobre el receptor del sistema descrito, usando una distribución de brillantez solar representada por una curva de distribución normal o Gaussiana.

Para validar los resultados obtenidos por TRECSOL-E, se realizan comparaciones con el código llamado CIRCE2 (Convolution of Incident Radiation with Concentrator Errors 2). Dado que CIRCE2 no puede simular concentradores con espejos secundario, se validaron nuestros resultados a través de la distribución de flujo en el foco primario.

Los resultados mostraron que los errores en los picos concentración son de 0.84, 0.39 y 0.61 %, para un espejo del grupo A, B y C, respectivamente; mientras que los errores absolutos promediados sobre todos los puntos en cada una de estas curvas son de 1.96, 1.98 y 0.48 soles, respectivamente.

Finalmente se estudia la distribución de flujos concentrados y picos de concentración sobre el receptor del sistema que involucra un espejo secundario. De acuerdo con los resultados es posible obtener un pico máximo de concentración de alrededor de 3200 soles sobre una mancha solar de 4 cm usando un espejo cóncavo.

Capítulo 1

Introducción

La energía solar es un recurso abundante sobre la superficie de la Tierra, y se le considera como una reserva de energía utilizable, inagotable, no individualizada y de uso ecológicamente benigno. En los últimos 20 años se ha desarrollado investigación alrededor del mundo que sustenta el incremento de su utilización. No obstante, es necesario mencionar que el uso de la energía solar requiere solucionar algunos problemas: la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra es diluida e intermitente, además presenta una distribución desigual sobre el globo terrestre. La intermitencia y desigual distribución de la radiación solar han motivado a la búsqueda de convertir la luz solar en un “combustible solar”, que pueda ser almacenado, transportado y utilizado en los lugares desfavorecidos, o bien cuando la insolación es baja. En particular, un esfuerzo importante de investigación se ha encaminado a la producción y utilización de hidrógeno, el cual se percibe como el candidato más fuerte para convertirse en este “combustible solar” (Steinfeld A. y Palumbo R., 2001).

1.1. El Sol y el recurso solar

1.1.1. El Sol

El Sol es la fuente básica de energía de la biosfera, la fuerza motriz gracias a la cual la vida existe. El desarrollo de la evolución biológica que distingue a nuestro planeta es por causa del proceso de la fotosíntesis, con el cual se convierte la energía solar en energía química. La energía solar que llega a la Tierra es muy abundante y proviene de una fuente prácticamente inagotable, el Sol. El Sol es una esfera gaseosa que produce una enorme cantidad de energía y solo una pequeña parte es interceptada por nuestro planeta. La energía que se produce en el Sol se debe a una continua reacción termonuclear que se lleva a cabo en su interior, a temperaturas de varios millones de grados. La reacción nuclear básica es la fusión, proceso mediante el cual dos núcleos atómicos se unen para formar uno de mayor peso atómico, la masa perdida se convierte en energía de radiación. Este proceso tiene lugar en el núcleo del Sol y se transfiere a la superficie a través de una serie de procesos radiativos y convectivos, incluidos los fenómenos de emisión, absorción y re-radiación. Finalmente la energía que llega a la Tierra es emitida desde la parte externa del Sol, llamada fotosfera, a una razón de 66 MW/m^2 (De vos, 1992). La Tierra se encuentra ubicada a una distancia promedio de $149.6 \times 10^6 \text{ km}$ y recibe aproximadamente 1367 W/m^2 , fuera de la atmósfera, valor que se conoce como constante Solar (De vos, 1992). El hecho de utilizar el término de “constante Solar” es poco preciso ya que el flujo Solar incidente sobre la Tierra varía como función del tiempo. Esto se debe principalmente a dos fenómenos:

- La órbita de la Tierra alrededor del Sol no es exactamente un círculo. De acuerdo con la primera ley de Kepler, la trayectoria que sigue la Tierra alrededor del Sol es una elipse, de aquí que la distancia Sol-Tierra varía periódicamente, con un periodo $\tau = 31.6 \text{ Ms}$, en un lapso de tiempo que comúnmente llamamos 1 año. Cuando la Tierra se encuentra en el *perihelio* tiene un radio $r_{\min} = 147 \text{ Gm}$, y cuando la Tierra se encuentra en el *afelio*, que es la distancia mas larga, $r_{\max} = 152 \text{ Gm}$. El flujo Solar es proporcional a r^{-2} lo

cual provoca una variación del 7 % de la radiación entre estos dos días, afelio y perihelio. Para fines prácticos, la distancia promedio Tierra Sol se define mediante un radio promedio (r_{prom}) (De vos, 1992).

- La temperatura del Sol no es rigurosamente un valor constante, ésta varía periódicamente alrededor de cada 11 años, llamados ciclo de manchas Solares. La amplitud de la oscilación es alrededor de 0.1 K (De vos, 1992).

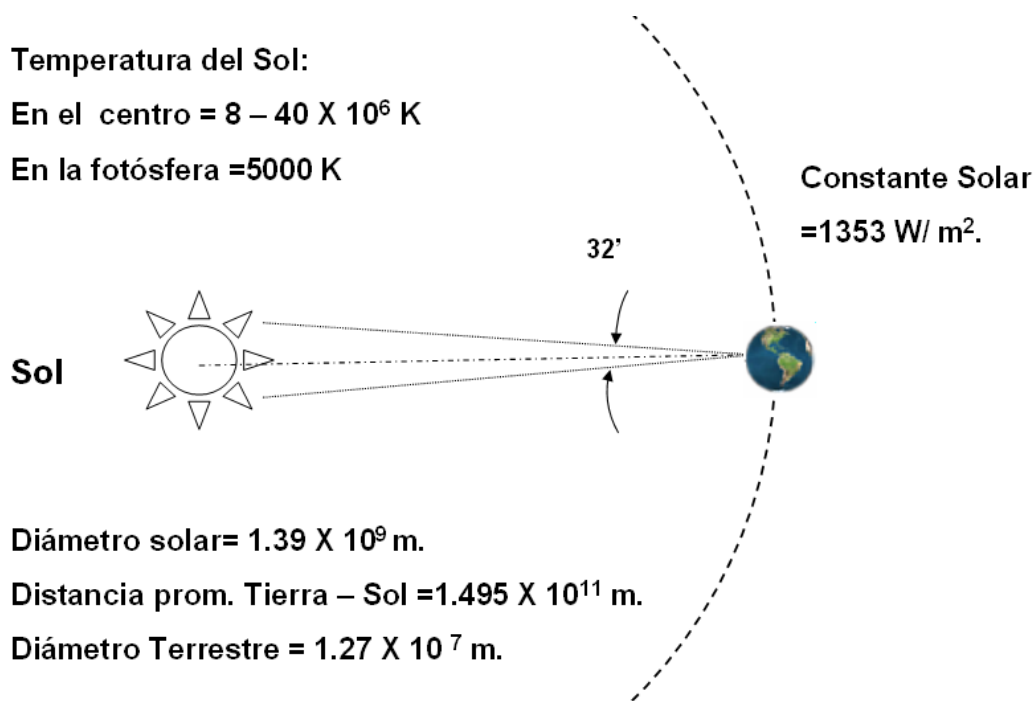


Figura 1.1: Diagrama esquemático Sol-Tierra.

1.1.2. Recurso Solar

La medición de la radiación solar juega un papel muy importante, en las aplicaciones de la energía solar. Cuantificar la energía que recibimos del Sol es una tarea importante, llevadas a cabo desde finales del siglo XIX, para el desarrollo de la tecnología solar. Hoy en día existen

medios prácticos que nos permite estimar la energía solar, podemos consultar mapas de radiación solar cuyas consideraciones son teóricas o bien mapas satelitales. Sin embargo hacer este tipo de estimaciones no es lo más conveniente dado que la radiación tiene un comportamiento particular en cada localidad. En muchos de los casos lo más conveniente es contar lecturas directas de la radiación solar con instrumentos de medición debidamente calibrados. Básicamente existen dos tipos de

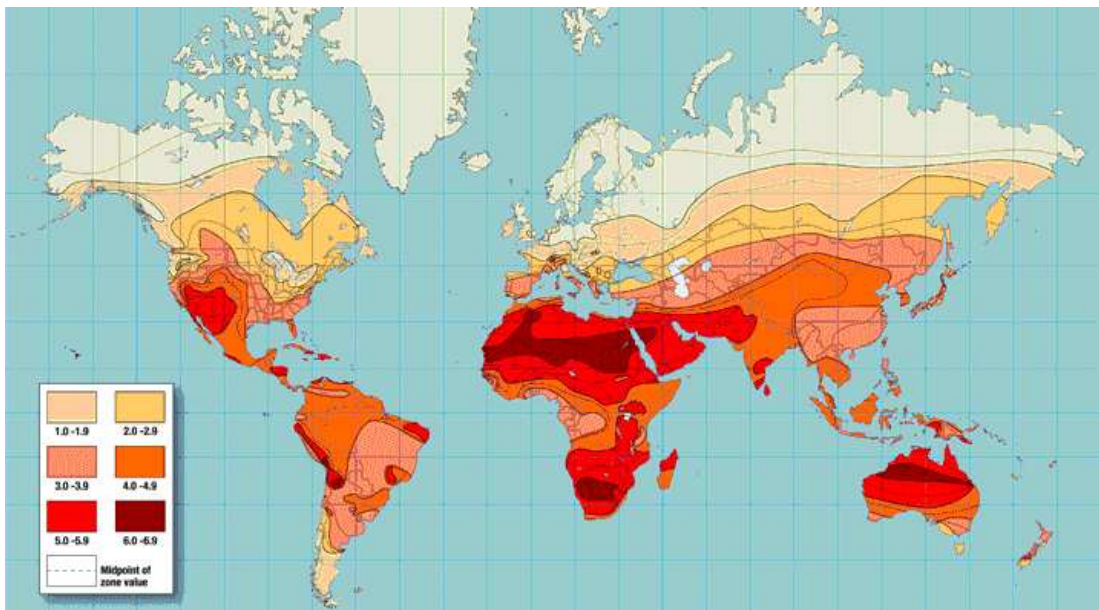


Figura 1.2: Energía solar recibidas en horas.

instrumentos que se usan para medir la radiación solar en las estaciones solarimétricas, el Piranómetro y el Periheliometro. Un Piranómetro es un instrumento que mide la radiación solar global es decir, directa más difusa, debido a su factor de forma recibe radiación de todo un todo un hemisferio. Por otra parte, el ángulo de vista del Periheliometro está restringido alrededor de 5° , lo cual sólo permite medir la radiación directa. Un Piranómetro también puede usarse para medir sólo la radiación difusa, mediante un dispositivo que bloquee la directa.

La figura 1.2 muestra una mapa de insolación. Las curvas de insolación en el mapa muestran el valor promedio diario de la energía total recibida sobre una superficie, que es perpendicular a la radiación solar (World design insolation by Solarex corporation). Aunque estos tipos

de mapas son poco precisos, nos permiten hacer una estimación general de la energía solar disponible en diferentes lugares alrededor del mundo.

La figura 1.3 muestra las curvas de irradiación espectral para radiación solar fuera de atmósfera terrestre, y la irradiación a nivel del mar. Se considera que el Sol se encuentra ubicado en el cenit. Las áreas sombreadas indican absorción de la radiación debido a los componentes atmosféricos, principalmente H_2O , CO_2 , y O_2 . En la figura 1.3 muestra la aproximación de la curva espectro de Planck para un cuerpo negro a 5762 K, con respecto al espectro de radiación. De esta manera podemos decir que el Sol se comporta aproximadamente como un cuerpo negro con una temperatura aproximada $T_s = 5762K$.

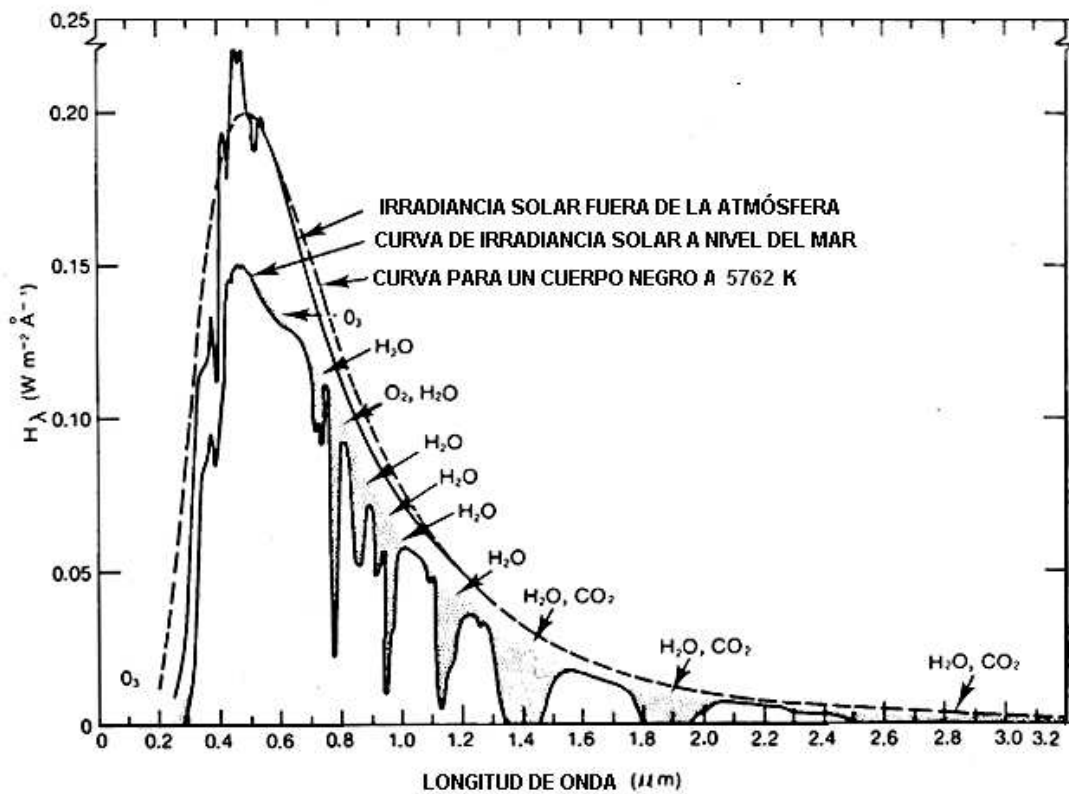


Figura 1.3: Curvas de irradiación solar espectral (Air force Cambridge Research Laboratories "the physics atmospheres")

1.2. Geometría de concentradores

En aplicaciones donde se requieren altos flujos radiativos concentrados es necesario emplear dispositivos ópticos, tal que nos permitan concentrar la radiación solar incidente sobre una área menor que el área de captación. Esto es posible mediante el uso de dispositivos ópticos, los cuales pueden ser lentes, espejos o bien una combinación de ambos. Estos dispositivos pueden ser de tipo cilíndrico para obtener un foco lineal o bien circular para obtener un foco puntual. Existen muchas configuraciones tales que pueden incrementar el flujo de radiación sobre el receptor. En la figura 1.4 se muestra seis diferentes configuraciones de concentradores. La primera imagen (a) es un arreglo de tubos evacuados con absorbedores cilíndricos separados, los cuales cuentan con una superficie reflectora difusa en la parte trasera que dirige la radiación que pasa entre los tubos hacia alguna parte sobre el tubo evacuado. En la figura (b) se muestra un concentrador con espejos planos los cuales concentran la radiación sobre un absorbedor plano, este tipo de configuración permite una concentración no mayor que 4. La figura (c) muestra un concentrador parabólico, donde el receptor es tubular. La figura (d) muestra un arreglo de espejos planos orientados de manera que concentran la radiación sobre un absorbedor, este tipo de arreglos se conoce como reflectores tipo Fresnel.

Los concentradores con reflectores tipo Fresnel, básicamente se pueden encontrar en tres formas: plantas solares que consisten en un campo de helióstatos de espejos planos, sistemas compactos de platos parabólicos o concentradores lineales de Fresnel. El segundo tipo de configuración puede presentar un solo plato grande segmentado con perfil parabólico o un arreglo de facetas un mismo plano. Los sistemas instalados en Barstow, California y Albuquerque, Nuevo México, son torres con campos de helióstatos planos. Algunos otros concentradores tipo Fresnel han utilizado el concepto de secciones esféricas como los utilizados en la planta "Solar One" (posteriormente "Solar Two") (Wilkins, 1987) por citar algunos ejemplos.

En gran escala este tipo de configuración se utiliza para arreglos de helióstatos en torres de generación. Otro tipo de concentradores son los

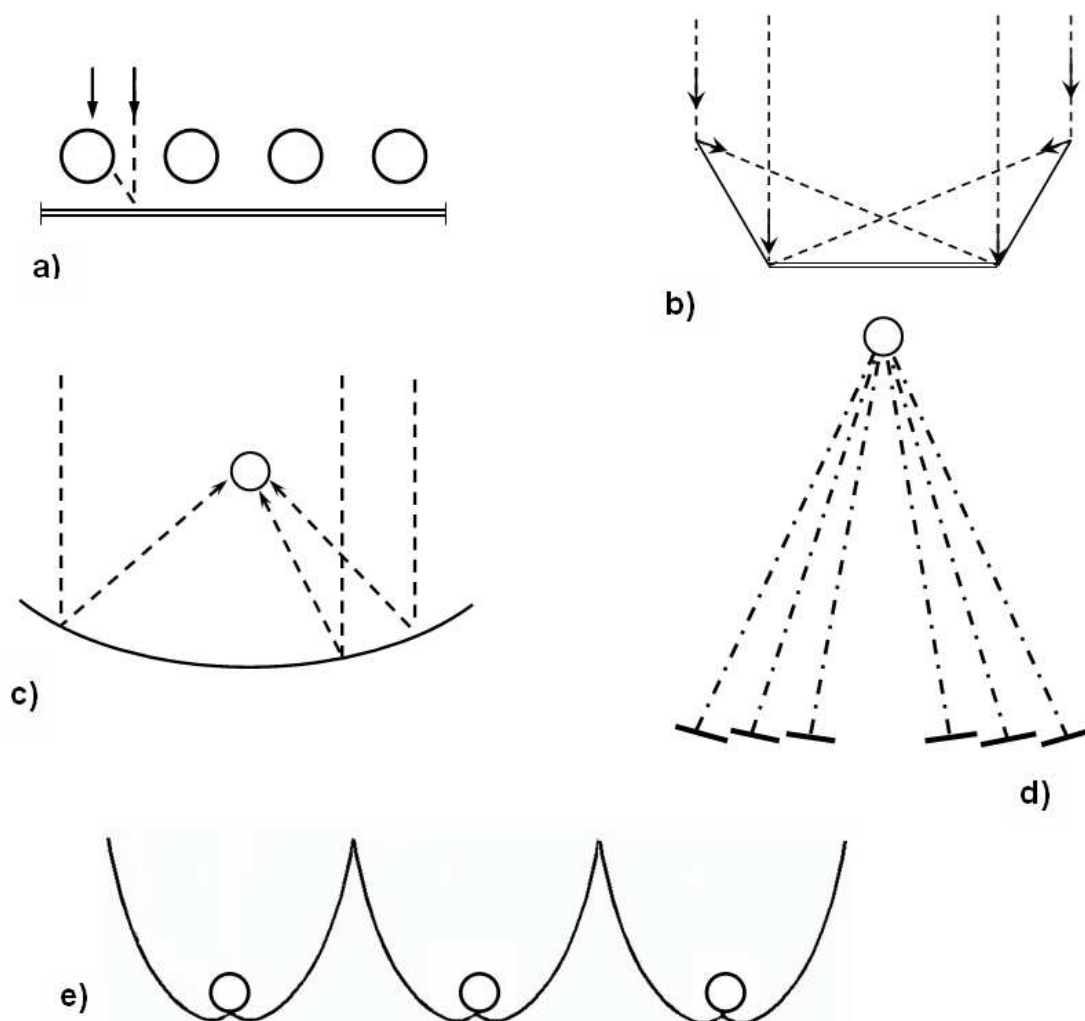


Figura 1.4: Configuraciones de concentradores solares a) Tubos evacuados con un espejo plano; b) arreglo de espejo plano; c) concentrador parabólico; d) concentrador tipo Fresnel; e) concentradores tipo CPC (fuente Duffie and Beckman, 1991)

conocidos como CPC (Concentradores Parabólicos Compuestos), figura 1.4 e, los cuales son sistemas de no imagen que concentran la radiación incidente sobre un absorbedor cilíndrico.

1.3. Concentración solar y límite termodinámico

Cuando hablamos de concentración solar es importante notar que la tecnología está limitada por las leyes físicas, por lo cuál, no podemos producir un valor de C infinitamente grande, esto es, concentrar la

energía en un foco infinitamente pequeño. La radiación solar que llega a la Tierra es mucho más débil que la radiación que sale del Sol. Si un 1m^2 de la superficie del Sol emite un flujo Q_s , entonces el flujo total emitido por Sol es $4\pi R_s^2 Q_s$, donde R_s es el radio del Sol. Cuando esta energía llega a la Tierra, ya no es una energía distribuida sobre un área de $4\pi R_s^2$, si no más bien, es sobre un área $4\pi r_{\text{prom}}^2$ donde r_{prom} es el radio promedio de la órbita de la Tierra alrededor de el Sol, debido a la expansión radial de los rayos del Sol. La densidad de energía se representa ahora como (De vos, 1992)

$$\frac{4\pi R_s^2 Q_s}{4\pi r_{\text{prom}}^2} = \frac{R_s^2}{r_{\text{prom}}^2} Q_s \quad (1.1)$$

Podemos pensar entonces, que el flujo de densidad se diluye por un factor

$$f = \frac{R_s^2}{r_{\text{prom}}^2} \quad (1.2)$$

donde $R_s = 696 \text{ Mm}$

$r_{\text{prom}} = 150 \text{ Gm}$

de esta manera f tiene un valor de $f = 2.16 \times 10^{-5}$.

Así la concentración máxima permitida sobre la Tierra está dada por:

$$1/f = 46296 \approx 46300$$

La irradiación solar sobre la atmósfera de la Tierra es conocida como constante solar y la podemos estimar como $G = f\sigma T_s^4$. Para un valor arbitrario C , la radiación solar incidente es $Cf\sigma T_s^4$ con $1 \leq C \leq 1/f$. Debemos considerar además la configuración del concentrador, ya sea 2D (foco lineal) o bien 3D(foco puntual). El límite termodinámico para un concentrador en 2D, esta dado por (Rabl, 1985)

$$C_{\text{max 2D}} = \frac{1}{\sin \theta_a} = 213 \quad (1.3)$$

donde C_{max} es la razón máxima de concentración. El ángulo θ_a es llamado ángulo medio de aceptación. El término ángulo medio de aceptación, se refiere al hecho que cubre la mitad de la zona angular dentro del cono

de incidencia. La radiación incidente sobre el receptor tiene un ángulo de aceptación total de $2\theta_a$.

Para un concentrador en 3D, el límite termodinámico está dado por:

$$R_{\max \text{ 3D}} = \frac{1}{\sin^2 \theta_a} = 45,300 \quad (1.4)$$

donde T_r es la temperatura del receptor y la podemos estimar como sigue

$$T_r = T_s \left[(1 - \eta_c) \tau \frac{\alpha_s C}{\varepsilon_{ir} C_{\max}} \right]^{1/4} \quad (1.5)$$

donde T_s es la temperatura efectiva del Sol. η_c es la fracción de energía absorbida sobre el receptor y entregada al fluido de trabajo, τ es la transmitancia total que es función de los efectos de lentes, espejos o cubiertas de cristal para algunos casos particulares, α_s es la absorptancia sobre el absorbedor, ε_{ir} es la emitancia en el infrarrojo de la superficie del receptor, C C_{\max} son relación de concentración y relación de concentración máxima respectivamente, (rabl, 1985) (ve apéndice A).

1.4. Química solar de alta temperatura

Las principales líneas de investigación que se han desarrollado durante estos últimos años en el área de Química solar se refieren a la producción de Hidrógeno. La producción de "Hidrógeno solar" se puede lograr por diferentes métodos (Epstein et al., 1995). A temperaturas altas puede llevarse a cabo la disociación térmica de agua o termólisis ($> 1000^\circ\text{C}$). Las temperaturas elevadas pueden obtenerse a través de una alta concentración de radiación solar.



Debido a la complejidad de la separación de los gases H_2 y O_2 a altas temperaturas, se han diseñado procedimientos indirectos con varias fases, donde la disociación de agua es el resultado neto. La producción de Hidrógeno a partir de ZnO , consiste en un proceso cíclico de dos etapas, en la primera de ellas tiene lugar la disociación del óxido de

zinc en Zn y O₂ a altas temperaturas (Lédé et al.,2001), las cuales se pueden alcanzar con energía solar concentrada (S.Möller y R. Palumbo 2001). La segunda etapa es la hidrólisis de Zn a 400°C, en una reacción exotérmica, dando como resultado la producción de hidrogeno de alta pureza y la recombinación del ZnO. Otros procesos prácticos que se estudian involucran varias fases; un ejemplo es el caso del ciclo del cloruro férrico, basado en reacciones gas/sólido, en reactores de lecho fijo y a rango de temperaturas entre 200 y 750°C. El reformado de gas natural (metano) es un proceso industrial muy conocido para producir gas de síntesis que es una mezcla de H₂ y CO. El proceso consiste en una reacción endotérmica que se realiza entre 600°-850°C, con un rendimiento global del proceso de 70-75 %, y es uno de los procesos más económicos para la obtención de hidrógeno. En el proceso convencional, la energía necesaria normalmente es suministrada quemando combustible fósil y gas residual del sistema de purificación.

Los procesos de conversión termoquímica de compuestos de carbón, principalmente biomasa, son procesos que buscan la transformación de estos productos, en otros mejorados tales como gases, hulla, etc. Esto se logra mediante procesos de gasificación o pirolisis termoquímica. La pirolisis de la biomasa tiene lugar a unos 900°C, originando la vaporización instantánea del 80 % del material. El gas resultante se lleva a un reformador solar donde se obtiene una mezcla de gas a una temperatura de unos 1000°C, mientras que el residuo carbonizado, muy reactivo con vapor de agua o CO₂, puede ser gasificado en un lecho fluidizado obteniéndose una mezcla de CO, H₂, CO₂ y H₂O para que posteriormente sea enfriada, condensada el agua y el gas resultante comprimido.

1.5. Hornos Solares

Para poder llevar acabo los procesos de química solar se requiere de sistemas de concentración capaces de producir altas temperaturas en los reactores. Estos sistemas se conocen como hornos Solares. El mayor de ellos situado en Odeillo, en la región francesa de los Pirineos, es un concentrador paraboloidal de 9 130 facetas, con una superficie total de

unos 1830 m², para producir temperaturas de hasta 4000 °C (figura 1.5). Otros ejemplos son el horno solar de NREL (National Renewable



Figura 1.5: Horno solar de Odeillo, Francia.

Energy Laboratory), el de la PSA (Plataforma solar de Almería) y el horno usado en la planta piloto SolZINC en el Instituto de ciencia Weizmann PSI (Paul Scherrer Institute), Figura (1.6). El horno de NREL, en Estados Unidos, es un concentrador de alto flujo que utiliza la óptica fuera de eje, formado por un heliostato y un concentrador segmentado, con una concentración media de 2500 Soles. Por otra parte, el horno solar de la PSA inicialmente fue construido con cuatro heliostatos dispuestos en dos niveles, cada uno de los cuales enfocaba a una esquina del concentrador, de manera que se aseguraba la iluminación completa de su superficie durante el periodo operativo. Actualmente estos heliostatos fueron sustituidos por un Solo heliostato de gran tamaño.

Otro horno solar alto-flujo es el de PSI (Paul Scherrer Institute), capaz de entregar hasta 40 kW con una razón de concentración máxima de 5000. Este horno se usa actualmente en la investigación de procesos termoquímicos de combustibles, con temperaturas superiores a los 2500K (Figura 1.7).

