



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

**DISEÑO ÓPTICO DEL HORNO SOLAR DE ALTO FLUJO
DEL CIE-UNAM**

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

Energía – Solar fototérmica

P R E S E N T A :

M. en C. David Riveros Rosas

TUTOR PRINCIPAL:

Dr. Claudio A. Estrada Gasca



Centro de Investigación
en Energía

2008

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Jesús Antonio Del Río Portilla
Secretario: Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca
Vocal: Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes
1er. Suplente: Dr. Marcelino Sánchez González
2do. Suplente: Dr. Ruben José Dorantes Rodríguez


Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Centro de Investigación en Energía, UNAM. Temixco, Morelos. México.

Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas. Madrid, España.

TUTOR PRINCIPAL LA DE TESIS

Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'CAEGA', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat illegible due to the cursive nature of the writing.

FIRMA

Dedicada a:

Mónica,
Mi Rosa de los Vientos
y brisa de mis tardes

Andrés,
Porque la luz nunca deje
de brillar en su rostro

Héctor y Lucía,
Por el bien que me ha hecho
que sean mis padres

Agradecimientos:

Siempre hay mucho que agradecer en cada uno de los pasos que se dan en el desarrollo profesional. Tantas personas, entre la familia, profesores, amigos cercanos y no tan cercanos, han dejado huella directa o indirectamente en mi formación, a cada una de estas personas quiero decirles GRACIAS.

En particular quiero agradecer de manera especial:

Al Dr. Claudio Estrada Gasca, mi director de tesis, por su paciencia y apoyo, por la confianza que siempre me ha tenido y por ser un amigo honesto y entrañable.

A Marcelino Sánchez a quien considero como un segundo director de tesis, no solo compartió conmigo abiertamente su trabajo, nos abrió las puertas de su familia y de su casa.

A Felix Maria Tellez, por la información que compartió conmigo, por los cursos y conferencias a las que me invitó, porque contribuyó a mi formación en esta área, pero sobre todo por su increíble hospitalidad, por acogernos en España y hacernos la vida más agradable.

A Camilo Arancibia, por su revisión de la tesis, por la confianza que me ha tenido y por haber contribuido a mi formación en esta área del conocimiento.

A Rafael Monterreal, por el apoyo que me brindo y sus valiosos comentarios, y porque cada vez que tengo comunicación con el, me da información para trabajar durante varios meses.

A Antonio del Rio y Ruben Dorantes por su paciente revisión de la tesis y por los valiosos comentarios que enriquecieron este trabajo

A Manuel Romero por sus valiosos comentarios al planteamiento de la tesis, por el interés que ha mostrado en ella y en mi trabajo, y por su apoyo en el artículo de iso-superficies.

A Maria Cruz de Andres, porque su apoyo fue fundamental para realizar mi trabajo de tesis, por ayudarme con al preparación del artículo y el trabajo de SolarPACES y porque sin conocerme me brindo todo su apoyo y amistad.

A Oscar Jaramillo, por toda la ayuda que me brindo en su oportunidad, por sus comentarios al trabajo y por haber contribuido a mi formación en esta área del conocimiento.

A Maricela Mendoza por quien siento un especial cariño y a Gabriel Mondragón porque no es fácil encontrar amigos tan entrañables como el. Ambos me han brindado un apoyo que es difícil de evaluar y porque en ellos atesoro una de las relaciones que más valoro en la vida

A María de los Angeles Sanchez y a Alejandra Mendoza, por toda la ayuda que nos brindaron y por su apoyo incondicional y por el cariño que nos une.

A mis amigos del posgrado Fernando, Carlos, Heidi y Moisés con quienes he compartido buenos momentos. Y porque siempre estuvieron dispuestos a brindarme su ayuda en diversas ocasiones.

A Maribel, por toda la ayuda que me prestó y por facilitarme la vida en diversas ocasiones.

En general al personal administrativo y directivo del CIE con quienes a cada problema, se encuentra una solución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para realizar este trabajo de investigación.

Tabla de contenido

RESUMEN	vi
Lista de figuras:	ix
Lista de Tablas:	xiv
Introducción	1
1.1 Energía y medio ambiente	2
1.2 Tecnologías termosolares de la concentración solar	6
1.3 Horno solar como instrumento de investigación	16
1.4 Revisión bibliográfica	19
1.5 Objetivos	23
Modelo matemático y algoritmo de solución	24
2.1 Modelo físico	25
2.2 Modelo matemático	32
2.3 Rutinas básicas	39
2.4 Algoritmo de solución y descripción del programa Tonalli	48
Estudios de validación	57
3.1 Relación de F/D óptimo	58
3.2 Validación con otros programas de modelación con trazado de rayos	65
3.3 Validación experimental con DEFRAC	69
3.4 Validación experimental con HSPSA	71
Estudios paramétrico	80
4.1 Distancia focal del canteo y número de facetas	81
4.2 Distancia focal de facetas	86
4.3 Determinación de iso-superficies en el horno solar	89
Diseño óptico del horno solar del CIE	95
5.1 Configuración de facetas	96
5.2 Efecto de los errores ópticos	102
5.3 Tamaño del Helióstato	105
5.4 Edificio del horno solar	108
Conclusiones	113
Bibliografía	119

RESUMEN

Por la relevancia que tendrán las tecnologías de concentración solar en nuestro país, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en colaboración con diversas instituciones de investigación y educación superior, tanto nacionales como internacionales, ha impulsado la creación del Laboratorio Nacional de Concentración Solar y Química Solar. Este proyecto, entre sus objetivos, considera la construcción de un Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR). Ello posibilitaría tener infraestructura para desarrollar tecnología de punta en el área de las aplicaciones termosolares. El horno que se está proyectando sería ubicado en las instalaciones del Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM en Temixco, Morelos.

Se han considerado algunas características básicas para dicho horno, como son, una potencia de 30 kW térmicos, concentraciones pico superiores a los 10 000 soles, un sistema óptico de facetas múltiples con un área de captación cercana a los 40 m², y una distancia focal de 3.68 m. El horno solar contará con un helióstato de 70 m², y un edificio de laboratorios para albergar salas de instrumentación y control de los experimentos. El edificio estará equipado con ordenadores, sistemas de adquisición de datos, monitores de video para la observación de experimentos, dispositivos automáticos para los controles del helióstato, atenuador, mesa de ensayos, e instrumentos para monitorear las variables involucradas en los experimentos llevados a cabo en la zona focal.

Con lo anterior, surgió el problema del diseño óptico del HSAFR. Para resolverlo, durante la realización de la tesis, se modeló la concentración de la energía solar mediante el método de trazado de rayos usando la técnica de la convolución. El modelo se implementó a través de un programa de cómputo que permitió conocer las formas e intensidades de las distribuciones de radiación en la zona focal del sistema óptico. El programa de cómputo, desarrollado, permite la simulación de una gran diversidad de configuraciones ópticas, lo que facilitó la realización de los estudios paramétricos requeridos para la optimización del diseño. El trabajo que se desarrolló, como tema de esta tesis, contribuyó de manera fundamental al diseño óptico del HSAFR, con el fin de lograr las características deseadas.

A continuación se describen las etapas que se siguieron para la realización de esta tesis

Planteamiento y solución del modelo matemático

Para el estudio óptico del dispositivo se consideró la metodología de trazado de rayos. Para ello se colaboró de manera cercana con investigadores de la Universidad Complutense de Madrid y del CIEMAT en España. De esta colaboración, se desarrolló un código de simulación que fue implementado en el programa de cómputo elaborado en esta tesis.

Validación del Código Numérico

Los resultados de las simulaciones fueron comparados con otro software disponible. También se realizó la comparación con resultados experimentales obtenidos de otros concentradores solares como son el DEFAC, en el CIE-UNAM; o el horno solar de la PSA, en España.

Estudio Paramétrico

Con la información teórica disponible se realizó el estudio paramétrico de diversas configuraciones ópticas, a fin de definir la configuración final del sistema que permitieran alcanzar las características deseadas.

Elaboración de trabajos y reportes de investigación

A partir de los resultados esperados en el desarrollo de la tesis se elaboraron, en colaboración con otros investigadores, diversos reportes que contemplan, artículos de investigación y trabajos en congresos.

El trabajo realizado, en cada una de las etapas, se explica detalladamente en los capítulos que conforman esta tesis. El contenido de cada uno de los capítulos se explica a continuación:

El capítulo uno aborda un panorama energético que es el actual motor del desarrollo de las energías renovables. También se hace una descripción de las principales tecnologías solares para la generación de energía y se describe el funcionamiento y aplicaciones de los hornos solares, así como su relevancia en el desarrollo de las tecnologías termosolares en el mundo. En este capítulo se describe el proyecto del diseño óptico del horno solar para el CIE y cuales serán los objetivos que se persiguen en este trabajo de tesis.

El capítulo segundo describe el modelo físico y matemático que sustentan los resultados alcanzados para el diseño del horno solar. A partir de los modelos físico y matemático se elaboró el programa de computo Tonalli¹. En este capítulo también se describen las rutinas básicas que componen al programa y una explicación detallada de los parámetros que se utilizan para el funcionamiento del mismo.

En el capítulo tercero se presenta los estudios de validación realizados para verificar la fiabilidad de los resultados aportados por el programa Tonalli. Para ello se reproducen resultados ya conocidos para sistemas de concentración de configuración simple. También se hace la

¹ Este término en el idioma náhuatl tiene diversas acepciones como son: energía, día, luz solar, y calor. En algunos foros el término tonalli esta asociado al concepto de irradiación o rayos de luz. También se le ha asociado con el destino y con el espíritu humano, aunque estas acepciones provienen de que en el pensamiento náhuatl los humanos son parte de la materia y la energía del universo

comparación con los resultados obtenidos de otros programas de cómputo utilizados para la modelación de sistemas de concentración solar. El programa Tonalli fue utilizado para reproducir algunos de los resultados experimentales del concentrador solar DEFAC, ubicado en el CIE en la Ciudad de Temixco Morelos; y del horno solar de la PSA, ubicado en la ciudad de Almería, España.

En el capítulo 4 se describen los estudios paramétricos que se realizaron para determinar la dependencia de la distribución espacial de la irradiancia solar concentrada con los parámetros que caracterizan la configuración óptica de un horno solar de facetas múltiples. También se describe el programa desarrollado para la obtención de iso-superficies de irradiancia en sistemas de concentración de foco puntual. Este programa se espera que pueda ser importante para el estudio y diseño de receptores en el horno solar, así como otro tipo de sistemas de concentración.

En el capítulo 5 se describen las características y diseño óptico del horno solar de alto flujo para el CIE, UNAM. Este capítulo contiene los estudios realizados para la obtención del diseño final así como los resultados esperados para su desempeño final, una vez construido. Se incluye una descripción de la distribución de facetas del helióstato y una descripción del edificio que albergará al horno solar y los laboratorios que serán parte del complejo.

Lista de figuras:

Figura 1.1. Distribución del suministro mundial de energía primaria desde 1971 a 2005.

Figura 1.2. Predicción de la producción mundial de petróleo.

Figura 1.3. Escenario mundial de energía 2000-2050.

Figura 1.4. Proyección de la transformación del sistema energético mundial.

Figura 1.5. Porcentaje de la oferta nacional de energía primaria excepto petróleo y sus derivados.

Figura 1.6. Eficiencia de Carnot para una máquina térmica y eficiencia óptica para sistemas de concentración con diferentes factores de concentración.

Figura 1.7. Eficiencia combinada para sistemas de conversión de potencia que utilizan sistemas de concentración solar.

Figura 1.8. A) Los sistemas pasivos se utilizan en arquitectura para el acondicionamiento climático de las construcciones. B) Los captadores solares planos colectan la luz solar para el calentamiento de agua ya sea en casas o piscinas.

Figura 1.9. Cocedor solar con respaldo eléctrico sin seguimiento.

Figura 1.10. Sistemas para la generación de potencia eléctrica.

Figura 1.11. Los sistemas CCP concentran la radiación solar sobre un tubo colocado en la línea focal del sistema.

Figura 1.12. Complejo de plantas SEGS (*Solar Electric Generating Systems*) en el desierto de Mohave, California, USA.

Figura 1.13. (Arriba) Planta solar PS10 en Sevilla, España. (Derecha) Vista aérea de la PS10 y del terreno para la PS20.

Figura 1.14. Sistemas *Dish-Stirling* de la empresa *Stirling Energy Systems Inc.*

Figura 1.15. Ejemplos de sistemas de disco parabólico desarrollados en las últimas tres décadas.

Figura 1.16. Esquema de componentes de un horno solar.

Figura 1.17. Fotografía del horno solar de Odeillo en Francia.

Figura 1.18. Esquema de la distribución de los componentes ópticos del horno solar del DLR.

Figura 1.19. Fotografías del horno solar del DLR en Alemania.

Figura 1.20. Esquema del horno solar de 2 etapas en el PSI.

Figura 2.1. Distribuciones angulares que se usan comúnmente en la modelación de sistemas de concentración solar.

Figura 2.2. Curvas de reflectividad especular para diferentes metales usados en aplicaciones solares.

Figura 2.3. Esquemas de diferentes modos de reflexión.

Figura 2.4. Esquema que ejemplifica los errores de superficie de un espejo respecto a su curvatura ideal.

Figura 2.5. Ejemplo del cálculo de la convolución de dos funciones de escalón en tres puntos diferentes. La línea verde representa el resultado de la convolución en el punto correspondiente.

Figura 2.6. Proyección del cono de irradiancia reflejado en el plano receptor. La forma de la proyección corresponde a una elipse.

Figura 2.7. (a) Esquema que muestra la posición de los ejes propios de la proyección del cono reflejado en el plano receptor. (b) Esquema de la relación trigonométrica de la coordenada y con la coordenada angular α_N , la distancia $d_{i,j}$, y el ángulo α_N entre la dirección de reflexión y el vector normal al plano.

Figura 2.8. (a) Proyección del cono solar en el plano con coordenadas propias de la proyección. (b) Proyección del cono solar una vez que fue orientada con la dirección del rayo reflejado y trasladada al punto de corte del rayo central.

Figura 2.9. Construcción del cono de irradiancia solar A) perfil de irradiancia por archivo. B) puntos del perfil rotados alrededor del eje Z. C) interpolación de puntos en una malla XY de coordenadas angulares. D) Superficie de distribución XY de la irradiancia una vez normalizada.

Figura 2.10. Perfil de la irradiancia solar convolucionado con diversas distribuciones normales de error.

Figura 2.11. Particionamiento de las facetas. A) hexagonal, B) rectangular, C) disco homogéneo, D) radial.

Figura 2.12. Diferencia entre el área medida sobre un espejo curvo y el área medida sobre un espejo plano.

Figura 2.13. Esquema de las variables necesarias para calcular el punto de corte en el plano receptor.

Figura 2.14. Ejemplos de puntos calculados, por el modelo matemático, en un plano receptor fuera de foco. El receptor esta inclinado respecto al eje focal un ángulo de A) 45° y B) 0° .

Figura 2.15. Asignación de los vectores unitarios (\hat{i}) y (\hat{j}) en el plano receptor de acuerdo al sistema de coordenadas geográfico del concentrador.

Figura 2.16. Concentrador de facetas con dos tipos de canteo y los rayos reflejados hacia el foco del sistema. A) canteo "parabólico". B) canteo "enfoca".

Figura 2.17. Ejemplos del posicionamiento de los puntos de reflexión dependiendo de la procedencia de la radiación solar y el punto de enfoque. A) heliostato con Sol en el cenit. B) heliostato con Sol hacia el oeste. C) Horno Solar de Almería en posición vertical.

Figura 2.18. Proyección de la luz solar desviada por el heliostato sobre las facetas del horno.

Figura 2.19. Distribución de facetas generada por la rutina GenDatos_Horno para facetas de 60 cm de diámetro y las áreas efectivas se obtienen una vez que cada espejo es posicionado y orientado de acuerdo a la geometría del canteo, en este caso parabólico.

Figura 2.20. A) Vista en corte transversal de la disposición del espejo concentrador y el plano de incidencia cercano al foco del espejo. B) Vista de la distribución de irradiancia obtenida mediante el cálculo de tres planos consecutivos.

Figura 2.21. Diagrama de flujo de la rutina principal del trazado de rayos en el programa Tonalli.

Figura 3.1. Dimensiones de la imagen para un concentrador de perfil parabólico.

Figura 3.2. Dependencia del factor de concentración y diámetro de la mancha solar con el ángulo de borde para un concentrador de 6 m de radio.

Figura 3.3. Irradiancia en el plano receptor a partir de un modelo de Sol uniforme.

Figura 3.4. Razón F/D óptima para diferentes porcentajes de captación en receptores planos de un espejo circular parabólico.

Figura 3.5. Trazado de rayos de un casquete esférico para diferentes valores de la Razón F/D.

Figura 3.6. Ubicación de un plano receptor a una distancia focal corregida, en un espejo concentrador esférico. Imagen obtenida con el programa de trazado de rayos Tonalli.

Figura 3.7. Distancia focal óptima de un espejo circular esférico para diferentes errores ópticos de superficie en un receptor plano.

- Figura 3.8.** Distribución de energía en el plano focal para el DEFAC.
- Figura 3.9.** Distribución relativa de errores que genera el programa *Espejos* para la simulación del DEFAC.
- Figura 3.10.** Distribución de energía en el plano focal para el DEFAC.
- Figura 3.11.** Comparación de los resultados de irradiancia, en un plano receptor, con los resultados de los programas Circe2 y Tonalli (error óptico de 0 mrad).
- Figura 3.12.** Comparación de los resultados de irradiancia, en un plano receptor, para diferentes errores ópticos. Resultados de los programas Circe2 y Tonalli.
- Figura 3.13.** Dispositivo experimental para la caracterización óptica del DEFAC.
- Figura 3.14.** Distribución de irradiancia, obtenida con el programa Tonalli, para un plano receptor del concentrador DEFAC.
- Figura 3.15.** Ubicación de los espejos del DEFAC dentro de sus grupos A, B y C.
- Figura 3.16.** Dispositivo experimental para la caracterización óptica del horno de la PSA.
- Figura 3.17.** Proyección de la luz solar desde el helióstato GM-140 hacia el horno solar de la PSA para el día 29/IX/2004 a las 14:28.
- Figura 3.18.** Reflectividades de las facetas considerando los sombreados y la proyección del helióstato sobre el horno.
- Figura 3.19.** Reflectividades de las facetas considerando los sombreados y la proyección del helióstato sobre el horno.
- Figura 3.20.** Distribución de irradiancia en un planos situado en el punto focal, para un error de 6.6 mrad.
- Figura 3.21.** Distribuciones de Irradiancia, en planos situados 15 cm antes del punto focal, correspondientes a: (a) la modelación por trazado de rayos, (b) las imágenes obtenidas experimentalmente.
- Figura 3.22.** Tres casos de distribución de los puntos de ataque de las facetas, alrededor del punto focal ubicado en el origen de la figura.
- Figura 3.23.** Distribución de irradiancia para un plano a 15 cm antes del punto focal.
- Figura 3.24.** Distribución de irradiancia, para un plano a 15 cm antes del punto focal. (a) caso B . (b) caso C.
- Figura 3.25.** Comparación de la distribución de irradiancia, para un plano en el punto focal, en el caso A y en la irradiancia obtenida experimentalmente.
- Figura 4.1.** Área efectiva cubierta por facetas de diferentes formas.
- Figura 4.2.** Curvas de irradiancia promedio para los diferentes niveles de facetas (Error óptico = 0 mrad).
- Figura 4.3.** Dependencia de la irradiancia promedio con el número de facetas y la distancia focal para errores ópticos globales de 2 y 3 mrad.
- Figura 4.4.** Dependencia de la irradiancia pico con el número de facetas y la distancia focal para errores ópticos globales de 0, 2 y 3 mrad.
- Figura 4.5.** Dependencia del pico de irradiancia con la variación de la distancia focal de las facetas respecto a su valor óptimo.
- Figura 4.6.** Esquema con las distancias focales óptimas para cada faceta de acuerdo a su posición en el sistema óptico.
- Figura 4.7.** Esquema con la ubicación de los diferentes grupos de facetas.
- Figura 4.8.** Gráfica de la irradiancia pico para diferentes configuraciones de distancias focales.

Figura 4.9. Gráfica de la irradiancia pico y promedio para diferentes distancias focales únicas.

Figura 4.10. Esquema de la disposición de un concentrador y de los planos sobre los cuales se calcula la distribución de irradiancia.

Figura 4.11. (a) Planos de irradiancia alrededor del punto focal. (b) Interpolación para obtener una superficie con puntos de igual irradiancia entre planos (protosuperficie).

Figura 4.12. Diferencia entre los planos tangentes a una protosuperficie y los planos paralelos con que se calculó la protosuperficie.

Figura 4.13. (a) disposición de los planos inclinados sobre los cuales se calcula la distribución de irradiancia. (b) Conjunto de planos con las distribuciones de irradiancia y una protosuperficie.

Figura 4.14. (a) Vista esquemática de la superposición de protosuperficies para generar un iso-superficie. (b) Superposición de protosuperficies a lo largo del eje X, los puntos en rojo corresponden a la iso-superficie.

Figura 4.15. Iso-superficie obtenida para un concentrador de simetría cuadrangular.

Figura 4.16. Sección transversal de iso-superficies de irradiancia obtenidas de un concentrador parabólico de revolución.

Figura 4.17. Sección transversal de iso-superficies de irradiancia de $4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$, suponiendo diferentes errores en la superficie de los espejos.

Figure 4.18. (a) Irradiancia sobre dos iso- superficies de 1×10^6 y $8 \times 10^5 \text{ W/m}^2$. (b) Irradiancia sobre un plano colocado en la misma posición de la iso-superficie de $8 \times 10^5 \text{ W/m}^2$.

Figura 5.1. Disposición de las facetas en el diseño del INAOE-CIE.

Figura 5.2. Las facetas sobre la esfera son reorientadas para lograr la concentración en el foco del sistema. (a) Facetas en un canteo esférico. (b) Canteo esférico modificado.

Figura 5.3. Ejemplo de la deformación de las facetas hexagonales del horno respecto a su forma ideal.

Figura 5.4. Distribución de las distancias focales y los grupos de espejos en el sistema óptico del HSAFR.

Figura 5.5. Distribución de irradiancia en el plano focal del sistema para el caso de: A) canteo parabólico, B) canteo esférico modificado.

Figura 5.6. (a) Trazado de rayos para estructuras esféricas con diferentes radios de curvatura. (b) Comparación del ángulo de apertura de la incidencia de rayos para los diferentes radios de canteo.

Figura 5.7. Variación de la concentración pico con la distancia focal del arreglo para la propuesta del Horno solar INAOE-CIE.

Figura 5.8. Potencia total para diferentes radios de captación.

Figura 5.9. Flujo Pico obtenido en el receptor con diferentes ajustes de la distancia focal de las facetas.

Figura 5.10. Radio de la mancha solar para cada una de las configuraciones del sistema óptico de 409 espejos.

Figura 5.11. Radio de la mancha solar y Flujos pico y promedio para diferentes errores ópticos en los espejos.

Figura 5.12. Flujos pico para diferentes distancias focales y errores ópticos en los espejos.

Figura 5.13. Flujos promedio para diferentes distancias focales y errores ópticos en los espejos.

Figura 5.14. (a) Esquema de planos alrededor del punto focal del sistema con su respectiva distribución de irradiancia. (b) Irradiancia pico para los diferentes planos, ya sea a lo largo del eje focal, o bien a lo largo de un eje radial de un plano ubicado en el punto focal.

Figura 5.15. Irradiancia alrededor del punto focal en planos ortogonales al eje del sistema. (a) Corte transversal a lo largo del eje focal. (b) Curvas de nivel de la sección transversal.

Figura 5.16. Corte transversal de las curvas de nivel alrededor del punto focal del sistema.

Figura 5.17. Esquema de la proyección del helióstato sobre el concentrador del horno en el solsticio de verano.

Figura 5.18. Esquemas de proyección del helióstato ($7.8 \times 9 \text{ m}^2$) para los solsticios y equinoccios a diferentes horas del día.

Figura 5.19. Esquemas de proyección del helióstato ($10.4 \times 9 \text{ m}^2$) para los solsticios y equinoccios a diferentes horas del día.

Figura 5.20. Número de días adecuados para operar el horno (año 2005).

Figura 5.21. Ubicación del horno solar dentro de los terrenos del CIE.

Figura 5.22. Fotografías del horno de la PSA. (a) mesa de ensayos en la zona focal. (b) computadoras de control y visualización de la mesa de ensayos. (c) Helióstato de 120 m^2 frente al horno solar.

Figura 5.23. Plano planta baja, laboratorio de química solar y base de la estructura del concentrador Nivel +0.00 m.

Figura 5.24. Vista en corte longitudinal de la cara norte del edificio del horno solar.

Figura 5.25. Plano planta del laboratorio de instrumentación. Nivel +3.00 m

Figura 5.26. Plano planta alta, cuarto de control del horno solar. Nivel +5.45 m

Figura 5.27. Dibujo a mano alzada de la cara Sur-Oriente del edificio del horno y la plataforma solar sur.

Figura 5.28. Dibujo a mano alzada de la cara Norte- Poniente del edificio del horno y la plataforma solar sur.

Lista de Tablas:

Tabla 1.1. Proyectos de torre central desarrollados en el mundo antes de la planta PS10.

Tabla 1.2. Características principales de las diferentes plantas termoeléctricas (Zarza, Sánchez y Téllez, 2005).

Tabla 1.3. Factores típicos de transmisividad para un horno solar de doble reflexión.

Tabla 2.1. Rutinas principales para la modelación de trazado de rayos.

Tabla 3.1. Parámetros para modelación a la distancia focal óptima ($F/D = 0.58$).

Tabla 3.2. Parámetros para modelación con distancia focal variable.

Tabla 3.3. Diferencia máxima entre un concentrador parabólico y esférico, para diferentes razones F/D .

Tabla 3.4. Parámetros para la comparación de resultados entre los programas CIRCE y Tonalli.

Tabla 3.5. Coordenadas y características ópticas de los espejos del DEFRAC.

Tabla 3.6. Comparación de las irradiancias experimentales con las obtenidas del programa Tonalli.

Tabla 3.7. Descripción de los componentes principales del equipo utilizado para la campaña experimental.

Tabla 3.8. Resumen del sombreado para cada faceta, debido a los diferentes componentes del sistema.

Tabla 3.9. Comparación entre la modelo- experimento para un plano en el punto focal y un error óptico global de 6.6 mrad.

Tabla 3.10. Comparación entre la modelo- experimento para un plano a -15 cm del punto focal y un error óptico global de 6.6 mrad.

Tabla 3.11. Posición del plano receptor = 7.285 m (-15 cm desde el punto focal).

Tabla 3.12. Posición del plano receptor = 7.435 m (plano sobre el punto focal).

Tabla 4.1. Tamaño de las facetas y área efectiva del horno para sistemas ópticos con diferentes números de facetas.

Tabla 5.1. Grupos de distancias focales considerados para el HSAFR.

Tabla 5.2. Configuraciones consideradas para el diseño óptico del HSAFR.

Tabla 5.3. Resumen del estudio de comparación entre las simulaciones efectuadas para diferentes configuraciones del Horno Solar CIE-UNAM.

Capítulo 1

Introducción

...Entonces Anar se levantó en toda su Gloria, y el primer amanecer del Sol fue como una gran llamarada en las torres de las Pelori, las nubes de la Tierra media resplandecieron, y se oyó el sonido de muchas cataratas.....

J.R.R. Tolkien (El Silmarrillion)

1.1 Energía y medio ambiente

Vivimos en el final de la era del petróleo, durante los últimos 100 años la mayoría de los países del mundo han desarrollado un sin número de productos y servicios que son posibles en buena medida por el aprovechamiento de este recurso. Nos transportamos por aire, tierra y mar principalmente por la quema de hidrocarburos; la industria petroquímica provee las materias primas con las que se fabrican todo tipo de artículos que van desde detergentes, medias de nylon o fibras como el poliéster, hasta la elaboración de instrumental quirúrgico, prótesis, aparatos científicos e industriales, pasando por la elaboración de solventes, lubricantes, hules sintéticos, fármacos y todos los artículos que requieren del plástico en su elaboración.

El principal uso del petróleo es como fuente de energía primaria. Los hidrocarburos (petróleo y gas) representan el 55% de del abastecimiento de energía mundial (figura 1.1), y si consideramos a todos los combustibles que aportan CO₂ a la atmósfera (hidrocarburos y carbón) el porcentaje asciende al 81% de la generación total de energía en el mundo. En contraparte, la aportación de las fuentes renovables no relacionadas con la quema de combustible o la gran hidro (solar, eólica, geotérmica y mareas) es totalmente marginal, siendo apenas de 0.5%.

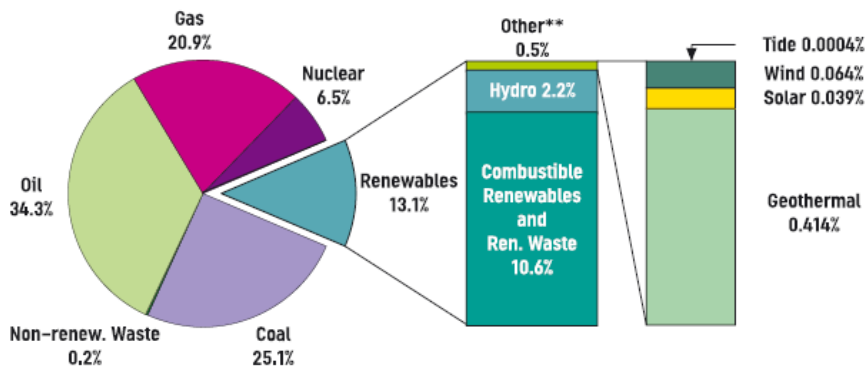


Figura 1.1. Distribución del suministro mundial de energía primaria desde 1971 a 2005 (Key World Energy Statistics, IEA 2007)

Se espera que durante el presente siglo, el consumo de petróleo deje de ser una opción rentable para la generación de energía. Diversos analistas pronostican que la producción mundial alcance su máximo en aproximadamente el año 2012 para después comenzar a disminuir conforme los principales yacimientos del mundo se vayan agotando (figura 1.2). La gráfica muestra que la producción decae gradualmente, sin embargo la demanda de energía a nivel mundial se está incrementando tanto por el aumento de la población mundial, como por el aumento de la actividad económica de los países de tercer mundo, los cuales tienen la necesidad de elevar el nivel de vida de su población. La demanda energética mundial está incrementándose a un ritmo aproximado de 2% anual. Por otro lado, la producción de petróleo está casi en su máximo y comenzará a decrecer. El problema es que el crecimiento de otras formas de energía no podrá compensar en conjunto la bajada de producción de petróleo y el aumento de la demanda de energía (figura 1.3).

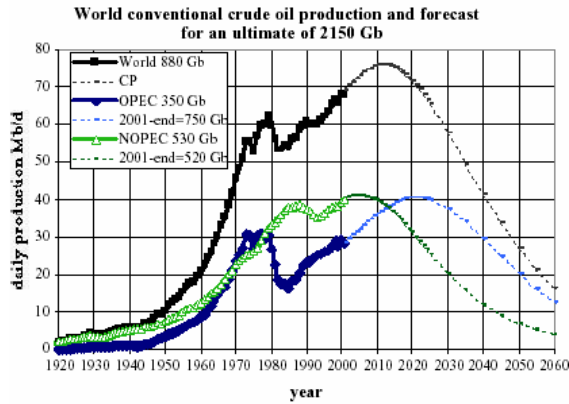


Figura 1.2. Predicción de la producción mundial de petróleo, (Jean Laherrere, 2003)

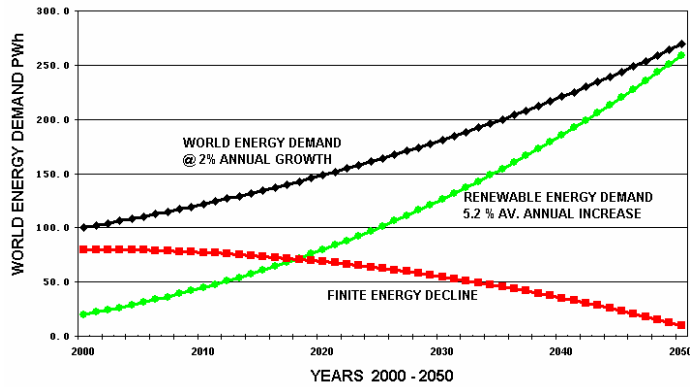


Figura 1.3. Escenario mundial de energía 2000-2050. Fuente para energía finita: ASPO-ODAC www.energiekrise.de & Kyoto Protocol

Aun cuando en el largo plazo las energías renovables serán nuestra principal fuente de energía, en el corto plazo, su aprovechamiento no se está incrementando con un ritmo suficiente. Parece inevitable que en las próximas décadas se llegue a un escenario en que la demanda mundial de petróleo supere a la oferta antes de que dispongamos de una fuente alternativa que pueda satisfacer el crecimiento en la demanda de petróleo.

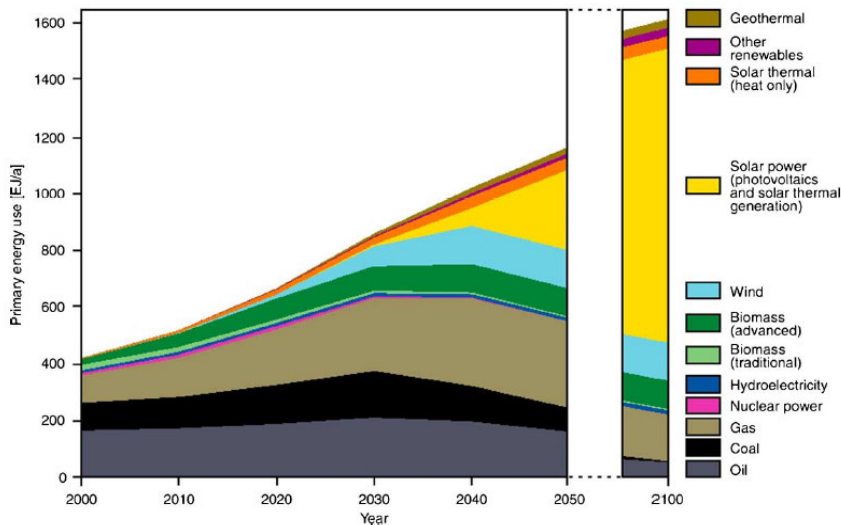


Figura 1.4: Proyección de la transformación del sistema energético mundial (Fuente: German Advisory Council on Global Change, 2003).

Ante esta situación se han impulsado diversos acuerdos internacionales para tratar tanto de revertir la dependencia energética del petróleo como de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Uno de los acuerdos más importantes es el llamado protocolo de Kyoto, el cual tiene el objetivo de que en el periodo 2008-2012 los países industrializados reduzcan sus emisiones de gases que originan el efecto de invernadero en un 5.2% respecto a 1990. En su origen, el acuerdo fue firmado por 34 países industrializados (en su mayoría europeos). Actualmente hay 141 países que se han adherido al acuerdo. Sin embargo, Estados Unidos (el principal emisor de CO₂ en el

mundo) dejó de apoyar el protocolo en 2001 por las enormes inversiones que representa cumplirlo, y porque algunas naciones en vías de desarrollo no están obligadas a alcanzar la meta, a pesar de contribuir enormemente con la emisión de CO₂, como es el caso de China y la India. Algunos estiman que el tratado aborda el problema de manera superficial pues, para controlar el calentamiento global, estiman que se requieren reducciones de hasta el 60%.

Una iniciativa que parece tener mejores posibilidades de éxito es el Libro Blanco de las Energías Renovables². Este documento representa un acuerdo entre los países de la unión europea con el objetivo de lograr, en el año 2010, que el 12% de la energía consumida proviniera de fuentes renovables. Para el 2001, la cuota de las fuentes de energía renovables respecto del total del consumo interior bruto de energía de la Unión era del 6%. El objetivo es doblar esta cuota hacia el 2010. El plan de acción del Libro Blanco tiene también otros objetivos esenciales:

- Eliminación de 402 millones de toneladas de emisiones de CO₂ al año mediante el uso de energías renovables. (1.6% de las emisiones globales)
- Aumentar en más de 100 veces la capacidad solar fotovoltaica instalada.
- Aumentar en 20 veces la capacidad de producción eólica.
- Aumentar en 15 veces la capacidad de producción solar térmica.
- Triplicar la energía producida a partir de biomasa.

En el marco de este plan, diversos países se han planteado metas más ambiciosas. Sin embargo, aun resultan modestas para poder enfrentar la emisión de CO₂ y la caída de las reservas de petróleo en las próximas décadas. Por mencionar un ejemplo, la eliminación de CO₂ que se ha planteado apenas representa un 1.6% del total de emisiones a nivel mundial.

Caso de México

En México las reservas probadas de hidrocarburos, estimadas por PEMEX, se encuentran en aproximadamente 15 514 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (al 1 de enero de 2007)³, y al ritmo de consumo actual, la relación reservas-producción pronosticaría el agotamiento de los actuales yacimientos en 9.6 años. Este escenario resulta incongruente con los escasos esfuerzos del país por impulsar otras fuentes energéticas, o invertir en exploración. De acuerdo con datos del INEGI la dependencia energética con los hidrocarburos se ha mantenido prácticamente constante en alrededor de 82% desde 1994 hasta 2004.

Esto significa que en más de una década no se ha tenido ninguna política exitosa para prevenir el eventual agotamiento de petróleo en el país, lo cual se espera que pueda ocurrir durante la próxima década. Cabe señalar que en el último año (septiembre de 2006 a mayo de 2007) la

² Fuente: <http://europa.eu/scadplus/leg/es/lvb/l27023.htm>

³ Fuente: PEMEX, "Las reservas de hidrocarburos, evaluación al 1 de enero de 2007"

energía eólica creció de manera importante por la operación de un proyecto de 88.2 MW en la zona del Istmo. Sin embargo la producción de energía eléctrica por este medio apenas ha llegado a representar el 0.2% de la generación de energía eléctrica nacional⁴

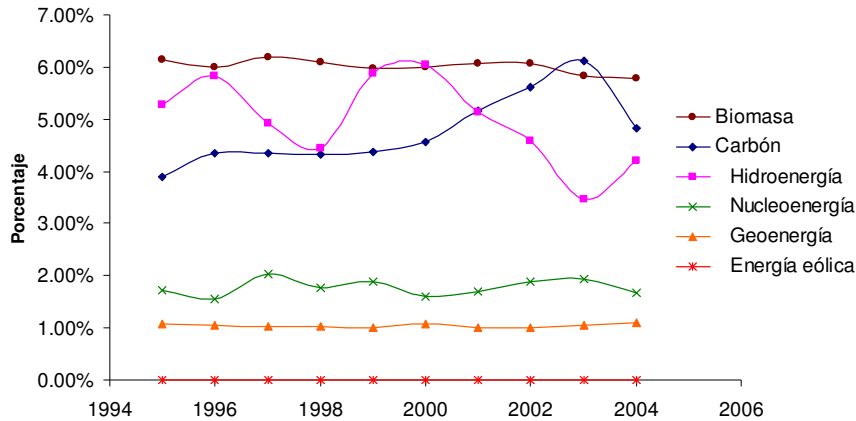


Figura 1.5. Porcentaje de la oferta nacional de energía primaria excepto petróleo y sus derivados.

Nuestro país tiene un enorme potencial para el aprovechamiento de la energía solar. Está ubicado en una posición privilegiada en el hemisferio norte entre las latitudes 14° 32' y 32° 43', que incluyen a la línea del trópico de cáncer, con una superficie de casi 2 millones de kilómetros cuadrados, un poco más de dos terceras partes de la superficie del país puede considerarse con un clima desértico o semidesértico. La irradiancia solar promedio en estos vastos territorios es superior a los 5.5 kWh/m²/día (Rincón, 1999). Si se pudiera aprovechar toda la energía captada por una superficie de 2 m² por habitante, en un año la captación de energía solar equivaldría a 4015 kWh/hab. Con ello se lograría un nivel de consumo similar a los países europeos que en promedio consumen 4000 kWh/hab/año (Rincón, 1999).

Haciendo un cálculo más realista, los actuales sistemas de conversión de energía solar tienen un rendimiento anual medio que oscila entre un 8% y un 20%. Esto supone que en la práctica sería necesaria una superficie entre 10 y 20 m² por habitante. Además, como una parte de esta energía debería ser almacenada, podrían suponerse unas pérdidas adicionales de un 20% que, unidas a las pérdidas de transporte, que son del orden del 5%, serían necesarios entre 12 y 25 m² por habitante. Si se considera que, en promedio, hay 4.4 habitantes por vivienda⁵, el área requerida por cada una sería entre 53 y 110 m². Si la población total en México fuera de 100 millones de habitantes, se requeriría un área de captación de inferior a 2500 km², (el equivalente a un cuadrado de 50 km x 50 km) es decir aproximadamente el 0.15% del territorio nacional.

⁴ Fuente: INEGI, de acuerdo a cifras de la Comisión Federal de Electricidad.

⁵ Fuente: INEGI, de acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2000.

En virtud de la disponibilidad de recurso solar en nuestro territorio, así como los retos energéticos que plantea el futuro del petróleo, México deberá emprender, en el corto plazo, el desarrollo y aplicación de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar. Por estas razones, el Centro de Investigación en Energía de la UNAM, ha impulsado un proyecto para la formación de un Laboratorio Nacional de Infraestructura en Sistemas de Concentración Solar y Química Solar⁶, a través del diseño, la construcción y la puesta en operación de tres sistemas solares: un Horno Solar de Alto Flujo Radiativo, una Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales y un Campo de Pruebas para Helióstatos. Se espera que el CIE y las instituciones participantes, en este proyecto, contribuyan al avance del desarrollo de las tecnologías de concentración solar en México, generando conocimiento científico y tecnológico, así como formando recursos humanos de alto nivel en el área.

Cada subproyecto tiene un objetivo general y objetivos particulares. El objetivo general, del subproyecto del horno solar, es usar la radiación solar concentrada tanto para investigación básica, aplicada y desarrollo tecnológico, como para el estudio de varios procesos industriales y el desarrollo de componentes de tecnologías para la generación termosolar de potencia eléctrica, entre otros.

1.2 Tecnologías termosolares de la concentración solar

Los sistemas de concentración solar tienen como finalidad incrementar el flujo de radiación solar sobre receptores diseñados para absorberla. La idea fundamental es capturar la energía solar para transformarla en calor útil que pueda aprovecharse como fuente directa de calor. O bien, para ser transformada posteriormente en energía mecánica o energía eléctrica. La generación de potencia a partir de la energía solar, requiere necesariamente de sistemas de concentración solar. La razón de esto es que la eficiencia, de los procesos de conversión, depende de la obtención de altas temperaturas. Este es el caso de las máquinas térmicas, en las cuales la eficiencia ideal esta dada a partir del ciclo de Carnot, de acuerdo con la expresión:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{amb}}{T_{abs}} .$$

En esta ecuación, T_{abs} es la temperatura del absorbedor de la radiación solar y T_{amb} es la temperatura ambiente. Si se quiere calcular la eficiencia respecto a la entrada global de energía solar al sistema, entonces esta eficiencia global es resultado de la combinación de la eficiencia de

⁶ Este proyecto fue aprobado por la UNAM y el CONACYT dentro del marco de la convocatoria de Apoyos Complementarios para el Establecimiento de Laboratorios Nacionales de Infraestructura Científica o Desarrollo Tecnológico 2006.

la máquina térmica y de la eficiencia óptica del receptor. Esta última puede calcularse como el cociente de la energía total absorbida por el receptor entre la energía solar total incidente sobre este. La potencia absorbida puede calcularse como la diferencia de la potencia absorbida \dot{Q}_{ent} y las pérdidas al ambiente \dot{Q}_{perd} . La potencia solar total de entrada, se obtiene del producto de la irradiancia solar concentrada ϕ_G por el área de entrada al receptor A_{rec}

$$\eta_{rec} = \frac{\dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{perd}}{\phi_G A_{rec}}$$

La potencia absorbida puede calcularse como la potencia solar de entrada por la absorptancia α del receptor; por otro lado, las pérdidas al ambiente pueden calcularse a partir de la potencia radiada, de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann; entonces pueden escribirse las dos siguientes relaciones.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ent} &= \alpha \phi_G A_{rec} \\ \dot{Q}_{perd} &= A_{rec} \sigma \varepsilon (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \end{aligned}$$

Donde σ es la constante de Estefan-Boltzmann y ε es la emisividad efectiva del receptor. La ecuación de eficiencia del receptor puede reescribirse como:

$$\eta_{rec} = \alpha - \frac{\sigma \varepsilon (T_{abs}^4 - T_{amb}^4)}{\phi_G}$$

Mientras que la eficiencia óptica disminuye con la temperatura del absorbedor, la eficiencia del ciclo termodinámico aumenta (figura 1.6). Por lo tanto cada sistema de concentración tendrá un valor óptimo de temperatura de absorbedor en función del factor de concentración del sistema óptico.

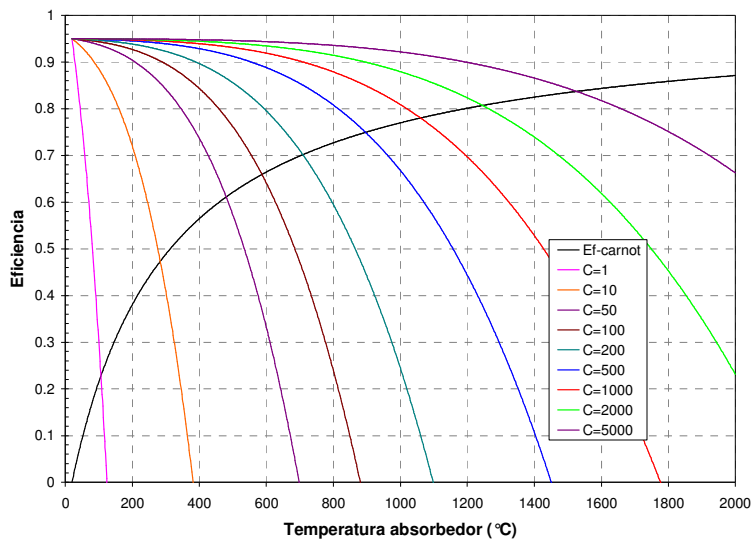


Figura 1.6: Eficiencia de Carnot para una máquina térmica y eficiencia óptica para sistemas de concentración con diferentes factores de concentración.

La eficiencia combinada puede calcularse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\eta_{Comb} = \left(\alpha - \frac{\sigma \varepsilon (T_{abs}^4 - T_{amb}^4)}{\phi_G} \right) \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{abs}} \right) .$$

En la figura 1.7 puede apreciarse los valores óptimos de temperatura para los diferentes factores de concentración. Por ejemplo, si una planta, cuyo sistema óptico esta formado por canales cilíndrico parabólicos, tiene un factor de concentración de 50, deberá operar con una temperatura de absorbedor de aproximadamente 370 °C. Si el factor de concentración fuera de 1000, entonces debería operar a aproximadamente 840 °C, aunque esto representa diversos retos tecnológicos en cuanto a la transferencia de energía al fluido de trabajo.

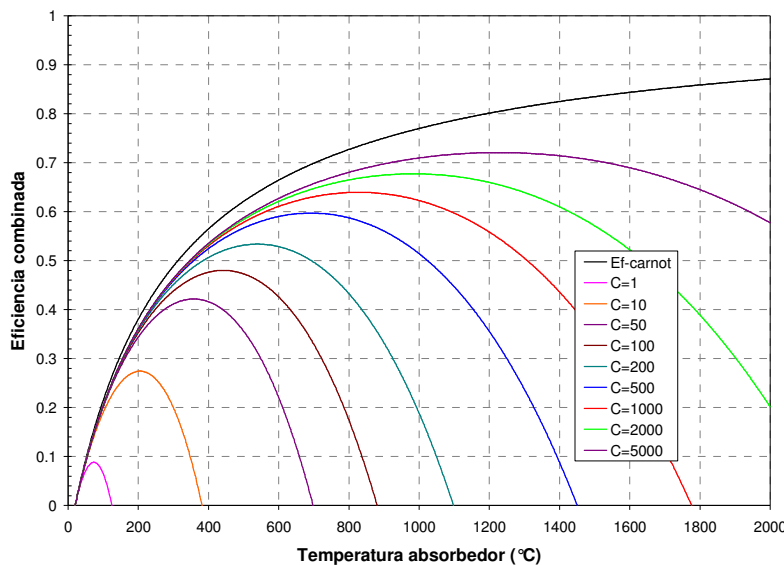


Figura 1.7: Eficiencia combinada para sistemas de conversión de potencia que utilizan sistemas de concentración solar.

Existen diversas configuraciones para los sistemas de concentración solar, pueden ser reflectores o refractores; pueden formar imagen solar o no formarla; pueden seguir al sol, tener ajustes periódicos o estar fijos; pueden ser cilíndricos para enfocar sobre una "línea" (concentradores bidimensionales) o circulares para enfocar sobre un "punto" (concentradores tridimensionales). Las tecnologías que concentran la luz del Sol podemos separarlas en tres grandes grupos dependiendo de su aplicación:

- **Sistemas de baja temperatura:** son tecnologías que permiten obtener temperaturas de salida en un intervalo de 80 °C a 100 °C aproximadamente. En general no requieren de concentrar la radiación solar y tampoco requieren de seguir el movimiento diario del Sol. La aplicación más extendida es el colector plano para producir agua caliente sanitaria en casas, piscinas y edificios en general. Los sistemas de baja temperatura también tienen aplicaciones agrícolas,

como es el secado solar de maderas o productos del campo. En las ciudades tienen aplicaciones pasivas como es el acondicionamiento de casas y edificios. También se encuentran en fase de investigación el uso de captadores para la detoxificación de aguas industriales.

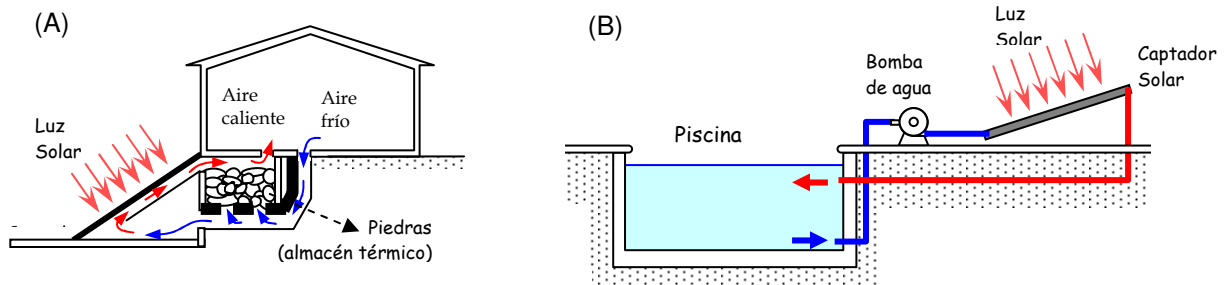


Figura 1.8: A) Los sistemas pasivos se utilizan en arquitectura para el acondicionamiento climático de las construcciones. B) Los captadores solares planos colectan la luz solar para el calentamiento de agua ya sea en casas o piscinas.

- **Sistemas de media temperatura:** son tecnologías que permiten obtener temperaturas en fluido de salida en un intervalo aproximado entre los 80 °C y los 250 °C. Éstas ya requieren de la concentración solar y sus aplicaciones se encuentran en la producción de fluidos térmicos para procesos industriales, la desalinización de agua de mar, refrigeración mediante energía solar y cocción de alimentos. Entre los dispositivos típicos de estos sistemas, se encuentran los CPC y los de geometría “axial” como los concentradores cilindro-parabólicos. Estos últimos requieren de dispositivos para seguir al movimiento del Sol.