Los tipos de hornos antes mencionados, son ideales para investigaciones que requieran temperaturas altas en entornos libres de contaminantes. Para poder coleccionar y concentrar la radiación incidente sobre un horno, existe diferentes configuraciones y arreglos como las mostradas en las figuras. 1.8 a 1.9. En la Figura. 1.8 se muestra un Concentrador

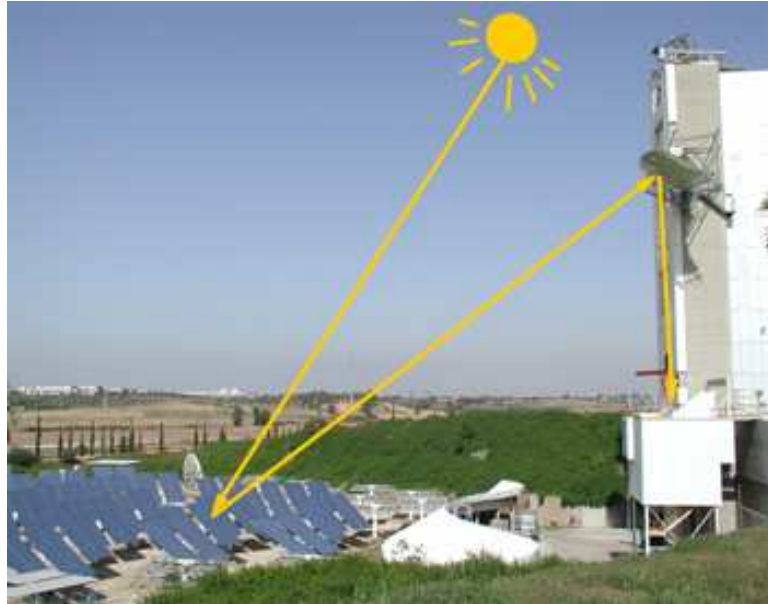


Figura 1.6: SolZINC planta piloto en operación (Weizmann Institute of Science).



Figura 1.7: Horno solar del PSI (Paul Scherrer Institut, Zurich, Suiza).

parabólico simple, en donde el reactor se localiza en el foco y está sujeto al movimiento de la parábola durante el seguimiento al Sol. En la Figura.1.9 se muestra una variante del horno de la Figura.1.8, en la cual se usa un concentrador de tipo Fresnel. Este tipo de configuración tiene la desventaja de poner la ventana del horno apuntando hacia abajo y de imponer mucho movimiento al reactor y todos sus sistemas periféricos. Debido a esto se desarrollaron los hornos con heliostatos que es la configuración más común, como se muestra en las figuras 1.5,1.7 y 1.10. Aquí el helióstato sigue de manera automática la trayectoria aparente del Sol, permitiendo mantener fijo el concentrador. Debido a que la zona focal se encuentra fija, el reactor puede estar montado en el interior de un edificio, contribuyendo aun ambiente más estable y controlado de trabajo.

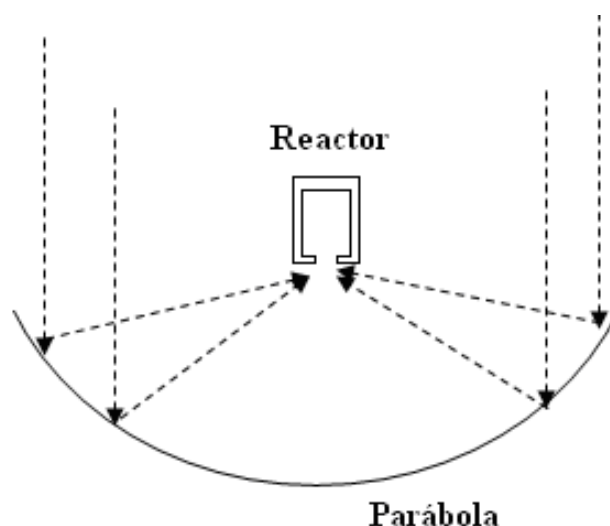


Figura 1.8: Horno con concentrador parabólico simple.

La figura. 1.11 muestra una configuración para hornos verticales. Esta configuración permite mantener fijo y en posición vertical el reactor. La limitante aquí pueden ser los efectos de sombreado, sobre todo para latitudes cercanas al ecuador. En las últimas décadas después de la aparición de los concentradores tipo Fresnel, aplicado a las torres centrales, muchos trabajos científicos propusieron diseños novedosos de reactores que se colocan en el foco primario, no obstante algunas ideas apuntaron a tener un foco secundario.

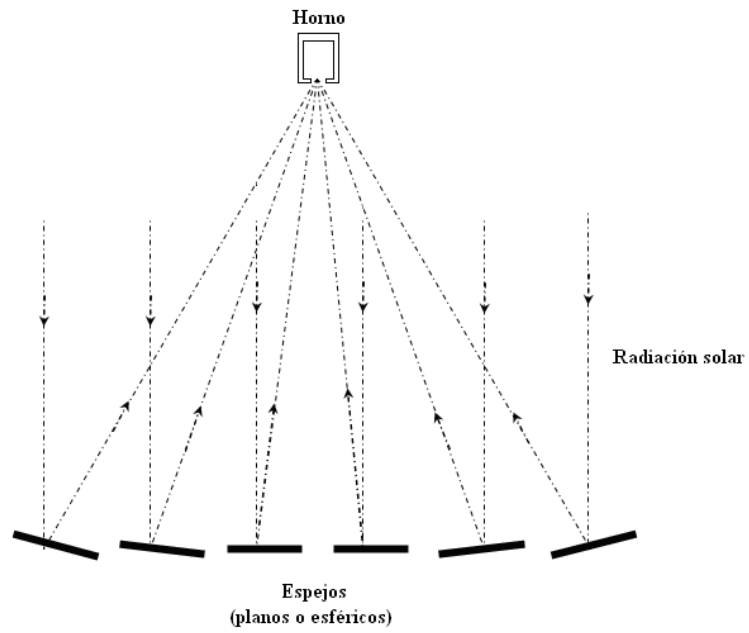


Figura 1.9: Concentrador tipo Fresnel.

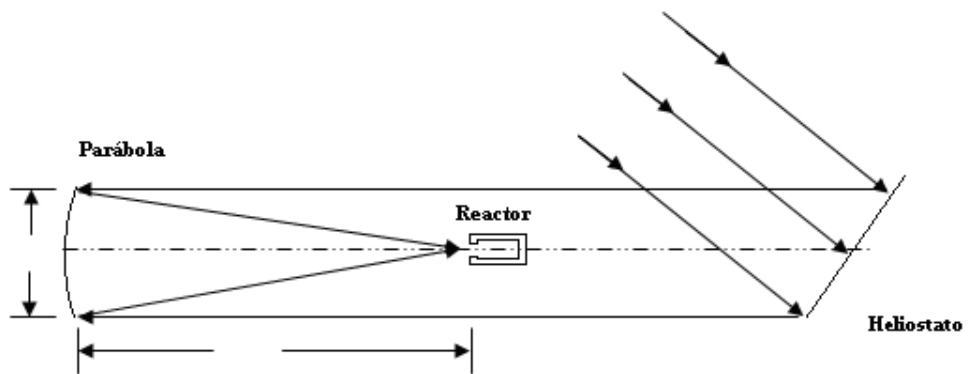


Figura 1.10: Horno con concentrador parabólico y heliostato.

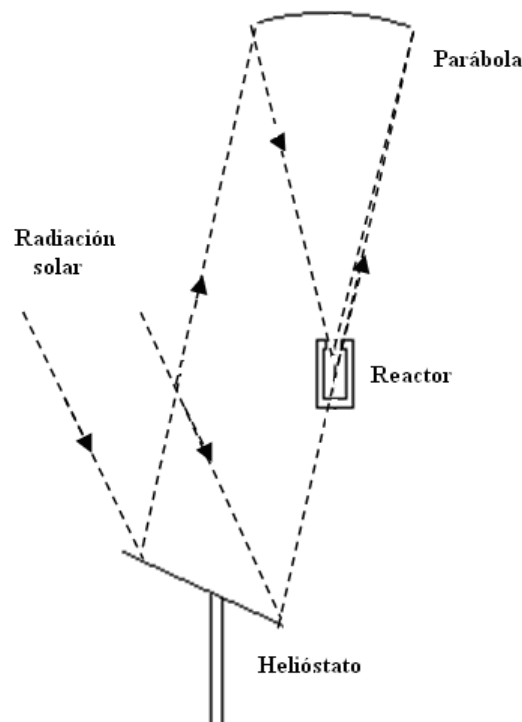


Figura 1.11: Horno vertical.

Rabl (1976) propuso un novedoso diseño en la configuración óptica, cuyo arreglo permite mover el reactor, ubicado en el foco primario de una torre, a un nivel cercano a al nivel del suelo . Este arreglo es conocido como SCOT (Solar Concentration Off-Tower), también llamado como “Beam-Down” o “reflective solar” (Tribus, 1998). Este tipo de configuración es usado en la planta piloto SolZINC en el Instituto de ciencia Weizmann, figura 1.6 (Reporte anual Salar PACES 2005). Segal y Epstein (2000) propusieron, que en este tipo de sistemas, es posible emplear espejos secundarios con perfiles hiperbólicos o elípticos los cuales tienen la propiedad de reflejar cada una de los rayos incidentes en el primer foco hacia un foco secundario. Dichos autores proponen dos formas de superficie que pueden ser usadas: una cóncava -elipsoide y otra convexa -hiperboloide. En el mencionado trabajo, ellos reportan un análisis del funcionamiento óptico para cada uno de los dos casos. En la Fig. 1.12 se muestra un concentrador tipo Cassegrain, en el cual la superficie primaria es parabólica y una secundaria, hiperbólica (Mauk et

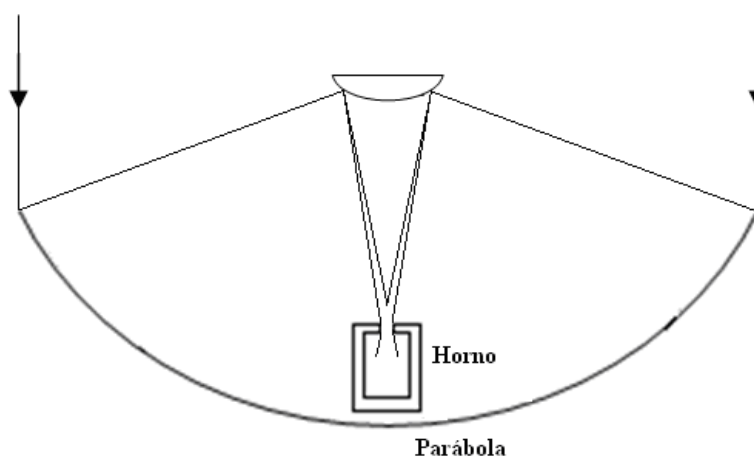


Figura 1.12: Concentrador de tipo Cassegrain.

al., 1979). Este tipo de configuraciones también se han empleado para concentración de energía solar en fibras ópticas (Kribus et al., 1999).

Mauk et al. (1979) analizaron un sistema de concentrador solar tipo Cassegrain con una primera superficie reflectora parabólica y como superficie secundaria, utilizaron un hiperboloide. El análisis presenta una aproximación en la deformación de la mancha solar en un plano ubicado en el foco secundario y una estimación de la concentración en función del ángulo de borde del concentrador primario.

1.6. El concentrador DEFRAC

En el Centro de Investigación en Energía (CIE; antes el Laboratorio de Energía solar del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM), se han diseñado y construido varios sistemas de concentración solar. Entre estos sistemas, se encuentra el dispositivo desarrollado por el Dr. Estrada hace 10 años, el Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Altamente Concentrados (DEFRAC) es el de mayor razón de concentración. El DEFRAC es un concentrador de foco puntual formado por tres grupos de seis espejos cada uno; en total, 18 espejos de sección esférica con 30 cm de diámetro y 1.9 cm de espesor como se muestra en la figura 1.13. Cada grupo de espejos tiene la misma distancia focal, los cuales concentran la radiación en un foco, a una distancia de 2 m de la

base del marco hexagonal (Estrada,1995). La imagen solar formada es aproximadamente circular con un diámetro de $2.6 \pm 0.2 \text{ cm}$ (Quiñones et al, 1997; Estrada, 1998). La figura 1.14 muestra la distribución radial del flujo solar concentrado sobre el receptor para los 18 espejos del DEFAC(Estrada et al.,2007).

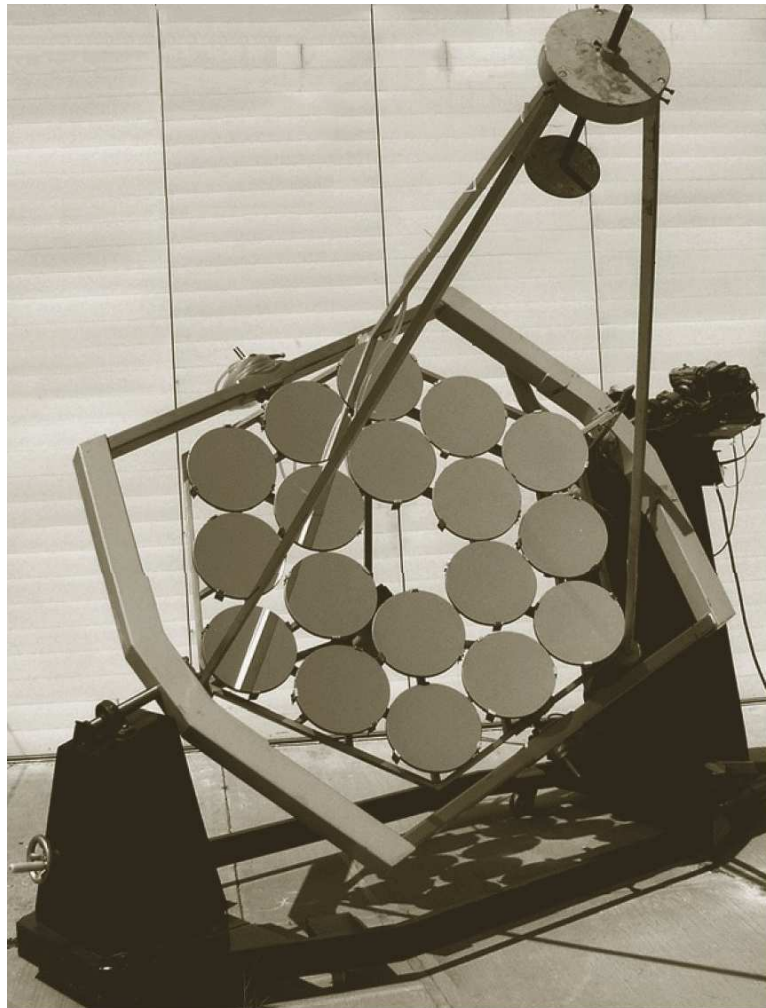


Figura 1.13: Concentrador solar DEFAC

En el DEFAC se han realizado estudios de caracterizaciones ópticas (Quiñones,1997) y térmicas (Estrada,1998, Cruz et al., 1997) y es posible alcanzar temperaturas superiores a 1500 K, por lo anterior se considera que en principio sería factible instalar un pequeño reactor para pruebas química en dicho concentrador. Como se discutirá más adelante, en este trabajo se analiza la viabilidad de usar un espejo se-

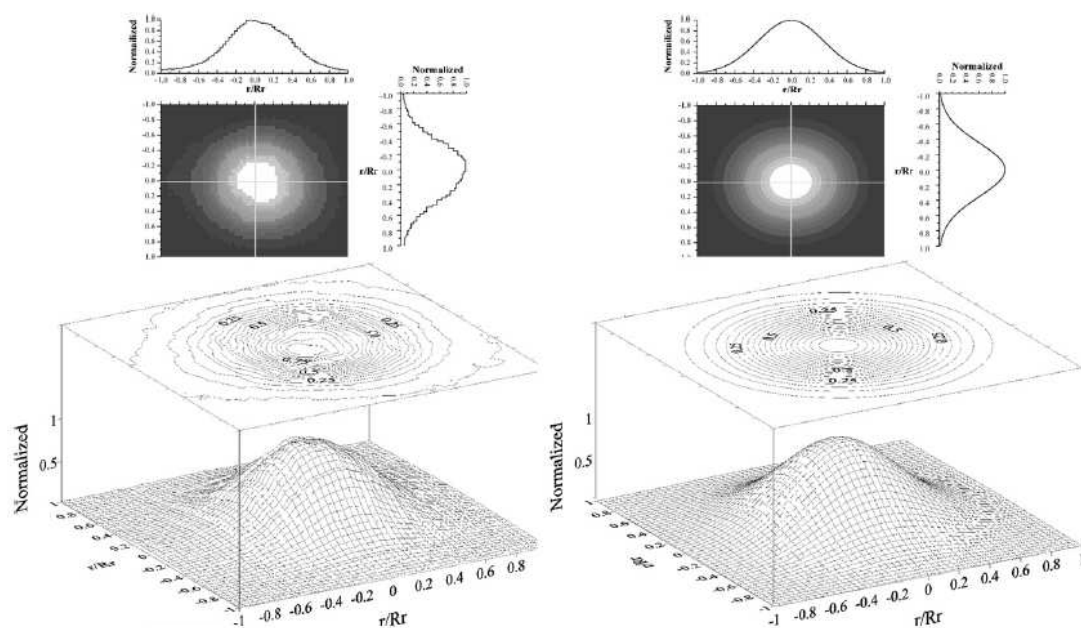


Figura 1.14: Distribución radial del flujo solar concentrado sobre el receptor. Resultados experimentales (izquierda) y teóricos (derecha).

cundario en el DEFRAC, en una configuración como la que se muestra en la figura 1.15.

1.7. Objetivos generales y específicos

El objetivo general de este trabajo es proponer una configuración de un espejo secundario tal que permita implementar en el DEFRAC un horno solar eje móvil para el estudio de química solar de alta temperatura. Los objetivos particulares de este trabajo son los siguientes:

- Desarrollar un código de trazado de rayos usando el método de Monte Carlo, para concentradores solares de foco puntual, que incluya la simulación de espejos secundarios.
- Modelar el DEFRAC implementando un espejo secundario, mediante el código desarrollado.
- Determinar la distribución del flujo radiativo incidente sobre un plano colocado en el foco del sistema.

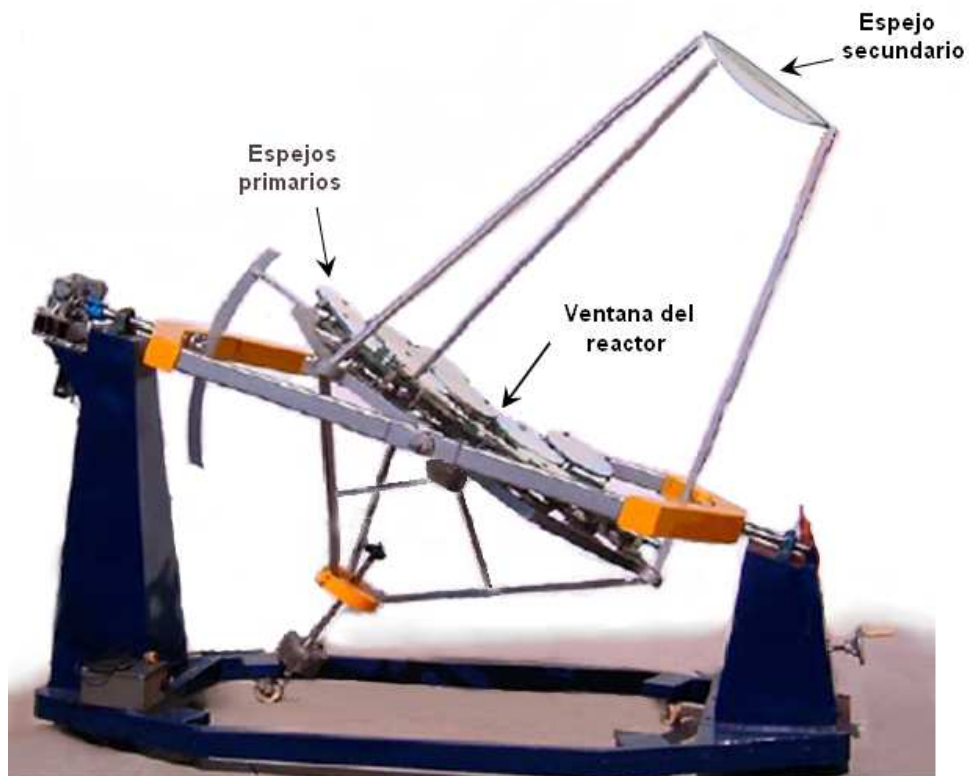


Figura 1.15: Representación esquemática de la configuración propuesta para el DEFRAC usando un espejo secundario.

- Determinar la potencia y el pico de concentración del DEFRAC con espejo secundario, en función de la ubicación y características de dicho espejo.

En este capítulo se ha hecho una introducción general al recurso solar y al concepto de concentración solar. Así mismo, se han expuesto diferentes configuraciones de hornos solares que pueden ser empleados en el estudio de química solar de alta temperatura. Finalmente se han planteado los objetivos del trabajo. En el siguiente capítulo se discutirán algunos conceptos de óptica de concentradores solares y otras herramientas conceptuales necesarias para el desarrollo del presente trabajo.

Capítulo 2

Conceptos Generales

En este capítulo se presentan los conceptos generales que se emplean en el desarrollo del código de trazado de rayos. En primer lugar se discute la distribución angular de la radiación directa, así como su representación a partir del llamado muestreo circumsolar estándar ¹ y a partir de una distribución Gaussiana. Posteriormente se presenta la ley de reflexión de la radiación en superficies ideales así como la representación vectorial de la misma. Se discuten también las superficies reales y los factores que dan lugar a un comportamiento no especular de la reflexión en ellas, así como la representación Gaussiana del cono de reflexión resultante. Finalmente concluimos presentando algunos conceptos básicos de vectores.

¹Standard circumsolar scan.

2.1. Distribución angular de la radiación directa

El Sol visto desde la Tierra se aprecia como un pequeño disco con un radio angular de

$$\theta_s \approx 4.7 \text{ mrad.}$$

Este valor varía temporalmente debido a la excentricidad de la órbita terrestre alrededor del Sol, en un $\pm 1.7\%$, hecho que muchas veces es despreciado. La radiación electromagnética que recibimos sobre la superficie terrestre, es emitida del disco solar con una distribución de brillantez no uniforme. En muchas aplicaciones, no se requiere un análisis riguroso de la distribución de la brillantez solar, sólo en aquellas donde se utilizan altos flujos concentrados. En los sistemas de alta concentración la distribución de la energía solar en el receptor depende, entre otras cosas, de dicha distribución angular de la energía solar incidente, es decir de la forma solar.

La radiación solar al entrar en contacto con la atmósfera es desviada debido al esparcimiento² producido por las partículas atmosféricas. Cuando el radio de las partículas atmosféricas es más grande que la longitud de onda de la luz ocurre el esparcimiento, en un cono estrecho alrededor de la dirección original; es decir, se trata del esparcimiento hacia delante. Este hecho da lugar a lo que se conoce como la región circumsolar del cielo o aureola solar, comprendida entre 4.7 mrad y 50 mrad (Rabl, 1985).

La distribución de brillantez solar real puede variar en gran manera con las condiciones atmosféricas (Neumann, 2002). Buie et al, (2003) mostraron que la forma solar presenta pequeñas variaciones entre diferentes lugares, cuando se normalizan y son descritas en términos de la razón circumsolar (CSR). La CSR (χ) se define como el flujo radiante, contenido dentro de la región circumsolar del cielo Φ_{CS} , dividido entre el flujo directo total Φ_{ν} . Este parámetro puede tener bajo un cielo despejado variaciones importantes, dependiendo de las condiciones atmosféricas precisas y su valor puede estar desde 0.01 hasta 0.8 (Buie et al., 2003)

²En ésta tesis la palabra esparcimiento indica el cambio de la dirección de la radiación (scattering), en contraste con cambios en la longitud de onda (dispersion).

$$\chi = \frac{\Phi_{cs}}{\Phi_l} \tag{2.1}$$

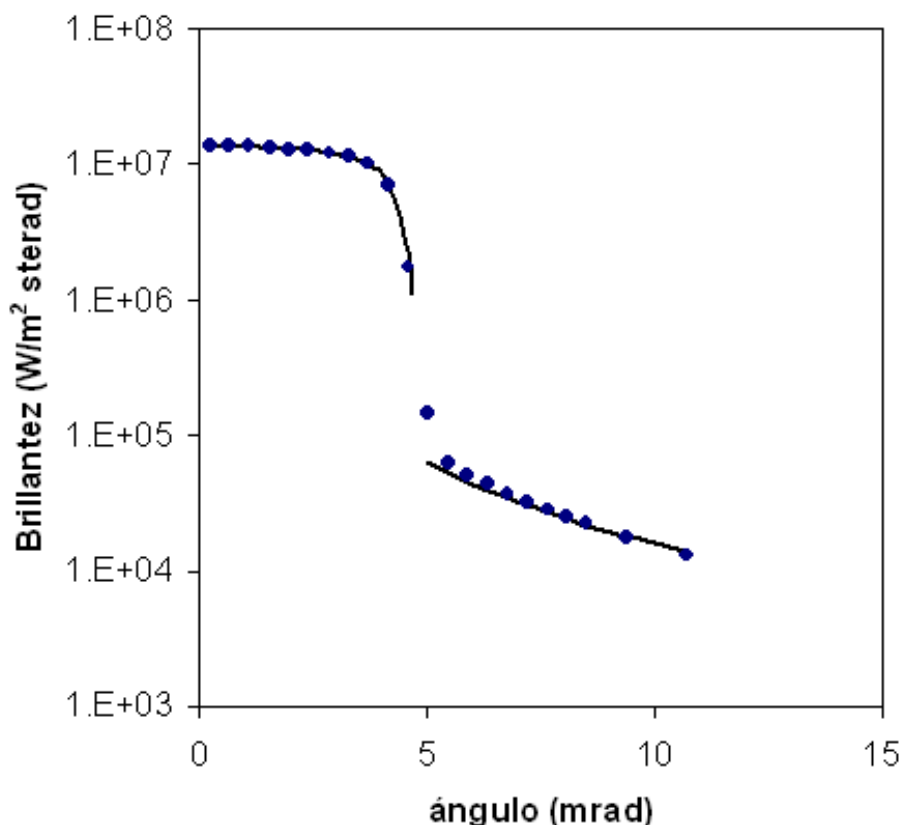


Figura 2.1: En la figura los puntos representan datos experimentales y las líneas los ajustes para la región del disco y la aureola (Rabl, 1985). Nótese la escala logarítmica. No se incluyen en el gráfico los puntos medidos para ángulos mayores, los cuales llegan hasta 55 mrad.

En la figura 2.1 se muestra una distribución de brillantez solar típica del muestreo circumsolar estándar bajo cielos despejados. Esta curva representa los valores promedio obtenidos de un número grande de experimentos del tipo mostrado en la figura 2.2. En la figura 2.2 se presentan curvas de 20 perfiles los cuales son datos medidos en diferentes lugares bajo cielo despejado, las curvas contiene información tanto para el disco solar como para la región circumsolar (Buie et al., 2003). En la distribución de la figura 2.1 se puede apreciar que cerca de centro del disco solar, la brillantez es casi uniforme, pero luego, cerca del borde

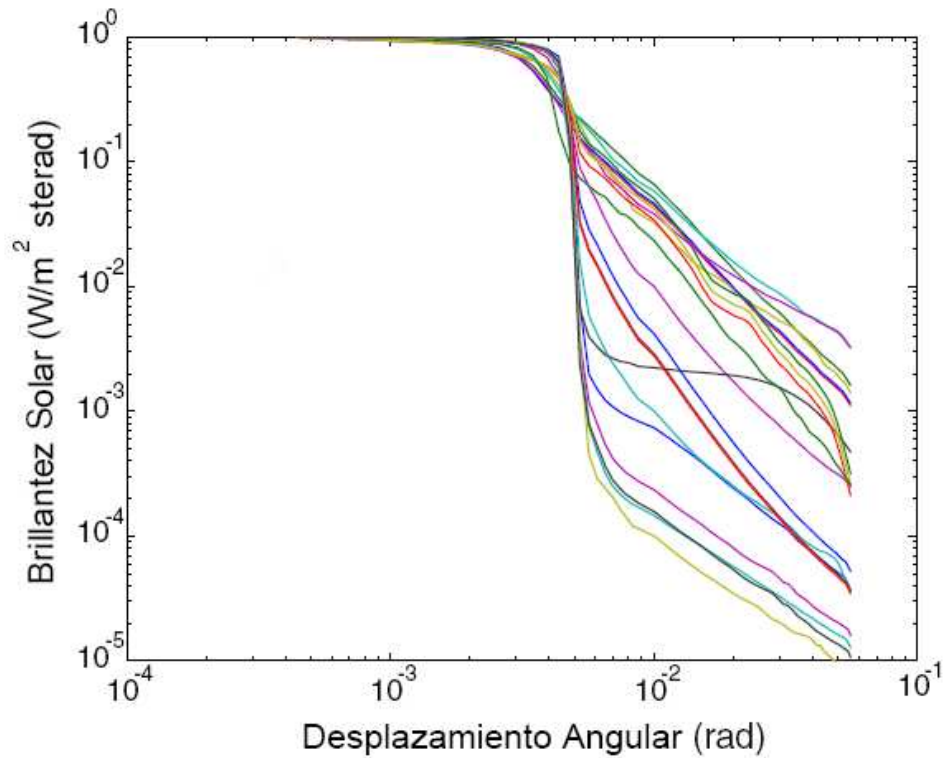


Figura 2.2: Ejemplo de 20 perfiles solares medidos en los laboratorios de Lawrence Berkley (Buie et al., 2003).

cae por casi tres ordenes de magnitud. A la distribución de brillantez del muestreo circumsolar estándar es posible ajustar polinomios. La región del disco solar mediante la siguiente función (Winter et al., 1991.)

$$B(\theta) = B_d [1 - (0.5051 \theta/\alpha)^2 - (0,9499 \theta/\alpha)^8] \quad (2.2)$$

donde $B_d = 13.639 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \text{ sterad}$ y $\alpha = 4.653 \text{ rad}$, mientras que la aureola la podemos ajustar con (Winter et al., 1991.)

$$B(\theta) = B_\alpha (\theta/\alpha)^{-2} \quad (2.3)$$

donde $B_\alpha = 72,200 \text{ W/m}^2 \text{ sterad}$.