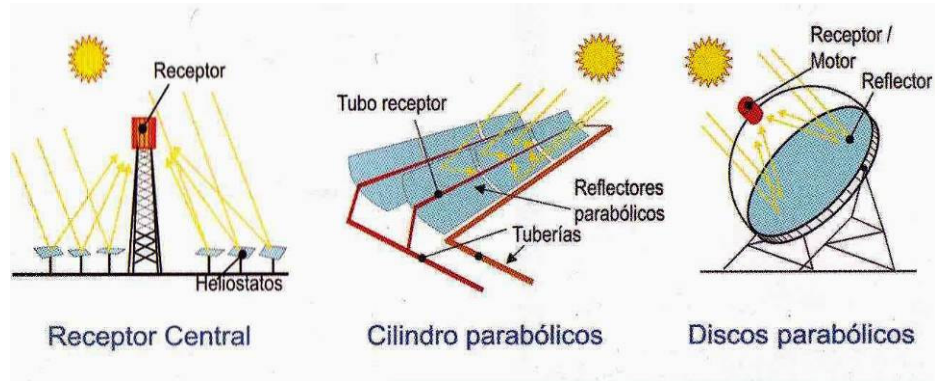


Figura 1.9: Cocina solar hecha con paneles reflectivos. (Tomado de <http://www.solarcooking.org>)

- **Sistemas de alta temperatura:** son tecnologías en las cuales el flujo de salida puede alcanzar temperaturas superiores a los 250 °C y llegar hasta los 2000 °C. Las aplicaciones típicas de estas tecnologías son la producción de electricidad con energía solar. Para ello suele acoplarse, en la región focal, un mecanismo basado en ciclos termodinámicos, o algunos procesos de química solar (por ejemplo el reformado de metano para producir hidrógeno). Los

dispositivos de concentración típicos son de geometría “de revolución” ya sean de superficie única, como los espejos parabólicos de revolución (o discos parabólicos) o de superficies múltiples o faceteadas, como los campos de helióstatos con concentración sobre receptor soportado en torre central. También se cuentan entre estos sistemas los concentradores de tipo Fresnel y los cilíndrico-parabólicos para la generación de potencia eléctrica.

Figura 1.10: Sistemas para la generación de potencia eléctrica.



Una de las principales aplicaciones de los sistemas de concentración solar es la generación de electricidad. A los sistemas usados con este fin se les conoce como plantas solares termoelectricas (PST). En la actualidad existen tres tecnologías de este tipo de plantas y que se denominan: colectores cilíndrico-parabólicos, de receptor central (torre central), y discos Stirling.

Un colector solar cilíndrico parabólico (CCP) está compuesto por un canal cuyo perfil tiene forma de parábola. Esta geometría permite que la radiación solar que incide paralela al eje focal de la parábola se concentre en el foco de la misma. El foco de la parábola se extiende como una línea focal a lo largo de todo el canal. Sobre esta línea se coloca un tubo receptor, y dentro de éste se encuentra el fluido (generalmente aceite) que debe calentarse cuando el tubo absorbe la radiación solar. De esta manera la radiación solar se transforma en calor útil.

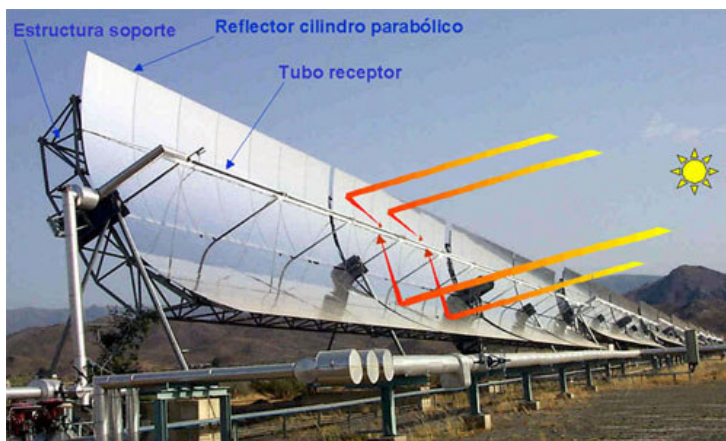


Figura 1.11: Los Sistema CCP concentran la radiación solar sobre un tubo colocado en la línea focal del sistema.

En vista de que estos sistemas suelen trabajar a temperaturas por encima de los 100 °C, estos campos solares pueden acoplarse a un ciclo Rankine de agua vapor para producir electricidad. El sistema en su conjunto tiene 3 componentes: el sistema de concentración, el generador de vapor, y el sistema de potencia. Actualmente, el mayor complejo comercial que opera en el mundo se encuentra en el desierto de Mohave en *Kramer Junction* (California, USA). Y esta constituido por 8 plantas CCP, seis de ellas son de 30 MWe y dos son de 80 MWe, para dar un total de 340 MWe de capacidad instalada. Sin embargo, el costo de la electricidad producida en este tipo de plantas aun es demasiado alto para lograr una expansión comercial. La electricidad obtenida de esta manera resulta poco competitiva frente a las centrales eléctricas convencionales. Es necesario usar estrategias gubernamentales o políticas como la asignación de subsidios a la producción o bien incentivos fiscales a la inversión para lograr crear un mercado que pueda abaratar los altos costos iniciales de instalación. Estos costos oscilan actualmente entre los 2500 y 5000 €/kWe, dependiendo el tamaño de la planta y del sistema de almacenamiento (Zarza, Sánchez y Téllez, 2005).



Figura 1.12: Complejo de plantas SEGS (*Solar Electric Generating Systems*) en el desierto de Mohave, California, USA.



Los sistemas de Torre central conocidos como CRS (*Central Receiver System*) están constituidos por cientos o miles de espejos con seguimiento en dos ejes (helióstatos) que reflejan la radiación solar sobre una región focal que se sitúa a una altura suficiente para evitar sombreadamientos entre helióstatos cercanos entre sí. Estos sistemas pueden concentrar la luz solar hasta 600 veces y operar a temperaturas entre los 250 °C y 1000 °C. Desde sus inicios los CRS fueron concebidos para la generación de alta potencia. Las primeras plantas de prueba se terminaron de construir, a principios de los años ochenta en España (CRS), en Italia (Aurelios) y en Japón (*Sunshine*). Las potencias de estas plantas eran de 0.5 0.75 y 1 MWe respectivamente. La planta *Sunshine* operó durante 3 años mostrando la viabilidad de la tecnología. En estados Unidos se construyó solar-one, un CRS de 10 MWe que operó de 1982 a 1988; sin embargo una drástica caída en los precios del petróleo en la década de los 80, provocó que se considerara poco rentable. De hecho,

la construcción de plantas de torre central se suspendió durante una década partir de 1985, siendo las últimas construidas CESA-1 en Tabernas, España; y C3C-5 en Crimea, Rusia. En la tabla 1 se resumen las características de las plantas de torre central que se han construido desde 1981 hasta la actualidad (Zarza, et al., 2005).

Tabla 1.1. Proyectos de torre central desarrollados en el mundo antes de la planta PS10

Nombre	Ubicación	Tamaño (MWe)	Fluido de transferencia	Entrada en servicio	Financiación
Eurelios	Adrano, Sicilia	0.75	Vapor de agua	1981	Unión Europea
CRS	Almería, España	0.5	Sodio	1981	8 países europeos y USA
Sunshine	Nio, Japón	1	Vapor de agua	1981	Japón
Solar One	California, USA	10	Vapor de agua	1982	USA
Themis	Targasonne, Francia	2.5	Sal fundida	1983	Francia
CESA-1	Almería, España	1.2	Vapor de agua	1984	España
C3C-5	Crimea, Rusia	5	Vapor de agua	1985	Rusia
Solar two	California, USA	10	Sal fundida	1996	USA

A partir de 1996, el diseño y construcción de torres centrales se reinició simultáneamente en diferentes lugares del mundo. En Estados Unidos, se construyó y puso en operación *Solar Two* que funcionó de 1997 a 1999. Esta planta se construyó a partir de Solar-One, pero el fluido de trabajo se cambió de agua/vapor a sales fundidas. Por otra parte, el abaratamiento de los sistemas de control y equipo de cómputo ha permitido experimentar con plantas de menor capacidad. En Australia, se experimenta con sistemas centrales donde la Torre central tiene apenas una decena de metros y el tamaño de los helióstatos es de 5 a 10 m²; a diferencia de los sistemas convencionales donde la torre tiene alturas superiores a 50 m y los helióstatos de puede ser de 60 a 150 m² (Schramek et al, 2006).

Los primeros sistemas comerciales han iniciado su operación o se encuentran en proceso de construcción. La planta solar PS10 tiene una capacidad de 10 MWe y entró en operación en el año 2007, fue construida por la compañía Abengoa con la participación de la Unión Europea y esta ubicada en Sevilla, España. La planta cuenta con una torre de 100 m de altura y 624 helióstatos con un área de 120 m² cada uno. El fluido de trabajo que utiliza es de vapor saturado y trabaja a una temperatura de 250°C. Otras dos plantas están por entrar en operación: La PS20 que tiene el doble de capacidad de la PS10 y su ubicación será adyacente a la PS10. La planta Solar-Tres será construida en Córdoba, España y tendrá una capacidad de 15 MWe y operará con un receptor de sales fundidas aprovechando la experiencia de Estados Unidos con la planta Solar-Two



Figura 1.13: (Arriba) Planta solar PS10 en Sevilla, España. (Derecha) Vista área de la PS10 y del terreno para la PS20

Los sistemas de disco parabólico, o mejor conocidos como Dish-Stirling, deben su nombre a que están diseñados con espejos parabólicos de revolución y un motor de combustión externa Stirling. Estos motores se ubican en la zona focal del concentrador para transformar la radiación solar en electricidad. Los discos-Stirling están pensados para operar a una escala más pequeña que los grandes sistemas CCP o las plantas CRS. Por su tamaño, independencia y modularidad, pueden abastecer de electricidad a regiones donde la densidad de población es baja y dispersa. Llevar electricidad a estas regiones con sistemas convencionales resulta poco rentable y por ello generalmente se utilizan plantas de generación diesel, que a mediano y largo plazo resultaran difícilmente sostenibles.

Un sistema de Disco-Stirling está compuesto de un espejo parabólico de revolución o de un conjunto de espejos parabólicos orientados hacia un mismo punto focal. Normalmente la superficie reflectiva tiene un área entre 40 y 120 m². El sistema completo se mueve continuamente a lo largo del día orientándose con el Sol, de tal forma que la luz solar es reflejada en los espejos hacia el foco del sistema donde se ubica un motor Stirling. La radiación se absorbe en el receptor y ahí se calienta el fluido de trabajo del motor, el cual acciona directamente a un generador de energía eléctrica.

Esta tecnología se ha estudiado extensamente durante los últimos 30 años y ha demostrado las mayores eficiencias de los sistemas solares termoeléctricos, tanto en el punto de diseño como en su producción anual. En la figuras 1.14 y 1.15, se muestran varios tipos de sistemas dish Stirling que han operado durante miles de horas mostrando la viabilidad de la tecnología. En la actualidad se esta ensayando con 6 sistemas Eurodish en la Plataforma Solar de Almería (PSA) y un disco WGA con un motor Stirling de la marca SOLO⁷, esta funcionando en *Sandia National Laboratory*

⁷ SOLO es una compañía alemana que ha comenzado la fabricación de motores Stirling para la producción de electricidad y la cogeneración.

en Estados Unidos. Recientemente se tienen dos proyectos para la construcción de dos plantas solares para generar energía eléctrica con esta tecnología. Se trata de los proyectos *SES solar one* y *SES solar two*. El sistema *dish-stirling* que será utilizado para la implementación de dichos proyectos, corresponde a un diseño originario de *McDonnell Douglas*, y ahora propiedad de la compañía *Stirling Energy Systems Inc.* Cada sistema tiene una capacidad de 25 kW. De realizarse dichos proyectos, estos serán las primeras plantas comerciales que utilicen esta tecnología para la generación de energía eléctrica (www.stirlingenergy.com).



Figura 1.14: Sistemas *Dish-Stirling* de la empresa *Stirling Energy Systems Inc.*

La planta *SES solar one*, contempla en una primera etapa la operación de 20,000 sistemas *Dish-Stirling* para una tener una capacidad de 500 MW. En una segunda etapa, el número de sistemas se elevaría a 34 000 sistemas para una capacidad de generación de 850 MW. Este proyecto estaría ubicado en *San Bernardino County* en una zona sin desarrollo en el desierto de Mohave. El proyecto *SES Solar two*, se ubicará en *Imperial Valley* en California. La planta contará entre 12 000 y 36 000 sistemas, en la primera fase tendrá una capacidad de 300 MW y posteriormente se ampliará a 900 MW.

En la actualidad, la investigación sobre estos sistemas se ha orientado al desarrollo de micro turbinas de gas en lugar de la opción del motor Stirling (Ciclo Bryton). El concepto de utilizar combustibles fósiles con sistemas solares no es nuevo y se ha probado para todas las tecnologías que se han descrito anteriormente. Estas pequeñas turbinas se han desarrollado a partir de una tecnología madura y de mayor fiabilidad que la asociada a los motores Stirling. La eficiencia de conversión calor-electricidad es de aproximadamente el 30% que es menor que la de los motores Stirling. También se están trabajando en la reducción de costes asociados a la eficiencia óptica del concentrador y de los sistemas de seguimiento. En la Universidad Nacional de Australia se

prueba un prototipo de gran tamaño llamado el “*Big Dish*” de 400 m² y una capacidad de 150 kWth; esta diseñado para funcionar con un generador de vapor de 50 kWe o para utilizarse en la cogeneración con producción de vapor solar (Zarza, Sánchez y Téllez, 2005).



Disco Stirling de SAIC



Disco Stirling de WGA Associates



Big Dish. Australian Nacional University



Prototipo SBP-Eurodish

Figura 1.15. Ejemplos de sistemas de disco parabólico desarrollados en las últimas tres décadas (Stine & Diver, 1994).

En la tabla 1.2 se encuentran las características más importantes de las tecnologías de concentración solar utilizadas para la generación de potencia eléctrica. Todas las tecnologías han sido probadas y se ha demostrado su viabilidad. Sin embargo, el reto sigue siendo la reducción de costos ya sea a través de la creación de un mercado y una industria que pueda abaratar los precios de producción; o bien, mediante la investigación y desarrollo de nuevos materiales para receptores, mediante el desarrollo y pruebas de nuevos dispositivos para la generación de potencia o el almacenamiento de energía y obtención de combustibles solares.

Tabla 1.2 Características principales de las diferentes plantas termoeléctricas (Zarza, Sánchez y Téllez, 2005)

Características	Cilíndrico-parabólicos	Receptor Central	Discos Stirling
Potencia de planta	10-200 MW	10-200 MW	5-25 kW
Temperatura de operación	395 °C	250-1000 °C	750 °C
Eficiencia pico (solar eléctrica)	22%	23%	30%
Eficiencia neta anual	11-16%	7-20%	12-25%
Estado comercial	8 plantas en operación rutinaria	Primera planta comercial en operación. Dos en construcción	Prototipos demostrativos
Riesgo tecnológico	Bajo	Medio	Alto
Almacenamiento disponible	Si	Si	Si
Diseños híbridos	Si	Si	Si
Coste W instalado (€/W)	5-2.4	5-2.3	11-3

La disponibilidad de espacios para realizar las tareas de investigación y desarrollo (I+D) asociadas a estas tecnologías es fundamental. Existen diversos centros y laboratorios en el mundo dedicados a las tareas de I+D asociadas al avance de las tecnologías termosolares y en todos ellos es indispensable la disponibilidad de un horno solar de alto flujo radiativo.

1.3 Horno solar como instrumento de investigación

El desarrollo de las tecnologías de concentración requiere de ambientes de laboratorio adecuados para la realización de experimentación y pruebas de dispositivos. Las condiciones en que deben realizarse estos ensayos deben ser lo más parecidas a las condiciones de operación esperadas. Sin embargo, los sistemas de concentración generalmente requieren del seguimiento continuo del Sol, lo que representa un problema para la realización de pruebas debido a las continuas modificaciones y ajuste de los diseños que se requieran durante el desarrollo de las mismas. Es por lo anterior que se desarrolló el concepto del horno solar, con el objetivo, desde su inicio, de ser un instrumento de investigación científica [Bliss 1957]:

- Un horno solar provee una atmósfera de trabajo de trabajo excepcionalmente limpia, sin contaminantes de tipo químico o efectos eléctricos.
- La intensidad de la radiación de energía para calentamiento puede ser controlada con precisión y modificada con rapidez.

Sin embargo un horno solar tiene limitaciones inherentes a sus condiciones de operación como las siguientes [Bliss 1957]:

- Deben colocarse en áreas con poca nubosidad.
- Los ensayos experimentales sólo pueden realizarse de manera intermitente.
- Sólo pueden tratarse muestras pequeñas y una a la vez.

- El costo de un horno solar es moderadamente alto, debido a los requerimientos en su calidad óptica, para hornos de un tamaño moderado con tamaños de la mancha solar de aproximadamente 2.5 a 5 cm; y se incrementa rápidamente hasta ser extremadamente alto para hornos de gran capacidad con tamaños en su mancha solar superiores a 10 cm.

Los hornos solares se constituyen de un sistema óptico compuesto por un helióstato con seguimiento automático del Sol que refleja la radiación solar a un espejo concentrador. El espejo concentrador puede ser un espejo paraboloide o un grupo de espejos esféricos. Debido a que la zona focal del espejo concentrador está fija, es sencillo instalar aparatos experimentales o de aplicación. El nivel de potencia del Horno es ajustado usando un atenuador, que trabaja como una persiana veneciana, y está localizado ente el helióstato y el concentrador.

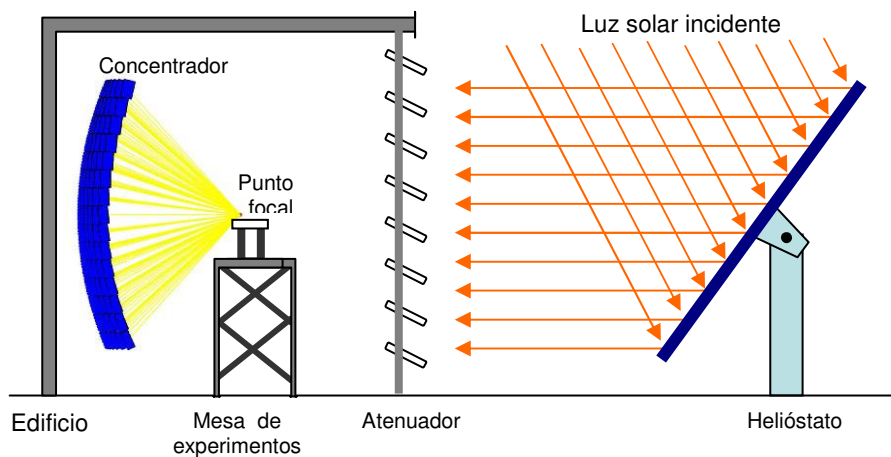


Figura 1.16. Esquema de componentes de un horno solar.

Un punto de interés entre los primeros trabajos realizados acerca de hornos solares fue la obtención de altas temperaturas. Las máximas temperaturas alcanzables se calculaban de manera teórica, usando la ley de radiación de Stefan-Boltzmann, a partir del valor de flujo radiativo absorbido por un cuerpo negro ideal colocado en el foco del concentrador [Bliss 1957 & Hisada 1957]. Lo anterior supone despreciar cualquier mecanismo de pérdida de energía excepto el radiativo, y que la energía absorbida no se transforma en trabajo o se extrae como calor útil. En la actualidad los hornos solares cubren un amplio espectro de aplicaciones [Suresh 1981], por ejemplo:

- Procesamiento y manufactura de materiales avanzados: cerámicas metalizadas para componentes electrónicos, fullerenos y nanotubos.
- Determinación de propiedades termofísicas bajo luz solar concentrada, incluyendo expansión térmica, conductividad y difusividad térmicas, calor específico, propiedades mecánicas, y emisividad y emitancia espectral.

- Determinación del funcionamiento y los límites de falla de materiales cerámicos y refractarios.
- Envejecimiento acelerado de materiales por UV.
- Desarrollo de receptores para la tecnología de plantas de generación de potencia termosolar.
- Descomposición térmica y termoquímica del agua para la producción de Hidrogeno.
- Simulación de efectos térmicos en presencia de flujo radiativo altamente concentrado.
- Destrucción de materiales tóxicos: industriales, orgánicos, desechos hospitalarios, etc.

1.4 Revisión bibliográfica

La tecnología de los hornos solares tiene sus inicios en la segunda mitad de la década de los 50's. Las primeras investigaciones sobre hornos solares tenían como finalidad conocer el efecto de las altas temperaturas (aprox 3500°C) sobre diversas propiedades de materiales expuestos a flujos radiativos muy concentrados [Glaser 1957, 1958]; como son conductividad térmica, coeficientes de dilatación, emisividad de materiales, puntos de fusión de diversos compuestos [Hisada, 1957], estudio de materiales ultrarrefractarios, obtención de diagramas de fase, crecimiento de cristales y purificación de materiales. Simultáneamente se han desarrollado métodos para medir altas temperaturas [Brenden, 1958] y técnicas para medir la densidad de radiación concentrada [Loh, 1957], estas últimas han evolucionado y actualmente se utilizan técnicas de digitalización de imágenes usando cámaras CCD [Johnston, 1995] y técnicas calorimétricas como medida de referencia para las imágenes [Pérez-Rábago, 2004].

Entre los primeros hornos se pueden mencionar el de *Arizona State Collage* en Estados Unidos de Norteamérica construido en 1956 [Kevane, 1957] y el de Instituto Gubernamental de Investigación Industrial, en Japón [Hisada, 1957]. La tecnología de los hornos solares ha evolucionado y se han construido hornos de mayor superficie y con mayor capacidad de concentración, como el que se encuentra en el Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS) en Odeillo, Francia de 1000 kW térmicos [Trombe, 1973]; el horno solar de la Academia de Ciencias de la Republica de Uzbekistán de 1000 kW [Abdukhamaranov, 1998]; el horno solar de Instituto *Paul Scherrer* (PSI) de aproximadamente 25-40 kW [Schubnell, 1991]; el horno solar del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) en Colorado, USA de 10 kW; el horno del Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT) ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA), España de 45 kW y el horno del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en Colonia, Alemania de 20 kW [Neumann, 1996].



Figura 1.17. Fotografía del horno solar de Odeillo en Francia.

El horno solar del DLR y del PSI, presentan características ópticas peculiares. En el primero, su sistema de facetas esta dispuesto sobre una estructura plana y están orientadas para lograr la concentración en un punto focal fuera del eje óptico del sistema. A continuación se destacan las siguientes características:

Área total	= 39 m ²	Concentración pico	= 4800
Num. de facetas	= 147	Concentración media	= 1830 (90% captación)
Radio de facetas	= 32 cm	Diámetro de spot	= 12 cm (90% captación)
Forma de facetas	= hexagonal	Distancia focal global	= 7.3 m
Perfil de facetas	= esférico	Distancias focales facetas	= 6.95, 7.3, 8.2 m
Material de facetas	= Vidrio (espesor 2 cm)	Alineación del foco	= fuera de eje
Recubrimiento	= Al y cuarzo (SiO _x)	Área heliostato	= 52 m ²
Reflectividad	= 89%		

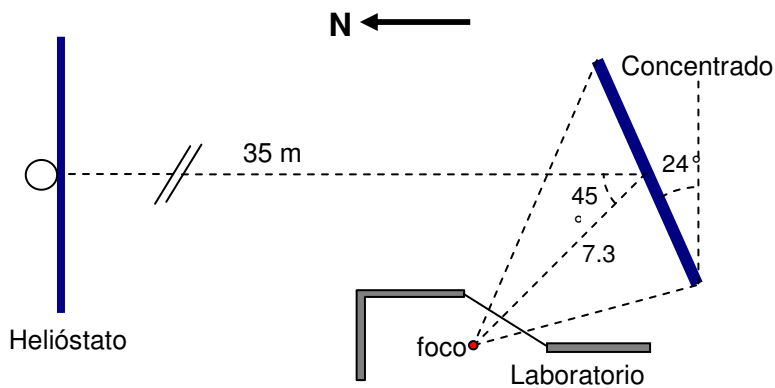


Figura 1.18. Esquema de la distribución de los componentes ópticos del horno solar del DLR

Cabe mencionar que, debido al costo de manufactura, las distancias focales de las facetas se reunieron en tres grupos, lo que permite alcanzar el 75% de la concentración pico que se obtendría si cada faceta tuviera su distancia focal óptima. Si se hubiera asignado una distancia focal única, se reduciría la concentración pico hasta en un 50%. La disposición fuera de eje del foco del sistema le permite operar sin sombreadamientos, sin embargo el spot tiene problemas de astigmatismo que afectan la concentración del sistema. A cambio se tiene mayor comodidad para la disposición de los arreglos experimentales [Neumann, 1996].



En las instalaciones del PSI se han realizado campañas experimentales, para estudiar la irradiancia solar concentrada, con un horno solar de doble etapa. Dicho horno consiste en un helióstato de 51.8 m² con una ligera concavidad, lo cual representa una preconcentración de la luz solar, con una distancia focal de 100 m. La irradiancia solar preconcentrada en el helióstato es colectada por un concentrador parabólico de 5.7 m² (radio de 1.34 m) y distancia focal de 1.93 m. Este diseño permite disminuir el costo y mejorar la calidad óptica del espejo del Horno Solar [Ries, 1990] [Schubnell, 1991], sin embargo introduce un problema de astigmatismo en la región focal que repercute en su factor de concentración el cual puede variar en más del 50% entre los meses de diciembre y junio; el flujo radiativo neto puede variar de 25 kW a 15 kW respectivamente. Sin embargo, llama la atención que un concentrador de cuya área correspondería a una potencia de 5.7 KWt, puede alcanzar potencias de 25 kWt y flujos pico cercanos a los 9000 soles.

Los problemas de diseño más comunes en un horno solar se refieren al tamaño y montaje de los helióstatos, el sistema de seguimiento del Sol y las imperfecciones ópticas en las superficies de los espejos [Bliss, 1957 y Jose 1957]. El desempeño y utilidad de estos hornos depende de la potencia solar que sean capaces de captar y del factor de concentración que puedan alcanzar. La concentración esperada con la geometría de un plato parabólico de revolución es bien conocida, sin embargo existen múltiples factores que pueden afectar directamente el factor de concentración que puede alcanzarse con un horno [Bliss, 1957].

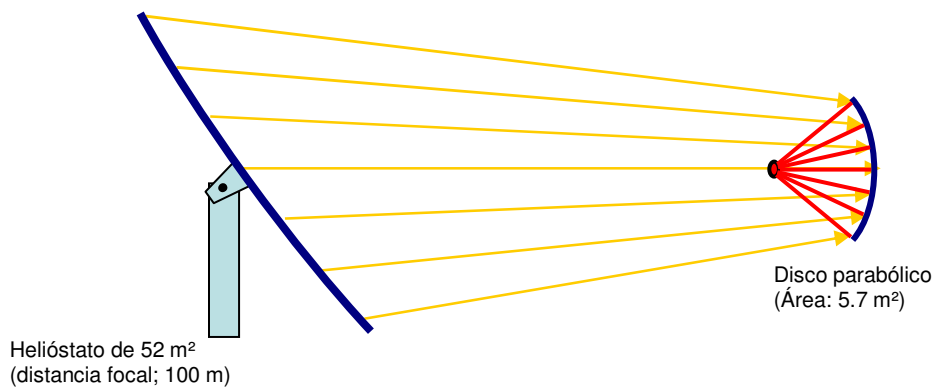


Figura 1.20. Esquema del horno solar de 2 etapas en el PSI.

La concentración del horno puede expresarse en primera aproximación de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C = F C_{\text{teórica}}$$

Donde $C_{\text{teórica}}$ es la concentración máxima que puede obtenerse de un concentrador parabólico ideal y F se le llama “factor de horno” y esta definido por el producto de los diversos coeficientes de transmisividad que afectan al horno y que se resumen en la tabla 1.3 [Bliss, 1957].

$$F = \eta_{t1}^2 \eta_{r1} \eta_{g1} \eta_{f1} \eta_{r1} \eta_{s1} \eta_p \eta_a \eta_{t2}^2 \eta_{r2} \eta_{g2} \eta_{f2} \eta_{r2} \eta_{s2}$$

Tabla 1.3 Factores típicos de transmisividad para un horno solar de doble reflexión

Símbolo	Factor	Estimación baja	Estimación alta
η_t	Transmisividad del vidrio	0.94	0.98
η_r	Reflectividad de la superficie	0.91	0.95
η_g	Imperfecciones geométricas	0.90	0.96
η_e	Sombreamiento estructural del horno	0.94	0.98
η_s	Sombreamiento de mesa experimental	0.85	0.95
η_p	Sombreamiento por persianas de flujo radiativo	0.95	0.99
η_a	Factor de alineación	0.95	0.99

En caso de que los espejos del helióstato y concentrador fueran de segunda superficie, el factor de transmisividad debe elevarse al cuadrado pues la radiación solar hace un recorrido de entrada y otro de salida por cada espejo.

El factor de horno resulta de utilidad para estimar la concentración que puede esperarse en un concentrador solar. Sin embargo, en la actualidad, esta estimación puede realizarse con mayor detalle si se cuenta con el modelo matemático y un programa de cómputo para simular la irradiancia esperada en el horno.

Otros trabajos que se han realizado en torno a la tecnología relacionada con los hornos solares se refieren al control de seguimiento del Sol el cuál es fundamental para los helióstatos [Abdukhamaranov, 1998] y ha ido mejorando junto con el desarrollo de los sistemas de cómputo y las tecnologías de control de señales. Por otro lado, el diseño de receptores para un horno solar es fundamental para optimizar la eficiencia de plantas de generación de potencia [Steinfeld, 1993]. También se ha estudiado el perfil de radiación solar y su efecto en concentradores solares [Schubnell, 1992 y Neumann, 1999].

En cuanto a las características del horno que es motivo de este trabajo, sería ubicado en las instalaciones del CIE-UNAM en Temixco. Se han considerado preliminarmente algunas características básicas para dicho horno, como son, una potencia de 30 kWt, un concentrador de facetas múltiples en un arreglo de 6.3 m x 6.3 m, un helióstato de 70 m², un atenuador de 40 m² y un edificio de laboratorio para albergar salas de instrumentación, de control de los experimentos, un laboratorio de química solar y una plataforma de pruebas.

El objetivo de esta tesis implica justamente el contribuir al diseño óptico de dicho horno. Por ello se ha elaborado un modelo matemático y un programa de simulación de sistemas de concentración de la energía solar mediante el método de trazado de rayos, ello permitirá conocer las formas e intensidades de las distribuciones de radiación en la zona focal del sistema óptico.

1.5 Objetivos

El **objetivo general** de este trabajo es estudiar las diferentes configuraciones ópticas del HSAFR a través del cálculo de las distribuciones de irradiancia en la zona focal.

Los **objetivos particulares** son los siguientes:

- Profundizar en el conocimiento de la distribución de irradiancia en sistemas concentradores de diversas configuraciones.
- Desarrollar una herramienta de cómputo que permita el cálculo numérico de distribuciones de irradiancia, en sistemas de concentración solar, a través de la técnica de trazado de rayos por convolución.
- Estudio de las distribuciones de irradiancia considerando al concentrador del HSAFR, como una superficie reflexiva continua.
- Estudio de las distribuciones de irradiancia considerando al HSAFR con una superficie reflexiva de multi-facetas fijas como concentrador.
- Estudio de las distribuciones de irradiancia considerando al HSAFR con una superficie reflexiva de multi-facetas móviles (para ajustes) como concentrador.
- Estudiar el efecto del sombreado producido por el atenuador en las distribuciones de irradiancia de la zona focal.
- Estudiar bajo que condiciones se pueden obtener campos radiativos uniformes y homogéneos en la zona volumétrica de la región focal.
- Verificar el código de simulación numérica a través de la comparación de los resultados de las distribuciones de irradiancia, teóricas y experimentales, obtenidos en la zona focal del DEFRA y del Horno Solar de Almería.

Capítulo 2

Modelo matemático y algoritmo de solución

Ce tonalli
Oncan tonaz, oncan tlathuiz
Oncan yezque, ayamo nican
Ni cuicatl, xic mocuili .

Una mañana
Allá aparecerá el Sol, allá habrá luz
Allá estaremos, no más aquí
Es mi canto, gócenlo.

*Del poema "Por un instante aquí en la Tierra"
Netzahualcoyotl*

2.1 Modelo físico

Este trabajo está enfocado a la obtención de una configuración óptima del arreglo de espejos y heliostato que componen la óptica de un horno solar. El diseño óptico requiere de considerar todos los procesos asociados a la incidencia directa de la luz solar en la superficie del sistema, así como su reflexión hacia la zona focal. Los niveles de concentración estarán determinados por la naturaleza de la fuente de luz, por los diferentes tipos de errores que pueden presentarse en la superficie de los espejos así como en su alineación, y por los errores de seguimiento y alineación que puedan existir en el motor y en el pedestal del heliostato. Estos últimos errores no serán tomados en cuenta en el presente estudio; la razón de esto es que tienen poco efecto en el factor de concentración instantánea que puede obtenerse. En cambio, con el paso del tiempo pueden provocar la deriva de la mancha solar alrededor del punto focal del sistema. Esto reduce el factor de concentración de energía al integrar la potencia en el tiempo.

En cuanto a la selección de materiales y metodologías para la elaboración del sistema óptico y de seguimiento, se debe considerar que el horno solar es un instrumento de investigación y como tal, no es primordial en su diseño encontrar una buena relación final de energía/precio. Si bien es cierto que el costo debe considerarse cuando se tienen requerimientos de equipamiento y recursos económicos finitos, se debe también considerar que, como equipo de infraestructura, buscamos en el horno buenas especificaciones como son:

- Precisión en los mecanismos de control.
- Durabilidad en los materiales de construcción.
- Alta reflectividad de los espejos.
- Bajo nivel de errores en la óptica.
- Precisión en la alineación del sistema.

Estas características deben traducirse en una parametrización que permita identificar los valores requeridos de diseño a fin de alcanzar los objetivos de concentración deseados. Para propósitos de la modelación, deben hacerse diversas suposiciones en cuanto a la naturaleza de los procesos involucrados y las características físicas del sistema. Estas suposiciones constituyen el modelo físico a partir del cuál, se desarrolló el algoritmo computacional para la simulación del horno.

Forma del cono solar

Para múltiples aplicaciones ópticas, una fuente luminosa puntual es suficiente para el diseño óptico de dispositivos. De hecho, las primeras modelaciones ópticas de concentradores solares, se realizaron con técnicas convencionales de óptica geométrica. Sin embargo, el Sol es una fuente luminosa extendida (no puntual) y la irradiancia que emite se distribuye a lo largo de un intervalo angular alrededor de la dirección principal de incidencia. A este intervalo, visto desde un

cierto punto de observación, se le conoce como cono solar. La determinación de los factores de concentración, requiere necesariamente considerar al Sol como una fuente luminosa extendida. A partir de los datos astronómicos del tamaño del Sol y la distancia promedio del Sol a la Tierra puede calcularse el ángulo que subtende el Sol visto desde la Tierra:

$$\rho_s = \frac{R_s}{d_{TS}} = \frac{0.696 \times 10^6 \text{ km}}{149.6 \times 10^6 \text{ km}} = 4.65 \text{ mrad} .$$

Donde ρ_s es el radio angular solar visto desde la Tierra, R_s es el radio del Sol y d_{TS} es la distancia promedio Tierra Sol. Cabe señalar que la órbita de la Tierra es básicamente una elipse con una excentricidad muy baja ($e = 0.017$) y por la cual, la distancia del Sol a la Tierra oscila entre 152.1 y 147.1 millones de kilómetros. Esta oscilación es suficiente para afectar la irradiancia solar fuera de la atmósfera, en un factor que oscila alrededor de 4%. De la misma forma, el tamaño del radio angular del Sol puede variar aproximadamente en un 2%. Para los propósitos de este trabajo, consideraremos al radio angular del Sol constante, pues el radio del disco solar y la irradiancia solar a nivel del suelo tienen variaciones mayores a los porcentajes anteriores, según las condiciones atmosféricas. Para los propósitos de esta tesis, el radio solar se considera de 4.65 mrad y la irradiancia solar se considerará con un valor constante de $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$.

En cuanto a la forma en que se distribuye angularmente la irradiancia solar $I(\rho)$, se puede calcular con el producto de la irradiancia directa I_0 y una función de distribución normalizada $G(\rho)$. El ángulo ρ se mide desde el centro del disco solar:

$$I(\rho) = I_0 G(\rho) . \quad (2.1)$$

Como $G(\rho)$ es una función normalizada, se debe cumplir la siguiente condición;

$$\int_0^{\infty} 2\pi\rho G(\rho) d\rho = 1 .$$

Comúnmente se utilizan 4 formas diferentes de abordar el modelo de Sol extendido; las cuales, dependen de la distribución de la irradiancia angular solar y del diámetro angular del Sol. A estas formas se les conoce como Sol uniforme, Sol normal, Sol real y Sol estándar.

Sol uniforme: consiste en considerar la irradiancia angular como una constante a lo largo del diámetro angular solar, de tal forma que la integral sobre el ángulo corresponda a la irradiancia

directa que se recibe del Sol en la superficie de la Tierra. La ecuación para distribución normalizada se obtiene integrando la ecuación anterior y se escribe como:

$$G(\rho) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \rho_s^2} & ; \rho \leq \rho_s \\ 0 & ; \rho > \rho_s \end{cases} .$$

Sol normal: consiste en aproximar el cono solar con una distribución normal, como si se tratara de una distribución aleatoria de tendencia central. La desviación estándar de la distribución se ajusta al radio angular solar y la altura de la distribución se ajusta a que la integral de la distribución corresponda con la irradiancia directa incidente en la superficie de la Tierra. La ecuación para distribución normalizada se escribe como:

$$G(\rho) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] .$$

Sol real: Consiste en definir al cono solar a partir de una tabla con medidas experimentales de la irradiancia angular solar. En algunos casos es posible tomar una fotografía del disco solar y obtener la distribución de intensidad a partir de la digitalización de la imagen. Esta técnica nos aporta una distribución en un plano, cuya integral se normaliza y posteriormente se multiplica por la irradiancia directa que se recibe del Sol.

Debe considerarse que esta forma puede variar significativamente según las condiciones atmosféricas de cada región en particular. El efecto de la atmósfera se traduce en lo que se le ha llamado la radiación circumsolar. Esta radiación tiene su origen en la radiación directa, pero a causa de la presencia de partículas en la atmósfera, una parte de la radiación es dispersada y ahora incide desde regiones alrededor del disco solar a manera de una aureola. La radiación circumsolar se mide a través de una magnitud llamada razón circumsolar, y representa la proporción de radiación que incide de manera circumsolar respecto al total de irradiancia directa. La razón circumsolar puede calcularse con la siguiente fórmula.

$$CSR = \frac{I_{CS}}{I_{CS} + I_{Sol}} .$$

Donde:

- CSR = razón circumsolar (siglas en inglés de *Circumsolar ratio*)
- I_{CS} = Irradiancia de la región circumsolar
- I_{Sol} = Irradiancia de la región del disco solar

La magnitud de la razón circumsolar es importante por dos razones. La primera está relacionada al diseño de los sistemas de concentración solar que consideran un ángulo de aceptación a partir

de un cono solar considerado. Si no se toma en cuenta que parte de la radiación directa incide en forma circumsolar, los rendimientos esperados en los sistemas de concentración podrían ser sobrestimados, lo que afectaría la rentabilidad de las inversiones. La segunda razón se relaciona con el diseño del horno solar. La forma del cono solar afecta a las curvas de distribución de irradiancia que se obtienen en la zona focal, así como los valores de concentración promedio y pico que se pueden esperar del foco del sistema. Por ejemplo en el horno solar del PSI, si la magnitud CSR es inferior al 1%, el diámetro de la mancha solar en la zona focal es de 13 cm, sin embargo cuando la magnitud CSR llega a un 40% el diámetro de la mancha solar es mayor a 16 cm, esto además afecta el pico de concentración que se obtiene en la zona focal. Cabe mencionar que existe una relación lineal entre el diámetro de la mancha y la magnitud CSR (Neuman and Witzke, 1999).

Sol estándar: Para propósitos de la implementación del algoritmo, en este trabajo se recurrirá a un perfil del cono solar utilizado en el programa de simulación CIRCE2 (Romero, 1984) y que corresponde a un promedio cuadrático de las observaciones realizadas con el telescopio circumsolar LBL (*Lawrence Berkeley Laboratories*). Este estudio fue realizado, hacia finales de los años 70's y principios de los 80's, en 11 sitios a lo largo de los Estados Unidos (Buie D. et al, 2003). En la figura 2.1 puede observarse que la forma del cono solar de dicho estudio, es similar al modelo del Sol uniforme, para ángulos inferiores al radio solar. Para ángulos más grandes puede verse la contribución de la radiación circumsolar de la distribución.

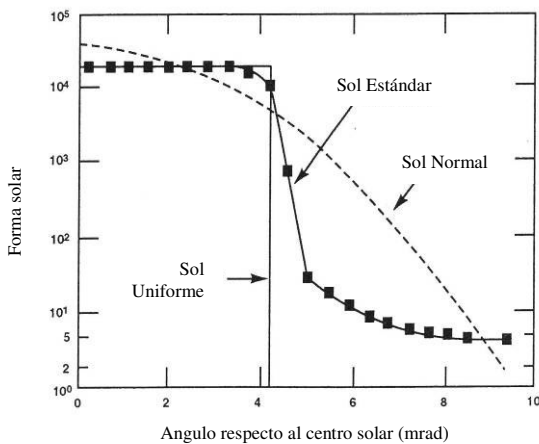


Figura 2.1. Distribuciones angulares que se usan comúnmente en la modelación de sistemas de concentración solar (Romero, 1984)

Reflectividad de los materiales

Existen diversos materiales utilizados para la elaboración de superficies reflectantes. En general se han utilizado espejos de vidrio con depósito de plata o aluminio. Estos pueden ser de primera o segunda superficie. Los espejos de primera superficie tienen la ventaja de tener la mejor reflectividad que es directamente la del material de depósito. En la figura 2.2 se muestra la respuesta en reflectividad de diferentes metales. El aluminio tiene una reflectividad casi constante

desde el cercano ultravioleta hasta el lejano infrarrojo. Sufre una considerable bajada en el cercano infrarrojo⁸; sin embargo, ésta no es importante pues además de no ser muy abrupta (~7%), ocurre en una región del espectro (mediano infrarrojo) que se ve afectada por las condiciones atmosféricas, por lo que si supusiéramos un coeficiente de reflectividad constante al 92%, entonces el error que tendríamos por no tomar en cuenta esta bajada sería inferior al 1.5% (entre 700 y 1000 nm llega el 20% de la radiación de todo el espectro). Más allá de los 1500 nm, la reflectividad del aluminio es ya muy cercana al 96%, sin embargo, tampoco esto debe tomarse mucho en cuenta pues en esta región del espectro, la energía que recibimos es inferior al 10% del total.

Los espejos de primera superficie suelen tener un recubrimiento para protegerlos de la oxidación. Por ejemplo, a los espejos de aluminio generalmente se les deposita una capa muy delgada de óxido de silicio (cuarzo). Esta capa, por su espesor, no reduce la reflectividad y en cambio si la mejora en ciertas longitudes de onda.

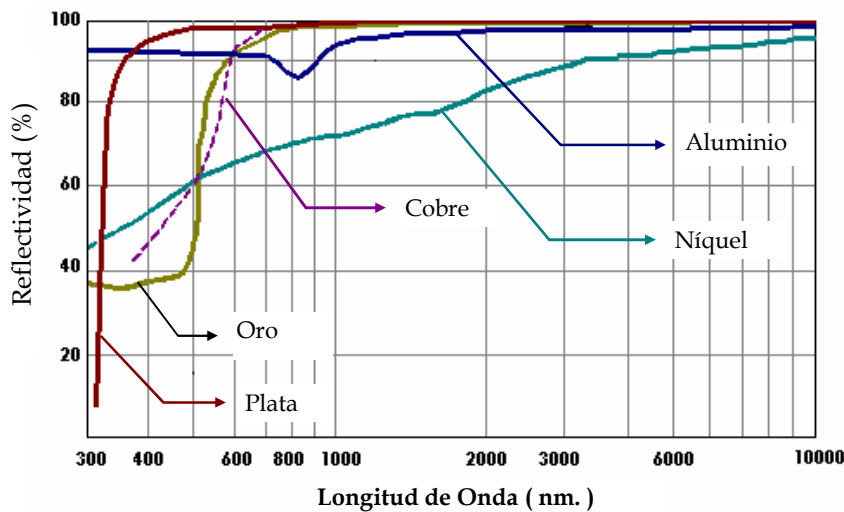


Figura 2.2. Curvas de reflectividad especular para diferentes metales usados en aplicaciones solares (Robinson, 1966)

Cuando los espejos son de segunda superficie, debe considerarse que la absorción del vidrio reduce la reflectividad en factores que varían de acuerdo al espesor y el tipo de vidrio con que fue fabricado, así como el ángulo de incidencia e incluso del tiempo que el espejo ha estado expuesto a la radiación solar. En general podemos considerar que la absorción oscila entre 8 y 10 %, por lo que la transmitancia oscila entre 90 y 92%. En un espejo con depósito de Aluminio, la reflectancia total puede disminuir a un intervalo entre 81 y 85%. Un espejo con depósito de plata mejoraría su reflectividad a un intervalo entre 88 y 90%.

⁸ Se considera que el Sol tiene un espectro de emisión aproximado a un cuerpo negro de 5813 K

En este trabajo consideraremos espejos de primera superficie con depósito de aluminio y recubrimiento de óxido de silicio, de esta manera podemos considerar a la reflectividad constante a lo largo del espectro de aproximadamente 90%.

Errores ópticos

En un espejo sin errores, la dirección de un rayo reflejado se calcula de acuerdo con ecuación:

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

Donde \hat{r} corresponde al vector unitario del rayo reflejado, \hat{i} es el vector unitario incidente en el punto de reflexión y \hat{n} es el vector unitario normal a la superficie del espejo (figura 2.3). Cuando la totalidad de rayos reflejados se obtiene de acuerdo a esta ecuación decimos que la superficie de reflexión es perfectamente especular.

En el caso de una fuente como el Sol, el vector incidente coincide con la línea que proviene del centro del disco solar y la irradiancia dentro del cono solar se distribuye simétricamente alrededor de esta línea. En una superficie ideal, el cono reflejado tiene la misma forma del cono solar incidente.

El caso opuesto a la reflexión especular es la reflexión difusa. En este caso, la radiación puede ser reflejada en cualquier dirección de manera aleatoria, sin importar la dirección de los rayos incidentes. Un ejemplo de este tipo de reflexión se encuentra en una superficie totalmente mate, en la cual no puede observarse ningún reflejo. Sin embargo, no existen en la naturaleza tanto la reflexión especular ideal como la difusa ideal. En el caso de una reflexión especular real siempre estará presente una componente difusa alrededor de la dirección del rayo reflejado.

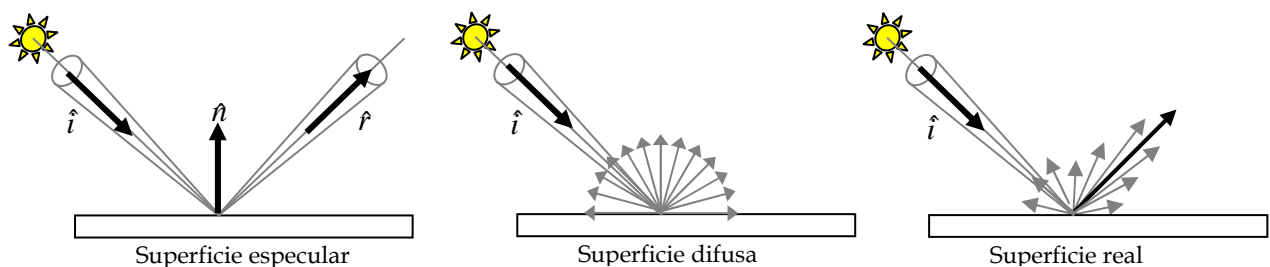


Figura 2.3. Esquemas de diferentes modos de reflexión.

Por lo regular en una superficie especular no se desea que los rayos reflejados se dispersen respecto a la reflexión ideal. Cualquier característica de la superficie que pueda provocar reflexión difusa o que desvíe a los rayos reflejados de la dirección esperada, se les considera errores ópticos de la superficie. Entre estos, podemos considerar que hay de tres tipos: microscópicos o de rugosidad, de escala media o de ondulación, y de escala macróscópica o de curvatura.

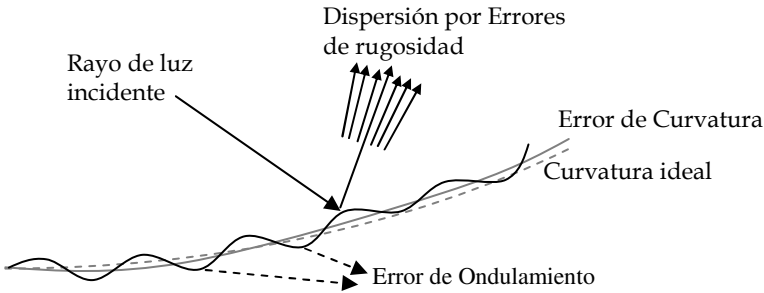


Figura 2.4. Esquema que ejemplifica los errores de superficie de un espejo respecto a su curvatura ideal

Todos los errores de superficie están relacionados con los procesos ya sean de obtención del material como de fabricación de los espejos. Los errores de ondulación y de curvatura pueden asociarse a la maquinaria que da curvatura a los espejos, mientras que los errores de rugosidad están asociados con la estructura cristalina o granular del sustrato y del metal depositado así como del pulido de la superficie una vez maquinada.

Además de los errores propios de la superficie de los espejos, debe considerarse en concentradores de facetas múltiples que la alineación de los espejos es otra fuente de error que puede representarse también por una función aleatoria de distribución. La alineación de las facetas del helióstato, así como de su pedestal, y la precisión del seguimiento pueden producir errores tanto en la reflexión, como de deriva de la mancha de concentración en la zona focal. Los errores de deriva no suelen modificar la forma de la distribución de irradiancia concentrada pero si afectan la irradiancia recibida en un mismo punto de la zona focal.

A fin de proporcionar un modelo general para representar al conjunto de errores de superficie, suele considerarse que las desviaciones de los rayos reflejados, en su conjunto, se distribuyen aleatoriamente alrededor de las direcciones ideales de reflexión. Esto es equivalente a una distribución de números aleatorios con tendencia central, que se le conoce como distribución normal o distribución gaussiana. Cada tipo de error, puede representarse mediante una distribución normal. En función del radio angular, la expresión matemática de esta distribución está dada por:

$$E(\rho) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] .$$

2.2 Modelo matemático

Para la modelación del horno solar se recurrió a la técnica de trazado de rayos por convolución. La diferencia con el trazado de rayos tradicional consiste en que, a cada rayo incidente al sistema óptico, está asociado el cono de distribución de irradiancia solar. Una vez que el cono solar es reflejado, la distribución se ve modificada por los errores aleatorios en la superficie de los espejos. La nueva forma del cono solar puede conocerse a través de una técnica matemática llamada convolución de funciones. La función que es resultado de aplicar esta técnica, representa el “traslape” de una función g al ser “subida” en el dominio otra función f . En el siguiente ejemplo el dominio de la función g es “subido” en tres puntos del dominio de la función f . En el primer punto, vemos que, si no hay traslape de las funciones entonces el valor de la convolución es cero. Si ambas funciones traslapan totalmente el valor de la convolución es igual al área de traslape

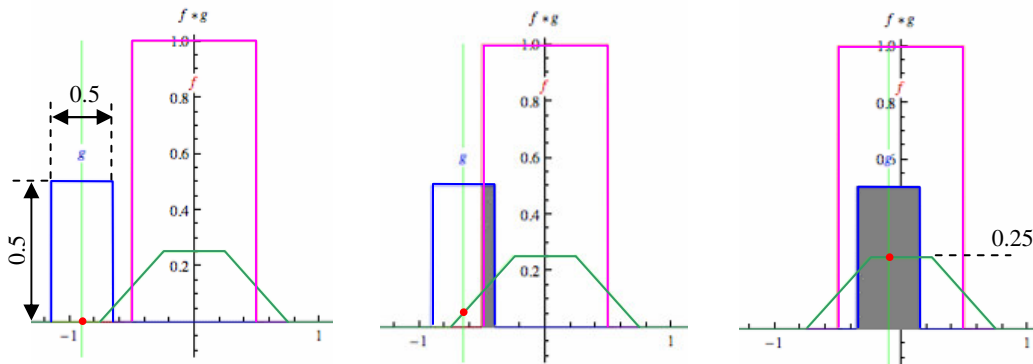


Figura 2.5. Ejemplo del cálculo de la convolución de dos funciones de escalón en tres puntos diferentes. La línea verde representa el resultado de la convolución en el punto correspondiente.