Para un análisis estadístico de la radiación interceptada por una superficie colectora, es conveniente usar la raíz cuadratica media del ancho solar (rms). Para sistemas de foco puntual geométrico (discos parabólicos) el ancho del rms σ_{sol} esta dado por (Rabl, 1985)

$$\sigma_{\text{sol}}^2 = \frac{\int_0^{\infty} \theta^3 B(\theta) d\theta}{\int_0^{\infty} \theta B(\theta) d\theta}. \quad (2.4)$$

Si el sol fuera un disco uniforme de tamaño θ_s , la amplitud rms debería ser

$$\sigma_{\text{disco}} = \left[\frac{\int_0^{\theta_s} \theta^3 d\theta}{\int_0^{\theta_s} \theta d\theta} \right]^{1/2} = \frac{\theta_s}{\sqrt{2}}. \quad (2.5)$$

Para la distribución de brillantez solar real, la amplitud rms varía con las condiciones atmosféricas, debido a la contribución de la región circumsolar. Bajo un cielo claro la amplitud puede ser considerada (Rabl,1985)

$$\sigma_{\text{sol-std}} \approx 3.6 \text{ mrad} \quad (2.6)$$

2.1.1. Representación Gaussiana de la forma solar

La distribución de brillantez solar es posible representarla mediante una función de distribución Gaussiana (figura 2.3). En este tipo de representación es posible considerar simetría circular en la distribución. Una distribución Gaussiana circular normalizada esta dado por

$$B_{\text{Gauss}}(\theta) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (2.7)$$

donde σ es la dispersión o el ancho de la raíz cuadrática media (rms) de la distribución. En nuestro análisis usaremos $\sigma_{\text{solG}} = 2.55 \text{ mrad}$ para representar esta desviación.

2.2. Reflexión de la radiación en superficies ideales

En la óptica geométrica se consideran los haces de luz como rayos, los cuales siguen trayectorias rectilíneas. Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie lisa reflectora, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Se llama ángulo de incidencia el ángulo formado

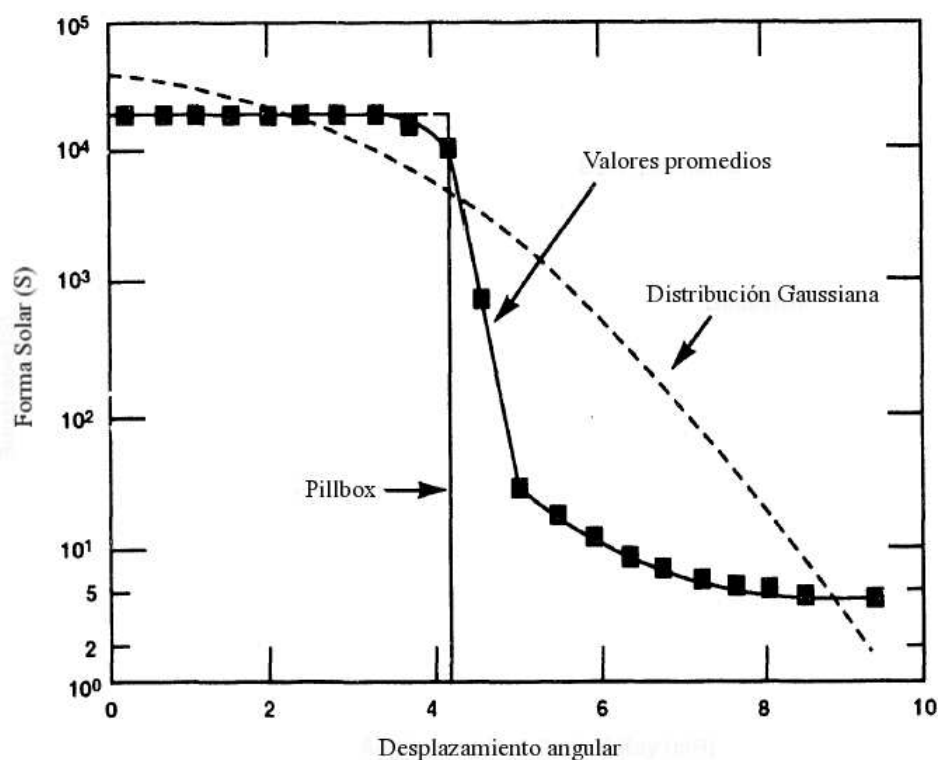


Figura 2.3: Representación de la brillantez solar (Forma solar).

por el rayo incidente con la normal al plano y ángulo de reflexión al ángulo formado por el rayo reflejado con la normal al plano. El rayo incidente, la normal de la superficie sobre punto de impacto y el rayo reflejado, son coplanares es decir están ubicados sobre el mismo plano, Figura (2.4).

2.2.1. Representación vectorial de la ley de reflexión

Por conveniencia para las simulaciones representaremos la ley de reflexión en forma vectorial. Para hacerlo, usaremos tres vectores unitarios como se muestra en la figura 2.4, donde \hat{i} es la dirección del rayo incidente, \hat{n} es la dirección de la normal de la superficie reflectora, \hat{r} es la dirección del rayo reflejado.

En la ley de la reflexión especular se considera que:

1. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión

$$\theta_i = \theta_r,$$

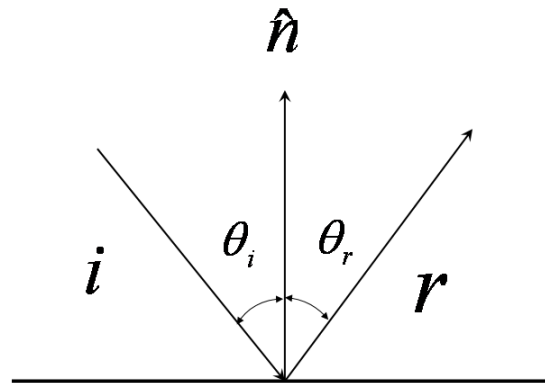


Figura 2.4: Reflexión de un rayo sobre una superficie ideal.

$$\cos \theta_i = \cos \theta_r$$

por lo tanto,

$$\hat{i} \cdot \hat{n} = \hat{r} \cdot \hat{n}. \quad (2.8)$$

2. $\hat{i}, \hat{n}, \hat{r}$ deben de estar en el mismo plano

$$(\hat{i} \times \hat{r}) \cdot \hat{n} = 0. \quad (2.9)$$

Para determinar el vector reflejado es necesario conocer el vector incidente \hat{i} y la normal de la superficie \hat{n} . Dada las ecuaciones 2.8 y 2.9 es posible determinar el vector reflejado \hat{r} , que dando expresado de la siguiente manera (Goswami, 1999)

$$\hat{r} = \hat{i} - 2(\hat{i} \cdot \hat{n})\hat{n}. \quad (2.10)$$

2.3. Estadística de superficies

2.3.1. Efectos de errores en rayos reflejados

En un concentrador de foco puntual ideal todos los rayos incidentes paralelos al eje de simetría, serán reflejados a un punto llamado foco. No obstante, en los concentradores reales es imposible concentrar la radiación solar en un punto debido a la forma, imperfecciones y al tamaño finito del Sol. Estas imperfecciones o "errores" se clasifican en: error microscópico, ondulaciones y errores de contorno, las cuales en

conjunto afectan de manera directa la forma y el tamaño de la mancha focal, también conocido como spot, sobre el receptor.

Los errores microscópicos, propiedad intrínseca de una superficie real, son rugosidades provocadas principalmente por dos causas: el tamaño de grano del material, particularmente en los recubrimientos metálicos depositados por evaporación u otros métodos similares; o el diámetro de las partículas empleadas durante el pulido de la superficie o el sustrato donde se deposita la misma. Por otra parte, las ondulaciones son provocadas por esfuerzos mecánicos en la estructura de los concentradores, abolladuras o bien una combinación de ambas. Finalmente, la diferencia que existe entre el perfil teórico y la superficie promedio real se conoce error un de contorno, el cual proviene de imprecisiones en el formado de dicho perfil. Para entender mejor estos

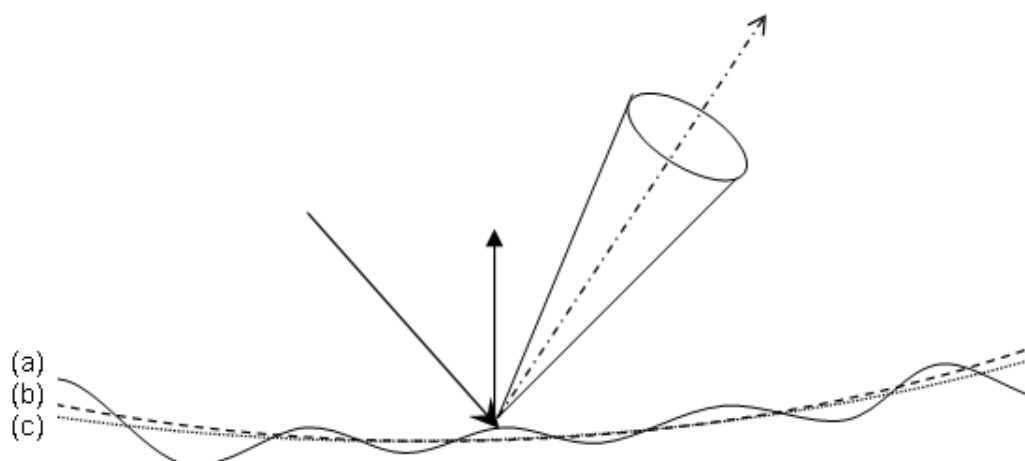


Figura 2.5: La línea sólida muestra la superficie real apreciándose ondulaciones en ella (a). Las líneas con segmentos; (b) muestra el promedio de la superficie real. Las líneas punteadas muestran el perfil teórico de una parábola (c).

conceptos se puede observar la figura 2.5. La línea sólida muestra la superficie real, apreciándose ondulaciones en ella (a). La líneas con segmentos (b) muestra la desviación del perfil promedio real con respecto al perfil teórico. Las líneas punteadas muestran el perfil teórico de un concentrador, frecuentemente se usa una parábola (c).

Los errores de contorno en muchos casos representa la escala de mayor error óptico. Las ondulaciones sobre superficies real típicamente

tiene una longitud del orden que varía de centímetros a decímetros y representa los errores de mediana escala. En el caso del DEFRAC, donde la superficie reflectora es de calidad astronómica, es decir están hechos por métodos de pulido para obtener desviaciones menores a $\frac{\lambda}{4}$, donde λ representa la longitud de onda. Los errores microscópicos y de contorno de cada faceta son muy pequeños comparados con otros tipos de concentradores, que tienen espejos metálicos. Sin embargo, hay dos importantes fuentes de error: la alineación de los 18 espejos entre si y los errores de seguimiento.

Los errores microscópicos se determinan midiendo la fracción de luz dispersada de un rayo colimado después de haber sido reflejado sobre un elemento de área de la superficie a caracterizar. Los errores de contorno y ondulaciones se determinan mediante el mapeo del contorno del reflector usando un trazado de rayo mecánico u óptico. Cada uno de esos errores ópticos pueden ser caracterizados por una función de distribución estadística, respecto a variaciones angulares. Idealmente la distribución debería ser obtenida de mediciones, lo cual no siempre es posible. Pettit (1977) encontró que para muchos materiales reflectores, la dispersión de la radiación alrededor de la dirección del rayo especular puede ser descrita por una distribución Gaussiana.

$$R(\theta) \propto R_1 e^{-\left(\frac{\theta^2}{2\sigma_1^2}\right)}, \quad (2.11)$$

donde θ es la desviación angular de la dirección de un rayo especular en particular y $R(\theta)$ es la intensidad de radiación reflejada dentro de la dirección θ , R_1 es la reflectancia total y σ_1 es el ancho de la distribución.

Es posible caracterizar el error de superficie a través de la desviación estándar de la distribución angular de la radiación reflejada σ_s^2

$$\sigma_s^2 = \sigma_{\text{micr}}^2 + \sigma_{\text{cont}}^2 + \sigma_{\text{ond}}^2. \quad (2.12)$$

donde σ_{micr}^2 , σ_{cont}^2 , σ_{ond}^2 representan las desviaciones estándar de los errores microscópicos, de contorno y ondulaciones sobre la superficie, respectivamente. De este modo, para estimar la distribución de la energía solar concentrada sobre receptor, es necesario incluir en las simulaciones la descripción estadística de los errores de superficie, de

tal manera que nos permitan modelar el comportamiento óptico de un concentrador de foco puntual.

2.3.2. Interpretación de los errores de superficie

En un concentrador real los rayos inciden dentro de un rango de direcciones, cubriendo el disco solar y una fracción de la circumsolar, y son reflejados por un reflector de superficie imperfecta que causa un agrandamiento de este cono solar incidente. Dicho agrandamiento es posible explicarlo en términos de pequeñas desviaciones.

Si se emite un rayo desde una fuente puntual S , de tal manera que éste impacte sobre una superficie especular en el punto R , se espera que el rayo reflejado, obedeciendo la ley de reflexión, alcance el punto Q sobre un receptor como se ilustra en la figura 2.6.

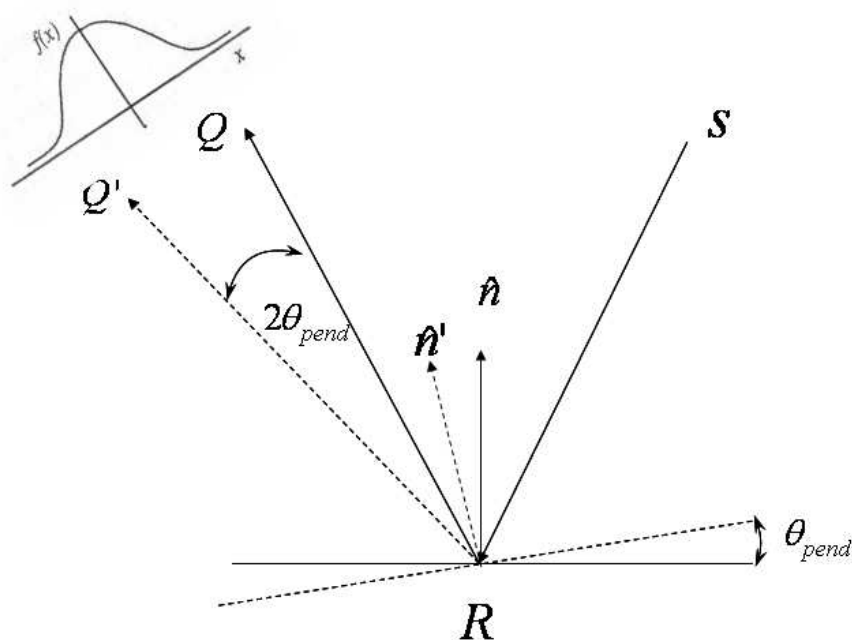


Figura 2.6: Superficie reflectora con fuente puntual

En un reflector real esto no sucede debido a las desviaciones posibles que pueden causar los diferentes tipos de errores que se encuentran presentes. Es posible considerar esos errores como pequeñas desviaciones de la superficie, respecto al perfil ideal, en cada punto de impacto. De

esta manera, el rayo emitido de la fuente S que impacte en el punto R será desviado por un plano inclinado a un ángulo de φ respecto al plano ideal, impactando en el punto Q' . El comportamiento de dichas desviaciones es posible aproximarlas a una distribución de Gauss. La figura 2.7 muestra el efecto de reflexión de un rayo, sobre una superficie ideal inclinada, cambiando su dirección por un ángulo $2\theta_{\text{pend}}$ de esta manera

$$\theta_r = 2\theta_{\text{pend}}$$

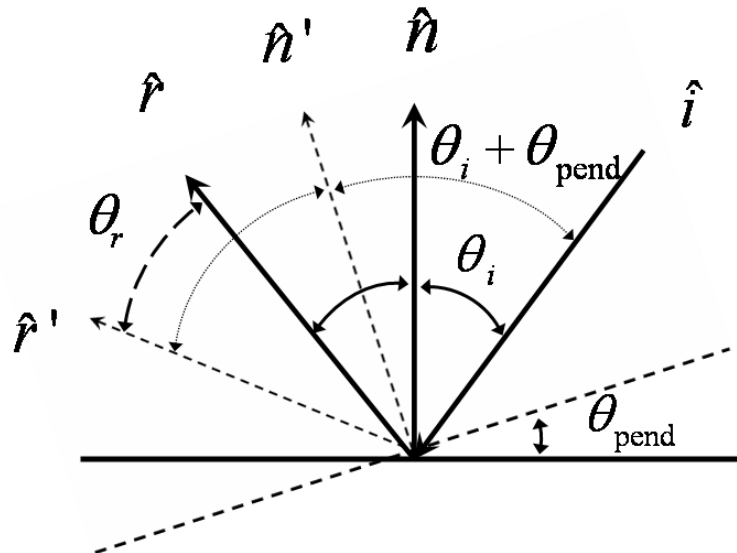


Figura 2.7: Representación de la desviación de un rayo respecto a una superficie por una pendiente de ángulo φ

La figura 2.6 muestra con líneas punteadas el efecto de desviación del rayo respecto a la dirección original. De acuerdo a lo anterior se puede apreciar que el ángulo de la desviación del rayo resultantes \hat{r}' , respecto del rayo original \hat{r} , es 2 veces el ángulo de inclinación del plano θ_{pend} (Bendt y Rabl. 1981), por lo tanto

$$\sigma_{\text{cont}} = 2 \sigma_{\text{pend}}. \tag{2.13}$$

Finalmente el error de superficie se puede representar como

$$\sigma_s^2 = \sigma_{\text{micr}}^2 + 4 \sigma_{\text{pend}}^2. \quad (2.14)$$

y el error óptico como

$$\sigma_{\text{opt}}^2 = \sigma_s^2 + \sigma_{\text{seg}}^2, \quad (2.15)$$

donde σ_{seg} es la dispersión estándar del error de seguimiento cuando es aproximado por una distribución Gaussiana.

2.4. Fuente efectiva (sol degradado)

En las secciones anteriores hemos hablado a cerca de los errores ópticos σ_s y el cono solar σ_{sol} . Cuando observamos el cono reflejado, es imposible distinguir en él los rayos que se deben al cono solar y aquellos que son producto del esanchamiento de este cono por los errores ópticos. En conjunto ambos errores se combinan para dar lugar al error total (Rabl, 1985)

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_{\text{opt}}^2 + \sigma_{\text{sol}}^2. \quad (2.16)$$

Una manera alterna de considerar los errores totales es considerando los errores ópticos y el cono solar como uno solo, llamado cono de sol degradado (σ_{sdegr}) o fuente efectiva.

La fuente real y los errores ópticos son caracterizados por funciones de distribución angular, por lo tanto, la fuente efectiva $B_{\text{eff}}(\theta)$ es también una distribución; esta describe cuanta radiación incide de la dirección θ sobre la apertura de una superficie reflectora perfecta. Una distribución de brillantes $B_{\text{eff}}(\theta)$ y $B_{\text{sol}}(\theta)$ tienen unidades de $\text{W}/\text{m}^2 \text{sterad}$ para un foco puntual.

La distribución angular de la radiación de una fuente real como la del Sol, está dada por una dependencia funcional de la brillantes solar $B_{\text{sol}}(\theta_{\text{in}})$ sobre el ángulo de incidencia. Los datos de la brillantes solar usualmente son reportadas como una distribución radial $B_{\text{radial}}(\theta)$ en $\text{W}/\text{m}^2 \text{sterad}$, y es medida a partir del centro del disco solar. Para un concentrador de foco puntual las formulas de la fuente efectiva esta

dada por

$$B_{\text{eff}}(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{opt}}(|\theta - \theta_{\text{in}}|) B_{\text{sol}}(\theta_{\text{in}}) d^2\theta_{\text{in}}. \quad (2.17)$$

en muchos casos, los errores ópticos se pueden considerar Gaussianos y la fuente efectiva toma la forma

$$B_{\text{eff}}(\theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{opt},x}\sigma_{\text{opt},y}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{\theta_x^2}{2\sigma_{\text{opt},x}^2} - \frac{\theta_y^2}{2\sigma_{\text{opt},y}^2}\right] B_{\text{sol}}(\theta - \theta') d^2\theta' \quad (2.18)$$

donde $\sigma_{\text{opt},x}^2$ y $\sigma_{\text{opt},y}^2$ son las desviaciones standard en las direcciones ortogonales x y y para permitir la posibilidad de una distribución de error sin simetría rotacional (Rabl, 1985).

2.4.1. Espejos parabólicos y esféricos.

Los discos parabólicos son superficies de revolución que concentran la radiación sobre un punto llamado foco. Debido a esta cualidad las parábolas se usan mucho como concentradores solares. La distancia medida del vértice de una parábola al foco se conoce como distancia focal f . Por otro lado, las superficies esféricas son más fáciles de fabricar que las parabólicas, las cuales dentro de la región paraxial pueden funcionar correctamente como un concentrador parabólico. Para poder mostrar lo anterior es necesario definir las ecuaciones básicas para ambos casos, para una superficie esférica y parabólica.

La ecuación de una parábola cuyo vértice se encuentra en el origen y cuyo foco está ubicado a la derecha puede ser escrita como sigue

$$x = \frac{y^2}{4f} \quad (2.19)$$

donde f representa la distancia focal. Por otro lado, la ecuación de la sección circular transversal de una superficie esférica la podemos representar de la siguiente manera (Hecht E, 2000)

$$y^2 + (x - R)^2 = R^2 \quad (2.20)$$

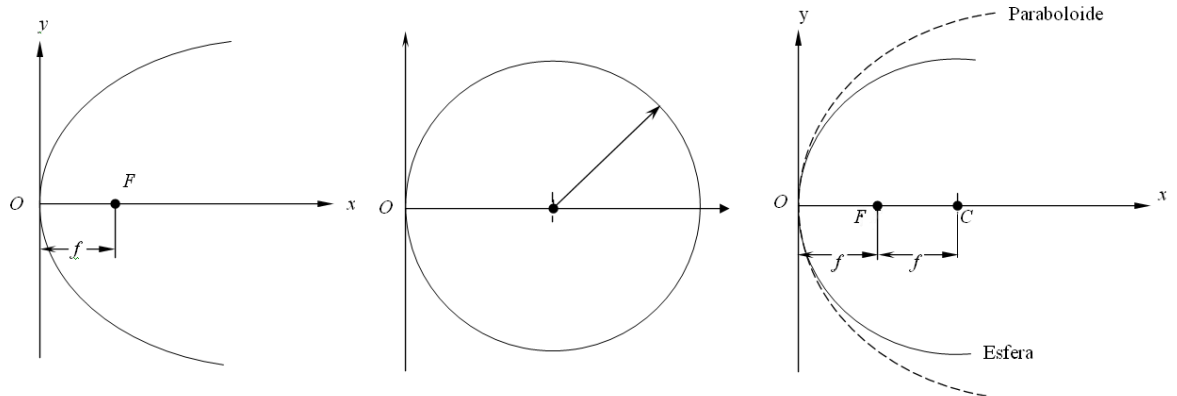


Figura 2.8: Comparación entre un perfil esférico con un perfil parabólico

Nótese que el centro C se encuentra desplazado del origen O por una magnitud R (radio), como se muestra en la figura 2.8. Despejando x podemos expresar la ecuación 2.20 de la siguiente manera

$$x = R \pm (R^2 - y^2)^{1/2} \quad (2.21)$$

Después de un desarrollo en una serie binomial, x adquiere la siguiente forma

$$x = \frac{y^2}{2R} + \frac{y^4}{2^2 2! R^3} + \frac{3y^6}{2^3 3! R^5} + \dots \quad (2.22)$$

Los efectos de la desviación solo se puede apreciar cuando los valores de x son relativamente grandes comparados con el radio R . Con esto los términos de la ecuación 2.23 representan la diferencia entre estos dos perfiles. A medida que aumenta el valor de Y , la diferencia entre los dos perfiles también aumenta. Al comparar un perfil parabólico (2.19) con un perfil esférico (2.20) se observa que el primer término de la ecuación es una parábola, lo cual nos indica que para valores de $Y \ll R$, es decir la región paraxial, el foco $f \simeq \frac{R}{2}$.

$$\Delta x = \frac{y^4}{8 R^3} + \frac{y^6}{16 R^5} + \dots \quad (2.23)$$

Podemos concluir que en la región paraxial, estas dos configuraciones son indistintas, característica que permite emplear los casquetes

esféricos como concentradores de foco puntual siempre que se encuentren dentro de ésta región, de lo contrario los efectos de aberración esférica se vuelven significativos (Hecht E, 2000). En el apéndice B se muestra un caso particular para un solo espejo del DEFRAC.

2.4.2. Representación vectorial de líneas y superficies.

Las rectas y esferas son objetos geométricos que pueden ser representados por medio de ecuaciones algebraicas. Sin embargo en nuestras simulaciones es conveniente representarlos vectorialmente. En esta sección nos ocuparemos en la representación vectorial de las mismas.

Recta Una recta l que pasa por el extremo del vector \vec{r}_0 y tiene por vector director \hat{s} se puede representar en forma vectorial de la siguiente manera (figura 2.9).

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \hat{s}t \quad (2.24)$$

donde \vec{r}_0 es el vector al punto P_0 .

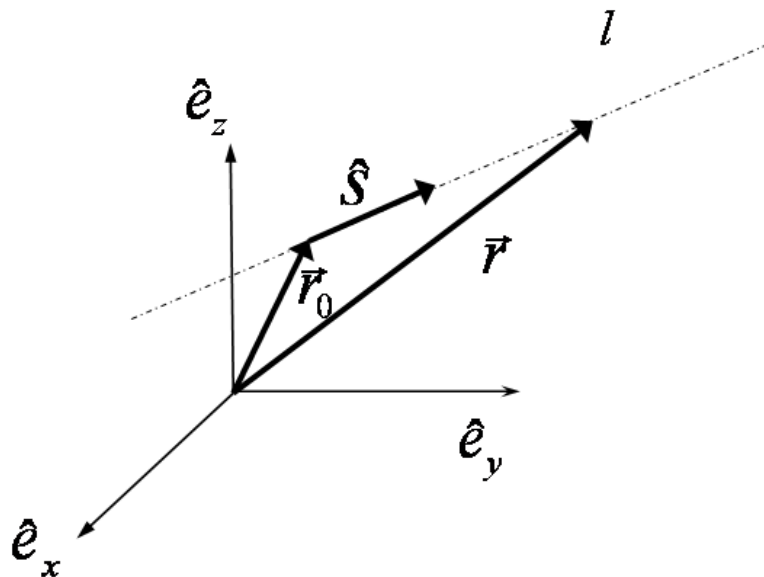


Figura 2.9: Recta l en la dirección \hat{s} que pasa por la punta de \vec{r}_0

Plano Una superficie plana la podemos representar en forma vectorial de la siguiente manera

$$\hat{n}_p \cdot (\vec{r} - \vec{r}_p) = 0 \quad (2.25)$$

donde \hat{n}_p es el vector normal al plano y \vec{r}_p es el vector posición del plano, figura 2.10.