Matemáticamente podemos definir la convolución de dos funciones mediante la siguiente integral.

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t - \tau) d\tau .$$

El significado físico de la convolución, en el problema de la reflexión del cono solar, está en términos de que la distribución de error que representa una probabilidad, de que un rayo perteneciente al cono solar sea reflejado en una cierta dirección.

Trazado de rayos y convolución

Para entender el significado físico de la convolución, se debe responder a la cuestión de cómo es la reflexión en una muestra de rayos contenidos en el cono solar cuando son reflejados aleatoriamente en la superficie del espejo. Si definimos a la distribución de errores con la función $E(\theta)$, entonces podemos definir a la probabilidad de que un rayo reflejado en el intervalo de ángulos θ_e y $\theta_e + \Delta\theta_e$ como:

$$P\{\theta_e, \theta_e + \Delta\theta_e\} = E(\theta_e) \Delta\theta_e$$

Por otro lado, si consideramos al cono solar como una función de probabilidad $B(\theta)$ como en el caso de la función de error entonces, por analogía, podemos escribir a la probabilidad de encontrar un rayo en el cono solar entre los ángulos θ_s y $\theta_s + \Delta\theta_s$ como:

$$P\{\theta_s, \theta_s + \Delta\theta_s\} = B(\theta_s) \Delta\theta_s$$

Si ahora, se quiere calcular la probabilidad de que un rayo solar se encuentre entre los ángulos θ_s y $\theta_s + \Delta\theta_s$, y al reflejarse su ángulo de error este entre θ_e y $\theta_e + \Delta\theta_e$, entonces esto puede escribirse como:

$$P\{\theta_s, \theta_s + \Delta\theta_s \cap \theta_e, \theta_e + \Delta\theta_e\} = B(\theta_s) d\theta_s E(\theta_e) \Delta\theta_e$$

Debe considerarse que dado un ángulo de reflexión θ , este puede ser resultado de la suma de diversos ángulos θ_s y θ_e . Así que la probabilidad $D(\theta) \Delta\theta$ de que un rayo tenga un ángulo θ tal que $\theta = \theta_e + \theta_s$, puede escribirse como:

$$D(\theta) \Delta\theta = \sum B(\theta_s) \Delta\theta_s E(\theta_e) \Delta\theta_e$$

Puesto que θ_s y θ_e no son independientes entonces puede substituirse θ_e en términos de θ_s . Dado un valor de θ_s , el ángulo θ_e y su variación pueden calcularse como:

$$\theta_e = \theta - \theta_s \Rightarrow \Delta\theta_e = \Delta\theta$$

De esta forma, la probabilidad de que el ángulo reflejado tenga un ángulo θ puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$D(\theta) = \sum B(\theta_s) E(\theta - \theta_s) \Delta\theta_s$$

En el límite cuando $\Delta\theta_s \rightarrow 0$

$$D(\theta) = \int B(\theta_s) E(\theta - \theta_s) d\theta_s$$

La función $D(\theta)$ representa la distribución angular de los rayos reflejados a partir del cono solar inicial y de la distribución de errores en el espejo. En el caso de un cono solar obtenido con datos experimentales esta integral puede resolverse numéricamente a partir de una función de error que ya incluye el efecto combinado de los diferentes errores ópticos de los espejos.

Convolución de errores ópticos

De manera similar al procedimiento seguido para realizar la convolución del cono solar con una función de error óptico global. Los diversos errores ópticos pueden convolucionarse para obtener la función de error global y que es resultado del efecto combinado de los errores ópticos individuales. La convolución es una operación que se realiza entre dos funciones. Así que en caso de tener 3 o más distribuciones de error, la tercera distribución puede convolucionarse con el resultado de las primeras dos, y así sucesivamente hasta convolucionar todas las distribuciones de error.

En promedio, se considera que las diversas distribuciones de error se aplican en cada punto de reflexión de la superficie del espejo y, además, dependen de dos coordenadas angulares para permitir la dispersión angular en cualquier dirección a partir del plano. Si se tienen dos distribuciones de error E_1 y E_2 independientes entre sí, con coordenadas en el plano (p, q) , entonces la convolución de estas funciones $E_{1,2}$ quedará expresada como:

$$E_{1,2}(p_0, q_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1(p_0 - p, q_0 - q) E_2(p, q) dp dq .$$

Para estudiar el efecto del error global en las curvas de irradiancia en la zona focal, se optó por una distribución normal circular para los diferentes tipos de error. Sean E_1 y E_2 distribuciones normales circulares en un plano XY en el espejo:

$$E_1(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_1^2}(x^2 + y^2)\right] ; \quad E_2(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_2^2}(x^2 + y^2)\right] .$$

El resultado de la convolución puede obtenerse mediante el teorema de la convolución, el cual establece que la transformada de Fourier de la convolución de funciones es igual al producto de la transformada de Fourier de cada función. Este procedimiento da como resultado una ecuación que también corresponde a una distribución normal (Biggs, 1994):

$$E_{1,2}(x, y) = \frac{1}{2\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}\right] .$$

Por inspección visual puede concluirse que el cuadrado de la desviación estándar de la nueva distribución es igual a la suma de los cuadrados de las desviaciones estándar originales:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} .$$

Si el proceso de convolución se repitiera para considerar N distribuciones de error en los espejos, entonces la desviación estándar global quedaría expresada como:

$$\sigma = \sqrt{\sum_1^N \sigma_i^2} .$$

Este resultado permite estimar la función de error total a partir de conocer una desviación media cuadrática de cada tipo de error, aproximando siempre los errores a través de una distribución aleatoria normal.

Proyección del cono solar en el plano receptor

Una vez que un rayo es reflejado en la superficie del espejo, el problema se reduce a calcular la proyección del cono solar degradado en el plano receptor ubicado en la zona focal. Regularmente, en los sistemas de facetas múltiples, el punto focal del sistema se encuentra fuera del eje focal de los espejos individuales. Por esta razón, prácticamente cualquier cono solar proveniente de los espejos, incide de manera oblicua al plano receptor. El cono solar está definido en términos de una distribución angular y para obtener la distribución en el plano deben proyectarse las coordenadas angulares a coordenadas cartesianas.

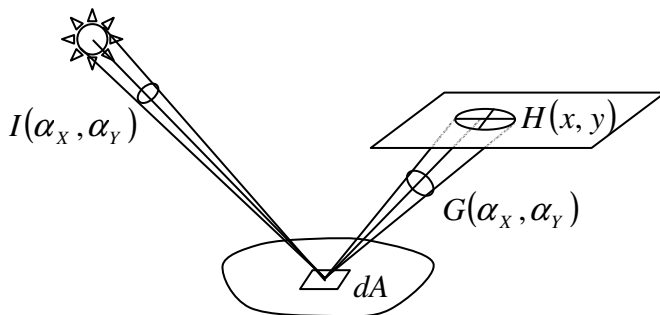


Figura 2.6. Proyección del cono de irradiación reflejado en el plano receptor. La forma de la proyección corresponde a una elipse

Dada la forma en que el cono incide sobre el plano, la figura geométrica de la intersección corresponde a una elipse. Entonces los ejes de coordenadas, propios de la proyección, pueden seleccionarse tales que el eje X coincida con el semieje menor, el cual será ortogonal al vector de incidencia del rayo central. Por otro lado, el eje Y deberá coincidir con el semieje mayor de la elipse. De la misma forma, los ejes angulares del cono se orientan de tal forma que el ángulo α_x es coplanar con el eje X en el plano y el ángulo α_y es coplanar con el eje Y.

La coordenada x y la distancia $d_{i,j}$ (entre el punto de reflexión en el espejo y el punto de cruce del rayo central al cono) son ortogonales entre sí. Entonces, la relación entre la coordenada x y el ángulo α_x puede escribirse con la siguiente relación trigonométrica:

$$x_p = \alpha_X d_{i,j} .$$

Por otro lado, la expresión para la coordenada y puede obtenerse mediante relaciones trigonométricas a partir de la figura 2.7(b):

$$y = \frac{\alpha_Y d_{i,j} \sin(90 - \alpha_Y)}{\sin(90 + \alpha_Y - \alpha_N)} \quad \text{o bien} \quad y = \frac{\alpha_Y d_{i,j}}{\cos(\alpha_N) + \tan(\alpha_Y) \sin(\alpha_N)} .$$

Donde α_N es el ángulo entre el vector normal al plano \hat{N} y el vector del rayo reflejado \hat{r} .

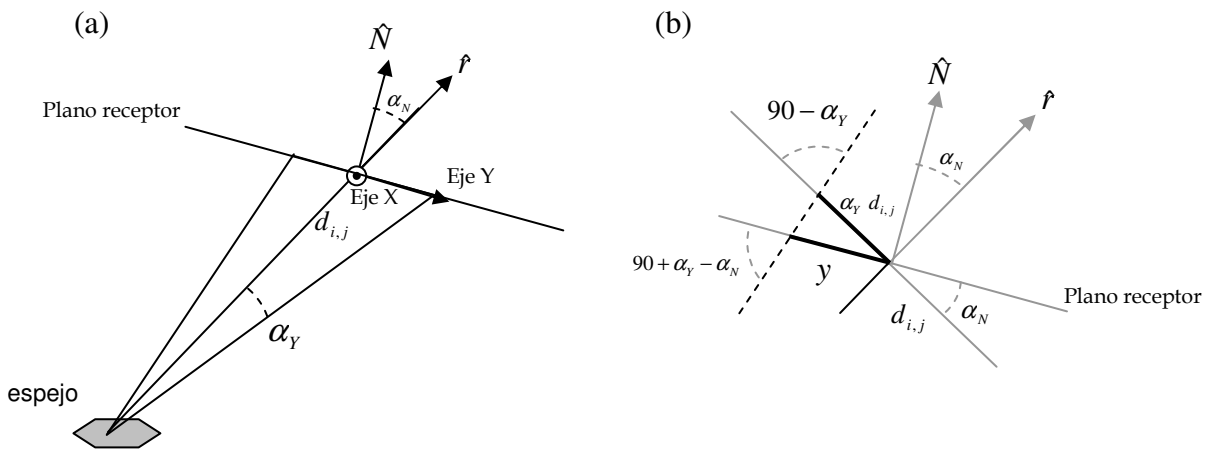


Figura 2.7. (a) Esquema que muestra la posición de los ejes propios de la proyección del cono reflejado en el plano receptor. (b) Esquema de la relación trigonométrica de la coordenada y con la coordenada angular α_Y , la distancia $d_{i,j}$, y el ángulo α_N entre la dirección de reflexión y el vector normal al plano.

Las coordenadas (x, y) corresponden a los ejes propios de la proyección, pero no a los ejes del plano receptor. Por ello es necesario rotarlas para hacerlas coincidir con la orientación del rayo reflejado. Una vez que ha sido rotadas, deben desplazarse para que el centro de la proyección quede situado alrededor del punto de corte del rayo reflejado en el plano, tal y como se muestra en la figura 2.8b.

La operación que realiza la rotación y la traslación, para obtener las coordenadas finales (x_p, y_p) en el plano receptor, esta representada por la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_R) & -\sin(\alpha_R) \\ \sin(\alpha_R) & \cos(\alpha_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \end{bmatrix} .$$

Donde α_R es el ángulo de rotación requerido y (x_C, y_C) son las coordenadas del punto de corte del rayo reflejado en el plano.

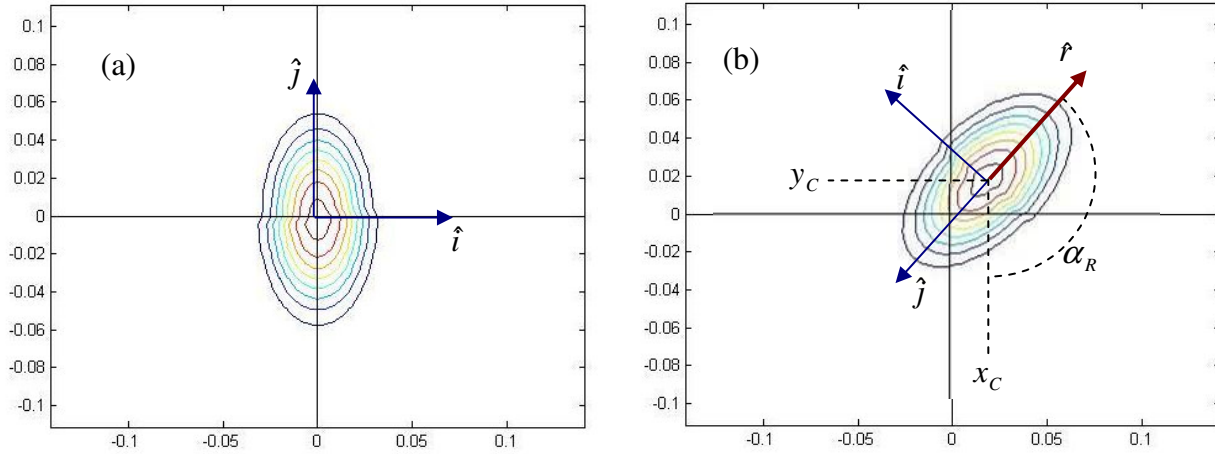


Figura 2.8. (a) Proyección del cono solar en el plano con coordenadas propias de la proyección. (b) Proyección del cono solar una vez que fue orientada con la dirección del rayo reflejado y trasladada al punto de corte del rayo central.

Integración de la Energía

Cada cono solar degradado, después de la reflexión, contiene una distribución de potencia solar $dP(\alpha_X, \alpha_Y)$ que es resultado del producto de la irradiancia por un elemento de superficie en el espejo $dA(x_E, y_E)$.

$$dP(\alpha_X, \alpha_Y) = dA(x_E, y_E) I_0 G(\alpha_X, \alpha_Y) .$$

Las coordenadas (α_X, α_Y) y (x_E, y_E) , corresponden a las coordenadas en el cono solar degradado y al punto de reflexión en el espejo respectivamente. Así que la potencia transportada, en un elemento angular del cono, puede escribirse como:

$$dP(\alpha_X, \alpha_Y) d\alpha_X d\alpha_Y = dA(x_E, y_E) I_0 G(\alpha_X, \alpha_Y) d\alpha_X d\alpha_Y .$$

Cada elemento angular, en el cono, incide sobre el plano receptor y se proyecta en un elemento de área que depende tanto del ángulo de inclinación con que incide en el plano, como de la distancia del punto de reflexión hasta el punto de incidencia. Análíticamente el elemento de área proyectado en el plano puede calcularse con la ecuación diferencial de las coordenadas (x, y) .

$$dx = \frac{d}{d\alpha_X} (\alpha_X d_{i,j}) d\alpha_X .$$

$$dy = \frac{d}{d\alpha_Y} \left(\frac{\alpha_Y d_{i,j}}{\cos(\alpha_N) + \tan(\alpha_Y) \sin(\alpha_N)} \right) d\alpha_Y .$$

La rotación y la traslación no modifican la distancia entre puntos o la forma de la proyección del cono solar. Por esto, puede considerarse que un elemento de área, antes y después de la rotación y traslación, permanece sin cambios.

$$dx_p dy_p = dx dy .$$

La irradiancia en un elemento de superficie del plano receptor, puede calcularse al dividir la potencia, de una porción angular del cono solar, entre el área proyectada sobre el plano receptor:

$$dI(x_p, y_p) = \frac{dA(x_E, y_E) I_0 G(\alpha_X, \alpha_Y) d\alpha_X d\alpha_Y}{dx_p dy_p} .$$

Para fines del cálculo numérico, los elementos diferenciales pueden aproximarse mediante elementos finitos. De esta forma, la irradiancia total puede calcularse como la suma de las contribuciones de irradiancia provenientes todos los elementos de área considerados en los espejos. Así que la expresión final puede escribirse como:

$$I(x_p, y_p) = \sum_A \Delta I(x_p, y_p) = \sum_A \frac{\Delta A(x_E, y_E) I_0 G(\alpha_X, \alpha_Y) \Delta\alpha_X \Delta\alpha_Y}{\Delta x_p \Delta y_p} .$$

Esta última ecuación fue implementada para integrar numéricamente la irradiancia en cada uno de los puntos considerados en el plano receptor.

2.3 Rutinas básicas

En el diseño de sistemas de concentración solar, es indispensable tener herramientas con capacidad de predecir los flujos radiativos en la zona focal. Generalmente cada centro de investigación ha desarrollado, para su uso interno, los programas de cómputo que puedan satisfacer sus necesidades particulares de diseño. Otros programas se han desarrollado para dar versatilidad al diseño de configuraciones ópticas y su uso se ha difundido entre diversos grupos de investigación en el mundo. Los paquetes Helios [Biggs, 1979] y CIRCE2/DEKGEN2 [Romero, 1984], fueron elaborados para simular el flujo radiativo en concentradores de foco puntual. Posteriormente se realizó COMPREC [Johnston, 1995] para eliminar la limitación de CIRCE2 acerca del número de facetas que pueden incorporarse a un sistema de concentración. Otro programa para simulación por trazado de rayos es OPTEC, el cuál es utilizado para simular campos de helióstatos, o bien, un espejo paraboloide de revolución como concentrador primario y concentrador *trumpet* o CPC como concentrador terminal [Neumann, 1999].

Para la realización de las rutinas de programación del diseño del horno, se colaboró con investigadores del CIEMAT⁹ en España. Este centro tiene a su cargo las tareas de la Plataforma Solar de Almería (PSA), que es el mayor centro de investigación, desarrollo y ensayos de Europa dedicado a las tecnologías solares de concentración. Dada su experiencia en sistemas de alta concentración, en este centro se han elaborado diversos programas de cómputo para simular la concentración de energía en la zona focal de un concentrador solar. Los programas han sido elaborados en el ambiente de programación de MATLAB en álgebra matricial y utilizan la técnica de trazado de rayos por convolución. Dichas rutinas mejoran algunas de las deficiencias de cálculo que presenta CIRCE2/DEKGEN2.

En virtud de que la utilidad de estas rutinas está estrechamente relacionada con los objetivos de la presente tesis, se realizó un análisis detallado de algunos de los programas desarrollados¹⁰ en el CIEMAT, los cuales están escritos en forma modular y son independientes entre sí. Esto facilitó su adecuación al proyecto de esta tesis. En diversos casos las rutinas de cómputo fueron modificadas para incorporar nuevos algoritmos de cálculo; y en otros, para agregar características ópticas deseables en el estudio del horno. También se elaboraron rutinas nuevas, para realizar el análisis de diferentes casos de configuraciones ópticas del horno. En esta sección se describen las rutinas utilizadas con sus modificaciones y se describen los programas nuevos que fueron elaborados. El total de rutinas que componen el sistema es numeroso, sin embargo el núcleo de rutinas fundamentales se enlistan en tabla 2.1.

⁹ Por sus siglas es el Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas, a cargo del Ministerio de Educación y está ubicado en la ciudad de Madrid, España

¹⁰ Los programas fueron desarrollados por el Dr. Marcelino Sánchez quien se desempeñaba como Jefe de la Coordinación de Alta Concentración en el CIEMAT.

Tabla 2.1 Rutinas principales para la modelación de trazado de rayos

Nombre de la rutina	Descripción y modificación
conoerror.m	Calcula la distribución de irradiancia del disco solar convolucionado con la función de error global del sistema óptico. La distribución de errores se asume como una distribución normal circular.
discosurfdiscreta.m	Calcula los puntos de reflexión sobre un espejo, ya sea en coordenadas polares o cartesianas. También calcula el área útil sobre el disco que representa cada uno de los puntos. Modificación: Se adicionó una partición de disco homogéneo (Riveros, 1996) en el caso de facetas circulares y se elaboró e implementó el algoritmo para el particionamiento de facetas hexagonales. Esta rutina fue incorporada a otra llamada GenConcentrador que genera los puntos de reflexión para facetas múltiples. Esta última también asigna el área real de cada elemento de partición de superficie a su punto de reflexión correspondiente.
NormcuaM.m	Calcula los vectores normales de una superficie cuadrática en los puntos especificados
CosdreM.m	Calcula los vectores de los rayos reflejados en una superficie a partir de los vectores normales y de incidencia del sol. Modificación: Esta rutina fue rehecha con otro algoritmo para simplificar el código. Se adicionó además el cálculo del área correspondiente al punto de reflexión según el ángulo de incidencia respecto al vector normal.
planoCM.m	Calcula los puntos de corte de los rayos reflejados con un plano de incidencia Modificación: Esta rutina fue rehecha con otro algoritmo para simplificar el código. Se adicionó además el filtrado de rayos que incide sobre una de las caras del plano.
fluxcalc.m	Calcula la distribución de irradiancia sobre el plano de incidencia de los rayos reflejados. Modificación: Se modificó el posicionamiento del plano receptor para permitir colocarlo en cualquier punto y orientación alrededor del foco del concentrador respecto a un sistema general de coordenadas del sistema óptico global. También se reformuló la ecuación de proyección del cono solar sobre el plano receptor.

A continuación se describen las funciones de las rutinas principales como finalmente han sido implementadas.

Función conoerror

Esta función toma los datos de un perfil solar real o ficticio a partir de una tabla de datos, ya sea que estén o no normalizados. A partir de los puntos graficados en un plano XZ, se genera una distribución 3D haciendo girar, grado a grado, la gráfica alrededor del eje Z. Hasta este momento, los puntos son generados en coordenadas polares. Posteriormente se realiza una interpolación lineal sobre una malla de puntos XY de 30x30.

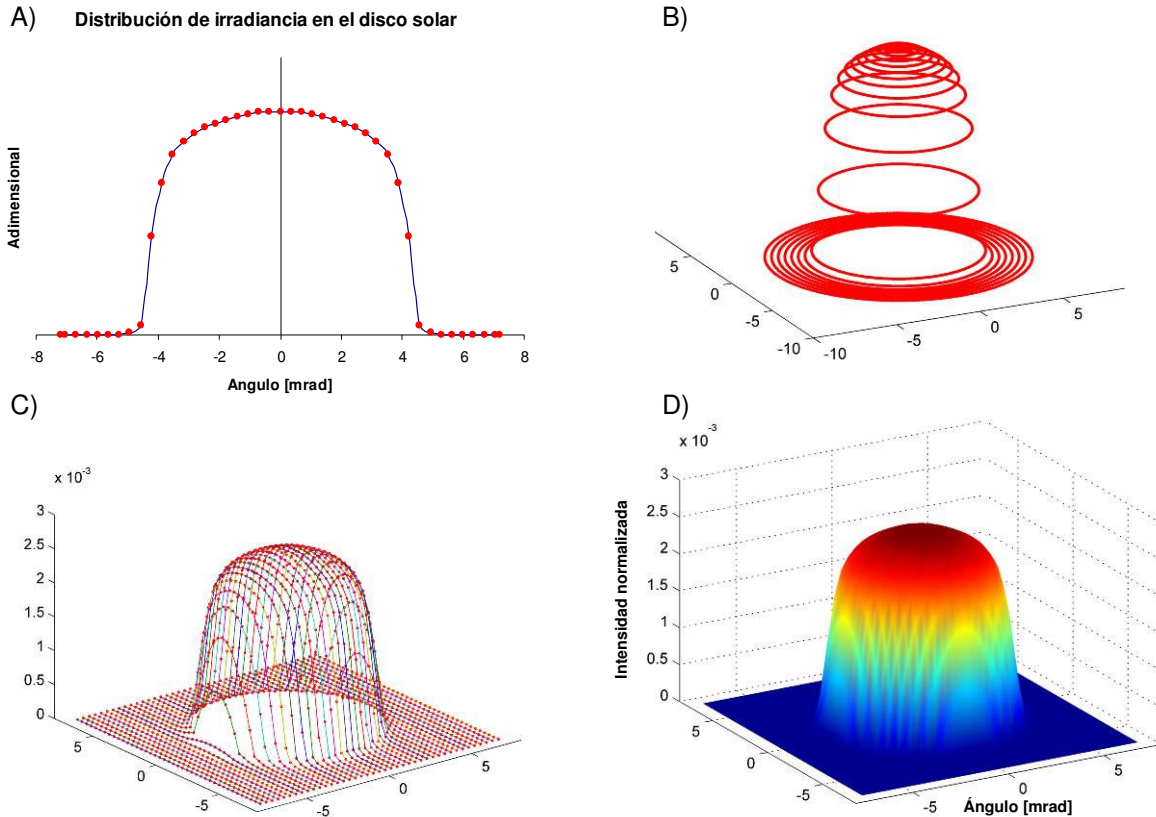


Figura 2.9. Construcción del cono de irradiancia solar A) perfil de irradiancia por archivo. B) puntos del perfil rotados alrededor del eje Z. C) interpolación de puntos en una malla XY de coordenadas angulares. D) Superficie de distribución XY de la irradiancia una vez normalizada.

Esta matriz representa la distribución normalizada de irradiancia solar. Una vez que se obtiene, debe convolucionarse con la función de error en la superficie de los espejos. Al final esta rutina entrega, como resultado, una función de distribución normalizada. En la figura 2.10 se muestra el efecto de diferentes distribuciones de error en el perfil del cono solar reflejado. En la mayoría de los casos estudiados en este trabajo de tesis, se consideraron distribuciones de error cuya desviación estándar varía entre 0 y 4 mrad.

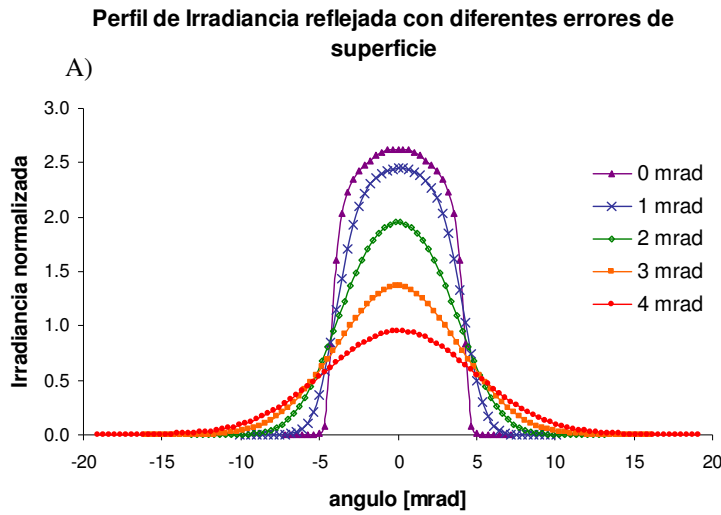


Figura 2.10. Perfil de la irradiancia solar convolucionado con diversas distribuciones normales de error.