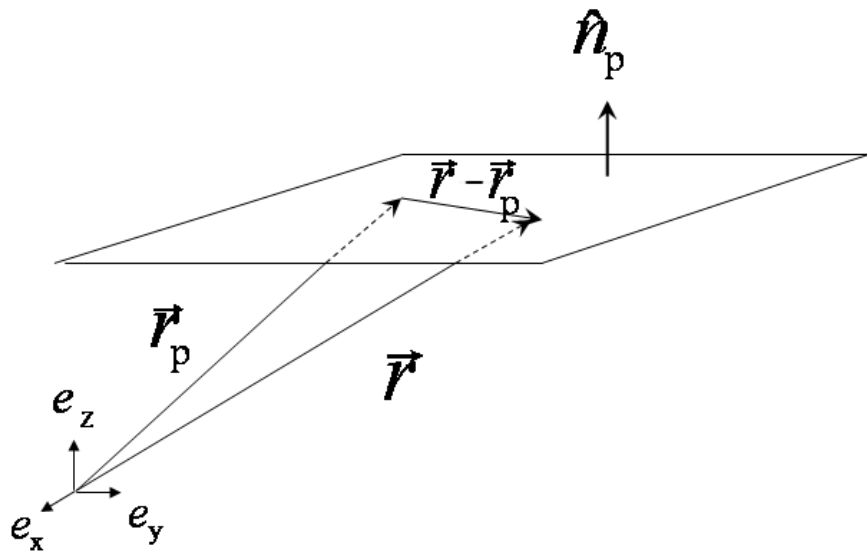


Figura 2.10: Representación gráfica de un plano ubicado en el espacio

Esfera Una esfera es un sólido terminado por una superficie curva cuyos puntos equidistan todos de otro interior llamado centro. La representación en forma vectorial se expresa de la siguiente manera

$$\vec{a} \cdot \vec{a} = R^2 \quad (2.26)$$

donde \vec{a} es el vector a la superficie de la esfera, cuya magnitud es igual a R , figura 2.11.

Los conceptos que se han expuesto en este capítulo son los que servirán de base para el desarrollo del código de trazado de rayos. En el capítulo siguiente se introduce el método Monte Carlo y se discute en detalle el algoritmo del código.

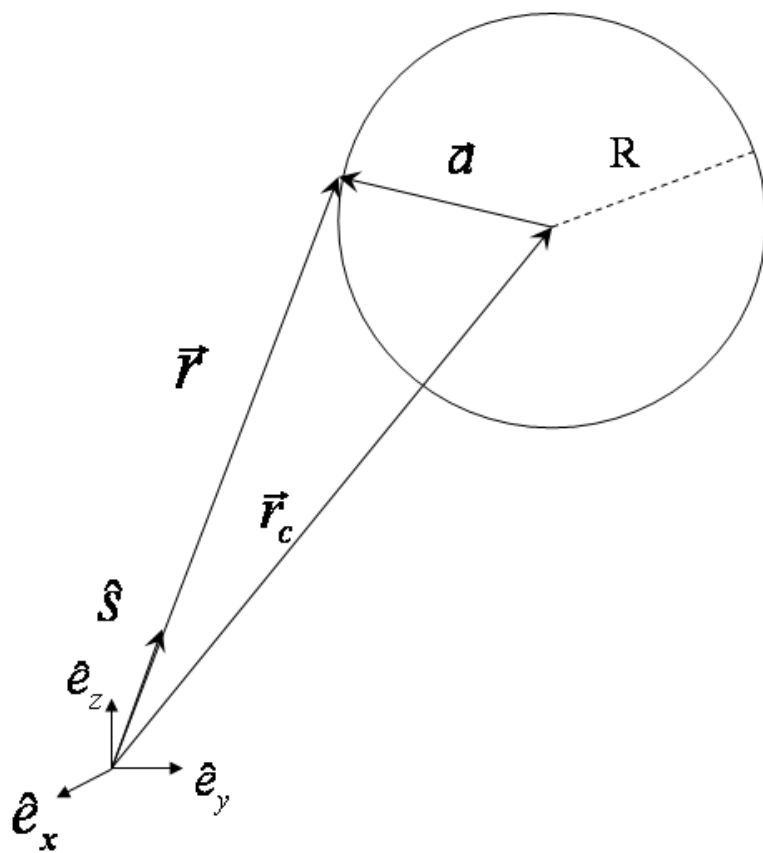


Figura 2.11: Recta \vec{r} en la dirección \hat{s} que corta la superficie esférica

Capítulo 3

Trazado de rayos

En este capítulo se presenta el algoritmo y las fórmulas empleadas en el código de trazado de rayos. Se comienza con una descripción básica del proceso y posteriormente se presenta las ideas principales del método de Monte Carlo, el cual es usado en el algoritmo. Dicho método consiste en describir la incidencia y reflexión de radiación como procesos aleatorios los cuales se abordarán a detalle en el desarrollo del capítulo. Finalmente se derivan varias fórmulas necesarias para el desarrollo del código.

3.1. Algoritmo básico del modelado

El trazado de rayos consiste en seguir un rayo de luz hasta que las condiciones de partida cambien. Por ejemplo, si emitimos un rayo en el espacio éste tendrá dirección y un sentido inicial, las condiciones permanecerán constantes a menos que en su trayectoria encuentre un obstáculo que obligue a cambiarlas. Si el rayo adquiere una nueva dirección no importarán las condiciones que tenía al inicio, solamente aquellas condiciones adquiridas una vez que ha sido redirigido. El esquema de la simulación se ilustra en la figura 3.1.

Para modelar el concentrador, comenzamos generando rayos aleatorios, los cuales inciden en sobre la superficie del espejo esférico primario (1). Los rayos interceptados por la superficie del espejo serán reflejados obedeciendo la ley de reflexión descrita en el capítulo anterior (2), una vez reflejados por la superficie del espejo primario, los rayos son reflejados nuevamente por un espejo secundario (3) y finalmente, son contabilizados en un receptor secundario ubicado en el plano de los espejos primarios (4). Cada uno de los procesos (1),(2) y (3) se simularán como procesos aleatorios, como se describe más adelante.

3.2. Método de Monte Carlo

Podemos imaginar que sobre una superficie iluminada por un haz de radiación solar directa inciden un infinito número de rayos; en cada uno de los infinitos puntos de la superficie incide un rayo por cada una de las infinitas direcciones de incidencia posibles dentro de del cono solar. Por lo tanto, al hacer un trazado de rayos es imposible seguir todos los posibles rayos que incidirán sobre cualquiera de las facetas de un concentrador solar. Lo que hacen los métodos de trazado de rayos es tomar una “muestra” de estos rayos y seguirlos en detalle a lo largo de su propagación en el sistema. La idea, es que si se simulan suficientes rayos es posible representar con alta precisión el comportamiento del sistema.

En los métodos convencionales el muestreo de rayos se hace de manera determinista, es decir, se hace una discretización del espacio

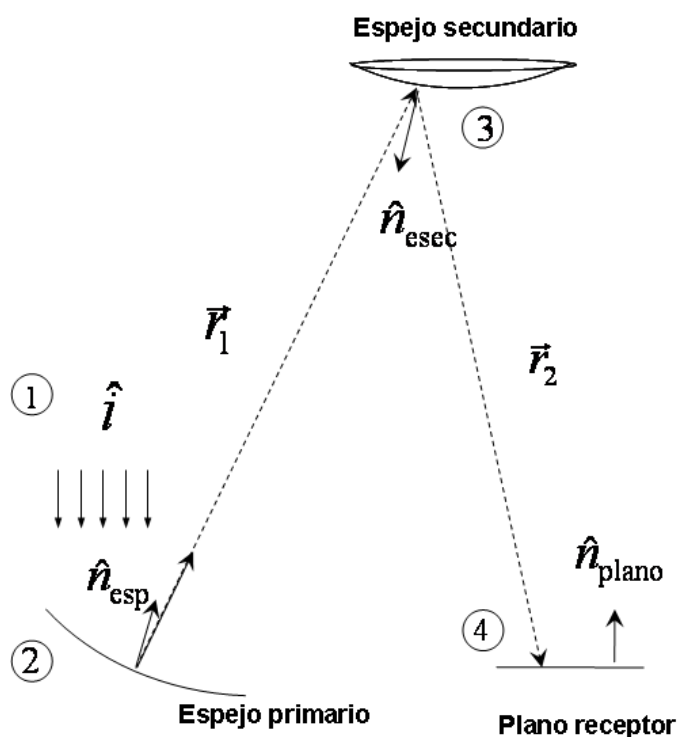


Figura 3.1: (1) Rayos incidentes; (2) reflexión sobre el espejo esférico primario; (3) reflexión sobre el espejo secundario; (4) incidencia en el receptor.

de posibles puntos de incidencia y direcciones, de acuerdo con alguna regla apropiada y se propaga un rayo por cada uno de los nodos de esta discretización. En el método Monte Carlo, utilizado en el presente trabajo, el muestreo es aleatorio: se simula un número predeterminado de rayos escogiendo para cada uno de ellos el punto de incidencia y la dirección con base en la generación de números aleatorios. Estos números aleatorios se escogen de acuerdo con las distribuciones de probabilidad que reflejen la física del proceso.

En el caso de los puntos de incidencia sobre un espejo, la distribución de probabilidad es uniforme, es decir, todos los puntos del espejo tienen la misma probabilidad de ocurrir, lo que representa bien la incidencia de un haz de irradiancia uniforme sobre su superficie. En el caso de las direcciones, no todas ocurren con la misma probabilidad, ya que la brillantez del disco solar no es la misma para todos los ángulos. Se interpreta en este caso la función de brillantez solar como una distribución de probabilidad Gaussiana.

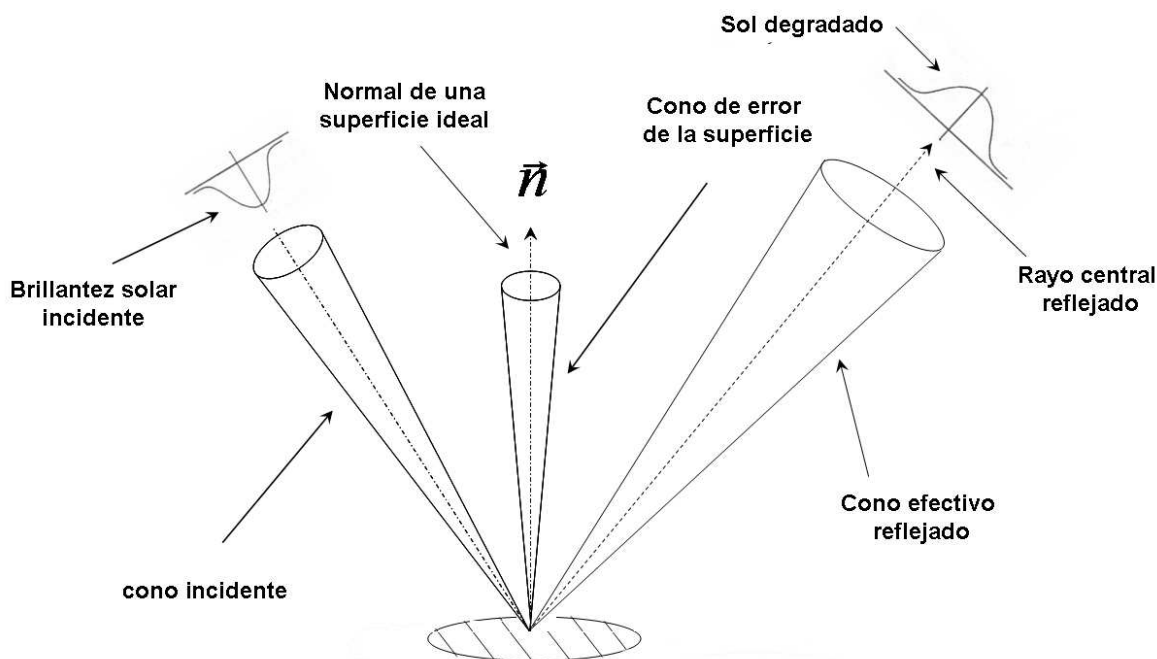


Figura 3.2: Representación estadística de reflexión sobre una superficie real.

En un espejo ideal se considera que la superficie es microscópicamente lisa, lo que significa que la normal en cualquier punto sólo está asociada a la geometría de la superficie. Sin embargo, en un espejo real (imperfecto) existen rugosidades que afectan la dirección de la normal, provocando un cono de reflexión difusa. A este hecho, es posible asociar una función de distribución que pueda representar el conjunto de las nuevas direcciones que toma normal sobre la superficie en un punto. En muchos materiales reflectores la función de distribución puede ser descrita por una distribución Gaussiana (Pettit, 1977). La manera de generar las nuevas direcciones, al igual que en el caso anterior, es por medio de números aleatorios.

3.3. Incidencia rayos sobre un casquete esférico

Podemos representar un casquete esférico a partir de tres parámetros: su radio de curvatura que es la distancia del centro de curvatura al espejo, su diámetro y el vector normal a su superficie, ubicado en su

centro como se muestra en la figura (3.3).

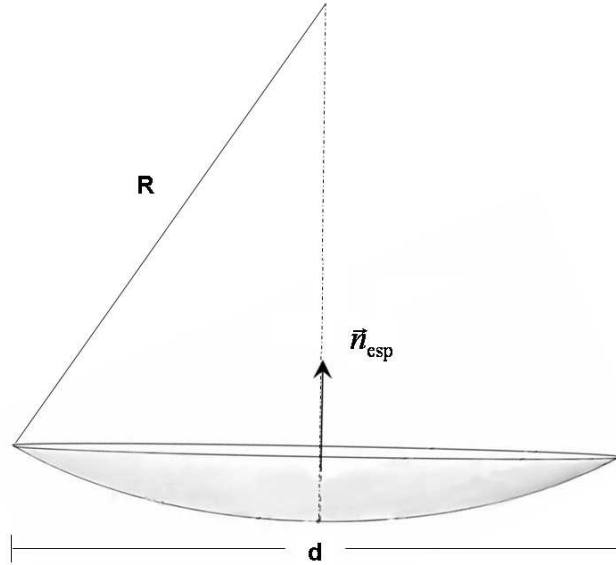


Figura 3.3: Casquete esférico primario de diámetro d , \hat{n}_{esp} el vector normal del espejo.

La normal del casquete esférico se determina como sigue

$$\hat{n}_{\text{esp}} = \cos\phi \sin\alpha \hat{i} + \cos\phi \cos\alpha \hat{j} + \sin\phi \hat{k} \quad (3.1)$$

donde, ϕ es el ángulo de inclinación del espejo, Figura 3.4 a), y α es su ángulo azimutal sobre el marco hexagonal, Figura 3.4 b).

Si el vector normal del casquete esférico es paralelo a los rayos del Sol, la proyección del espejo sobre una superficie plana es un círculo. Por otro lado, si está inclinado, la proyección será una elipse cuya área es función del ángulo inclinación ϕ .

Para simular la llegada de los rayos sobre la superficie del espejo, generaremos números aleatorios uniformemente distribuidos sobre su proyección, por medio de dos variables aleatorias (ξ, ω) , como se muestra en la figura 3.5

La representación paramétrica de cualquier punto en el interior de una elipse esta dado por la ecuación 3.2

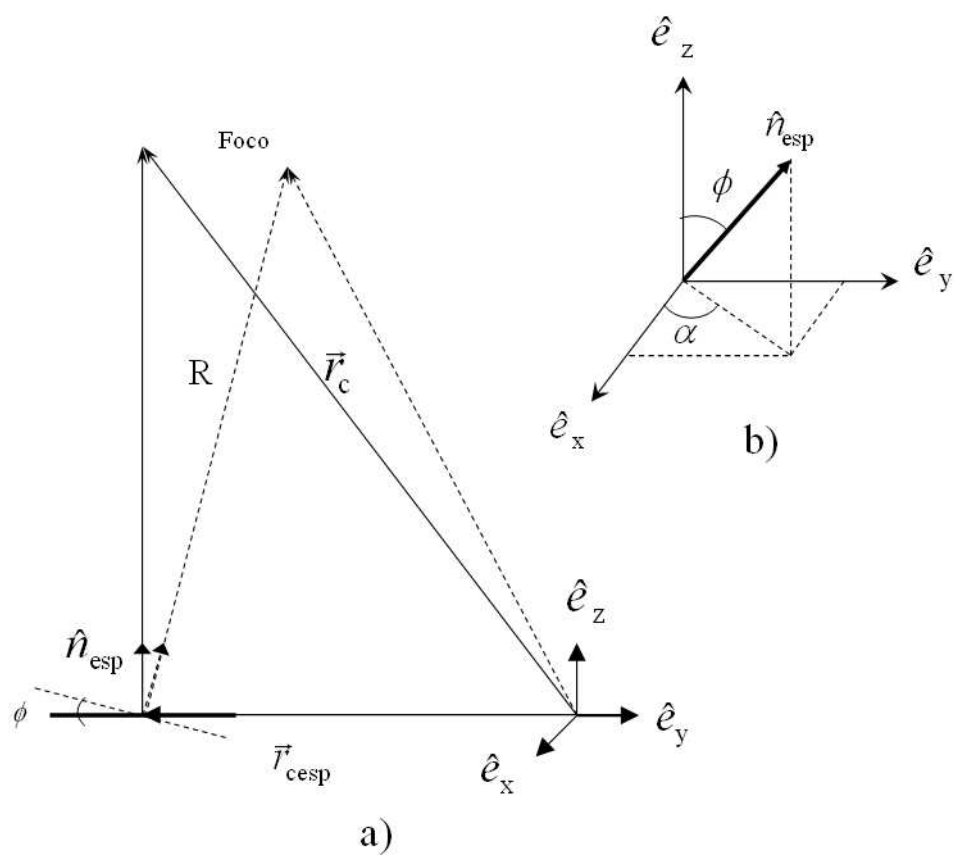


Figura 3.4: a) Espejo inclinado en 2D; b) Normal del espejo.

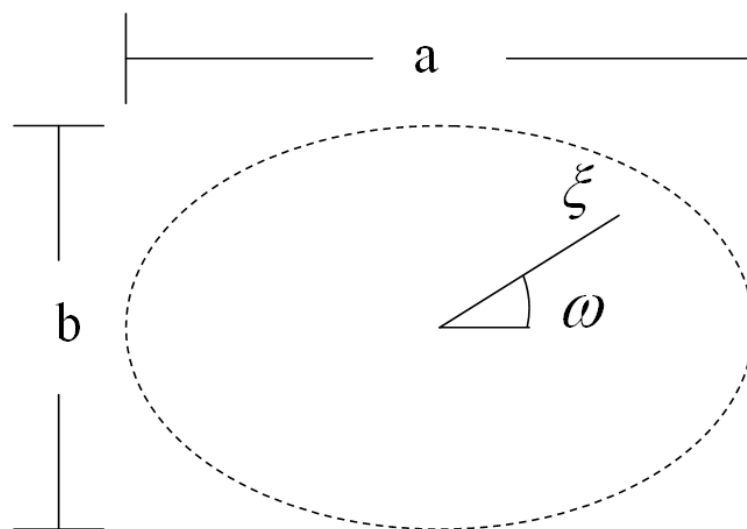


Figura 3.5: ξ, ω son variables que permiten ubicar los puntos aleatorios sobre la elipse.

$$\begin{aligned}x &= \xi \quad a \cos(\omega) \\y &= \xi \quad b \sin(\omega)\end{aligned}\tag{3.2}$$

$$0 \leq \xi \leq 1 \quad 0 \leq \omega \leq 2\pi$$

donde a y b representan los ejes mayor y menor de la elipse, respectivamente. Se define como centro de la elipse al punto donde cortan los semiejes y ξ es la distancia normalizada de un punto $P(x, y)$ hacia el centro de la elipse. ω es el ángulo que existe entre ξ y un eje de referencia. La figura (3.5) muestra la representa gráfica de estas variables aleatorias (ξ y ω).

Estos números se pueden generar a partir de dos números aleatorios uniformemente distribuidos A_i y B_i (vea apéndice D) como

$$\begin{aligned}\xi &= \sqrt{A_i} \\ \omega &= 2\pi B_i\end{aligned}$$

Una vez generado el punto de partida de un rayo aleatorio \vec{r}_{al} sobre una elipse, donde el su centro es ubicado por el vector \vec{r}_{ce} , proyectamos el rayo generado sobre la superficie del espejo como se muestra en la figura 3.6. La representación matemática de lo descrito, se escribe a continuación.

Recordemos que la ecuación de una esfera se puede representar en forma vectorial, como se ha explicado en la sección 2.4.2, de la siguiente manera

$$\vec{a} \cdot \vec{a} = R^2\tag{3.3}$$

donde \vec{a} es el vector que va del centro de curvatura a un punto sobre la superficie del espejo. R es el radio de curvatura.

$$\|\vec{a}\| = R$$

El vector al punto aleatorio, ubicado desde el origen \vec{r}_{pw} se escribe como

$$\vec{r}_{pw} = \vec{r}_{ce} + \vec{r}_{al}$$

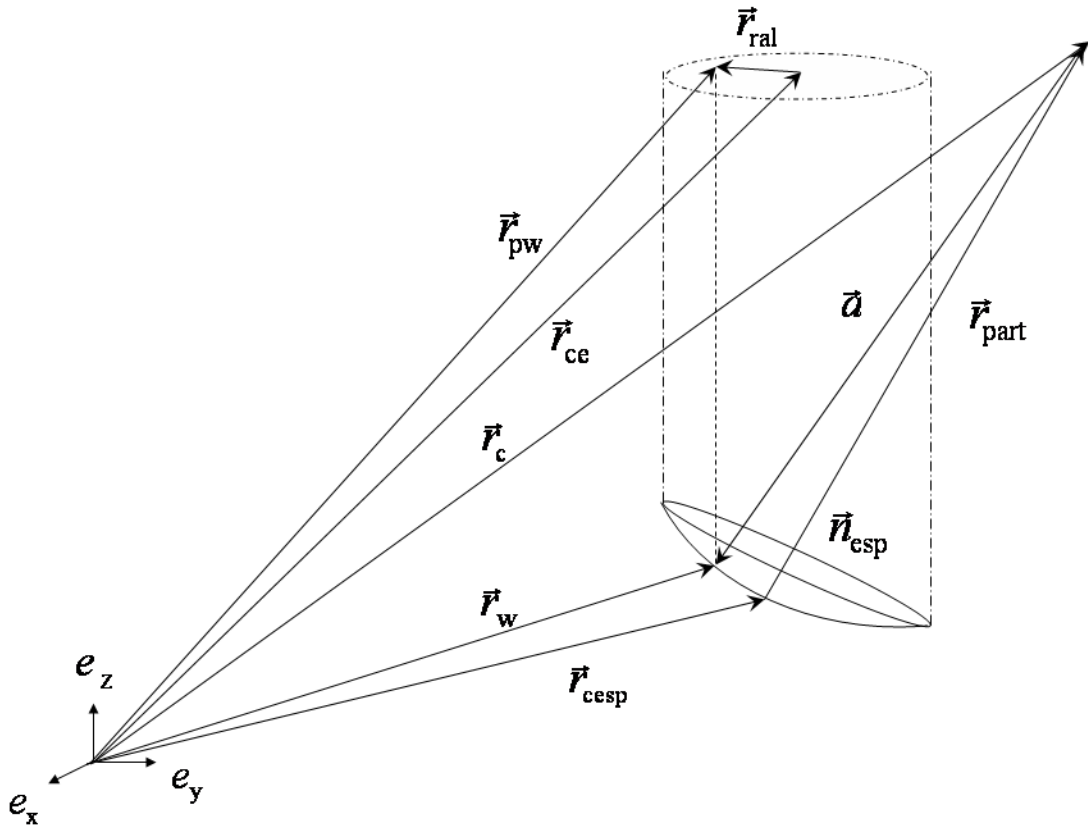


Figura 3.6: Representación del vector \vec{r}_w sobre el espejo.

donde \vec{r}_{al} es el vector aleatorio sobre la superficie elipsoidal descrita por

$$\vec{r}_{al} = \xi a \cos(\omega) \hat{e}_x + \xi b \sin(\omega) \hat{e}_y$$

y \vec{r}_{ce} es el vector que va del origen de coordenadas al centro de la elipse.

Por otro lado, si \vec{r}_w es el vector al punto de impacto sobre el espejo y \vec{r}_c es el vector al centro de curvatura del espejo, entonces se cumple que

$$\vec{a} = \vec{r}_w - \vec{r}_c .$$

Dado que las componentes del x y y del centro de la elipse coinciden con las componentes del centro del espejo, es fácil determinar el valor de z_w y con esto el valor del vector \vec{r}_w , que es el punto de impacto sobre sobre la superficie del espejo de interés.

Sustituyendo el valor del \vec{a} en la ecuación (3.3) podemos obtener el valor de z_w

$$(\vec{r}_w - \vec{r}_c) \cdot (\vec{r}_w - \vec{r}_c) = R^2$$

$$(x_w - x_c)^2 + (y_w - y_c)^2 + (z_w - z_c)^2 = R^2$$

$$z_w = \sqrt{R^2 - (x_w - x_c)^2 - (y_w - y_c)^2} + z_c$$

Con esto, podemos encontrar el valor de particular de $\vec{r}_w = \vec{r}_w(\xi, \omega)$.

$$\vec{r}_w = \vec{r}_{ce} + \vec{r}_{al} + \hat{k}(z_w - z_c) \quad (3.4)$$

El proceso se debe repetir para cada nuevo rayo trazado.

3.4. Rayo reflejado

Los rayos que inciden sobre la superficie del espejo primario, ubicados por el vector \vec{r}_w , son reflejados obedeciendo la ley de reflexión.

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

donde \hat{r} el rayo reflejado, \hat{i} es el rayo incidente y \hat{n} se conoce como la normal particular para cada punto de impacto sobre la superficie del espejo.

En una superficie ideal se considera que el rayo será reflejado con el mismo ángulo de incidencia; esto no sucede con una superficie real, debido al error de superficie el cual puede ser descrita por una distribución Gaussiana, donde σ_{error} representa la desviación estandar del error de la superficie. La reflexión puede darse en un cono de probabilidad donde el rayo reflejado \hat{r}' es la suma del rayo central del cono \hat{r} más el vector desviación $\vec{\delta}$

$$\hat{r}' = \hat{r} + \vec{\delta} \quad (3.5)$$

Para expresar matemáticamente lo anterior, es necesario definir dos nuevos ejes (\hat{e}_1, \hat{e}_2) ubicados sobre el cono como se muestra en la Figura 3.7. Una forma de definir estos ejes es buscar cualquier vector \hat{v} que no sea paralelo a \hat{r} . Entonces se define

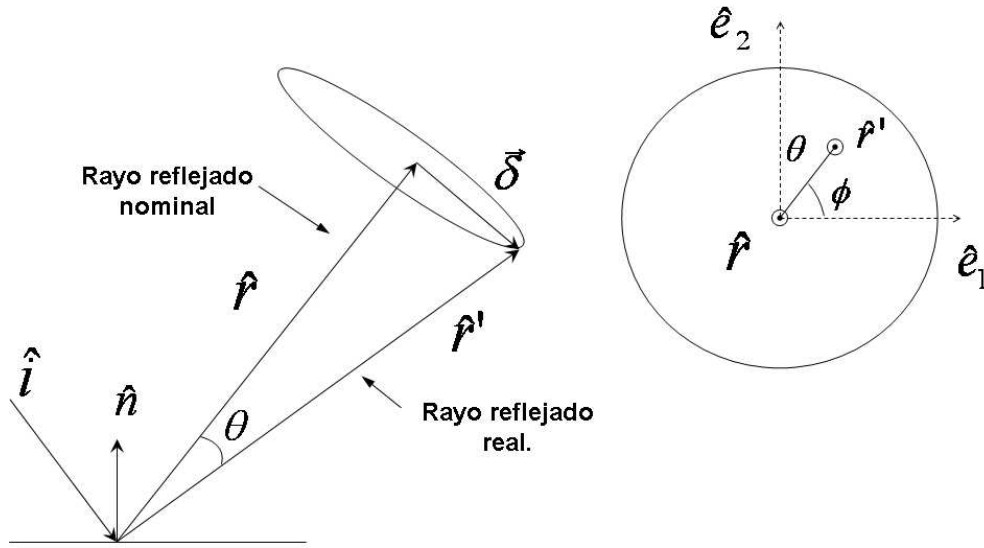


Figura 3.7: Cono de error.

$$\hat{e}_1 = \frac{\hat{v} \times \hat{r}}{\|\hat{v} \times \hat{r}\|} \quad (3.6)$$

$$\hat{e}_2 = \hat{r} \times \hat{e}_1 \quad (3.7)$$

y se puede ver que \hat{e}_1, \hat{e}_2 y \hat{r} forman un nuevo sistema de referencia ortogonal.

Usando este sistema de referencia

$$\vec{\delta} = \theta \cos\phi \hat{e}_1 + \theta \sin\phi \hat{e}_2 \quad (3.8)$$

donde $\vec{\delta}$ es el vector desviación, θ y ϕ son variables aleatorias, que permiten ser simuladas usando el método de Monte Carlo.

En nuestro código de trazados de rayos se simulan los errores y el cono solar por separado ($\sigma_{\text{solG}}, \sigma_s$). No obstante la desviación estándar del cono de incidencia y la desviación estándar del error de superficie, pueden representarse mediante un solo cono que llamaremos: cono de Sol degradado

$$\sigma_{\text{sdegr}} = \sqrt{(\sigma_{\text{solG}})^2 + (\sigma_{\text{error}})^2}.$$

Lo anterior sugiere que los rayos sean emitidos dentro del cono de Sol degradado, a partir de la superficie del espejo primario, en cada punto de impacto y no propiamente desde el Sol. Esto es sólo una interpretación conveniente dado que en ambos casos, brillantez solar y errores de superficie, se consideran una función de distribución Gaussiana. Aunque no consideramos este caso en la evaluación de los resultados finales, encontramos que simular los dos conos de manera independiente o bien una suma cuadrática de ambos dan los mismos resultados.

3.5. Cono de probabilidades

Tanto la distribución de brillantez solar como el cono de error de superficie son representados en este trabajo por distribuciones Gaussianas. En particular estas distribuciones son Gaussianas bivariadas, definidas en dos direcciones perpendiculares dentro del cono (Figura 3.7). Una distribución normal para datos univariados (1D) esta dada por la siguiente ecuación

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{[-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma_1})^2]} \quad (3.9)$$

donde μ es la media, σ_1 es la desviación estándar. La probabilidad de que ocurra un evento sobre una Gaussiana bidimensional (datos bivariados) está dada por el producto de dos gaussianas de 1D normalizadas. Así

$$E_{2D}(\theta_1, \theta_2) = f(\theta_1)g(\theta_2)$$

Si:

$$f(\theta_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{\theta_1^2}{2\sigma_1^2}}$$

$$g(\theta_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{\theta_2^2}{2\sigma_2^2}}$$

$$E_{2D} = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta_1^2}{\sigma_1^2} + \frac{\theta_2^2}{\sigma_2^2}\right)} \quad (3.10)$$

Si consideramos una distribución de tal manera que $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ y $\theta^2 = \theta_1^2 + \theta_2^2$ implica que la distribución es simétrica en todas direcciones,

luego entonces que la distribución de E_{2D} adquiere la forma siguiente:

$$E_{2D} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \mathbf{e}^{-\left(\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (3.11)$$

Un rayo dentro de un cono puede ser ubicado por dos variables aleatorias θ y ϕ (Figura 3.7).

$$\theta_1 = \theta \cos\phi \quad \theta_2 = \theta \sin\phi \quad (3.12)$$

Si la función de probabilidad es una Gaussiana estas variables están dadas por (Apendice E)

$$\theta = \sqrt{-2\sigma^2 \ln(1 - A_1)}$$

$$\phi = 2\pi B_1$$

Donde θ es la variable longitudinal dentro del cono y ϕ es la variable angular $0 \leq \phi \leq 2\pi$. A_1 y B_1 son numeros aleatorios uniformemente distribuidos en el rango $[0;1]$.

3.6. Espejo secundario esférico

Al igual que el espejo primario, representaremos el espejo secundario a partir de tres parámetros: radio de curvatura, diámetro y el vector normal a su superficie, ubicado en su centro. Los rayos que intercepten la superficie del espejo secundario serán reflejados obedeciendo la ley de reflexión. El punto de impacto de los rayos sobre la superficie del espejo están dados por el vector \vec{a}_2 . Figura (3.8)

$$\vec{a}_2 = \vec{r} - \vec{r}_{\text{cesec}} \quad (3.13)$$

\vec{r}_{cesec} es el vector al centro de curvatura del espejo secundario, R_{esec} es el radio del espejo. La recta que corta el espejo secundario en la dirección \hat{r}' se representa como

$$\vec{r} = \vec{r}_w + tr' \quad (3.14)$$

Sustituyendo la ecuación (3.13) y (3.14) en la ecuación vectorial de una esfera ec. (3.3), obtenemos

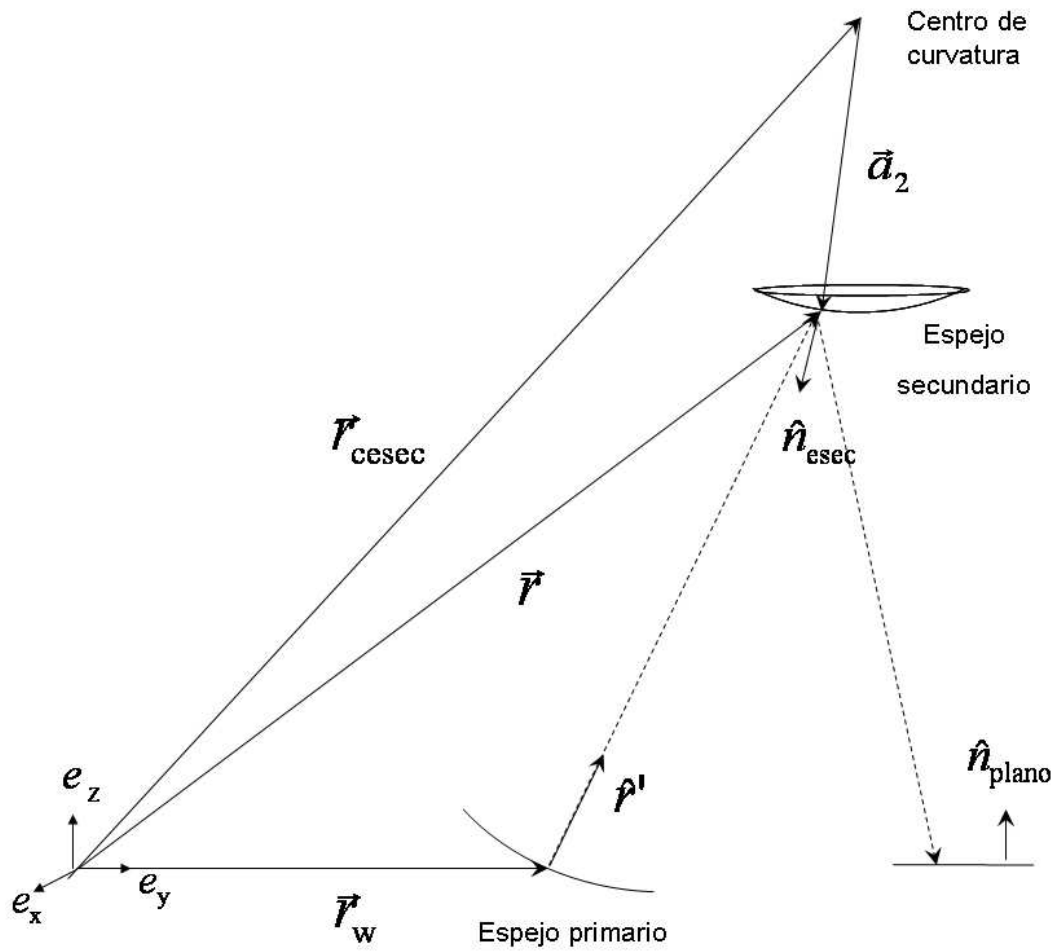


Figura 3.8: Rayo reflejado que intercepta el espejo secundario.

$$(\vec{r}_w + t\hat{r}' - \vec{r}_{cesec}) \cdot (\vec{r}_w + t\hat{r}' - \vec{r}_{cesec}) = R_{esf}^2$$

$$t^2 + 2\hat{r}' \cdot (\vec{r}_w - \vec{r}_{cesec})t + (\vec{r}_w - \vec{r}_{cesec}) \cdot (\vec{r}_w - \vec{r}_{cesec}) - R_{esf}^2 = 0 \quad (3.15)$$

resolvemos la ecuación cuadrática y determinamos si existe intersección alguna.

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Donde:

$$a = 1$$

$$\begin{aligned}
b &= 2\hat{r}' \cdot (\vec{r}_w - \vec{r}_{\text{cesec}}) \\
c &= (\vec{r}_w - \vec{r}_{\text{cesec}}) \cdot (\vec{r}_w - \vec{r}_{\text{cesec}}) - r_{\text{esf}}^2 \\
k &= (2\hat{r}' \cdot (\vec{r}_w - \vec{r}_{\text{cesec}}))^2 - 4(\vec{r}_w - \vec{r}_{\text{cesec}}) \cdot (\vec{r}_w - \vec{r}_{\text{cesec}}) - r_{\text{esf}}^2
\end{aligned}$$

k se conoce como discriminante, si:

$k < 0 \Rightarrow$ no existe intersección alguna.

$k = 0 \Rightarrow$ existe una sola intersección

$k > 0 \Rightarrow$ existen dos intersecciones.

Una vez obtenidas las intersecciones del rayo con el espejo calculamos la normal al punto de impacto y reflejamos el rayo de la misma forma como se explica en la sección (3.5).

3.7. Intersección del rayo reflejado con un plano

Llamaremos \vec{r}_{plano} al vector que ubica el plano en nuestro sistema coordenado. El rayo reflejado abandona la superficie en la dirección \hat{r} , y recorre una distancia t antes de chocar con el plano. Como se observa en la figura (3.9). Podemos representar un plano de manera algebraica mediante la siguiente expresión.

$$\hat{n}_{\text{plano}} \cdot \vec{r}_{\text{dis}} = 0 \quad (3.16)$$

donde \hat{n}_{plano} es el vector normal al plano y \vec{r}_{dis} es el vector al punto de intersección.

\vec{r}_{dis} es el vector que ubica el punto de impacto sobre el plano receptor y lo podemos expresar como

$$\vec{r}_{\text{dis}} = \vec{r} - \vec{r}_{\text{plano}} \quad (3.17)$$

\vec{r} es la recta que corta al plano en la dirección del rayo reflejado. Sustituyendo la ecuación (3.17) en \vec{r}_{dis} en la ecuación (3.16) obtenemos

$$\hat{n}_{\text{plano}} \cdot (\vec{r}_0 + t\hat{r} - \vec{r}_{\text{plano}}) = 0$$

despejando t de la ecuación tenemos

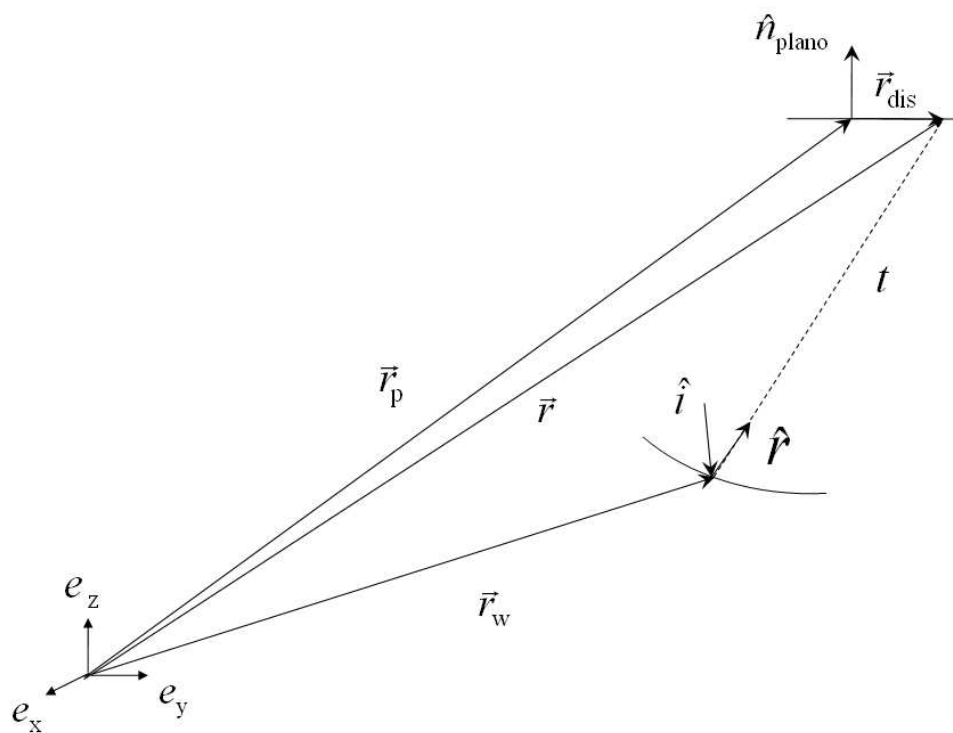


Figura 3.9: Intersección del rayo reflejado con un plano

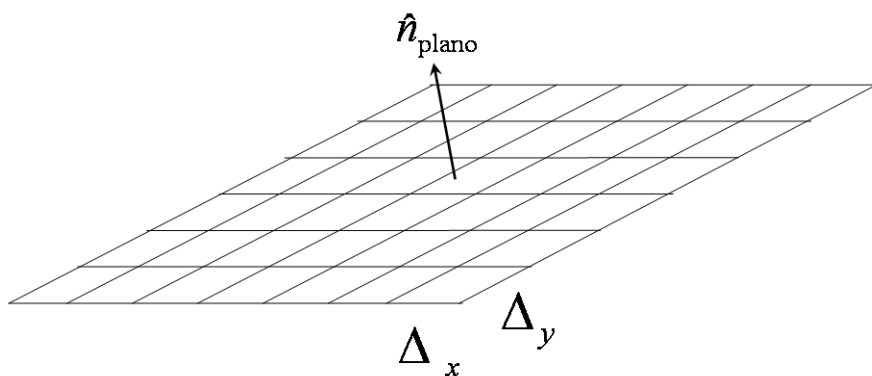


Figura 3.10: Discretización de un plano.

$$t = -\frac{\hat{n}_{\text{plano}} \cdot (\vec{r}_0 - \vec{r}_{\text{plano}})}{\hat{n}_{\text{plano}} \cdot \hat{r}} \quad (3.18)$$

t es la distancia que recorre el rayo en la dirección \hat{r} que corta el plano l . Todos los rayos que arriban al receptor serán contabilizados. Para hacerlo, discretizamos el plano receptor en elementos de tamaño Δx y Δy en la dirección x y y , respectivamente. Así cada rayo ubicado por el vector \vec{r}_{dis} sobre el plano puede ser ubicado en una casilla.

3.8. Características del espejo secundario

Si un rayo emitido de un punto S impacta una superficie reflectora en el punto A , este será reflejado con el mismo ángulo de incidencia, respecto a la normal en el punto de impacto, cortando el eje central en un punto P .

$$\theta_i = \theta_r$$

Cuando se trata de superficies esféricas (región paraxial) la formula que relaciona estos dos puntos, S y P se escribe como.

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} \quad (3.19)$$

donde s_i y s_o son las distancia que ubican estos puntos, S y P respectivamente, medidos a partir del vértice V (Figura 3.11).

La ecuación (3.19) se denomina la fórmula de los espejos y es aplicable tanto a espejos cóncavos ($R < 0$) como convexos ($R > 0$) (Hetch., 2000). Dado que

$$\text{si } s_i \rightarrow \infty \implies s_o = f_o$$

por otro lado

$$\text{si } s_o \rightarrow \infty \implies s_i = f_i$$

considerando los criterios anteriores y evaluándolos en la ecuación (3.19) se puede ver que

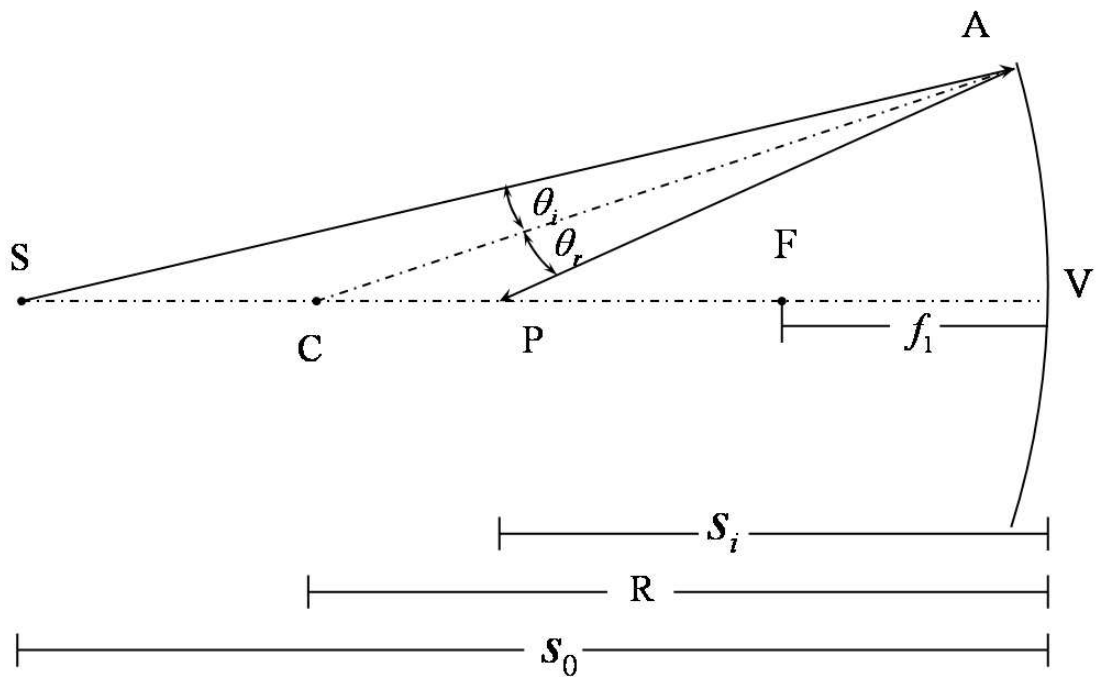


Figura 3.11: Espejo esférico cóncavo.

$$f_i = f_o = -\frac{R}{2} \quad (3.20)$$

Finalmente la formula para los espejos, en términos de las distancia focales se expresa como

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (3.21)$$

Dado que en nuestro análisis involucraremos un espejo secundario, combinamos las ecuaciones dos sistemas de espejos como se muestra en la figura 3.12.

Para definir las características del espejo secundario exigimos que el foco del sistema se localice en el plano de los espejos primarios. Podemos estimar el radio de curvatura del espejo secundario usando la la ecuación 3.23 para un sistema de dos espejos combinados.

El radio de curvatura (R_{curv}) que toma cada espejo al varia su altura sobre el eje del sistema h_z , se determina usando la ecuación 3.23

$$R_{\text{curv}} = 2 \frac{s_o (d - f_1)}{s_o + d - f_1} \quad (3.22)$$

donde s_0 es la distancia del foco secundario medido a partir del vértice del espejo secundario. d es la distancia de que existe entre el foco primario y el vértice del espejo secundario y f_1 es la distancia focal de espejo primario.

si $s_0 = d$ la ecuación se reduce a

$$R_{\text{curv}} = \frac{2 d (d - f_1)}{2d - f_1} \quad (3.23)$$

El radio del espejo secundario (R_{esec}) se determina usando

$$r_{\text{esec}} = h_z \left[\frac{d_{\text{ext}} - r_{\text{spot}}}{f_1} \right] + r_{\text{spot}} \quad (3.24)$$

donde h_z representa la altura del espejo secundario sobre el eje z , d_{ext} es la distancia máxima al borde de un espejo el grupo C partiendo del origen de nuestro sistema. r_{spot} representa el radio del spot y f_1 es la distancia focal del sistema (200 cm), tal como se muestra en la figura 4.9.

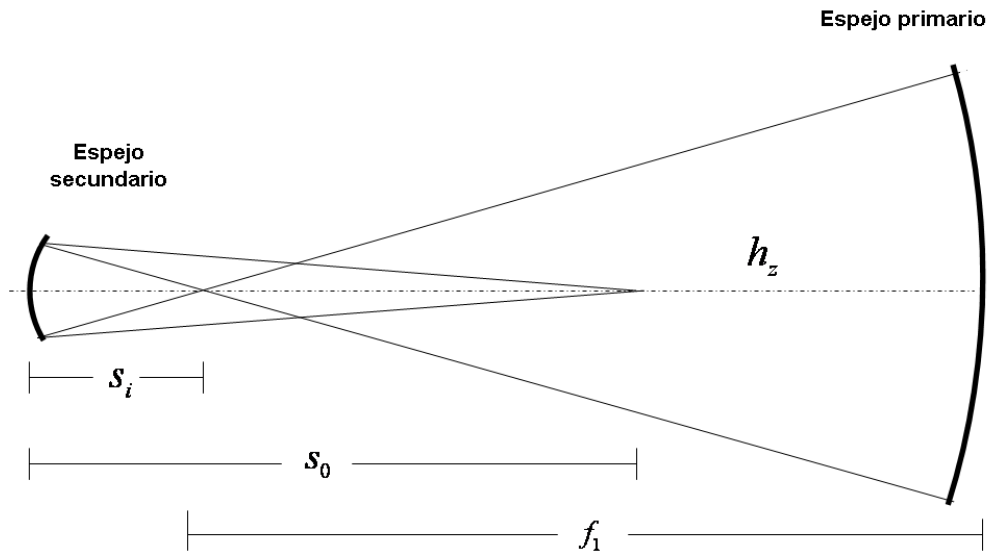


Figura 3.12: Sistema de dos espejos combinados.

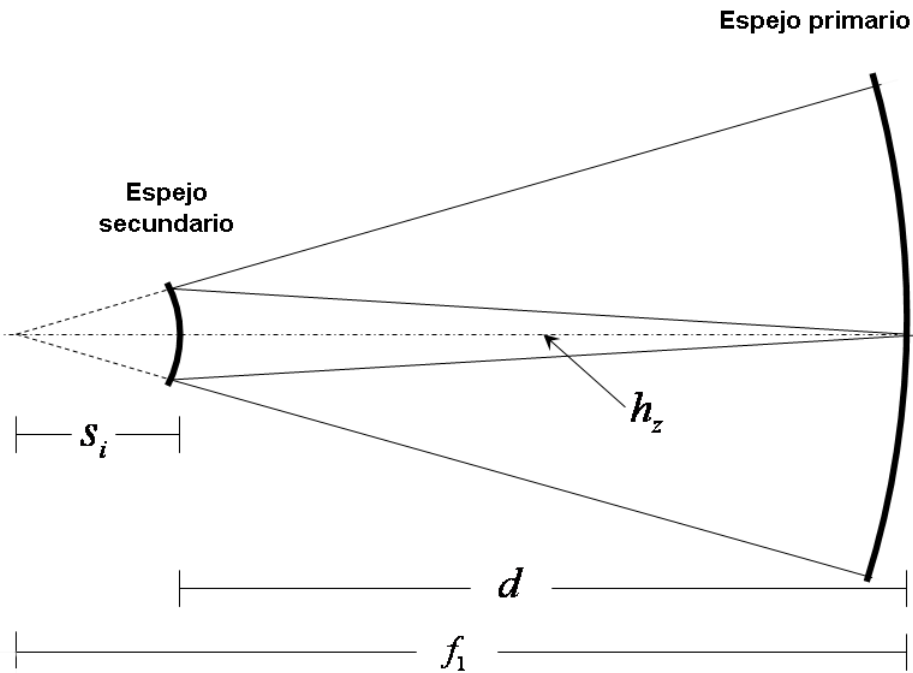


Figura 3.13: Espejo secundario convexo.

3.9. Determinación de concentración del flujo sobre el receptor

La potencia que incide sobre cualquiera de los espejos primarios está dada por

$$P_{\text{espejo}} = A G_b \cos \phi \quad (3.25)$$

donde G_b es la radiación incidente, A es el área de captación y ϕ es el ángulo de inclinación.

Si se simula este espejo usando un número N de rayos la potencia de cada rayo está dado por

$$P_{\text{rayo}} = \frac{P_{\text{espejo}}}{N_{\text{rayos}}} \quad (3.26)$$

donde N_{rayos} es el número de rayos que inciden sobre el espejo primario.

Después de la propagación, si se contaron $N_{i,j}$ rayos en la casilla (i, j) de receptor, esto corresponderá a una potencia

$$P_{i,j} = N_{(i,j)} P_{\text{rayo}} \quad (3.27)$$

El flujo radiativo incidente en la casilla de tamaño $\Delta x \cdot \Delta y$ es por tanto

$$q_{(i,j)} = N_{(i,j)} \frac{P_{\text{rayo}}}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (3.28)$$

Finalmente sustituyendo (3.25) la concentración de flujo en esa casilla está dado por

$$C_f(i, j) = \frac{q_{(i,j)}}{G_{rmb}} = N_{i,j} \frac{A \cos\phi}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (3.29)$$

En este capítulo se ha discutido en detalle las formulas que se utilizan en el algoritmo de trazado de rayos. La implementación de dicho algoritmo se llevo a cabo en el lenguaje de programación Fortran 90 y el texto del programa se encuentra en el apéndice F. En el próximo capítulo se presentan la validación de este código contra los resultados del código CIRCE2, para el caso del DEFRAC sin concentrador secundario, así como los resultados que se obtienen con el presente programa en el caso cuando ya se introduce un espejo secundario.

Capítulo 4

Validación y resultados

En éste capítulo se discute los resultados de aplicar el método de Monte Carlo en el trazado de rayos y compararlos con los resultados obtenidos por el código de CIRCE2. El estudio se realiza en dos etapas: la primera de ellas consiste en validar el código que hemos desarrollado, el cual lleva por nombre TRECSol-E (Trazado de Rayos Estocásticos para Concentradores Solares caso Esférico), con el CIRCE2, para la simulación del concentrador DEFRAC sin modificar, es decir sin espejo secundario. La segunda etapa consiste en implementar un espejo esférico secundario analizando los flujos concentrados en un plano ubicado sobre el foco del sistema. Finalmente se evalúa la potencia total concentrada y el pico de concentración en función de la distancia del espejo secundario sobre el plano de espejos primarios. Cabe aclarar que la distancia focal y el diámetro del espejo secundario varían con su posición de acuerdo con los criterios discutidos en el capítulo anterior.

4.1. Validación del código TRECSol-E con el CIRCE2.

El código CIRCE2 (Convolution of Incident Radiation with Concentrator Errors 2) es un programa que permite modelar el funcionamiento óptico de concentradores solares de foco puntual. Desarrollado a principios de los 90 's por Vicente J. Romero en los Laboratorios Nacionales Sandia, Albuquerque, Nuevo México (Romero., 1994). Es un sistema que permite estimar distribuciones de flujo en 3D, y potencia total sobre absorbedores los cuales pueden presentar diferentes configuraciones. En el CIRCE2 es posible modelar concentradores parabólicos, esféricos, entre otros, considerando en la modelación un sol tabular o un sol Gaussiano según sea el caso de interés. Sin embargo CIRCE2 no incluye la posibilidad de modelar espejos secundarios, razón por la cual hemos desarrollado el código TRECSol-E.

El estudio de validación del código TRECSol-E con el CIRCE2 se ha desarrollado de la siguiente manera: se simuló el concentrador DEFRAC sin espejo secundario tanto con el código CIRCE2 como con el desarrollado en el presente trabajo. Esta validación se consideró necesaria antes de pasar a simulaciones con espejo secundario.

Nuestro análisis considera dos casos con el CIRCE2, (1) Una distribución solar tabular (discutida en la sección 2.1) y (2) Una distribución solar Gaussiana (discutida en la sección 2.1.1). Con el programa TRECSol-E sólo se considera una distribución solar Gaussiana.

En primer lugar analizamos un espejo centrado en el eje del sistema variando el error de superficie (σ_{error}) y manteniendo constante la desviación (σ_{solG}) ya que en ambos casos consideramos una distribución solar Gaussiana. Continuamos analizando un espejo de cada grupo del DEFRAC A,B,C respectivamente, y finalmente, comparamos el flujo concentrado de los 18 espejos.