Función discosurfdiscreta

Esta función calcula los puntos de reflexión a partir de las características geométricas de las facetas, las cuáles pueden ser rectangulares, circulares y hexagonales. La forma de particionar cada faceta depende de la geometría de la misma, Los métodos que se utilizan en el programa se han denominado “cartesiano”, “radial”, “disco homogéneo” y “hexagonal”.

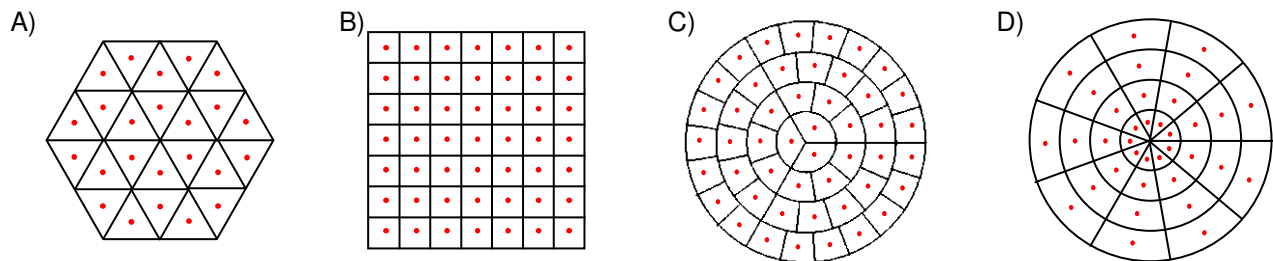


Figura 2.11. Particionamiento de las facetas. A) hexagonal, B) rectangular, C) disco homogéneo, D) radial.

Para cada punto de reflexión se calcula el área real sobre la faceta correspondiente a cada partición. Las configuraciones que se muestran en la figura tienen la ventaja de dar distribuciones de puntos de reflexión en forma homogénea y con áreas iguales en todas sus particiones. Sin embargo, si el área de que corresponde a cada punto de reflexión se calcula de acuerdo a las particiones que se muestran en la figura 2.11, el resultado sería el área equivalente en el caso de que los rayos solares incidan en forma paralela al eje óptico de los espejos. En sistemas de facetas múltiples esto no ocurre, por esto, el área de cada partición es corregida para tomar en cuenta la curvatura de los espejos. En la figura 2.12 se muestra la diferencia entre el área de una

partición considerando la curvatura del espejo ΔA_E y el área aparente ΔA_{ap} que se observa cuando se considera al espejo plano. La normal al espejo plano se denota con \hat{N}_{ap} y la normal al espejo real se denota con \hat{N}_E

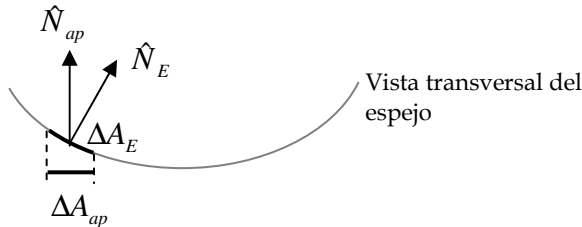


Figura 2.12. Diferencia entre el área medida sobre un espejo curvo y el área medida sobre un espejo plano.

El área real de cada elemento de la partición ΔA_E puede calcularse como:

$$\Delta A_{ap} = \Delta A_E (\hat{N}_E \cdot \hat{N}_{ap}) \quad \therefore \quad \Delta A_E = \frac{\Delta A_{ap}}{(\hat{N}_E \cdot \hat{N}_{ap})}$$

Posteriormente, una vez que se calcula la reflexión (en otra rutina), se calcula el área efectiva que corresponde a la dirección del vector del rayo reflejado; es decir, el área proyectada en la dirección del rayo reflejado.

Función NormcuaM y función CosdreM

Estas funciones se relacionan con la reflexión del cono solar en cada punto de la faceta. La primera toma los puntos de reflexión calculados por **discosurfdiscreta**, y calcula los vectores normales a la superficie de acuerdo al tipo de curvatura de la faceta, ya sea parabólica, esférica, cilíndrica o plana.

La segunda función calcula la dirección del rayo reflejado. En esta función se implementó el cálculo del área efectiva en dirección del rayo reflejado, multiplicando al área de la faceta por el coseno del ángulo entre el rayo reflejado y el vector normal a la superficie.

Función planoCM

Esta función calcula la intersección con el plano receptor a partir de las direcciones de los rayos reflejados en cada uno de los puntos en los espejos. En esta función se implementó un filtro de rayos a fin de que estos incidan por un solo costado del plano receptor. Esta característica es importante según la aplicación; por ejemplo, para obtener iso-superficies de irradiancia es necesario inclinar el plano receptor respecto al eje focal, esto permitiría la incidencia de radiación por ambos lados del receptor y afectaría la distribución de energía al sumar rayos que en la realidad no podrían alcanzar a la superficie del receptor.

El punto de corte puede calcularse con la solución simultánea a la recta definida por el vector de reflexión y la ecuación del plano receptor. A partir de la figura 2.13, sea h un coeficiente tal que, al multiplicarse por el vector de reflexión (x_r, y_r, z_r) , se obtengan las coordenadas de corte con el plano (x_c, y_c, z_c) .

$$\begin{aligned}x_c &= x_0 + hx_r \\y_c &= y_0 + hy_r \\z_c &= z_0 + hz_r\end{aligned}$$

Entonces el punto de corte debe cumplirse la siguiente condición:

$$a(x_0 + hx_r) + b(y_0 + hy_r) + c(z_0 + hz_r) = d$$

El valor de h puede expresarse como:

$$h = \frac{d - (ax_0 + by_0 + cz_0)}{ax_r + by_r + cz_r}$$

El valor de d puede obtenerse si conocemos el punto que se considera centro del plano receptor (x_{0p}, y_{0p}, z_{0p}) , por lo tanto, la expresión de:

$$h = \frac{(ax_{0p} + by_{0p} + cz_{0p}) - (ax_0 + by_0 + cz_0)}{ax_r + by_r + cz_r}$$

En la figura 2.14 se observa un ejemplo del cálculo de los puntos de corte para un plato parabólico de revolución. En esta misma figura se ejemplifica el filtrado de rayos que realiza la función para evitar que los rayos reflejados puedan incidir en ambas caras del receptor.

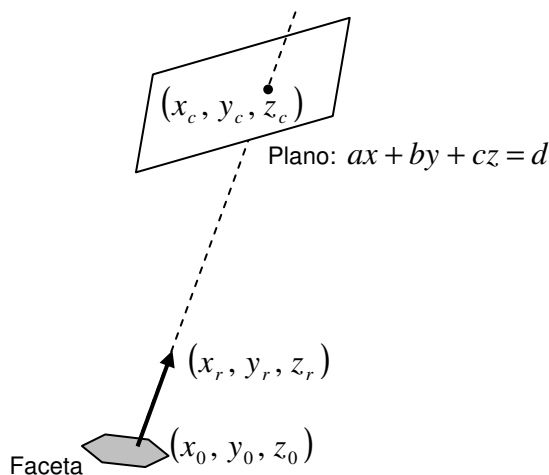


Figura 2.13. Esquema de las variables necesarias para calcular el punto de corte en el plano receptor

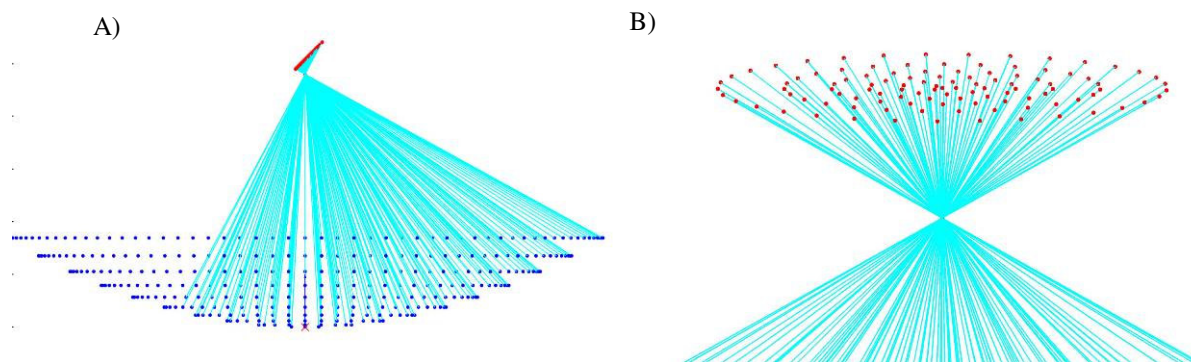


Figura 2.14. Ejemplos de puntos calculados, por el modelo matemático, en un plano receptor fuera de foco. El receptor esta inclinado respecto al eje focal un ángulo de A) 45° y B) 0°.

Función fluxcalc

Una vez que se tiene los puntos de incidencia en el plano receptor, el siguiente paso es integrar la irradiancia de los rayos reflejados en la malla del plano receptor. Para ello es necesario proyectar el cono de cada rayo en el plano. Este proceso fue explicado en la sección anterior. Sin embargo, aún falta determinar la forma en que son posicionados los ejes del plano receptor

El vector normal del plano se calcula con los ángulos cenital y azimutal, definidos por el usuario, y que se miden respecto al sistema de coordenadas geográficas del concentrador. El ángulo cenital se mide desde el eje Z del sistema de coordenadas geográficas y el ángulo azimutal se mide sobre el plano horizontal a partir de la dirección Sur del mismo sistema. La orientación de los ejes del plano receptor fue definida con el vector unitario (\hat{i}) en dirección siempre paralela a un plano horizontal terrestre. El vector (\hat{j}) sobre el plano receptor siempre mantiene un ángulo inferior a 90° respecto al eje Z del sistema geográfico del concentrador.

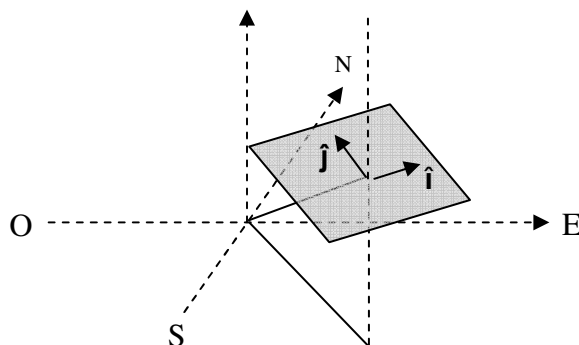


Figura 2.15. Asignación de los vectores unitarios (\hat{i}) y (\hat{j}) en el plano receptor de acuerdo al sistema de coordenadas geográfico del concentrador

Otras Funciones

Paralelamente se elaboraron las rutinas **genespejos** y **posespejos**. La primera permite generar los puntos de reflexión en un concentrador solar de una o varias facetas. También se especifica el tipo de perfil, la forma y dimensiones de cada faceta, así como el tipo de canteo para todo el conjunto. Esta rutina utiliza a **discosurfdiscreta** con sus modificaciones y se le adicionó la capacidad de enfocar las facetas sin cambiar su posición por algún tipo de canteo. Esta forma de orientar las facetas es similar a la que realiza un concentrador tipo fresnel. Con esta rutina es posible generar las facetas de un concentrador de disco, de un horno solar o de un heliostato.

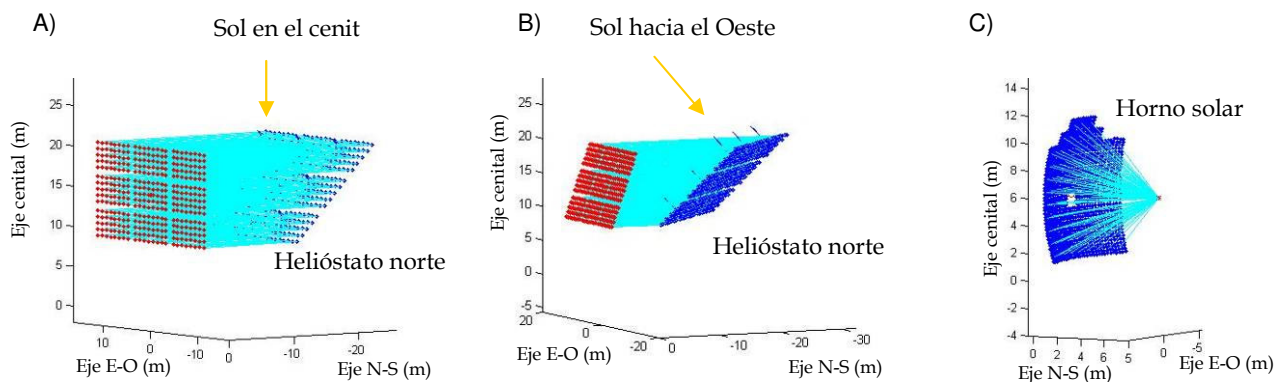
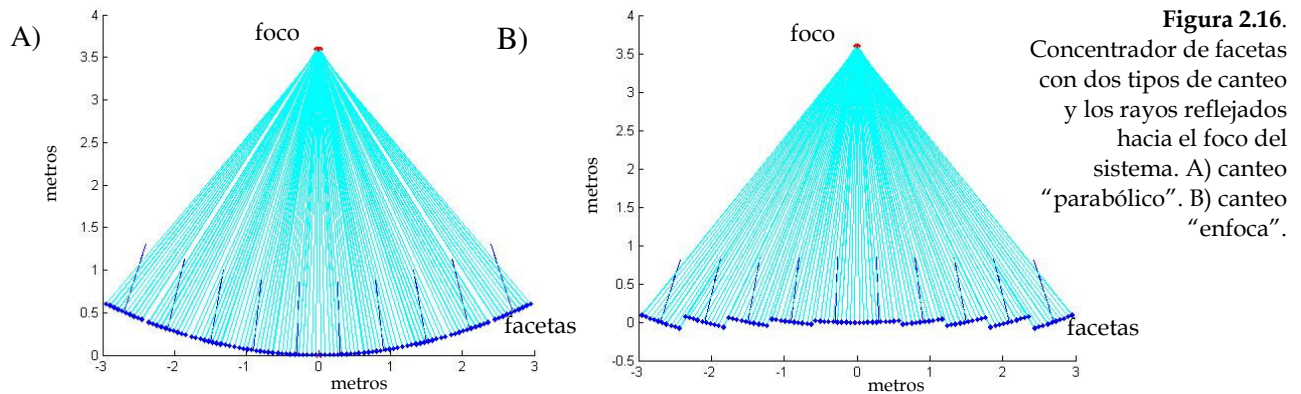


Figura 2.17. Ejemplos del posicionamiento de los puntos de reflexión dependiendo de la procedencia de la radiación solar y el punto de enfoque. A) heliostato con Sol en el cenit. B) heliostato con Sol hacia el oeste. C) Horno solar de Almería en posición vertical.

del heliostato sobre las facetas del horno a fin de observar la cobertura del horno para un día y hora del año específicos.

Proyección del heliostato sobre el Horno: 21- Dic 12:34 hrs (Medio día Solar)

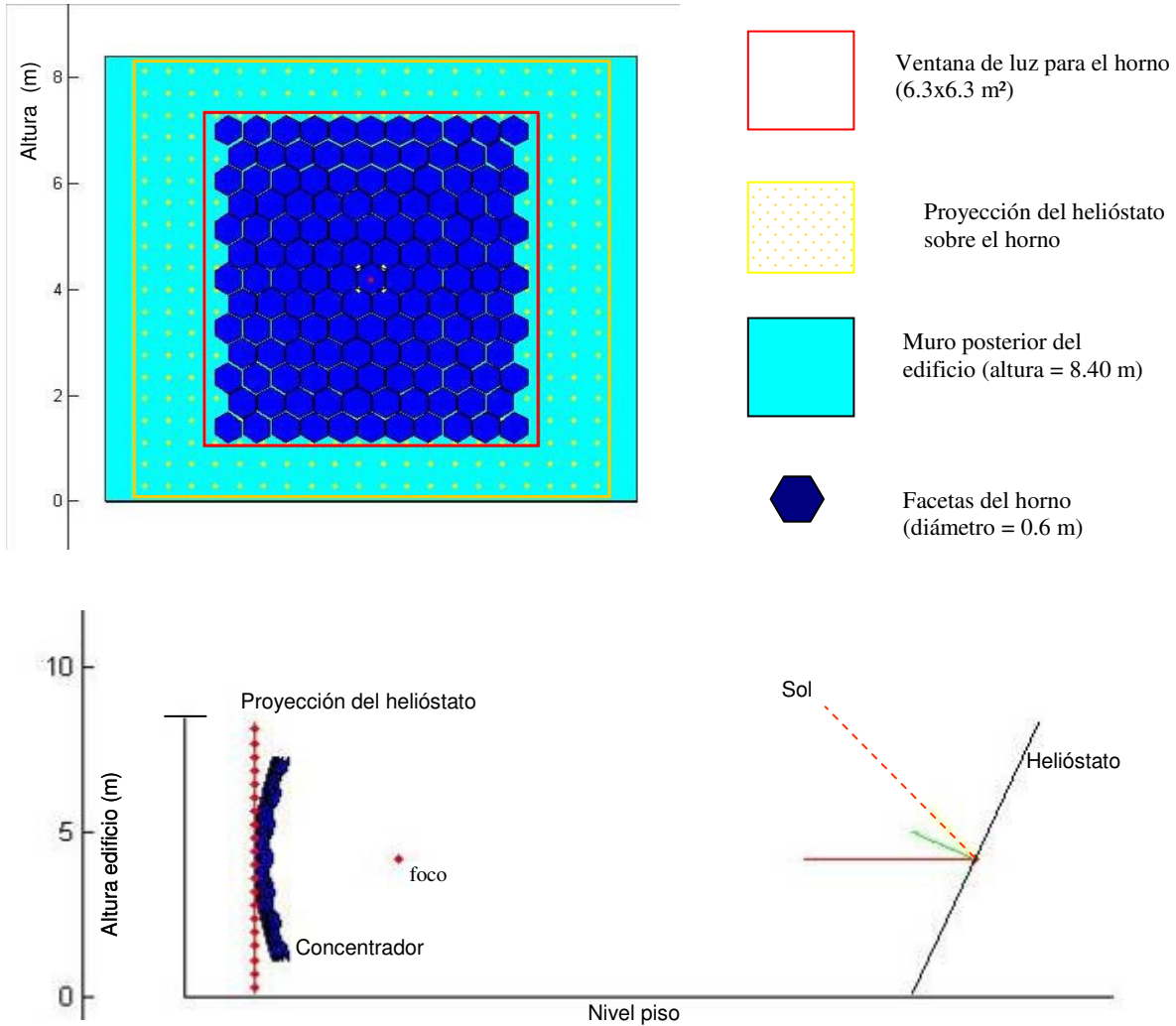


Figura 2.18. Proyección de la luz solar desviada por el heliostato sobre las facetas del horno

También se elaboró **GenDatos_Horno**, la cual se encarga de asignar las posiciones de los centros de facetas sobre un plano a partir de parámetros geométricos como son: la forma y el tamaño de las facetas, el tamaño del claro de ventana para el horno y la separación entre facetas deseada al ser colocadas en la estructura.

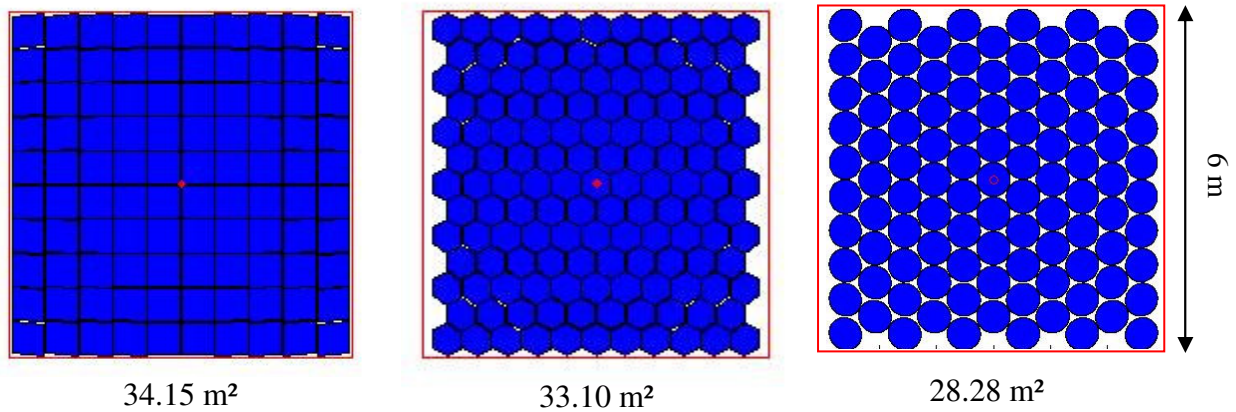


Figura 2.19. Distribución de facetas generada por la rutina GenDatos_Horno para facetas de 60 cm de diámetro y las áreas efectivas se obtienen una vez que cada espejo es posicionado y orientado de acuerdo a la geometría del canteo, en este caso parabólico.

2.4 Algoritmo de solución y descripción del programa Tonalli

Finalmente estas rutinas se han implementado en un programa que permite colocar un plano receptor a una cierta distancia del foco del sistema. Este programa posiciona al plano en cualquier punto alrededor del eje focal. También puede realizar el cálculo de planos consecutivos y almacenar los resultados en archivos para su posterior análisis en hojas electrónicas de cálculo. Además se implementó en este programa el cálculo de irradiancia promedio para receptores con diferentes porcentajes de captación de la energía total.

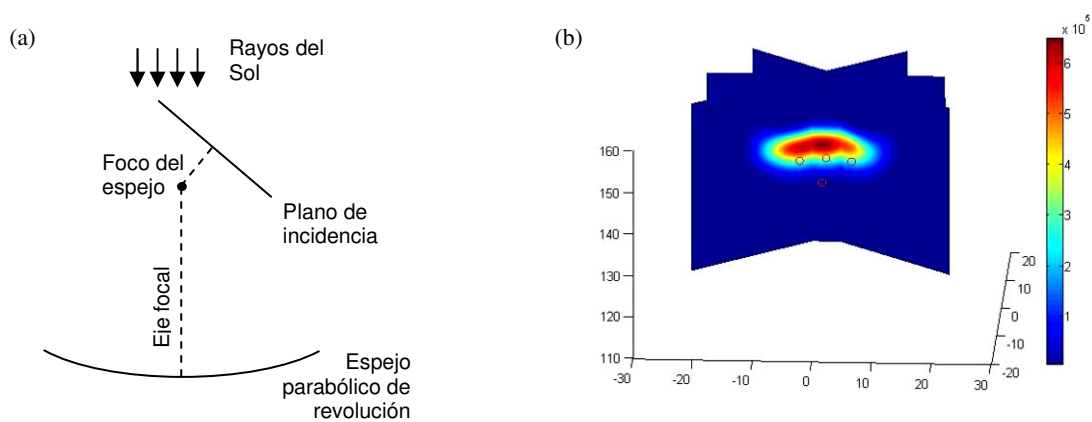


Figura 2.20. A) Vista en corte transversal de la disposición del espejo concentrador y el plano de incidencia cercano al foco del espejo. B) Vista de la distribución de irradiancia obtenida mediante el cálculo de tres planos consecutivos.

Como el objetivo de este programa es la simulación de sistemas de concentración solar de facetas múltiples, el programa puede definir facetas del tamaño de helióstatos y orientarlos de acuerdo a la posición del Sol a cualquier punto en el espacio. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la función no considera sombreamientos de ningún tipo entre facetas y tampoco considera la atenuación y dispersión de la atmósfera en la irradiancia global.

El programa fue compilado como un ejecutable y la entrada de parámetros se realiza a través de un archivo de datos. A continuación se muestra un ejemplo del archivo que contiene los parámetros para la simulación del concentrador solar DEFRAC (Estrada, 1998):

PARAMETROS_CONCENTRADOR

N CALCULA_ENERGÍA Indica si debe calcularse la irradiancia en el plano receptor
 N GIRASOL Indica si el XYZTARGET debe orientarse hacia el Sol dada una distancia focal
 S PERPENDICULAR Indica si el receptor debe ser perpendicular al eje focal
 N AIMORIENTA Indica si las facetas se orientan de acuerdo al los puntos AIM
 N CALCULA_FOCALES Indica si el programa debe calcular las distancias focales de las facetas

%***** Parámetros solares

863 Irradiancia solar en W/m²
 0 Angulo azimutal del SOL en grados
 0 Angulo cenital del SOL en grados

%***** Parámetros de planos receptores

90 Porcentaje de captación a interpolar para un receptor circular;
 0 0 0 XYZTARGET = Coordenadas en metros del centro del receptor del sistema
 10e-2 L_RecepX = longitud horizontal (X) del receptor (m)
 10e-2 L_RecepY = Longitud vertical (Y) del receptor (m)
 .1e-2 dx_target = Intervalo de partición para la malla del receptor en la dirección X (m)
 .1e-2 dx_target = Intervalo de partición para la malla del receptor en la dirección Y (m)

PLANOS

-0.0001 90 90 [distancia_Plano_foco cenit azim] Cada reglón es un plano a calcular
 -0.1000 90 90

%***** Parametros de espejos del concentrador

CIRCULAR FORMA de las facetas
 DISCOHOMOGENEO METODO de particionamiento
 ENFOCA CANTEO de las facetas en el concentrador
 SPH PERFIL o forma de la concavidad de las facetas
 0 0 0 XYZORIGEN = Coordenadas de centro del concentrador
 0 0 1 N_principal = Vector normal de orientación del helióstato o concentrador
 2.0 F_ini = Distancia focal inicial del sistema (m)
 2.0 F_fin = Distancia focal final del sistema (m)
 0.02 dF = espaciamiento entre las distancias focales a calcular (m)
 6.3 6.3 LímitesXY = Limites horizontal y vertical del sistema de facetas (m)
 0.4 TAM = Diametro o semilado de las facetas (m)
 90 Orientacion_fac = Orientación de las facetas: 0-apotema horizontal, 90-apotema vertical

0.0 Separacion_fac = Separación entre facetas (m)
 1 10 Nsize = Medida de particionamiento de las facetas
 1.0 Reflectividad promedio de las facetas
 0.55 Sigma_ini promedio inicial de errores de las facetas en mrad
 0.55 Sigma_fin promedio final de errores de las facetas en mrad
 1 d_sigma Cambio de SIGMA de errores de las facetas en mrad

DATOSFACETAS

X	Y	Z	Nx	Ny	Nz	Tx	Ty	Px	Py	Foco	Re	AimX	AimY	AimZ	#
-0.3134	-0.5428	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.098	0.92	0	0	0	1
0.0000	-0.5428	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.074	0.92	0	0	0	2
0.3134	-0.5428	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.098	0.92	0	0	0	3
0.4701	-0.2714	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.074	0.92	0	0	0	4
0.6268	0.0000	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.098	0.92	0	0	0	5
0.4701	0.2714	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.074	0.92	0	0	0	6
0.3134	0.5428	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.098	0.92	0	0	0	7
0.0000	0.5428	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.074	0.92	0	0	0	8
-0.3134	0.5428	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.098	0.92	0	0	0	9
-0.4701	0.2714	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.074	0.92	0	0	0	10
-0.6268	0.0000	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.098	0.92	0	0	0	11
-0.4701	-0.2714	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.074	0.92	0	0	0	12
-0.1567	-0.2714	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.025	0.92	0	0	0	13
0.1567	-0.2714	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.025	0.92	0	0	0	14
0.3134	0.0000	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.025	0.92	0	0	0	15
0.1567	0.2714	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.025	0.92	0	0	0	16
-0.1567	0.2714	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.025	0.92	0	0	0	17
-0.3134	0.0000	0	0	0	1	0.1500	0	5	0	2.025	0.92	0	0	0	18

El nombre del archivo puede variar, pero debe especificarse el nombre completo con extensión después de teclear el nombre del programa. Por ejemplo:

>>Tonalli.exe parametros.txt

El perfil de distribución solar que se usa por omisión corresponde al archivo 'sunshapecirce.txt' que contiene los datos del cono solar estándar reportado por el programa CIRCE2 (Romero, 1984). Si desea cambiar esta distribución, los datos deben especificarse en un archivo de texto con el mismo formato como se muestra en el siguiente ejemplo:

>>Tonalli.exe parametros.txt perfil_solar.txt

Todas las coordenadas del sistema de concentración están referenciadas a las coordenadas geográficas. El eje +Y corresponde a la dirección Norte, y el eje +X corresponde a la dirección Este. El eje +Z corresponde con la vertical hacia el cenit.

Al inicio del archivo de parámetros se encuentran con 5 banderas:

CALCULA_ENERGÍA, si su valor es 'S', el programa integra la distribución energía correspondiente a cada rayo en el plano receptor. Si el valor es 'N', el programa sólo se presentan los gráficos de la configuración óptica del sistema y los puntos de incidencia de los rayos en el plano receptor.

GIRASOL, si tiene el valor 'S', se modifica el punto focal *XYZTARGET* para orientarlo hacia el Sol dada una distancia focal.

PERPENDICULAR, si tiene valor 'S' el programa recalcula la orientación del plano receptor para colocarlo en posición perpendicular a la línea entre punto focal *XYZTARGET* y el centro de coordenadas del concentrador *XYZORIGEN*.

AIMORIENTA, si su valor es 'S', y en caso de haber puntos de ataque, las facetas se orientan de acuerdo a estos puntos a fin de que un rayo incidente en el centro de la faceta, sea reflejado hacia su punto de ataque correspondiente.

CALCULA_FOCALES, si su valor es 'S', la columna 11 de la matriz *DATOSFACETA* se iguala a cero para indicar al programa que debe calcular las focales de manera interna. Si la bandera *AIMorienta* tiene el valor 'N' el programa calcula la distancia focal de la faceta con la distancia entre el centro de la faceta y el punto focal del sistema. Si la bandera *AIMorienta* tiene el valor 'S' el programa calcula la distancia focal de la faceta con la distancia entre el centro de la faceta y el punto de ataque correspondiente.

En cuanto al resto de las variables a continuación se da una breve explicación de su significado físico:

El **porcentaje de captación** se refiere al porcentaje de Irradiancia a considerar para calcular el radio de un receptor plano que capta dicho porcentaje.

Las variables **L_RecepX** y **L_RecepY**, definen las dimensiones del plano receptor (que tiene forma rectangular).

La matriz **PLANOS** contiene las posiciones de diversos receptores localizados alrededor del punto focal *XYZTARGET*. Cada renglón de la matriz corresponde a la ubicación y orientación del plano. La primera columna de la matriz contiene la distancia del plano al punto *XYZTARGET*, la segunda columna contiene el ángulo cenital del vector normal al plano respecto a la vertical del sistema geográfico de referencia y la tercera columna contiene el ángulo azimutal del eje X del receptor. Los ángulos se miden de acuerdo a la siguiente convención

Ángulo azimutal:	Se mide en grados desde la dirección Sur siendo positivo hacia el Oeste y negativo hacia el Este
Ángulo cenital:	Se mide en grados desde el punto cenital del observador

El plano receptor sólo permite la incidencia en uno de sus lados. En general, la incidencia ocurre de acuerdo a la siguiente convención: si imaginamos al vector normal apoyado en el punto

XYZTARGET del plano, la incidencia ocurre en el lado del plano contrario al que apoya al vector. Consideremos los siguientes ejemplos:

azim = 180;	cenit = 90	=> Vector apunta al Norte, rayos inciden desde el Sur
azim = 0;	cenit = 90	=> Vector apunta al Sur, rayos inciden desde el Norte
azim = 90;	cenit = 90	=> Vector apunta al Oeste, rayos inciden desde el Este
azim = -90;	cenit = 90	=> Vector apunta al Este, rayos inciden desde el Oeste
	cenit = 0	=> Vector apunta al cenit, rayos inciden desde el abajo

La **FORMA** de las facetas puede ser HEXAGONAL, CIRCULAR y RECTANGULAR.

La variable **METODO** se refiere a la manera de particionar a la faceta para asignar los puntos de reflexión. Si las facetas son rectangulares solo es válido el método de cartesianas. En caso de facetas hexagonales el particionamiento también es hexagonal y el resto de los tipos de particionamiento no son válidos.

'POLARES'	Indica que la faceta se subdivide en un cierto número de anillos con igual número de particiones angulares.
'CARTESIANAS'	mallá de puntos cuadrada o rectangular.
'DISCOHOMOGENEO'	La faceta se subdivide en un cierto número de anillos y el número de subdivisiones angulares se ajustan para lograr secciones con la misma área.

La variable **CANTEO** se refiere a la forma en que serán dispuestas las facetas cuando sean colocadas en la estructura del sistema óptico. Es decir en la forma en que serán calculadas las coordenadas Z de los vértices de las facetas. En el caso de los tipos 'SPH' y 'PARAB', el cálculo se realiza, a partir de la distancia focal del canteo que se asigna, de acuerdo a las variables F_{ini} , F_{fin} y dF . Los tipos de canteo aceptados son:

SPH	esférico
PARAB	parabólico
PLN	plano
ENFOCA	Las facetas se orientan para que los rayos reflejados apunten a un lugar definido
NINGUNO	No se realiza canteo

La variable **PERFIL** se refiere a la forma de la curvatura o concavidad de las facetas individuales y el cálculo se realiza a partir de la distancia focal que se asigna a las facetas. Los tipos de canteo aceptados son:

SPH	esférica
CYLX	cilíndrica, eje paralelo a X
CYLY	cilíndrica, eje paralelo a Y
PLN	plana
PARAB	parabólico

La variable **XYZORIGEN** indica la posición del origen de coordenadas del concentrador. Las coordenadas de cada faceta en el sistema óptico toman como referencia a este punto.

La variable **N_principal** indica el vector normal con el cual será orientado el concentrador, en caso de ser cero, entonces será orientado de acuerdo a la dirección entre el punto XYZORIGEN y el punto XYZTARGET

El programa puede realizar corridas cambiando la posición de los planos receptores, sin embargo, también puede variar los errores ópticos promedio de los espejos y la distancia focal del arreglo. Para ello se asignan valores finales e iniciales en las variables **sigma_ini** y **sigma_fin** para el caso de los errores ópticos y **F_ini** y **F_fin** para el caso de las distancias focales. El incremento de error óptico esta dado por la variable **d_sigma**. El incremento en la distancia focal esta dado por la variable **dF**.

La variable **LimitesXY** determina un área dentro de la cual serán calculadas las coordenadas XY de los centros de las facetas en un plano horizontal. Cuando el programa no cuenta con la matriz **DATOSFACETA**, entonces, éste utiliza a la función GenDatos_Horno que genera a esta matriz limitando las coordenadas de las facetas al área definida por la variable Limites XY.

La variable **TAM** indica el tamaño de las facetas. Diámetro si es circular o HEXAGONAL, semilado si es cuadrada, y semilado1 y semilado2 si es RECTANGULAR. En caso de tener dos valores, para facetas circulares y hexagonales solo se toma el primero. En las facetas HEXAGONALES, el segundo valor indica el ángulo de rotación de la faceta que puede ser 0 o 90. En caso de ser cero, una de las aristas es paralela al eje X; si el ángulo es 90 entonces una de las aristas tendrá orientación vertical. La orientación, en el caso Hexagonal también se registra en la variable **Orientación_fac**.

La variable **Nsize** indica el número de particiones para cada dimensión de la variable TAM. Puede tener 1 o 2 valores. Para facetas circulares y hexagonales, solo se utiliza el primer valor. Para facetas rectangulares, se usan ambos valores.

La variable **Reflec** indica la reflectividad que se asigna a todas las facetas del sistema óptico. En caso de ser cero, entonces la reflectividad de cada faceta esta determinada por la matriz **DATOSFACETAS**.

Si el archivo contiene a la matriz **DATOSFACETAS**, en ella se especifican todos los parámetros ópticos y geométricos de las facetas para la simulación del concentrador. En caso de que el archivo no cuente con esta matriz, el programa generara la matriz utilizando la función GenDatos_Horno a partir de las variables: **LimitesXY**, **TAM**, **FORMA**, **Orientacion_fac**, **Separacion_fac**, **Nsize**, **Reflec**, **XYZTARGET**. A continuación se describe el contenido de la matriz **DATOSFACETA**:

Columnas 1, 2 y 3, contienen las coordenadas de los centros de cada faceta respecto a un origen ubicado en el centro de coordenadas del concentrador (*XYZORIGEN*).

Columnas 4, 5 y 6, corresponden al vector normal a cada faceta. Si estos vectores tienen norma cero, entonces el vector normal es determinado de acuerdo a las características ópticas del programa, es decir, por la posición del foco del sistema, por la distancia focal del arreglo o por los puntos *AIM* de cada faceta, según sea el caso.

Columnas 7 y 8, contienen las dimensiones de cada faceta. La columna 7 corresponde al Radio si la forma de las facetas es circular, o la longitud de una arista si es HEXAGONAL. En el caso circular no se toma en cuenta a los datos de la columna 8. Si la forma de las facetas es RECTANGULAR entonces las columnas 7 y 8 corresponden a los semilado1 y semilado2 respectivamente. En facetas HEXAGONALES la columna 8 indica el ángulo de rotación de la faceta que puede ser 0 o 90.

Columnas 9 y 10, contienen los valores para el particionamiento de las facetas y sólo se utilizan cuando la variable *Nsize* es igual a cero. En caso de que *Nsize* sea diferente de cero, entonces las columnas 9 y 10 de *DATOSFACETA* se substituyen por los valores de *Nsize(1)* y *Nsize(2)* respectivamente.

Columnas 11 y 12, corresponden a la distancia focal y a la reflectividad de cada faceta respectivamente. En caso de que la distancia focal de las facetas sea cero, el programa las calcula de acuerdo a las características ópticas del sistema (tipo de canteo, distancia focal del arreglo).

Columnas 13, 14 y 15, contienen las coordenadas de los puntos *AIM* de cada faceta. Las coordenadas están dadas respecto al sistema general de coordenadas del programa. Estos puntos permiten orientar a las facetas siempre y cuando éste active la bandera *AIMorienta*. Los puntos *AIM* no pueden ser generados por el programa y deben asignarse de manera externa en el archivo de 'parametros_concetrador.txt'.

El funcionamiento del programa puede resumirse en el diagrama de flujo que representa el algoritmo de solución:

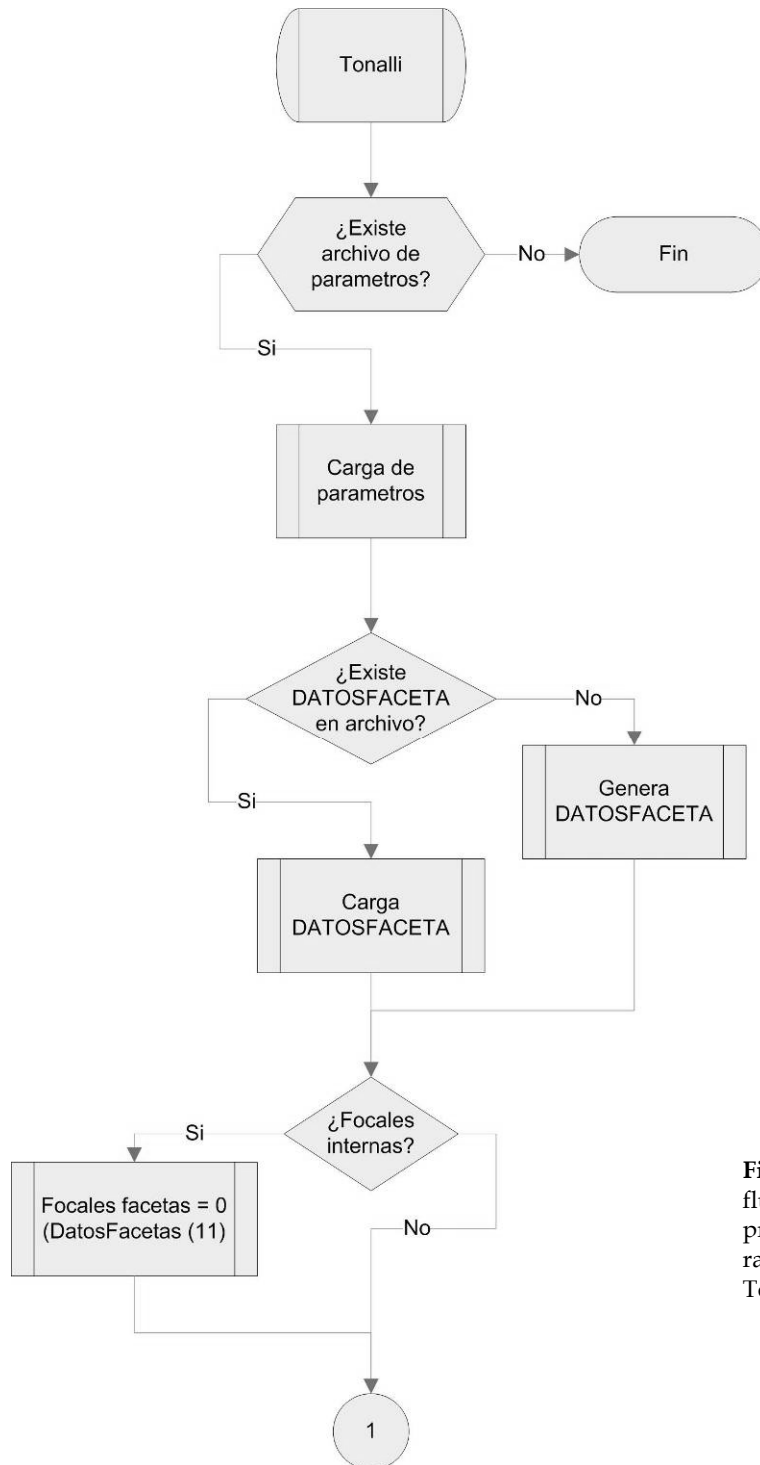
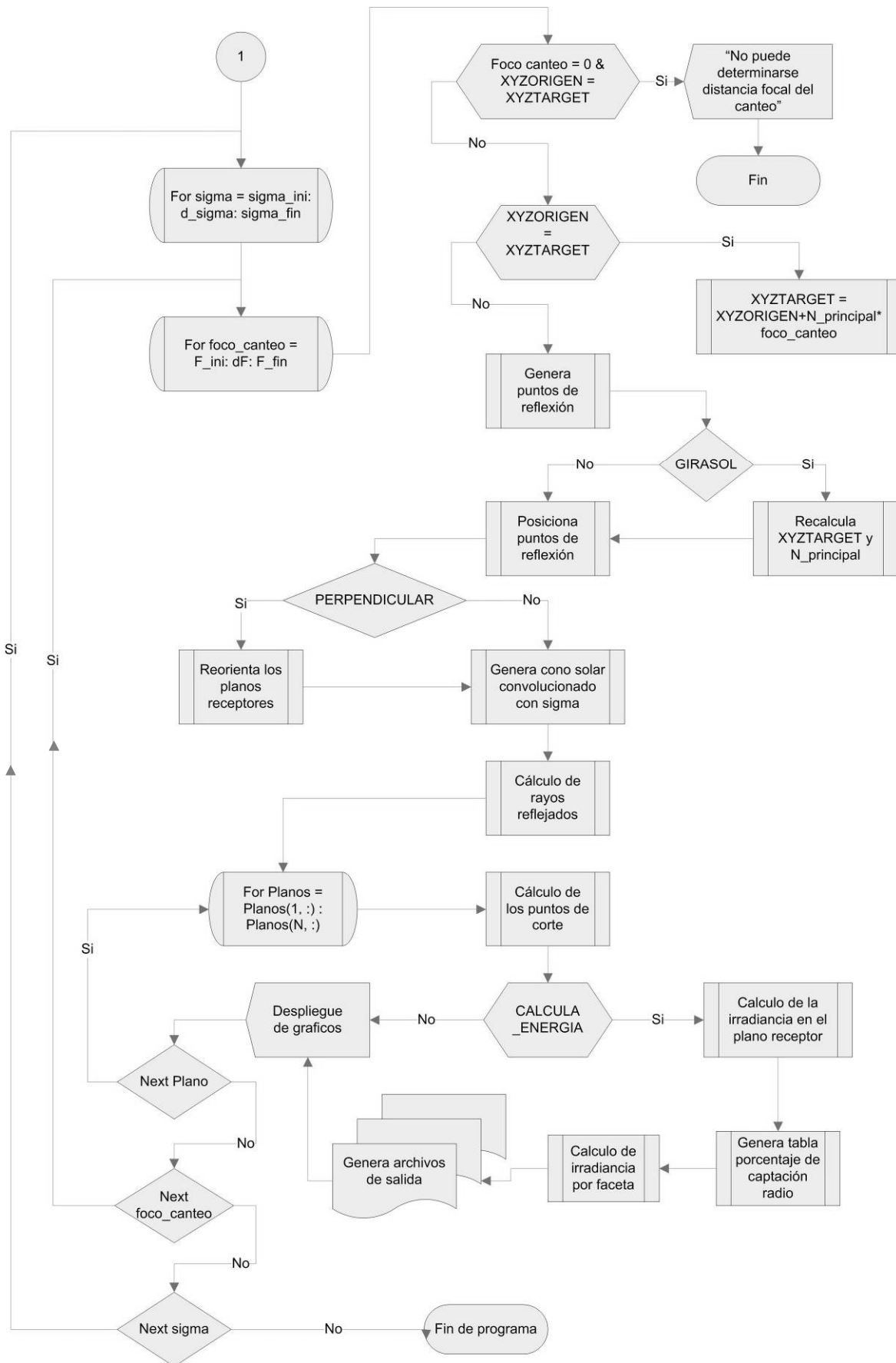


Figura 2.21. Diagrama de flujo de la rutina principal del trazado de rayos en el programa Tonalli.



Capítulo 3

Estudios de validación



3.1 Relación de F/D óptimo

A fin de realizar una validación teórica del modelo matemático, se reprodujeron algunos resultados ya conocidos para la óptica de concentración solar de foco puntual. En sistemas de concentración de foco puntual, el límite termodinámico para la concentración está dada por¹¹:

$$C_{fp,max} = \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\alpha_{ap}}{2}\right)} . \quad 3.1$$

Donde α_{ap} es el ángulo que subtende una fuente colocada simétricamente en el infinito, en este caso el Sol. El radio solar angular visto desde la Tierra es aproximadamente de 4.65 mrad, y corresponde a la mitad del ángulo de apertura de la fuente. Por lo que la concentración máxima que puede obtenerse del Sol es aproximadamente de:

$$C_{fp,max} \approx 46\,200 .$$

Este límite de concentración corresponde al promedio de irradiancia en concentradores de imagen. En cuanto a la concentración pico pueden obtenerse valores más altos. En el horno solar del NREL, se han reportado concentraciones pico del orden de los 84,000 soles (Rosen, 1991).

El factor de concentración puede verse afectado por la geometría del receptor. En el caso de un receptor plano, para un concentrador parabólico de revolución, el diámetro de una mancha solar en el foco del concentrador puede calcularse mediante la siguiente ecuación (Duffie, 1991):

$$W = \frac{2R \sin(\rho_s)}{\sin(\phi_r) \cos(\phi_r + \rho_s)} . \quad 3.2$$

Donde R corresponde al radio del concentrador y ϕ_r es el ángulo de borde del concentrador visto desde el punto focal (figura 3.1). A partir de esta ecuación podemos calcular el factor de concentración en un receptor plano C_{rp} mediante la expresión:

$$C_{rp} = \frac{A_{ap}}{A_{rp}} = \frac{\pi R^2}{\pi \left(\frac{W}{2}\right)^2} = \frac{4R^2 \sin^2(\phi_r) \cos^2(\phi_r + \rho_s)}{4R^2 \sin^2(\rho_s)} = \frac{\sin^2(\phi_r) \cos^2(\phi_r + \rho_s)}{\sin^2(\rho_s)} . \quad 3.3$$

¹¹ La derivación de esta ecuación podrá encontrarse en el apéndice A

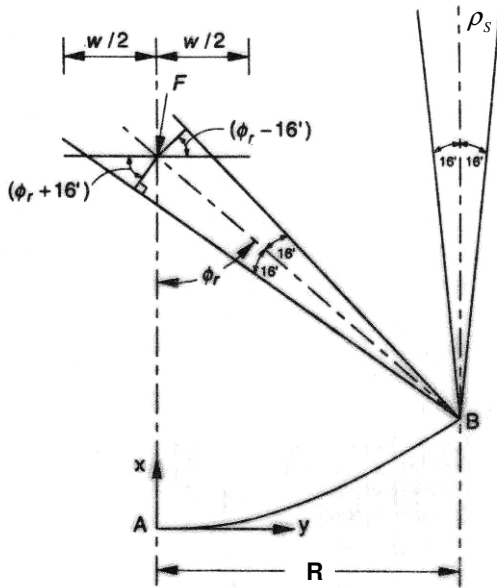


Figura 3.1 Dimensiones de la imagen para un concentrador de perfil parabólico.

Esta ecuación no depende de las dimensiones del concentrador. Al realizar la gráfica, se obtiene la concentración máxima cuando el ángulo de borde es de 45° . Para este ángulo el diámetro de la mancha solar tiene un valor mínimo y el factor de concentración es aproximadamente de:

$$W_{\min} \approx 11.24 \text{ cm} \quad ; \quad C_{rp,\max} \approx 11\,405 \quad .$$

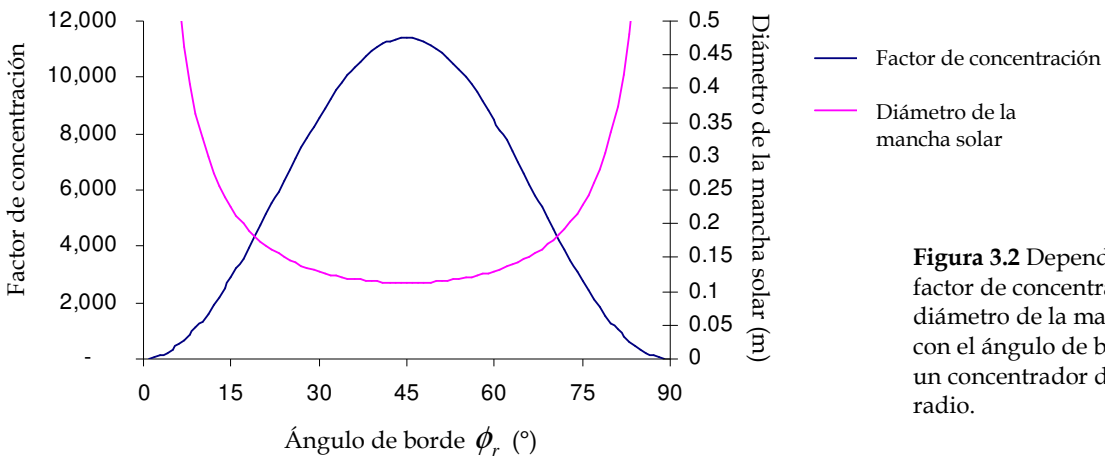


Figura 3.2 Dependencia del factor de concentración y diámetro de la mancha solar con el ángulo de borde para un concentrador de 6 m de radio.

Dado un ángulo de apertura, la razón entre la distancia focal y el diámetro del espejo se mantiene constante. Así que para un ángulo de 45° , la razón F/D óptima tiene un valor de:

$$\frac{F}{D} = 0.58 .$$

Para verificar que el programa pudiera reproducir estos datos, se realizaron varias pruebas modelando un concentrador de 6 metros de radio. La primera consistió en obtener la irradiancia en un plano receptor utilizando un modelo de Sol uniforme; con el fin de comparar el factor de concentración y el diámetro de la mancha solar que cubriera el 100% de la energía captada. Los parámetros de la modelación se reportan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros para modelación a la distancia focal óptima (F/D = 0.58)

Parámetro	Valor
Irradiancia solar	1000 W/m ²
Forma solar	Homogénea
Distancia focal	6.96 m
Radio del espejo	6 m
Reflectividad	1
Error óptico	0 mrad

En la figura 3.3 se muestra la curva de irradiancia que se obtuvo de la modelación. Si ajustamos el radio de un círculo centrado en el receptor para cubrir el 100% de la potencia en el plano se obtiene que el radio de la mancha solar es de 11.2 cm y la concentración promedio es de 11490, lo cuál representa un error de 0.3% y 0.7% respectivamente, respecto a los resultados esperados.