4.1.1. Espejo centrado en el eje óptico

La primera simulación que se lleva a cabo es la de un solo espejo primario centrado en el eje óptico del sistema, tanto con el código CIR-

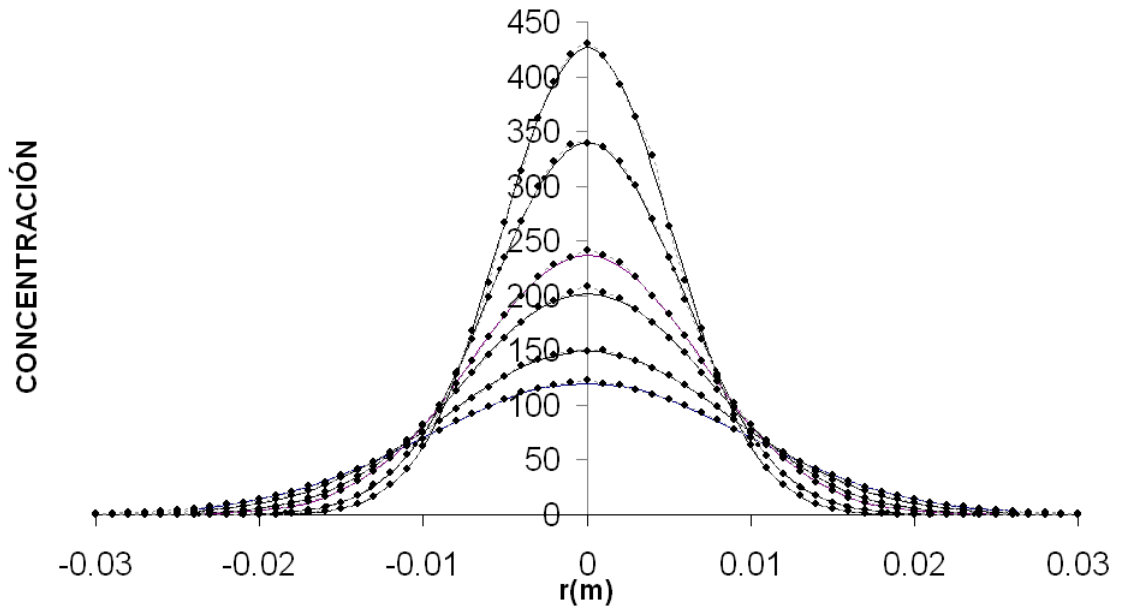


Figura 4.1: Distribución de flujo sobre un plano a 2 m sobre el espejo usando diferentes valores de σ_{error} , de arriba hacia abajo (0.05, 0.65, 1.15, 1.35, 1.75, 2.05 mrad): CIRCE2 (línea continua) y TRECSol-E (línea discontinua con puntos).

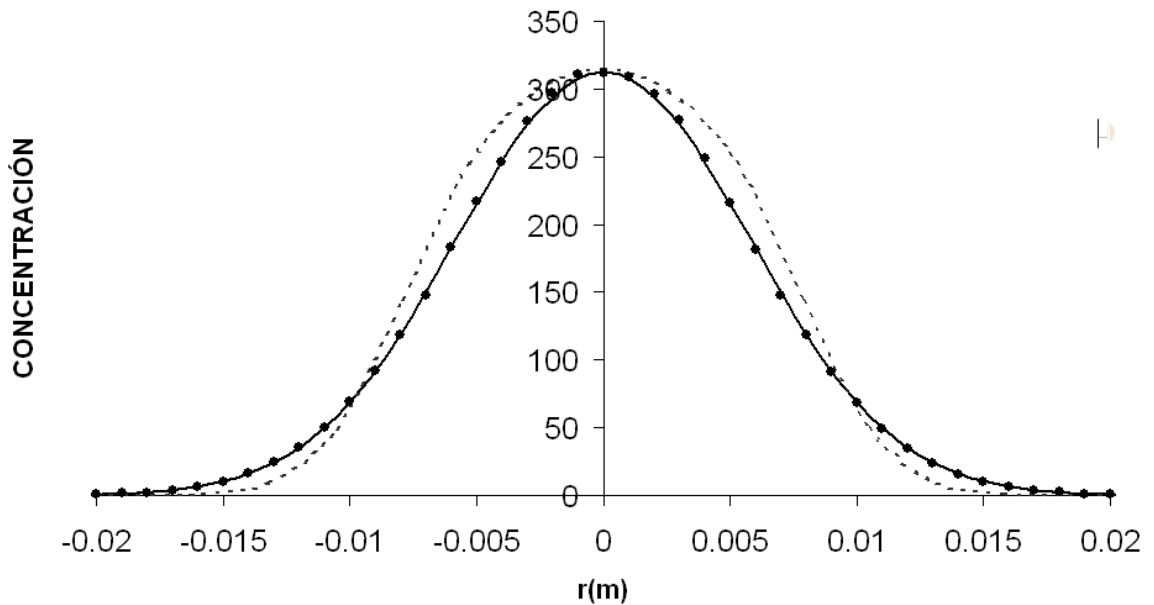


Figura 4.2: Espejo centrado con $\sigma_{\text{error}} = 0.65$ mrad y $\sigma_{\text{sol}} = 2.55$. CIRCE2 (a) un sol tabular (líneas punteadas), (b) una distribución solar gaussiana (Línea continua). TRECSol-E con el sol Gaussiano (línea gris con puntos negros)

CE2 como el TRECSol-E, variando el error de superficie del mismo. Se considera en esta y en todas las subsiguientes simulaciones un valor de $\sigma_{\text{solG}} = 2.55$ mrad para la representación Gaussiana de la distribución de brillantez solar. Al variar el error de superficie observamos que existe una muy buena aproximación entre los resultados obtenidos por ambos códigos para todos los casos, como se puede apreciar en la figura 4.1. De hecho el error en el pico de concentración no supera en ningún caso 2%. Esto es destacable dada la diferencia de metodologías entre ambos códigos. De hecho los errores pueden ser bastante mayores en las zonas de muy baja concentración de la distribución de flujo, lo cual sin embargo representa un porcentaje muy bajo de la energía contenida en la curva.

Trabajos previos de la Coordinación de Concentración Solar del CIE, reportan que el error de superficie para los espejos del DEFRAC es 0.65 mrad (Quiñones,1998; Pérez-Rábago, 2003), por lo cual consideramos este valor como una propiedad fija durante toda la simulación subsiguiente. La figura 4.2 muestra la comparación de los resultados obtenidos con CIRCE2 y TRECSol-E considerando este valor particular. Nótese que los resultados obtenidos por ambos códigos son muy parecidos, aunque difieren de la simulación con CIRCE cuando se usa un sol tabular.

4.1.2. Espejos fuera de eje

Un análisis similar se realiza para un espejo de cada uno de los grupos del DEFRAC, denominados A, B y C respectivamente, de acuerdo a su distancia con respecto al eje óptico. En la figura 4.3 se muestra el flujo concentrado para un espejo del grupo A. El espejo se encuentra ubicado a 31.7 cm del origen, sobre el plano x, y , con un ángulo de inclinación $\phi = 4.5^\circ$. En la figura 4.4 se muestra lo mismo para un espejo del grupo B, ubicado a 54.8 cm del origen e inclinado a $\phi = 7.6^\circ$. En la figura 4.5 se muestra el caso de un espejo del grupo C, ubicado a 63.3 cm del origen e inclinado a $\phi = 8.7^\circ$. Nuevamente observamos, como en el caso centrado, que la correspondencia entre ambos códigos es muy buena. De hecho, los errores en los picos concentración son de

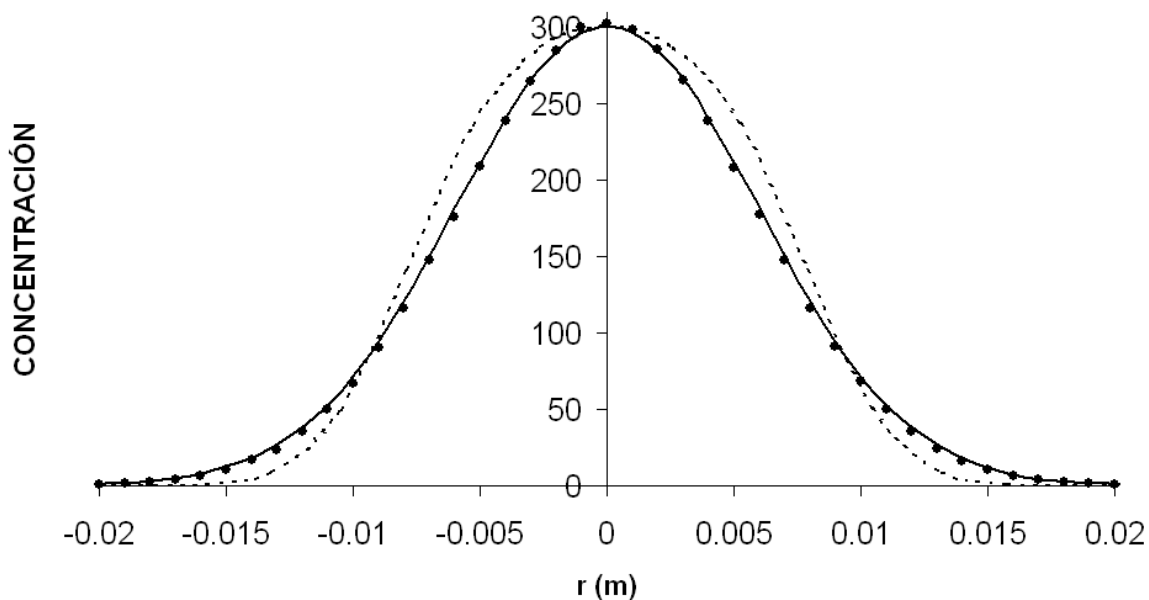


Figura 4.3: Flujo concentrado para un espejo del grupo A usando CIRCE2 (a) un sol tabular (líneas punteadas), (b) una distribución solar gaussiana $\sigma=2.55$ mrd (Línea continua). MCESol utiliza una distribución solar Gaussiana (línea gris con punto negro)

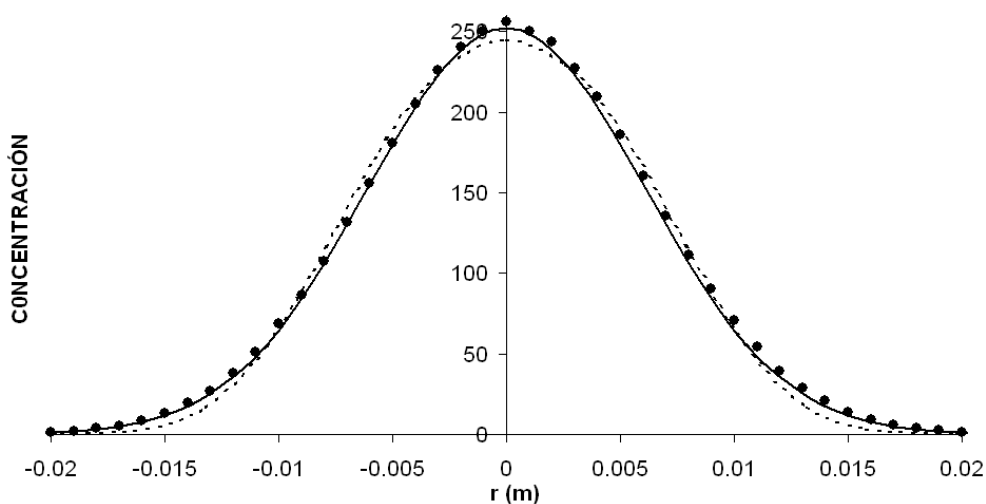


Figura 4.4: Flujo concentrado para un espejo del grupo B usando Circe2 1) sol tabular(líneas punteadas) 2)Usando una distribución solar gaussiana (Línea continua). MCESol 1) Considera una distribución solar Gaussiana

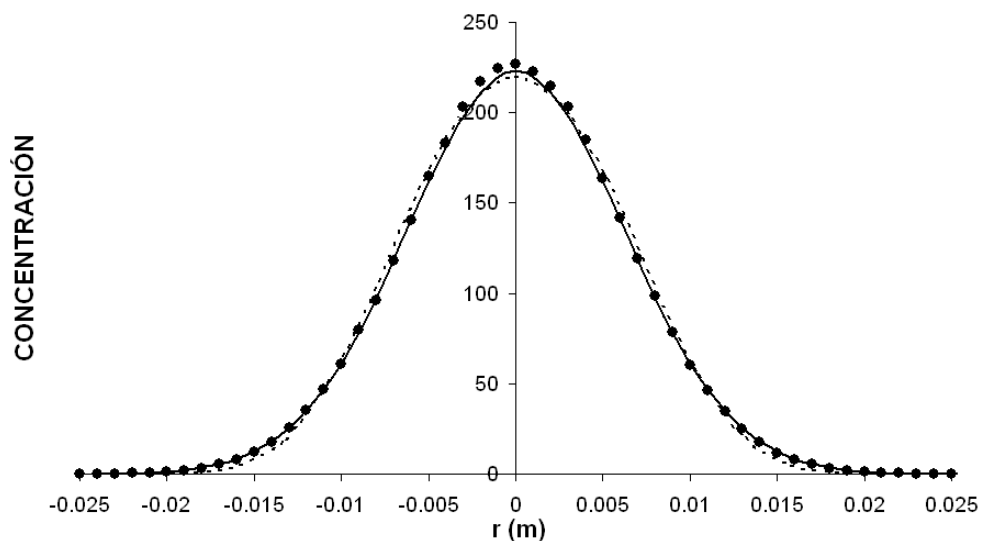


Figura 4.5: Flujo concentrado para un espejo del grupo C usando Circe2 1) sol tabular(líneas punteadas) 2)Usando una distribución solar gaussiana (Línea continua). MCEsol 1)Considera una distribución solar Gaussiana

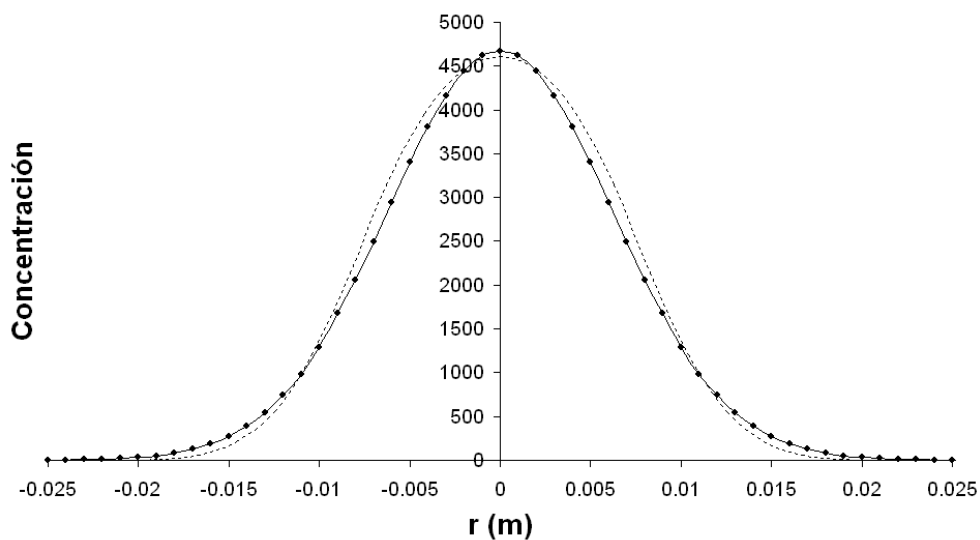


Figura 4.6: Flujo concentrado para los 18 espejos del DEFRAC usando en CIRCE2 1) un sol tabular (líneas punteadas) 2)Usando una distribución solar gaussiana (Línea continua). MCEsol utiliza una distribución solar Gaussiana $\sigma=2.55$ mrd (punto negro)

0.84, 0.39 y 0.61 %, para los espejos del grupo A, B y C, respectivamente; mientras que los errores absolutos promediados sobre todos los puntos en cada una de estas curvas son de 1.96, 1.98 y 0.48 soles, respectivamente. Finalmente, en la figura 4.6 se muestra una comparación del flujo concentrado para los 18 espejos del DEFRAC, usando en el CIRCE2 tanto una distribución solar tabular como una Gaussiana y en el programa TRECSol-E un sol Gaussiano. En este caso error relativo en el pico de concentración es de 2 % y el error absoluto promediado sobre toda la distribución es de 5 soles. Podemos concluir que existe una buena correspondencia entre ambos códigos, sobre todo en las zonas de muy alta concentración de flujo. En las zonas de baja concentración los errores relativos puede ser significativos debido a la imprecisión natural de los métodos que se están utilizando, lo cual no es importante para un código de sistema de alta concentración ya que estos errores son insignificante en términos de la fracción de la energía total que representan.

4.2. Espejo secundario.

Una vez validada la primera etapa con el CIRCE2, incorporamos el espejo secundario en el código de trazado de rayos TRECSol-E. La validación del código para espejo secundario no se puede hacer contra CIRCE ya que dicho software no tiene esa capacidad. Por lo tanto, la validación se tuvo que hacer por auto consistencia y se desarrollo en dos casos: (1) consideramos un espejo plano como espejo secundario, el cual se ubicó a 1 m por encima del origen y (2) consideramos un espejo esférico convexo con una radio de curvatura muy grande, es decir, prácticamente plano (50000 cm) colocándolo, de igual manera que el espejo plano, a 1 m por encima de origen.

Los rayos reflejados por el espejo secundario son interceptados por el plano receptor del sistema, localizado en el plano de los espejos primarios. Estos dos casos se compara contra la simulación sin espejo secundario y examinando el flujo sobre el plano focal original del DEFRAC, que se ubica a 2 m sobre el plano de espejos primarios. En teoría

al colocar un espejo secundario plano (o de radio de curvatura extremadamente grande) sin error de superficie a la mitad de la distancia focal del DEFRAC (figura 4.7 b), debe producir sobre el foco secundario la misma distribución de flujo que se obtiene al concentrar el flujo de los 18 espejos sobre el foco primario (figura 4.7 a), ya que en este caso el espejo secundario solamente “dobla” los rayos. En esta primera etapa no se considera la sombra producida por el espejo secundario sobre los espejos primarios, para que en efecto se pueda esperar que ambas situaciones sean iguales.

La figura 4.8 muestra la comparación del flujo concentrado para los tres caso: (1) distribución de flujo sobre el plano primario, (2) flujo concentrado sobre receptor secundario, usando un espejo secundario plano (3) flujo concentrado sobre el receptor secundario usando un espejo secundario esférico con un radio de curvatura de 50000 cm. Se puede apreciar que la diferencia entre cada uno de ellos es muy pequeña y atribuible a las fluctuaciones estadísticas naturales del método.

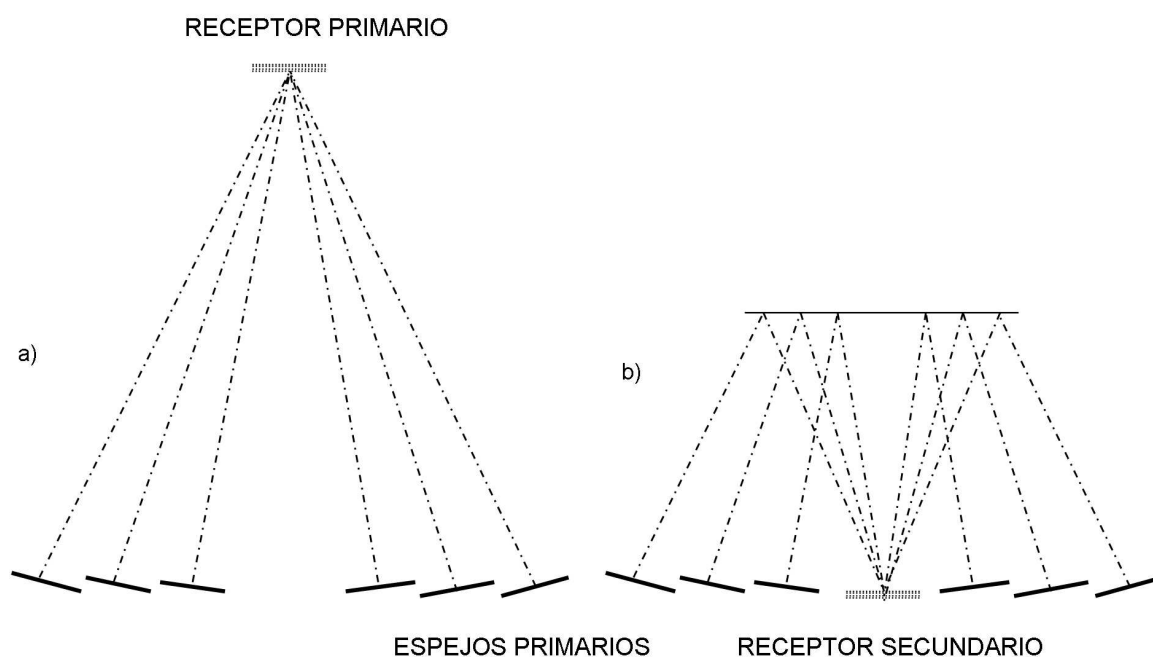


Figura 4.7: Foco primario y secundario usando un espejo plano.

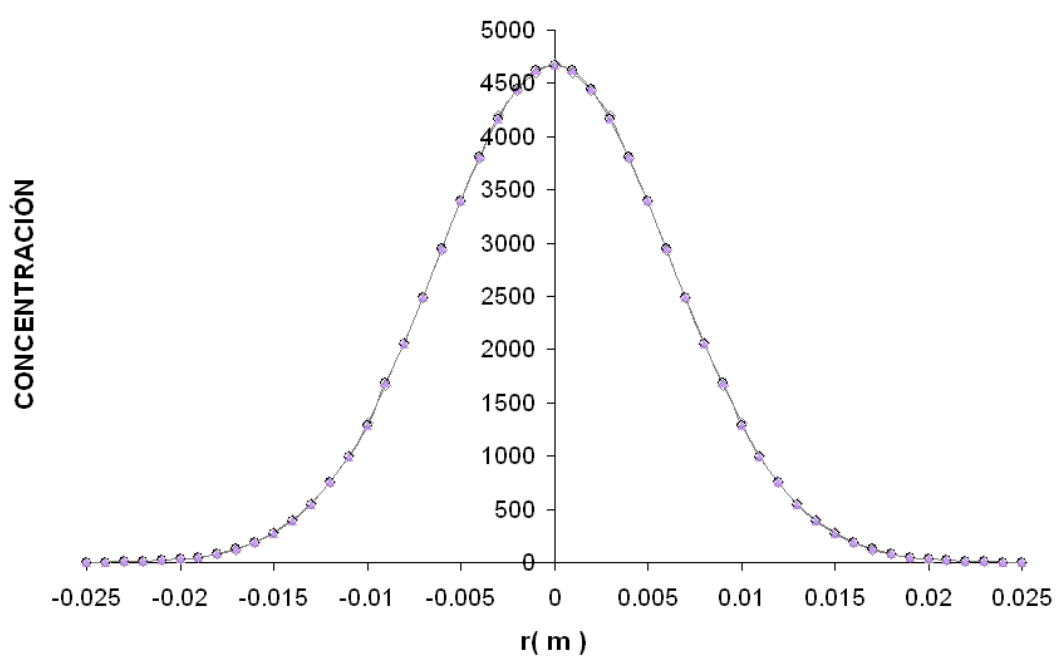


Figura 4.8: flujo sobre el plano primario (línea continua con puntos grises). Flujo concentrado sobre receptor secundario, usando un espejo secundario plano (línea continua con puntos negros). Flujo concentrado sobre el receptor secundario usando un espejo secundario esférico con un radio de curvatura de 50000 cm.

4.2.1. Característica del espejo secundario.

El criterio que se usó para determinar el diámetro del espejo secundario fue considerando un spot simétrico circular con un radio de 1.9 cm, que es el radio de spot en el cual obtenemos 99% de la energía del flujo concentrado, para los 18 espejos, sobre el foco primario. El radio del espejo secundario (R_{esec}) y el radio de curvatura del espejo secundario (R_{curv}), se determinaron usando las ecuaciones 3.24 y 3.23 respectivamente, para diferentes alturas sobre el plano de los espejos primarios h_z (figura 4.9).

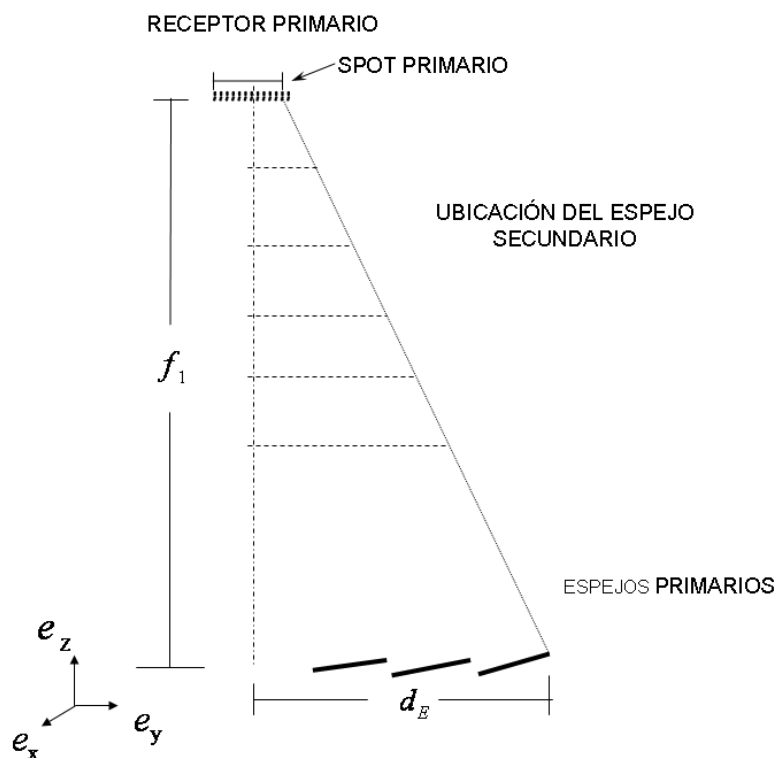


Figura 4.9: Esquema de la determinación del radio perimetral del espejo secundario en función de su altura sobre el origen.

La tabla 4.1 muestra tres columnas, la primera es la posición de espejo secundario sobre el eje z , la columna 2 nos proporciona el valor el radio de curvatura para cada valor sobre el eje z , considerando que el foco secundario se encuentra sobre el plano x, y . La tercera columna nos proporciona el radio del espejo secundario.

Tabla 4.1: Características del espejo secundario en función de la posición sobre el eje z .

Ubicación del espejo secundario sobre el eje z	Radio de curvatura del espejo secundario [cm].	Radio perimetral del espejo secundario [cm].
190	21.11	5.72
180	45.00	9.54
170	72.86	13.36
160	106.67	17.18
150	150.00	21.00
140	210.00	24.82
130	303.33	28.64
120	480.00	32.46
110	990.00	36.28
100	50000.00	40.10
98	4998.00	40.86
95	1995.00	42.01
93	1421.57	42.77
90	990.00	43.92
85	651.00	45.83
80	480.00	47.74

En base a las características mostradas en la tabla anterior para el espejo secundario en función de su ubicación se hacen todas las siguientes simulaciones. De hecho, en todo el trabajo subsiguiente se toma en cuenta los efectos de sombreado del espejo secundario sobre los espejos primarios ya que afectan de manera importante la potencia total concentrada por el sistema. Ejemplos de los efectos de sombreado se muestran en las figuras 4.10 y 4.11, para dos casos particulares.

4.3. Simulaciones con espejo secundario.

Una vez incorporado el espejo secundario a la simulación, analizamos la distribución de flujo sobre el receptor secundario para cuando éste está ubicado a diferentes alturas sobre el eje z y variando su radio

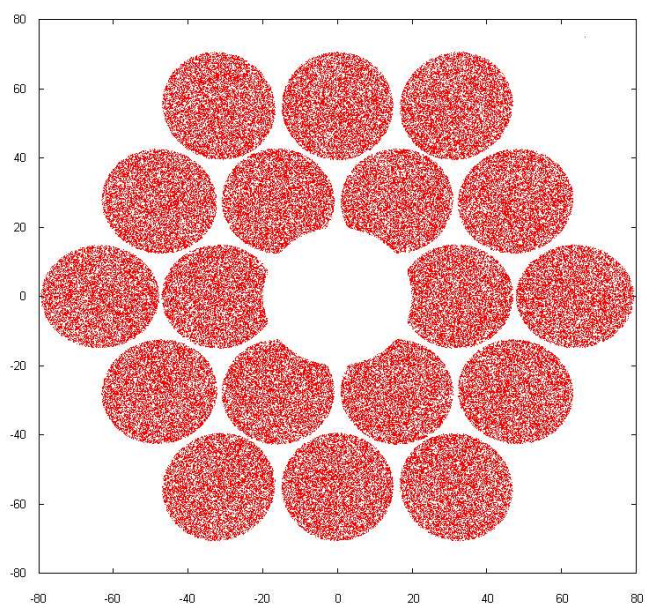


Figura 4.10: Efecto de sombreado sobre los espejos primarios, de un espejo secundario con un radio de 20 cm, ubicado a la altura de 152 cm por encima de los espejos primarios .

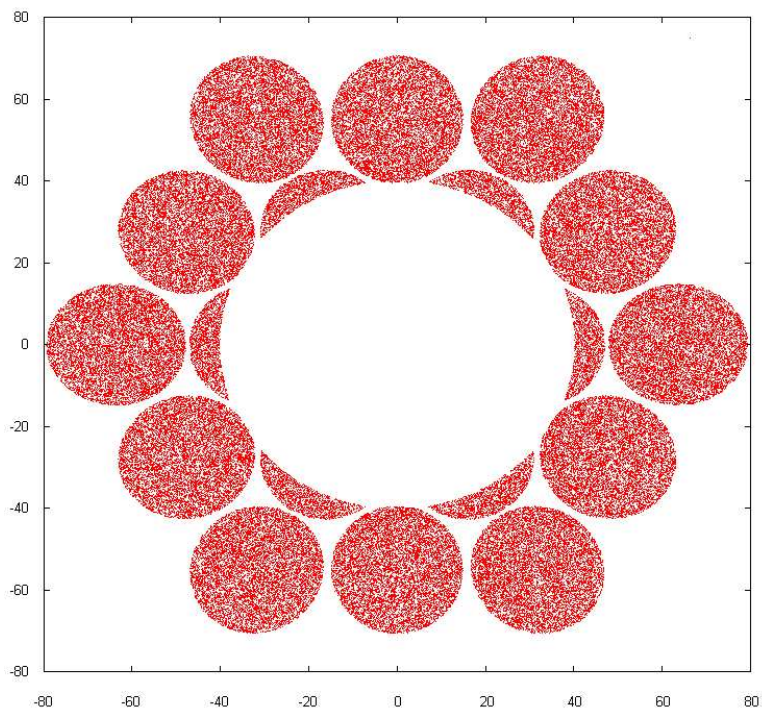


Figura 4.11: Efecto de sombreado sobre los espejos primarios, de un espejo secundario con un radio de 40 cm ubicado a la altura de 100 cm por encima de los espejos primarios .

de curvatura y radio perimetral de acuerdo con la tabla 4.1. La idea es hacer un barrido sobre el eje z y observar la concentración y potencia total obtenida sobre el receptor secundario. En el análisis se consideraron espejos secundarios con error de superficie 0.65 mrad (Quiñones, 1997; Pérez-Rábago, 2003), igual al de los espejos primarios y una reflectancia efectiva de 0.92 . Se analizaron 22 casos diferentes.

De acuerdo a la formula (3.21) cuando el espejo secundario está por arriba de 1 m debe ser cóncavo ($f > 0$) y cuando está por debajo de ser convexo ($f < 0$), cuando está exactamente a 1 m debe ser plano. Las configuraciones empleadas en los espejos (cóncavo y convexo), son configuraciones que nos permiten obtener un foco secundario sobre el plano de los espejos primarios y se determinaron con base en la aproximación paraxial de la óptica geométrica. La figura 4.12 muestra 4 casos representativos de flujos concentrados para un espejo secundario convexo. La curva con mayor concentración corresponde a un espejo secundario ubicado 100 cm por encima del origen, las curvas de menor concentración corresponden a ubicaciones de $120, 140, 160 \text{ cm}$ sobre el origen, respectivamente.

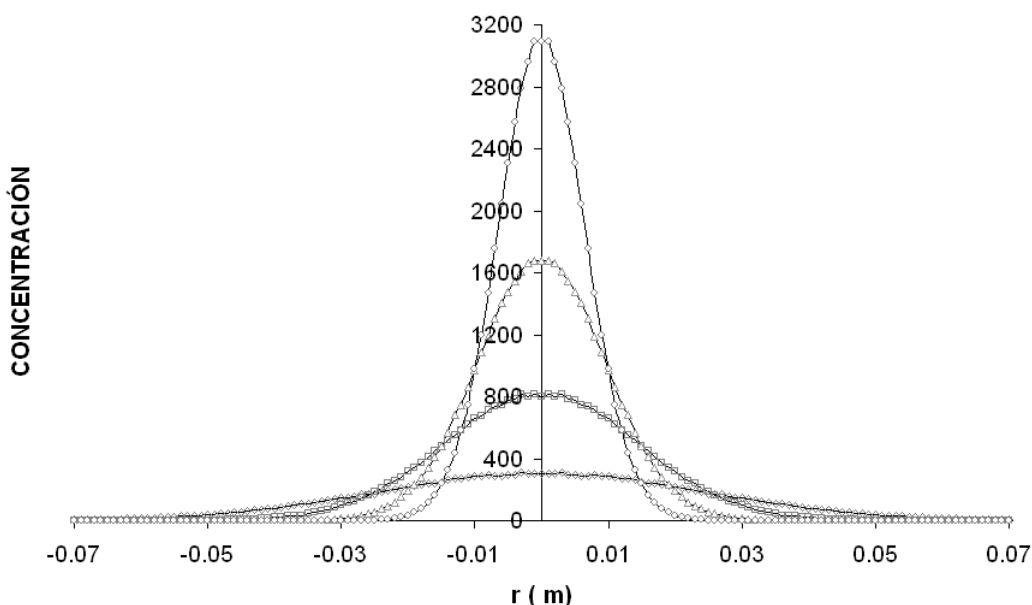


Figura 4.12: Flujo sobre el receptor secundario, considerando un espejo secundario convexo, en $100, 120, 140, 160 \text{ cm}$ por encima del origen.

La figura 4.13 muestra la distribución de flujos sobre el receptor secundario usando un espejo cóncavo, para diferentes alturas sobre el eje z: 92, 85, 80, 60 cm respectivamente. En las gráficas 4.14 y 4.15 se muestran los resultados de potencia acumulada y pico de concentración respectivamente después de analizar 22 puntos sobre el eje del sistema

El análisis de 22 casos se reportan en la gráfica 4.14 y 4.15, donde los puntos negros representan la potencia acumulada en el receptor secundario. La curva que dibujan los triángulos grises representa la concentración pico. Obsérvese que la concentración alcanza un valor máximo entre 20 y 30 cm por debajo del foco primario y disminuye debido al efecto de sombreado sobre los espejos primarios. De acuerdo con los resultados es posible obtener un pico máximo de concentración de alrededor de 3200 usando un espejo cóncavo y una concentración máxima de 1100 W.

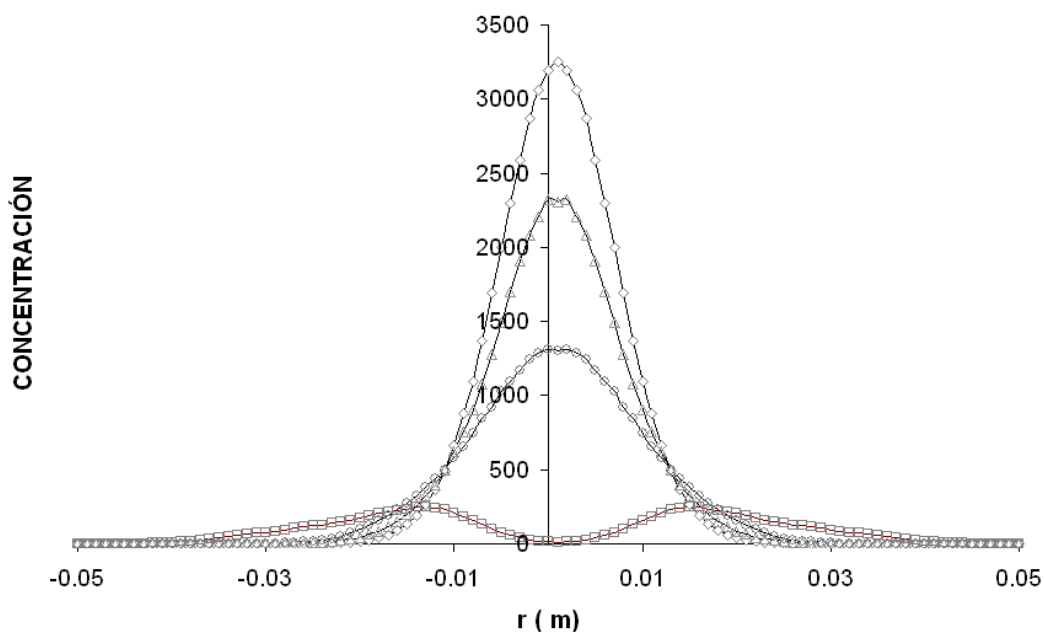


Figura 4.13: Flujo sobre el receptor secundario, considerando un espejo secundario cóncavo, en 92,85,80,60 cm por encima del origen, de arriba a abajo.

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran los radios de los spot y los valores de la concentración promedio respectivamente, para diferentes alturas sobre el eje z. El tamaño del spot se determina con base en la consideración que el 95% de la energía total, sobre el receptor secun-

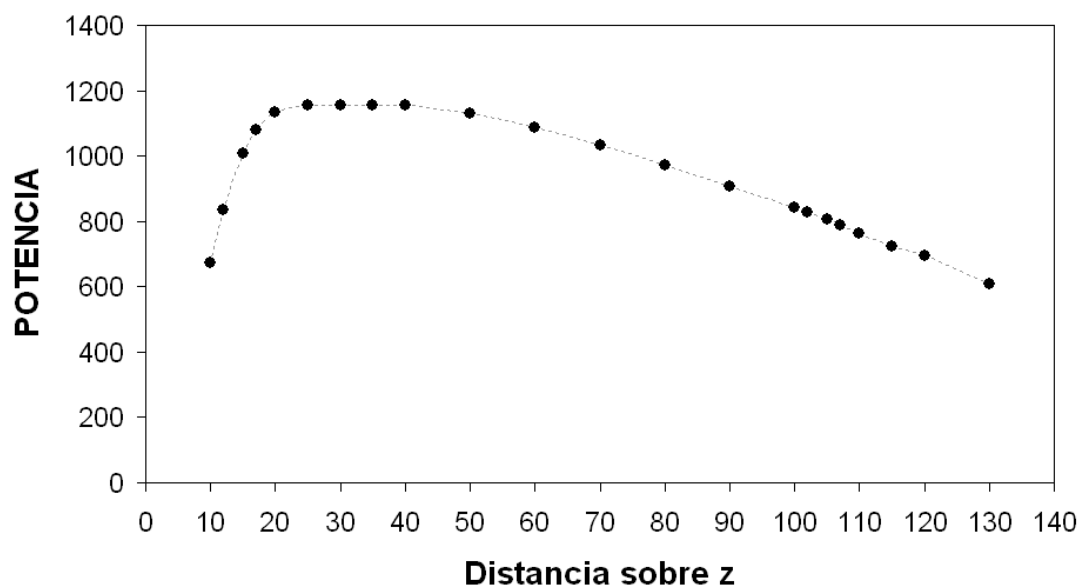


Figura 4.14: Los puntos negros indican la potencia acumulada sobre el receptor como función de la altura del espejos secundario sobre el eje del sistema.

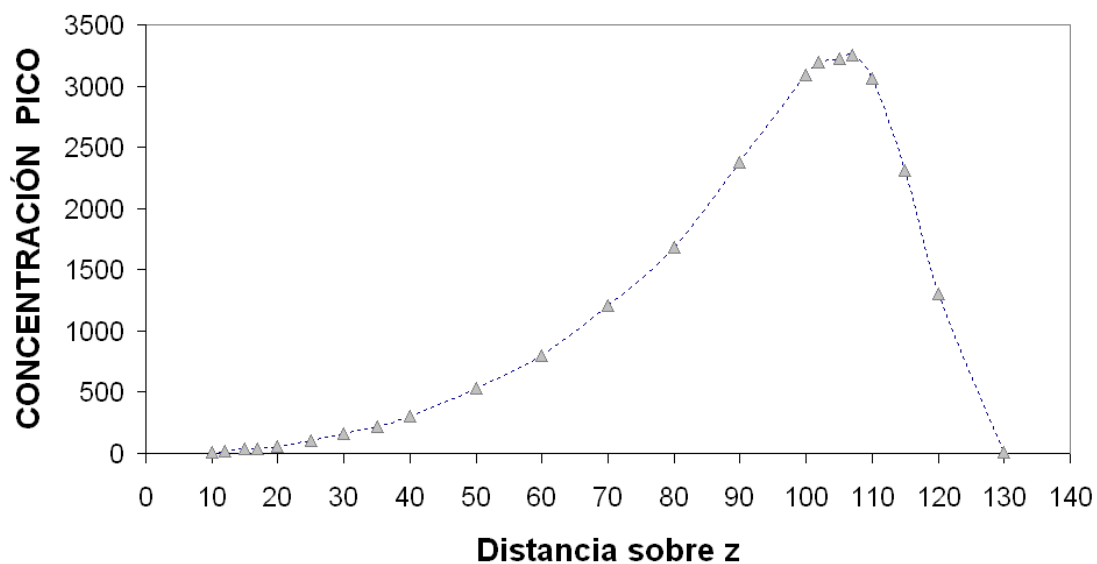


Figura 4.15: Concentración pico sobre el receptor plano como función de la altura del espejos secundario sobre el eje del sistema.

dario, debe estar dentro de él. Con base en a los resultados el “spot” más pequeño sobre el receptor del sistema propuesto es de 4 cm de diámetro aproximadamente.

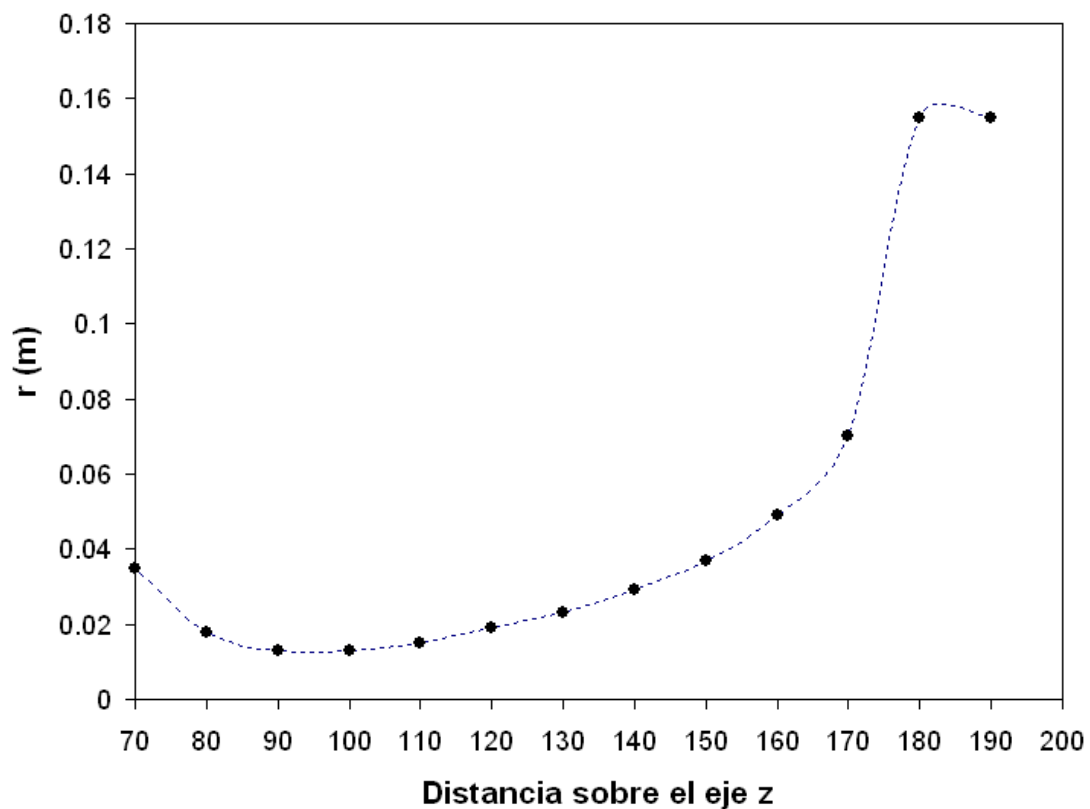


Figura 4.16: Radio del spot secundario.

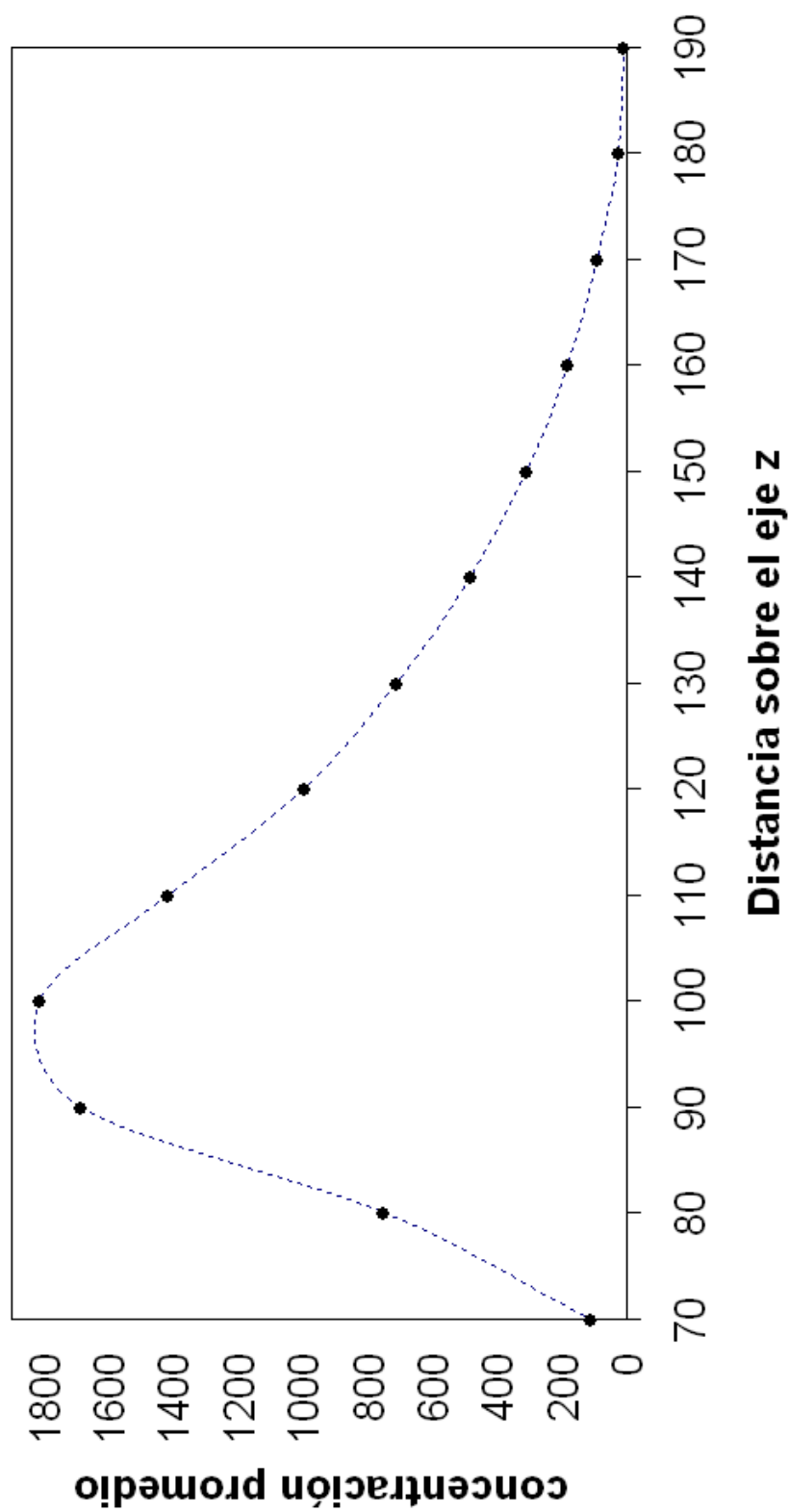


Figura 4.17: Concentración promedio

Capítulo 5

Conclusiones

En esta tesis hemos analizado la incorporación de un espejo secundario al concentrador solar de foco puntual conocido como DEFRAC (Estrada C.A., 1995). El objetivo de incluir este espejo sería el de trasladar el foco del sistema al centro del plano de espejos primarios, para posibilitar eventualmente la ubicación de un micro reactor termoquímico solar en este nuevo foco. Dicha ubicación permitiría tener la apertura del reactor hacia arriba en lugar de hacia abajo, con las consecuentes ventajas operativas.

Específicamente, procedió a determinar las características del mencionado espejo y a analizar el desempeño del sistema modificado. Esto se hizo variando la altura de la ubicación del espejo secundario sobre el plano de espejos primarios. Se estudio la distribución de flujos concentrados sobre un receptor secundario ubicado en la montura de los espejos primarios, así como la potencia total concentrada en dicho receptor.

Para el estudio fue necesaria la elaboración de un código de trazado de rayos, al cual se le ha denominado TRECSOL-E (Trazado de Rayos Estocástico para Concentradores Solares - Caso Esférico). En el código se considera la radiación solar como un proceso aleatorio y para simular la física de este fenómeno, se ha usado el método de Monte Carlo. Como resultado, el código permite evaluar los flujos concentrados, en

concentradores de facetas esféricas, sobre un receptor primario y sobre un receptor secundario. El código utiliza una distribución de brillantez solar representada por una Gaussiana.

Para validar los resultados obtenidos por TRECSOL-E, se realizaron comparaciones con el código llamado CIRCE2. Dado que CIRCE2 no puede simular concentradores con espejos secundario, se validaron nuestros resultados a través de la distribución de flujo en el foco primario.

En la etapa de validación consideramos 3 casos: (1) Un solo espejo centrado en el eje óptico del sistema sin inclinación, manteniendo constante el tamaño del cono solar $\sigma_{\text{sol}} = 2.55$ mrad para diferentes valores del error de superficie. (2) Un espejo de cada grupo del DEFRAC, analizados por separado. Dado que los espejos de cada grupo presentan una inclinación diferente, fue necesaria evaluar cada uno de ellos de manera independiente y observar los resultados obtenidos al compararlos con ambos programas. (3) El comportamiento de conjunto de los 18 espejos a fin de obtener resultados coherentes con los reportados en la literatura (Quiñones, 1998)

Observamos muy buena correspondencia entre los resultados obtenidos por ambos códigos, TRECSOL-E y CIRCE2, en los tres casos analizados. Particularmente en el primer ejercicio, cuando mantenemos constante el σ_{solar} y variando los valores de errores de superficie (fig. 4.1).

Los resultados mostraron que, usando una desviación estándar $\sigma = 2.55$ mrad, para un sol gaussiano, y un error de superficie de 0.65 mrad es posible obtener para el conjunto de los 18 espejos del DEFRAC, un radio del spot de 1.9 cm y una concentración pico de 4665.2 sobre el receptor primario. Cabe aclarar que el tamaño del spot se definió por aquel que abarca el 99.8 % de la energía incidente en el plano. En el caso de un solo espejo sin inclinación los resultados para ambos códigos son muy parecidos, el pico de concentración sólo difiere por el 0.3 % entre ambos casos. Para el caso de los espejos de cada grupo del DEFRAC, los resultados son muy similares. En el grupo A se observó una diferencia entre picos del 0.3 %, para el grupo B se observó una diferencia entre picos de 1.58 % y el grupo C una diferencia entre picos de 1.79 %. Con

esto concluimos que los resultados obtenidos por código TRECSOL-E son aceptables.

Para determinar la concentración y potencia sobre el foco secundario fue necesario considerar dos configuraciones del espejo secundario: convexo y cóncavo, las cuales son necesarias si queremos analizar el comportamiento del flujo concentrado sobre el receptor secundario al hacer un barrido sobre el eje z en la posición de este espejo.

En nuestro estudio consideramos en primer lugar un espejo convexo, el cual nos permite obtener un foco en el lugar deseado cuando el espejo se ubica a alturas mayores a un metro por encima del plano de los espejos primarios (a la mitad de la distancia focal del DEFRAC). En segundo lugar se consideró un espejo cóncavo dado que esta configuración se requiere cuando el espejo se ubica a menos de 1 m de altura.

El radio mas pequeño del spot sobre el receptor secundario se obtiene al colocar un espejo cóncavo, de radio de curvatura de 1421.57 cm, a una altura de 90 cm sobre el eje z. El valor de radio del spot es de 1.9 cm considerando el 95 % de la energía contenida en él.

Los efectos de sombreado sobre los espejos primarios debido al espejo secundario, tienen lugar cuando los valores del radio de éste superan los 16.7 cm y se vuelve muy importantes cuando este valor supera los 40 cm. En este punto el sombreado deja fuera de operación la mayor parte del grupo central (grupo A) de los espejos del DEFRAC. Los resultados sugieren utilizar en el DEFRAC un espejo cóncavo con un radio de curvatura de 1421.57 y un radio del espejo secundario de 42.77 para obtener una concentración máxima de 3252.007 con una potencia de 788.6118 W.

Apéndice A

Temperatura sobre el receptor

La radiación emitida por el sol y que es absorbida por el receptor del concentrador, esta dada por

$$q_{abs} = \tau \alpha_s A_s F_{sa} \sigma T_s^4 \quad (A.1)$$

Donde T_s es la temperatura efectiva del sol y τ es la transmitancia total que es función del concentrador, incluyendo los efectos de lentes, espejos, o cubiertas de cristal para algunos casos particulares. A_s es el área de apertura, α_s es la absorptancia sobre el absorbedor y F_{sa} es el factor de forma. Si se selecciona el disco solar, entonces el ángulo medio de aceptación es θ_s ($\theta_s \approx 1/4^\circ$). Para un concentrador con curvatura parabólica

$$q_{abs} = \tau \alpha_s A_a \sin^2 \theta_s \sigma T_s^4 \quad (A.2)$$

Si se pudiera eliminar las pérdidas de convección y radiación, entonces las pérdidas solo sería por radiación

$$q_L = \varepsilon_{ir} A_r \sigma T_r^4 \quad (A.3)$$

Donde ε_{ir} es la emisivancia en el infrarrojo de la superficie del receptor. A_r es el área y T_r es la temperatura del receptor. El balance sobre el receptor esta dado por

$$q_{abs} = q_L + \eta_c q_{abs} \quad (A.4)$$

Donde η_c es la fracción de energía absorbida sobre el receptor y entregada al fluido de trabajo, sustituyendo ec (A.2) y (A.3) en la ec (A.4) tenemos

$$(1 - \eta_c) \tau a_s A_a \sin^2 \theta_s \sigma T_s^4 = \varepsilon_{ir} A_r \sigma T_r^4$$

Como $GR = A_a/A_r$ y $GR_{max} = 1/\sin^2 \theta_s$, entonces

$$T_r = T_s \left(\frac{a_s GR}{\varepsilon_{ir} GR_{max}} \right)^{1/4} \quad (A.5)$$

Donde finalmente T_r es la temperatura del receptor.

Apéndice B

Región paraxial

Si considerando el primer término de la ecuación 2.22 y lo comparamos con la ecuación 2.19 que es la ecuación de la parábola, entonces

$$\frac{Ax}{x_{par}} = \frac{1}{4} \frac{y^2}{R} \quad (\text{B.1})$$

para es caso cuando $Ax/x_{par} = 0.001$

$$y = 0.063 R$$

En particular para un espejo de el DEFRAC

$$y = 0.15 \text{ m}$$

$$R = 4.00 \text{ m}$$

$$\frac{Ax}{x_{par}} = 0.00035 = \square \quad 0.035 \%$$

Apéndice C

Generación de números aleatorios con distribuciones dadas

Si $y = y(x)$ es una variable aleatoria que es función de otra variable aleatoria x , las distribuciones de probabilidad de ambas están ligadas por la ecuación

$$f(y)dy = g(x)dx \quad (\text{C.1})$$

ya que la probabilidad de ocurrencia de un rango de x es la misma que la probabilidad de ocurrencia de el correspondiente rango de y .

A partir de aquí se pueden generar números aleatorios con cualquier distribución f , a partir de números con distribución uniforme.

Sea $g(x) = 1$ una distribución uniforme en el rango de x de 0 a 1.

$$\square f(y) dy = dx$$

integrando

$$\square F(y) = x + c \quad (\text{C.2})$$

donde F es la integral de f . La constante c se obtiene evaluando en los límites de integración para $x(0; 1)$ y para $y(y_0 = f(0); y_1 = f(1))$.

Despejando y en la ecuación C.3

$$y = F^{-1}(x + c) \quad (\text{C.3})$$

el resultado de esto permitirá generar un número y con una distribución $g(y)$ a partir de un número uniformemente distribuido: primero se genera x y luego se obtiene y , evaluando la ecuación C.3. Para esto es necesario que la integral F exista analíticamente y sea invertible, cuando no es así se debe recurrir a una “inversión” numérica.

Apéndice D

Diferencial de área

Para obtener un diferencial sobre área para la elipse, es necesario aplicar el operador jacobiano. Las ecuaciones paramétricas de la elipse están dadas por

$$\begin{aligned}x &= e a \cos w \\y &= e b \sin w\end{aligned}\tag{D.1}$$

derivando x y y respecto de w y e

$$\frac{\partial x}{\partial w} = -ea \sin(w) \qquad \frac{\partial x}{\partial e} = -a \cos(w)$$

$$\frac{\partial y}{\partial w} = eb \cos(w) \qquad \frac{\partial y}{\partial e} = b \sin(w)$$

y aplicando el operador, tenemos que

$$\frac{\delta(x, y)}{\delta(e, w)} = \begin{vmatrix} a \cos(w) & -ea \sin(w) \\ b \sin(w) & ea \cos(w) \end{vmatrix} = aeb (\cos^2 w + \sin^2 w)$$

$$\frac{\delta(x, y)}{\delta(e, w)} = aeb$$

Así, el diferencial de área esta dado por:

$$dx dy = a e b \quad de dw$$

Sea:

$$f(e, w) = \frac{a e b}{\pi a b} \quad de dw$$

$$h(w) = k \qquad g(e) = \frac{\xi}{\pi k} = 2e$$

$$\int_0^{R_2} k dw = 2k\pi = 1 \qquad \int_0^{R_1} \frac{\xi}{\pi k} de = e^2$$

$$k = \frac{1}{2\pi}$$

Entonces:

$$h(w) = \frac{1}{2\pi}$$

$$g(e) = 2e$$

$$h(w)dw = dx \qquad g(e)de = dy$$

$$\frac{1}{2\pi}dw = dx \qquad 2e de = dy$$

Integrando

$$\frac{1}{2\pi}w = x + c \qquad e^2 = y + c$$

Evaluando las condiciones

$$h(w)dw = dx \qquad g(e)de = dy$$

$$\frac{1}{2\pi}dw = dx \qquad 2e de = dy$$

$$w = 2\pi x \qquad e = \sqrt{y}$$

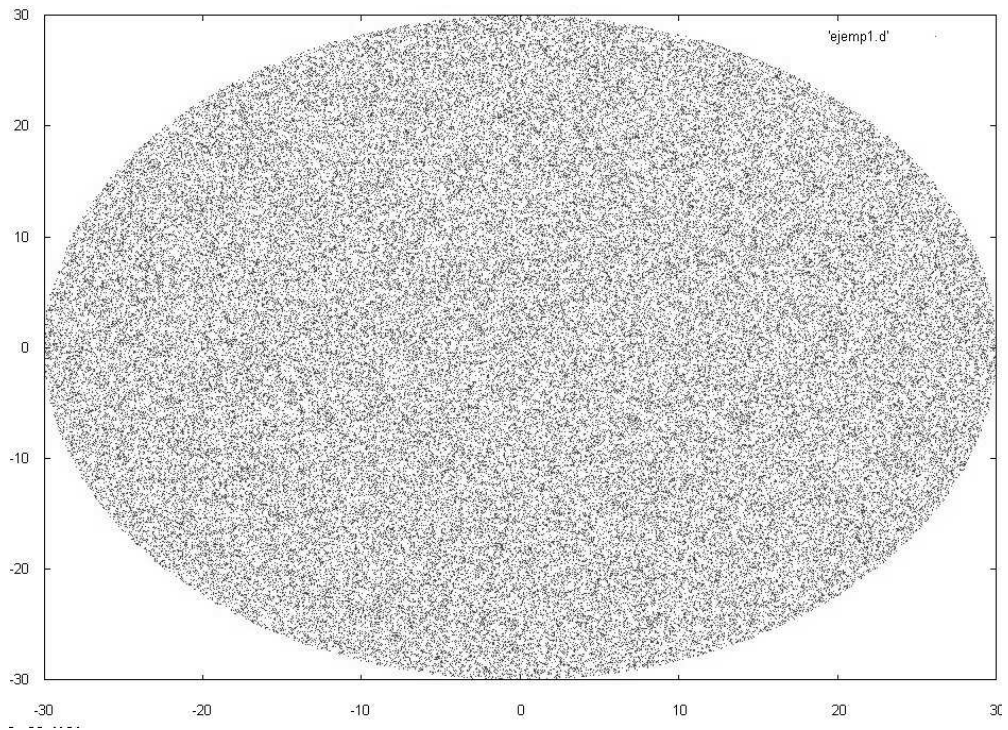


Figura D.1: Rayos aleatorios uniformemente distribuidos sobre el área de una elipse

Apéndice E

Cono de error

La distribución normal para datos univariados (1D) esta dada por la siguiente ecuación

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma_x} \right)^2} \quad (E.1)$$

Donde:

σ_x = Es la desviación estándar.

μ = Es la media.

La probabilidad de que ocurra un evento sobre una gaussiana bidimensional (datos bivariados) esta dada por el producto de dos gaussianas de 1D normalizadas.

$$E_{2D}(\theta_x, \theta_y) = f(\theta_x)g(\theta_y) \quad (E.2)$$

$$f(\theta_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{\theta_x^2}{2\sigma_x^2}}$$

$$g(\theta_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{\theta_y^2}{2\sigma_y^2}}$$

$$E_{2D} = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{\theta_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\theta_y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (E.3)$$

si $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ y $\theta_x^2 + \theta_y^2 = \theta^2$

Entonces la distribución de E_{2D} adquiere la forma siguiente:

$$E_{2D} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}}$$

la integral de las funciones están dadas por

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{2D}(\theta_x, \theta_y) d\theta_x d\theta_y = 1 \tag{E.4}$$

donde:

$$\theta_x = \theta \cos\varphi$$

$$\theta_y = \theta \sin\varphi$$

entonces la ecuación E.4 se convierte en

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E_{2D}(\theta, \varphi) \theta d\theta d\varphi = 1 \tag{E.5}$$

integrando y evaluando la primera integral tenemos

$$2\pi \int_0^{\infty} E_{2D}(\theta) \theta d\theta$$

sustituyendo

$$\frac{1}{\sigma^2} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} \theta d\theta$$

integrando y evaluando

$$\begin{aligned} \int e^u du &= e^u + c \\ u &= -\frac{\theta^2}{2\sigma^2} \quad du = -\frac{\theta}{\sigma^2} \\ -e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} \Big|_0^{\infty} &= 1 \end{aligned}$$

$$1 = 1$$

Para determinar la funciones que nos permitan generar los números aleatorios $(h(\theta)g(\varphi))$, de esta manera

$$P(x) dx = h(\theta) \theta d\theta \quad (E.6)$$

donde

$$h(\theta) = \frac{e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}}}{\sigma^2}$$

Si $p(x) = 1$, entonces

$$\int dx = \int \frac{e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}}}{\sigma^2} \theta d\theta$$

$$x = -e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} + c \quad (E.7)$$

evaluando las condiciones. Si $x = 0$, $\theta = 0$

$$0 = -1 + c$$

$$c = 1$$

evaluando la segunda condicion. Si $x = 1$, $\theta \rightarrow \infty$

$$-e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} \rightarrow 0$$

considerando la ecuación E.7 despejamos θ

$$\theta = \sqrt{-2\sigma^2 \ln(1 - X)}$$

si $X = A$ entonces

$$\theta = \sqrt{-2\sigma^2 \ln(1 - A)} \quad (E.8)$$

Donde A es la variable aleatoria.

Para determinar la segunda suponemos que

$$P(y)dy = g(\varphi) d\varphi \quad (E.9)$$

Donde

$$g(\varphi) = \frac{1}{2\pi}$$

si $P(y) = 1$, entonces

$$\int dy = \frac{1}{2\pi} \int d\varphi$$

$$y = \frac{\varphi}{2\pi} + c \quad (\text{E.10})$$

evaluando si $y = 0$, $\varphi = 0$

$$c = 0$$

Despejando φ tenemos

$$\varphi = 2\pi y$$

haciendo que $y = B$ entonces

$$\varphi = 2\pi B \quad (\text{E.11})$$

Donde B es una variable aleatoria.

Apéndice F

Algoritmo de TRECSol-E

```

|*****
|*****Código de trazado de rayos TRECSOL-E*****
|*****

program TRECSol-E
character(15)::nombre
integer,parameter::numcas=1000
real::k,deltay2,deltax2,deltay,x,y,omega,psi,x1,y1,x0,y0,xcir,
real,dimension(3)::rc,e2,rw,rplano,ndir,z,rdis,e2prim,rc1,e3,vr,rdisb,vz2&
&,nprim,eaaa,rplanosec,ral,nesp,rcesp,rce,rpw,a,d2,e3p,e

integer,dimension(-numcas:numcas,-numcas:numcas)::nrayos_casilla
external ran2,moderror,modespsec,modespplano,moderroresf

real,parameter,dimension(3):: &
nplano=(/0.0,0.0,1.0/) !normal al plano primario
real,parameter,dimension(3):: &
rcesec=(/0.0,0.0,50100.0000/) !vector al centro del espejo
!secundario
real,parameter,dimension(3):: &
nplano2=(/0.0,0.0,1.0/) !normal del segundo plano re-
!ceptor o secundario
real,parameter,dimension(3):: &
rplano2=(/0.0,0.0,0.0/) !ubicación del plano secunda-
!rio
real,parameter,dimension(3):: &
eds=(/0.0,0.0,-1.0/)

!**** DEFINIENDO ALGUNA VARIABLES****
idum=-75

c=-1
pi=acos(c) !numero pi
semiejeb=15 !Es el semieje y no el eje menor
reflec=.92
cedesv= 2*0.00065
cedesvs=0.00255

```



```

principal: do j=1,numrayos

      !***** GENERANDO LOS NÚMEROS ALEATORIOS *****
      semiejeb=semiejeb           !semi ejes de la elipse
      semiejea=semiejeb*cos(fi*pi/180.0)
      !*****EMITIENDO RAYOS*****
      x=ran2(idum)                !calcula los número aleatorios
      y=ran2(idum)                !en X y Y
      omega=2*pi*x
      psi= sqrt(y)
      ral(1)=psi*semiejeb*sin(omega)   !números aleatorios sobre
      ral(2)=psi*semiejea*cos(omega)   !una elipse (x,y)
      ral(3)=0.0
      ral=(/ral(1),ral(2),ral(3)/)     !ral es el vector generado por
      !los números aleatorios

      !*****SOMBRA DEL ESPEJO SECUNDARIO*****
      rce= rcesp                  !rce es el vector al centro de la
      rpw= rce + ral              !elipse.
      !rpw es la suma de dos vectores que
      !ya conocemos.
      prpw=sqrt(dot_product(rpw,rpw)) !es la magnitud de prpw
      if(prpw>respsec) then

      suma= resf**2 -(rpw(1)-rc(1))**2 -(rpw(2)-rc(2))**2
      raiz0=sqrt(suma)
      zw= -raiz0+ rc(3)
      rw= (/rpw(1),rpw(2),zw/)      ! rw es el vector que va del origen aun
      ! punto sobre
      ! el casquete de la esfera, este vector
      ! es funcion de
      ! los números generados sobre la elipse.

      !***** CALCULANDO EL VECTOR REFLEJADO *****
      a= rw-rc
      d2=-a/sqrt(dot_product(a,a))   !vector normal unitario
      call modsol(cedesvs,eds,e)
      e2=e - 2*dot_product(e,d2)*d2
      e2=e2/sqrt(dot_product(e2,e2))

      else
      sombra=sombra+1
      cycle
      endif

      call moderror (cedesv,e2,e2prim) ! es el modulo de error

```

```

call modespsec(respsec,rw,rcesec,e2prim,resp,a2,vx2)      !modulo del espejo
                                                    !jo secundario
if (a2(1)<=respsec .AND. a2(2) <=respsec) then
    vr=rw+e2prim*(vx2)

    !***** calculando el vector reflejado.*****
    vpart= rw+ (vx2*e2prim) -rcesec
nsec=-vpart/sqrt(dot_product(vpart,vpart))              !normal al espejo
                                                    !secundario

    e3= e2prim - 2*(dot_product(e2prim,nsec))*nsec
    e3=e3/sqrt(dot_product(e3,e3))

    pegan=pegan + 1      ! SIRVE PARA VER LAS COMPONENTES X Y Y DEL VECTOR a2
                        !SOBRE EL CASQUETE ESFERICO SECUNDARIO.
    else
        sombra2=sombra2 + 1
        cycle
end if

    call moderroresf (e3,e3p)      !modulo del error del espejo
                                    !secundario

!***** INTERSECCION DEL RAYO REFLEJADO CON UN PLANO *****

    z= rw-rplano
    ppl=dot_product(nplano,z)
    pp2=dot_product(nplano,e2prim)
    t=-ppl/pp2

!***** DISCRETIZANDO EL PLANO UBICADO EN EL FOCO *****

    ! e3p=e3 !SE USA PARA EL ESPEJO PLANO
    rdis=-rplano + rw +(t*e2prim)
!calculando la intersección del rayo reflejado, con un plano.

    vz2= vr-rplano2
    amt=-((dot_product(nplano2,vz2)/dot_product(nplano2,e3p))
    rdisb= vr +(e3p*amt)-rplano2

!~~~~~ Rotacion de los espejos ~~~~~
!~~~~~ Rotacion de los espejos ~~~~~
rotacion: do n=1,6
    if (n==1) then
        angdes=(agrg+0)*pi/180
    endif
    if (n==2) then
        angdes=(agrg+60)*pi/180
    endif
    if (n==3) then
        angdes=(agrg+120)*pi/180
    endif
    if (n==4) then
        angdes=(agrg+180)*pi/180
    endif
    if (n==5) then
        angdes=(agrg+240)*pi/180
    endif
    if (n==6) then
        angdes=(agrg+300)*pi/180
    endif
endif

```

```

=====
*****ESPEJOS PRIMARIOS*****
=====

      planos: do k=Fplano,Fplano
                ! 1  plano primario.
                ! 2  Plano secundario.

      if (k==1) then
        angpart= atan(rdis(1)/rdis(2))
        radpart=rdis(2)/cos(angpart)

        xprim=radpart*sin((angdes+angpart))
        yprim=radpart*cos((angdes+angpart))

        if(abs(xprim)<=deltax2*numcas .and. abs(yprim)<=deltay2*numcas) then
          ncasillax=nint(xprim/deltax2)
          ncasillay=nint(yprim/deltay2)
          nrayos_casilla(ncasillax,ncasillay)=nrayos_casilla(ncasillax,ncasillay)+1

        else
          print*,"fallo"
          continue
        endif

                !=====
                !print*,nrayos_casilla(ncasillax,ncasillay)
                !read*
                ! write(9,*)xprim,yprim
                !=====
                !=====

      endif

=====
*****ESPEJO SECUNDARIO*****
=====

      if (k==2) then

        angpart= atan(rdisb(1)/rdisb(2))
        radpart=rdisb(2)/cos(angpart)

        xprim2=radpart*sin((angdes+angpart))
        yprim2=radpart*cos((angdes+angpart))

        if(abs(xprim2)<=deltax2*numcas .and. abs(yprim2)<=deltay2*numcas) then

          ncasbx=nint(xprim2/deltax2)
          ncasby=nint(yprim2/deltay2)
          nrayos_casilla(ncasbx,ncasby)=nrayos_casilla(ncasbx,ncasby)+1

        else
          print*,"fallo"
          continue
        endif

                !=====
                ! print*, nrayos_casilla(ncasbx,ncasby)
                !read* !secundario
                ! write(9,*)xprim2,yprim2
                !=====
                !=====

      endif

      enddo planos

      enddo rotacion

      enddo principal
      print*,sombra2
      enddo inclinacion
      print*,"Rayos sombreados",sombra

```

```

print*, "Rayos sombreados que no interceptan el espejo secundario"
      prayo=0.1*((pi*(15.))**2)*cos(fi*pi/180.)/(numrayos*deltax2**2)
do n=Fplano,Fplano
      !n=0   si el flujo es en 2D
      !n=1   si el flujo es en 3D en el plano primario
      !n=2   si el flujo es en 3D en el plano secundario

      !~~~~~
      !&&& Distribucion de flujo en el plano PRIMARIO &&&
      !~~~~~

if (n==1) then
do ncasillax=-200,-200
do ncasillay=-200,-200
write(9,*)ncasillax*deltax2,ncasillay*deltax2,&
&nrayos_casilla(ncasillax,ncasillay) *prayo *reflec
enddo
write(9,*)" "

enddo
endif

if (n==2) then
!~~~~~
!&&& Distribucion de flujo en el plano SECUNDARIO &&&
!~~~~~

do ncasbx=-200,200
do ncasby=-200,200

c= sqrt((ncasbx*deltax2)**2 + (ncasby*deltax2)**2)

if (c<=receptorplanosec) then

write(9,*)ncasbx*deltax2,ncasby*deltax2,nrayos_casilla&
&(ncasbx,ncasby)*prayo *reflec
else
cycle
end if
enddo
write(9,*)" "

enddo
endif
enddo

end program TRECSol-E

```

```

=====
=====SUBROUTINAS=====
=====

      !***** GENERA NUMEROS ALEATORIOS ENTRE 0 Y 1 *****

function ran2(idum)
!
  integer, parameter :: m=714025,ia=1366,ic=150889
  real, parameter :: rm=1.400511e-6      ! Este parametro siempre debe
  ! ser igual a 1./m
  real, dimension(97), save :: ir      !todas estas variables deben tener el
  integer, save :: iff=0, iy          !atributo save, para que la subrutina
  real :: ran2                        !recuerde los ultimos numeros que
  character(1) :: palabra             !genere y los use para los nuevos
!
!
  if(idum<0.or.iff/=0)then            !iff=0 significa que ran2 se ejecuta
    iff=1                              !por primera vez, idum<0 significa
    idum= mod(ic-idum,m)                !que se esta reinicializando la
    !secuencia
!
  do j=1,97
    idum= mod(ia*idum+ic,m)             !estos son los numeros
    ir(j)= idum                         !aleatorios que da el generador
  end do                                !congruente lineal
!
  idum= mod(ia*idum+ic,m)              !este es el que se usa para
  iy= idum                             !elegir (barajar) uno de ellos
endif
! Lo anterior es la parte de la subrutina que se ejecuta solo
! al inicio. Lo que sigue se ejecuta una y otra vez.
! En el programa siempre se llamara la subrutina con la variable
! idum. Esta al principio tiene un valor negativo que damos para
! inicializarla, y luego adquiere los valores positivos que le da
! ran2. Si le cambiamos a un valor positivo en el programa principal
! se vuelve a ejecutar la parte anterior.
  j=1+(97*iy)/m                        !se elige uno de los ir en base
  !al valor de iy.
  if(j>97.or.j<1)then
    write(*,*)'comportamiento anormal en ran2'
    read(*,*)palabra
  endif
  iy= ir(j)                            !Este sera el nuevo iy
  ran2= iy*rm                           !y el numero de salida
  idum= mod(ia*idum+ic,m)
  ir(j)=idum                            !se repone el numero que se uso
  return
endfunction ran2

!*****
! Distribución de brillantez solar representada por una Gaussiana.
!*****
subroutine modsol (cedesvs,eds,e)
real,dimension(3)::ey,ex,ceel,cee2,distheta,e3prim,cendir,eds,e
external ran2

  angulo:do
    cetheta=sqrt(-2*((cedesvs)**2)*alog(1-ran2(idum)))
    if(cetheta<6*cedesvs) exit
  end do angulo

```



```

cepsi=2*pi*ran2(idum)

                                                                 !producto cruz
ex=(/1.0,0.0,0.0/)
ey=(/0.0,1.0,0.0/)

epp=dot_product(ex,eds)

  if (epp<=0.99) then
    ceel=(/ex(2)*eds(3)-eds(2)*ex(3),-(ex(1)*eds(3)-eds(1)*ex(3))&
    &,ex(1)*eds(2)-eds(1)*ex(2)/)

  else
    ceel=(/ey(2)*eds(3)-eds(2)*ey(3),-(ey(1)*eds(3)-eds(1)*ey(3))&
    &ey(1)*eds(2)-eds(1)*ey(2)/)
  end if

    cee2=-(/ceel(2)*eds(3)-eds(2)*ceel(3),-(ceel(1)*eds(3)&
    &-eds(1)*ceel(3)),ceel(1)*eds(2)-eds(1)*ceel(2)/)

    distheta=cetheta*cos(cepsi)* cee2 + cetheta*sin(cepsi)*ceel

!el nuevo rayo es
cendir= eds + distheta      ! es el rayo reflejado incluyendo el error
e=cendir/sqrt(dot_product(cendir,cendir))
end subroutine modsol

!*****
! este modulo devuelve el rayo de entrada mas un cono de error cuya dis-
! tribuciòn es gaussiana.
!*****
subroutine moderror (cedesv,e2,e2prim)
real,dimension(3)::e2,ey,ex,ceel,cee2,distheta,e2prim,cendir
!integer:: idum=-75
external ran2

  angulo:do
    cetheta=sqrt(-2*((cedesv)**2)*alog(1-ran2(idum)))
    if(cetheta<6*cedesv) exit
  end do angulo

cepsi=2*pi*ran2(idum)

ex=(/1.0,0.0,0.0/)
ey=(/0.0,1.0,0.0/)

epp=dot_product(ex,e2)

  if (epp<=0.99) then
    ceel=(/ex(2)*e2(3)-e2(2)*ex(3),-(ex(1)*e2(3)-e2(1)*ex(3))&
    &ex(1)*e2(2)-e2(1)*ex(2)/)

  else
    ceel=(/ey(2)*e2(3)-e2(2)*ey(3),-(ey(1)*e2(3)-e2(1)*ey(3))&
    &ey(1)*e2(2)-e2(1)*ey(2)/)
  end if

    cee2=(/ceel(2)*e2(3)-e2(2)*ceel(3),-(ceel(1)*e2(3)&
    &-e2(1)*ceel(3)),ceel(1)*e2(2)-e2(1)*ceel(2)/)

    distheta=cetheta*cos(cepsi)* ceel + cetheta*sin(cepsi)*cee2
cendir= e2 + distheta

```

```

e2prim=cendir/sqrt(dot_product(cendir,cendir)) ! es el rayo refle-
                                                !jado incluyendo
                                                !la desviación

end subroutine moderror
!*****
! Este modulo contiene la ecuaciones que permiten emplear un espeso
! secundario esferico.
!*****

subroutine modespsec (respsec,rw,rcesec,e2prim,resp,a2,vx2)
character(15)::nombre
integer,parameter::numcas=1000
real::k,deltay2,deltax2,deltay,x,y,omega,psi,x1,y1,x0,y0,xcir
real,dimension(3)::e2,rw,rplano,vz,vapart,va2,vd3,vz2,e3n,e3,nesecc,&
&vr,e2prim,patito,rcesec,a2
integer,dimension(-numcas:numcas,-numcas:numcas)::nrayos_casilla

! Realizando las operaciones
va=1.0 ! es el termino cuadratico
vz= rw-rcesec !producto punto (por comodidad)
vx=dot_product(vz,vz)

vb= 2*(dot_product(e2prim,vz)) !el termino lineal de la ecuacion
vc= vx -resp**2 !el termino independiente
vk=(vb)**2-4*va*vc !discriminante (for. gral.)

!vx1 y vx2 son las distancias de t (raices)

if (vk<0) then
! print*,' no existe interseccion alguna'
nrayosper=nrayosper+1
else if (vk==0) then
vraiz=sqrt(vk)
vx2=(-vb - vraiz)/(2*va)
!print*,'las raices son iguales', vx2
else if (vk>0) then
vraiz=sqrt(vk)
vx1=(-vb + vraiz)/2*va
vx2=(-vb - vraiz)/2*va
! print *,'existe dos intersecciones en'
! print *,vx1
end if
if (vx2<vx1) then
! print *,'la primera interseccion ocurre en',vx2
end if

a2=rw+vx2*e2prim-rcesec

end subroutine modespsec

```

Bibliografía

Bendt, P., Rabl, A., 1981. Optical analysis of point focus parabolic radiation concentrators. *Applied Optics* 20, 674-683.

Buie, D., Monger, A. G., 2004. The effect of circumsolar radiation on a solar concentrating system. *Solar Energy* 76, 181-185.

Buie, D., Dey, C.J., Bosi, S., 2003. The effective size of the solar cone for solar concentrating system. *Solar Energy* 74, 417-427.

Cruz, F., Estrada, C.A., Cervantes, J.G., Quiñones, J.J., 1997. Caracterización del DEFRAC. Parte I: Estudios Térmico. In: *Momorias de la XIX Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, México. pp. 170-176.

De Vos, A., 1992. *Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion*. Oxford University Press, Oxford. pp. 18-20.

Estrada, C.A., Cervantes J.G., Oskam A., Cruz F., Quiñones, J.J., 1998. Thermal and Optical Characterization of a Solar Concentrator for High Radiative Flux Studies. *Proceedings of the 1998 Annual Conference, American Solar Energy Society* 1,259-266. Editado por R. Campbell-Howe, T Cortéz y B. Wilkins-Crowder ASES, USA.

Estrada, C.A., Higuera, S., Oskam, A., Cervantes, J., 1995. Dispositivo Para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados: DEFRAC. In: *Memorias de la XIX Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, México. pp. 183-186.

Estrada, C.A., Jaramillo, O.A., Acosta, R., Arancibia-Bulnes, C.A., 2007. Heat transfer analysis in a calorimeter for concentrated solar radiation measurements. *Solar Energy* doi:10.1016/j.solener.2006.11.016

Goswami, D.Y., Kreith F., Kreider J.F., 1999. Principles of Solar Engineering. Taylor & Francis, Philadelphia, pp. 126-129.

Hecht, E., 2000. Óptica. Addison Wesley, España, pp.184-187.

Lédé J., Enrique-Elorza, R., Ferrer, M., 2001. Solar Thermal Splitting of Zinc Oxide: A review of Some of the Rate Controlling Factors. ASME Journal of Solar Energy Engineering 123, 91-97.

Marsden, J.E., Tromba, A.J., 1991. Cálculo Vectorial. Addison-Wesley Iberoamericana, México

Mauk, C.E., Prengle, H.W., Chi-Hua Sun, E., 1979. Optical and Thermal Analisis of a Cassegrain Solar Concetrator. Solar Energy 23, 157-167.

Möller, S., Palumbo, R., 2001. The Development of a Solar Chemical Reactor for the Direct Thermal Dissociation of Zinc Oxide. ASME Journal of Solar Energy Engineering 123, 83-90.

Neumann, A., Scott, A., Jones., Schmitt G., 2002. Representative Terrestrial Solar Brightness Profiles. ASME Jornal of Solar Energy Engineering 124, 198-204.

Pérez-Rábago, C.A., 2003. Diseño, construcción y puesta en operación de un calorímetro de cavidad conica para un concentrador solar de foco puntual (DEFAC). Tesis de maestría, CIE-UNAM Temixco, Morelos, México.

Pettit, R.B., 1976. Characterization of the reflected beam profile of solar mirror materials. Solar Energy 19, 733-741.

Quiñones, J.J., Estrada, C.A., Cruz F., Cervantes, J., 1997. Caracterización del DEFAC. Parte II: Estudios Ópticos, Primeros Resulatados. Memorias de la XIX Semana Nacional de Energía Solar, ANES, México. pp. 160-165.

Quiñones, J.J., 1998. Caracterización óptica del Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados. Tesis de licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan, Edo. de Mexico, Mexico.

Rabl, A., 1976. Tower reflector for solar power plant. Solar Energy 18, 269-271.

Rabl, A., 1985. Active Solar Collectors and Their Applications. Oxford University Press, Oxford.

Segal, A., Epstein, M., 2000. The Optics of the Solar Tower Reflectors. *Solar Energy* 69, 229-241.

Steinfeld, A., Palumbo, R., 2001. Solar Thermochemical Process Technology. *Encyclopedia Of Physical Science & Tecnology, Solar Termochemical Process Technology* 15 , 237-256.

Winter, C.J., Sizmann, R.L., Vant-Hull, L.L., 1991. *Solar power plant: Fundamentals, Tecnology, Systems, Ecomomics*. Springer, New York.