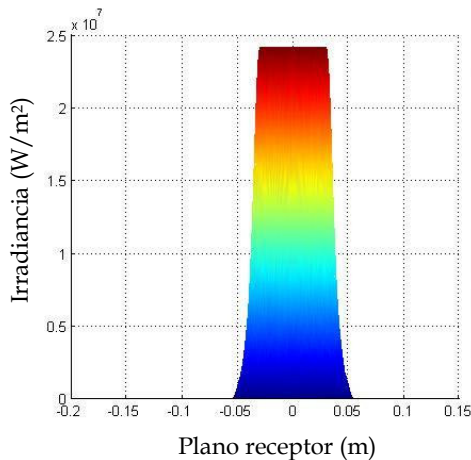


Figura 3.3. Irradiancia en el plano receptor a partir de un modelo de Sol uniforme.

La segunda prueba consistió en variar la distancia focal del concentrador para obtener la razón F/D óptima considerando diferentes porcentajes de captación en el plano. Los parámetros de la modelación se muestran en la Tabla 3.2 y los resultados se resumen en la gráfica 3.4. En la gráfica se observa que el valor F/D óptimo para un 100% de captación es de aproximadamente 0.58, lo cual corresponde al valor reportado teóricamente.

También se observa que la razón F/D óptima es muy dependiente del porcentaje de captación de energía. Si se disminuye el círculo de captación en el receptor, la irradiancia promedio aumenta sobre la superficie, pero esto exige reducir la distancia focal (o la razón F/D) del sistema para obtener el máximo de irradiancia. Un horno solar de facetas múltiples, cuyos espejos pudieran ajustarse por servomecanismos, podría aprovechar esta posibilidad si a la mesa de experimentación tuviera una distancia focal variable.

Tabla 3.2 Parámetros para modelación con distancia focal variable

Parámetro	Valor
Irradiancia solar	1000 W/m ²
Forma Solar	Sol estándar
Radio del espejo	6 m
Reflectividad	0.9
Error óptico	0 mrad

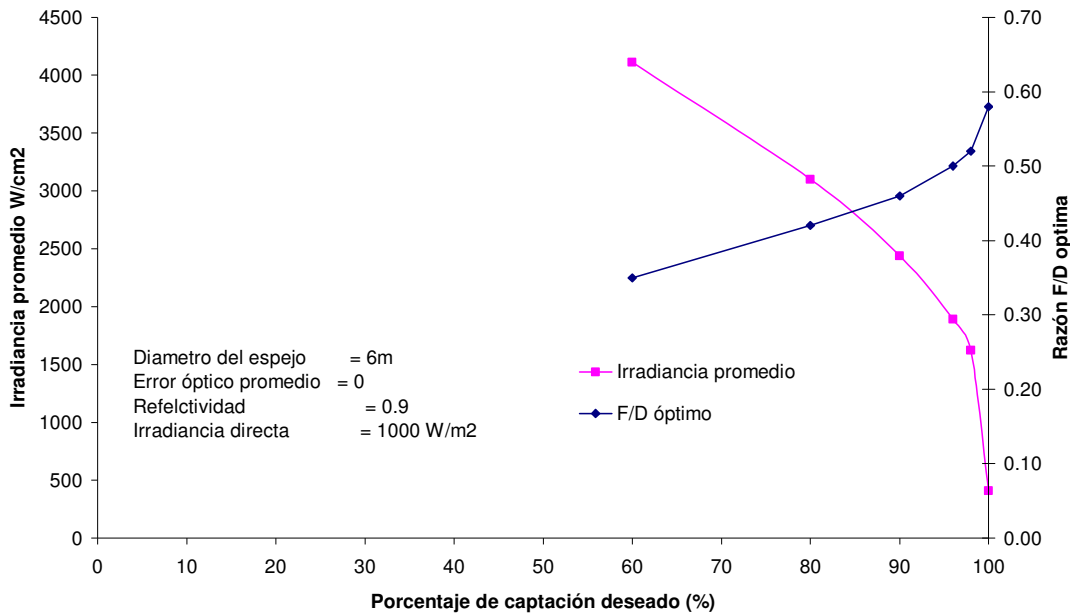


Figura 3.4. Razón F/D óptima para diferentes porcentajes de captación en receptores planos de un espejo circular parabólico.

Otro caso bien conocido, en óptica de concentración, es el de los espejos de cavidad esférica, Esta curvatura a diferencia de la parábola no tiene un punto focal definido, sin embargo para casquetes esféricos, cuya altura es inferior al radio, se les puede definir una distancia focal aproximada. A partir de la ecuación de una esfera:

$$x^2 + (y - R)^2 = R^2.$$

Si despejamos la variable y para dejarla en función de x , podemos reescribir la ecuación como:

$$y = R \pm \sqrt{R^2 - x^2}.$$

En el caso de casquetes que serán usados como concentradores, los valores de y deben ser inferiores al radio. Entonces se tomará el signo negativo de la raíz, y esta última puede desarrollarse a partir del teorema del binomio. Por lo tanto, la coordenada y puede expresarse como (Hecht, 1986):

$$y = \frac{x^2}{2R} + \frac{1x^4}{2^2 2! R^3} + \frac{1 \cdot 3y^6}{2^3 3! R^5} + \dots \quad 3.4$$

Esta expresión indica que, para valores pequeños de $x \ll R$, la ecuación de la esfera es similar a una parábola. Por lo tanto la distancia focal aproximada para un casquete esférico puede escribirse como:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Caso esférico} \quad 2R \quad y \approx x^2 \\ \text{Caso parabólico} \quad 4f \quad y = x^2 \end{array} \right\} \Rightarrow f \approx \frac{R}{2}. \quad 3.5$$

Por otro lado la condición de $x \ll R$ significa que, entre más pequeño sea el diámetro del espejo, la diferencia con la parábola disminuye por lo que es de esperarse que para razones F/D grandes, el factor de concentración debe mejorar. En la figura 3.5 se observan concentradores esféricos del mismo diámetro y diferentes razones F/D. En la figura puede notarse que a mayor distancia focal los rayos convergen de manera más puntual por lo que se debería de esperar una mayor concentración. Esto coincide con los datos de la tabla 3.3, en ella se presenta la máxima diferencia entre las coordenadas verticales de un casquete esférico y uno parabólico para diferentes valores de distancia focal (expresada en el número de veces el radio del espejo R); sin embargo, no debe olvidarse que a mayor distancia el cono solar cubre una área mayor en el receptor.

Tabla 3.3 Diferencia máxima entre un concentrador parabólico y esférico, para diferentes razones F/D

Diámetro	F/D	Ymax caso parabólico	Ymax caso esférico	Dif%
0.100 R	2.50	0.005	0.005	0.25%
0.125 R	2.00	0.008	0.008	0.39%
0.167 R	1.50	0.014	0.014	0.71%
0.250 R	1.00	0.031	0.032	1.61%
0.333 R	0.75	0.055	0.057	2.94%
0.500 R	0.50	0.125	0.134	7.18%
0.700 R	0.36	0.245	0.286	16.68%
0.800 R	0.31	0.320	0.400	25.00%
0.900 R	0.28	0.405	0.564	39.29%
1.000 R	0.25	0.500	1.000	100.00%

El diámetro está expresado en el número de veces el radio de la esfera. La variable Ymax se refiere a la coordenada Y en el borde del espejo

Cabe señalar que, en la figura 3.5, se aprecia que la distancia focal aproximada del casquete esférico parece estar por debajo de la posición que predice la ecuación 3.5. Para explicar esto se debe reescribir la ecuación 3.4 utilizando 2 términos, para dar una ecuación más precisa de la distancia focal aproximada de la parábola:

$$f = \frac{R}{2} \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{x}{2R}\right)^2} \right) \quad 3.6$$

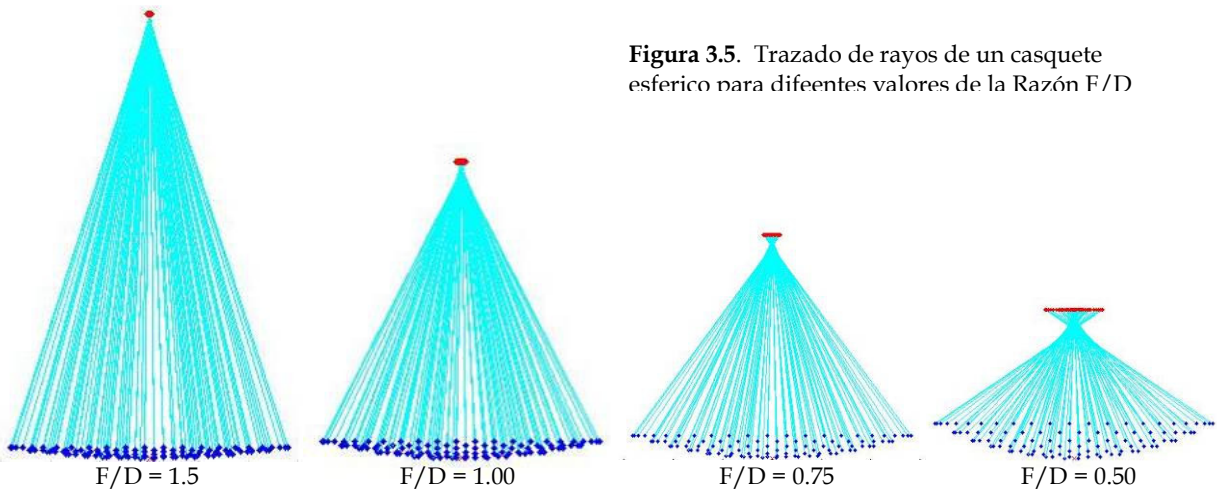


Figura 3.5. Trazado de rayos de un casquete esférico para diferentes valores de la Razón F/D

Esta ecuación depende del radio x del espejo. Para radios pequeños del espejo $x \ll R$, la distancia focal se ajusta bien a la mitad del radio de la esfera. Sin embargo para casquetes mayores la distancia focal se ve reducida en un factor $1 + \left(\frac{x}{2R}\right)^2$, por lo que la distancia focal óptima queda por debajo del resultado aproximado por la ecuación 3.5. En la figura 3.6 se muestra la ubicación del plano a la distancia focal corregida a partir de la ecuación 3.6, puede apreciarse que es en este punto donde se encuentra una mayor concentración de rayos.

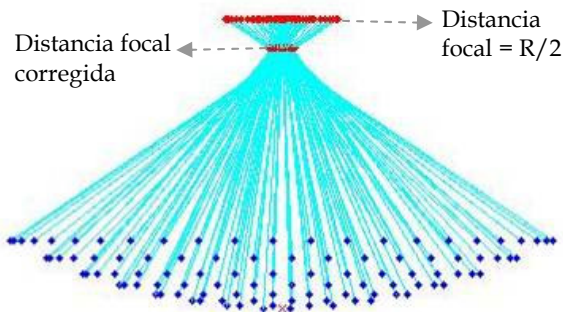


Figura 3.6. Ubicación de un plano receptor a una distancia focal corregida, en un espejo concentrador esférico. Imagen obtenida con el programa de trazado de rayos Tonalli.

Se realizó un estudio con un concentrador circular esférico, a fin de determinar el valor F/D óptimo para diferentes errores ópticos y de superficie. El diámetro del espejo considerado fue 6 m y una reflectividad de 0.9. La irradiancia directa se fijó en 1000 W/m² y la irradiancia promedio se calculó considerando el 90% de captación de energía. A diferencia de los espejos parabólicos, en los cuales varía muy poco la razón óptima F/D con el error óptico, en el caso de los espejos esféricos si hay una fuerte dependencia. Como puede observarse en a figura 3.7, la razón F/D óptima varía entre 1.7 y 1.2 para errores ópticos entre 0 y 4 mrad respectivamente. En la gráfica puede observarse que la irradiancia promedio tiene niveles mucho más bajos que el caso parabólico, incluso para razones F/D más pequeñas, debido a la aberración esférica.

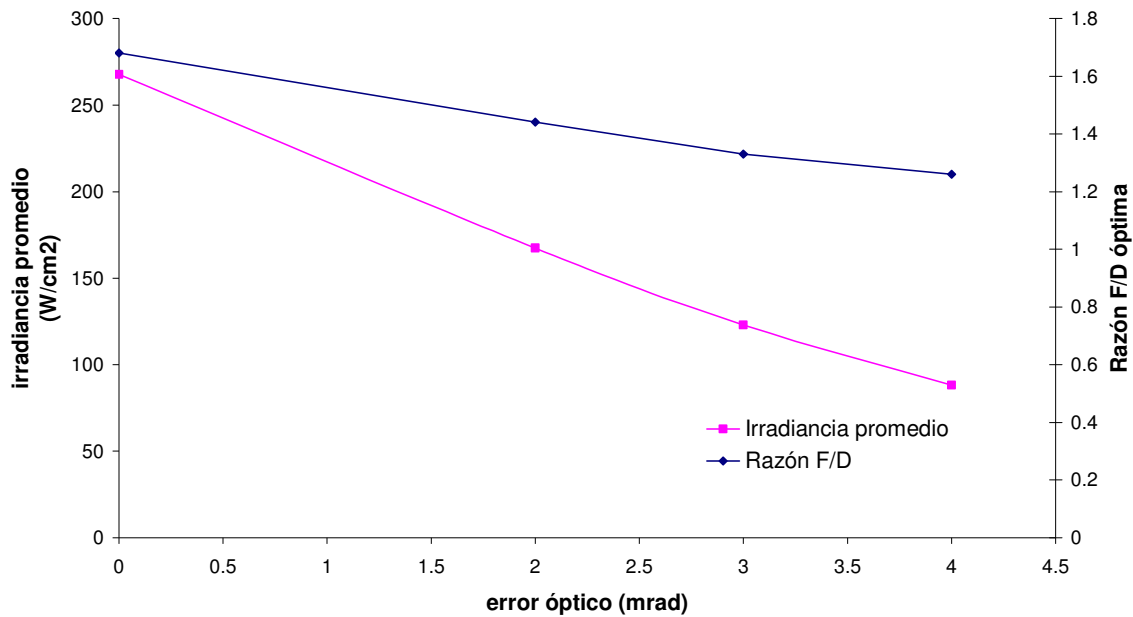


Figura 3.7. Distancia focal óptima de un espejo circular esférico para diferentes errores ópticos de superficie en un receptor plano.

3.2 Validación con otros programas de modelación con trazado de rayos

A partir de la técnica de trazado de rayos, en los laboratorios SANDIA, se elaboró un paquete de software para el análisis óptico en 3D de concentradores de energía solar llamado CIRCE2/DEKGEN2 [Romero, 1984]. Dicho paquete puede simular sistemas de espejos concentradores de foco puntual en 3 dimensiones y ha resultado una poderosa herramienta para la simulación de flujos radiativos concentrados. Sin embargo, existen algunas desventajas, CIRCE2/DEKGEN2 tiene la limitación de ser un programa elaborado sobre la base del sistema operativo DOS, lo que reduce su capacidad de manejo de memoria y limita su capacidad de modelación a menos de 350 facetas de un sistema óptico, el programa no permite realizar un análisis de la simulación de manera inmediata a su realización y resulta “poco amigable” para modificar los parámetros físicos del concentrador o de la radiación incidente, así como los parámetros numéricos para realizar de simulación.

Por las razones expuestas se consideró conveniente contar con un programa de cómputo con características similares a las de CIRCE2, pero aprovechando la versatilidad de los sistemas operativos y lenguajes de programación actuales e implementado algunas propiedades adicionales que permitan realizar un diseño óptico adecuado a las características de un horno solar.

Por otro lado, el CIE cuenta con un dispositivo para el estudio de flujos radiativos altamente concentrados (DEFAC) [Estrada, 1998] que consiste en un concentrador solar formado por 18 espejos parabólicos. Durante las etapas iniciales de la puesta en operación del DEFAC, se elaboró el programa de cómputo *Especios* en lenguaje C para simular la distribución de energía de este concentrador en su zona focal [Riveros, 1996]. El código fuente del programa de simulación del DEFAC se realizó utilizando la técnica de trazado de rayos.



Figura 3.8: Distribución de energía en el plano focal para el DEFAC.

Este programa modela a partir de un sol extendido uniforme y un generador de números aleatorios para el cual sólo se define el máximo error posible que puede desviarse un rayo reflejado alrededor de la dirección ideal de reflexión.

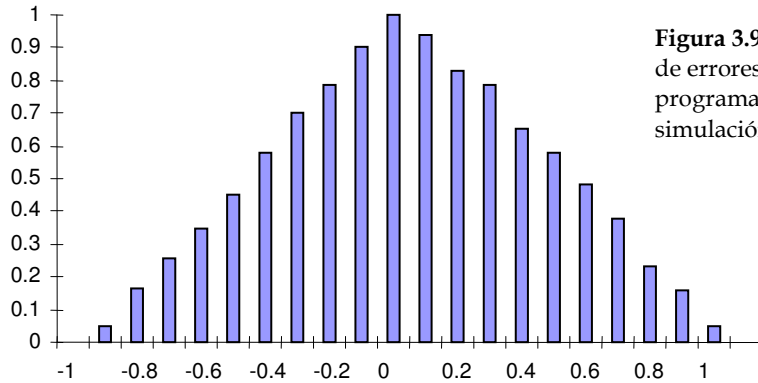


Figura 3.9: Distribución relativa de errores que genera el programa *Espejos* para la simulación del DEFAC.

Se obtuvieron numéricamente las curvas de distribución de energía para el concentrador DEFAC utilizando tanto el programa de trazado de rayos “espejos” como el programa CIRCE2 (figura 3.10). En ambos programas se introdujeron idénticos parámetros físicos del concentrador a fin de comparar la forma de las curvas de distribución de energía.

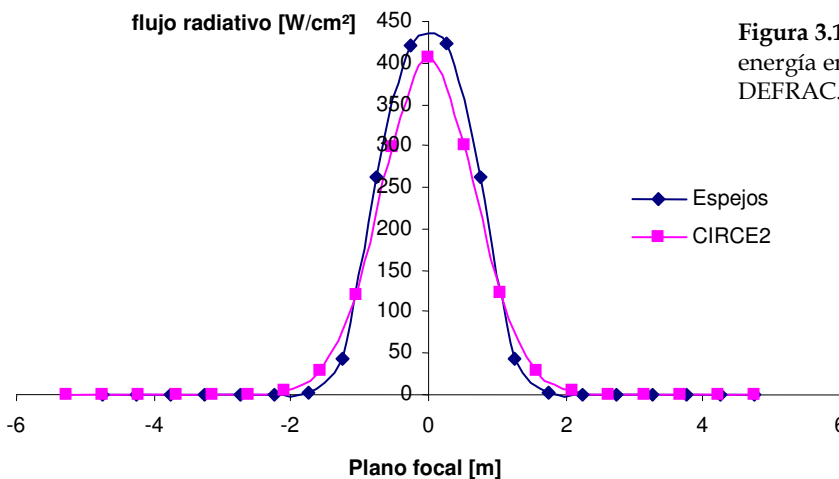


Figura 3.10: Distribución de energía en el plano focal para el DEFAC.

Se observa que ambas curvas son ligeramente diferentes, pero debe considerarse que el tratamiento de errores en la superficie de los espejos también es diferente. En CIRCE2 el cono de error corresponde a una distribución gaussiana cuyo ancho es de 1.26 mrad. Por el otro lado, el programa espejos utiliza la función random para generar los errores de superficie; siendo que el máximo ángulo de error permitido en la superficie de los espejos es de 3.78 minutos de arco (1.26 mrad). El perfil de distribución de errores de superficie en el programa espejos no corresponde a

una gaussiana y por lo tanto no pueden compararse adecuadamente los resultados de la simulación para cada uno de los programas.

Al realizar la comparación de datos con el programa CIRCE, se realizó una prueba a partir de un concentrador parabólico de revolución sin errores y utilizando un modelo de sol estándar. El paraboloide se seleccionó de 5.6 m de diámetro por ser éste el tamaño equivalente, en área, al horno solar de la PSA. De la misma forma, la distancia focal modelada también es igual a la del horno. Estas dos dimensiones dan una relación F/D que es aproximada al valor óptimo de 0.58 para un concentrador parabólico de revolución. Las características del concentrador se resumen en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Parámetros para la comparación de resultados entre los programas CIRCE y Tonalli

Parámetro	Valor
Irradiancia solar	1000 W/m ²
Forma Solar	Sol estándar
Área efectiva	98.5 m ²
Diámetro del espejo	11.2 m
Distancia focal	7.45 m
Relación F/D	0.66
Reflectividad	1.0
Error óptico	0 mrad

Ambos programas, utilizando los mismos parámetros, arrojan resultados muy similares como puede verse en la figura 3.11. La diferencia en el pico de irradiancia es inferior al 1%.

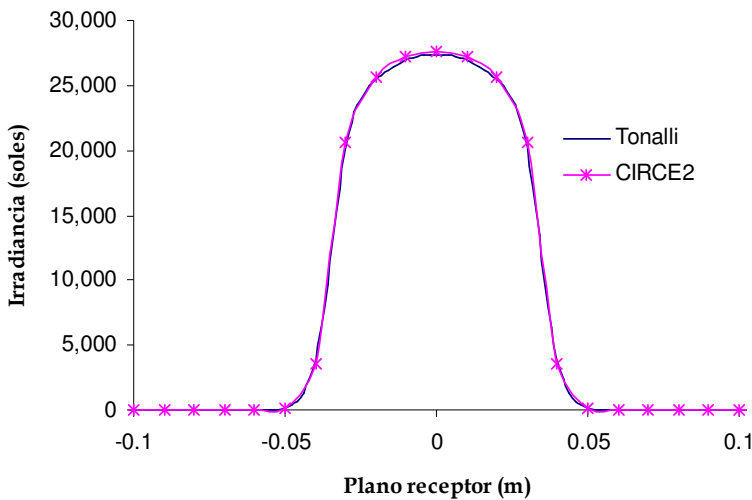


Figura 3.11: Comparación de los resultados de irradiancia, en un plano receptor, con los resultados de los programas Circe2 y Tonalli (error óptico de 0 mrad).

Al realizar la simulación del concentrador con errores ópticos, las diferencias entre ambos programas oscilan alrededor de un 10% para distribuciones de error cuya desviación estándar es

pequeña; y se reduce conforme la magnitud del error aumenta. Para errores ópticos superiores a 4 mrad es inferior a 3% (figura 3.12).

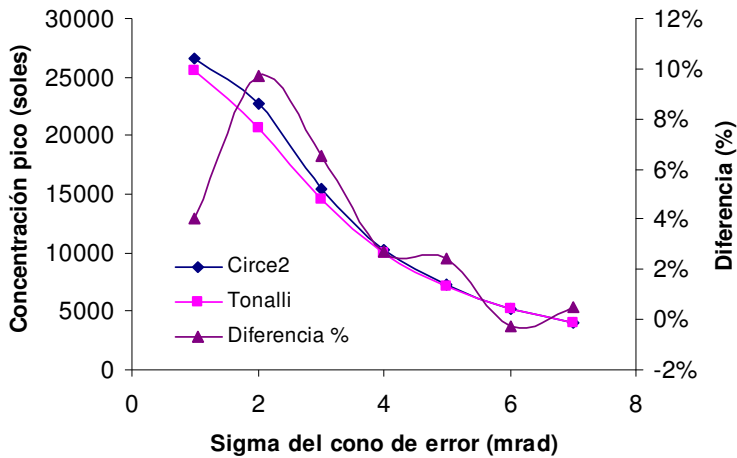


Figura 3.12: Comparación de los resultados de irradiancia, en un plano receptor, para diferentes errores ópticos. Resultados de los programas Circe2 y Tonalli.

Otras pruebas realizadas con concentradores de otros tamaños dan resultados similares. La diferencia porcentual disminuye cuando aumenta el error óptico del concentrador. Esto parece estar relacionado con la manera de subdividir la distribución de errores al hacer la convolución con la irradiancia solar. El mismo programa de Circe2 indica en su documentación, que si el ancho de la distribución de errores es inferior al radio solar, entonces la convolución debe realizarse en forma numérica. Sin embargo no es posible verificar el código de Circe2 por tratarse de un programa ejecutable. En el caso del programa Tonalli si el error óptico es pequeño ($\ll 1$ mrad), es conveniente aumentar el número de subdivisiones del cono solar para realizar la convolución numérica con mejor resolución.

3.3 Validación experimental con DEFRAC

Se realizaron pruebas del modelo matemático con la simulación del concentrador solar DEFRAC. Su sistema óptico cuenta con 18 espejos esféricos de aluminio de primera superficie recubiertos con un depósito de cuarzo. Tienen un diámetro de 30 cm y una reflectividad de 0.92. Los espejos están montados en una estructura hexagonal y a distancia focal equivalente es de 200 cm. El sistema actual cuenta con montura ecuatorial para el seguimiento continuo del Sol sobre un eje (figura 3.8). Las características físicas y ópticas de los espejos se resumen en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Coordenadas y características ópticas de los espejos del DEFRAC

Num.	X (m)	Y (m)	Foco (m)	Radio (m)	Re	Num.	X (m)	Y (m)	Foco (m)	Radio (m)	Re
1	-0.3134	-0.5428	2.098	0.15	0.92	10	-0.4701	0.2714	2.074	0.15	0.92
2	0	-0.5428	2.074	0.15	0.92	11	-0.6268	0	2.098	0.15	0.92
3	0.3134	-0.5428	2.098	0.15	0.92	12	-0.4701	-0.2714	2.074	0.15	0.92
4	0.4701	-0.2714	2.074	0.15	0.92	13	-0.1567	-0.2714	2.025	0.15	0.92
5	0.6268	0	2.098	0.15	0.92	14	0.1567	-0.2714	2.025	0.15	0.92
6	0.4701	0.2714	2.074	0.15	0.92	15	0.3134	0	2.025	0.15	0.92
7	0.3134	0.5428	2.098	0.15	0.92	16	0.1567	0.2714	2.025	0.15	0.92
8	0	0.5428	2.074	0.15	0.92	17	-0.1567	0.2714	2.025	0.15	0.92
9	-0.3134	0.5428	2.098	0.15	0.92	18	-0.3134	0	2.025	0.15	0.92

Para realizar el estudio de la distribución Irradiancia en el receptor, se utilizó un sistema vídeo para la captura de las imágenes. La cámara utilizada fue una cámara CCD marca Cohu-4800. Esta cámara se conectó a una computadora, a través una tarjeta de conversión de señal A/D, suministrada con el programa de cómputo para el análisis de imágenes llamado BEAMCODE (Quiñones, 1998).

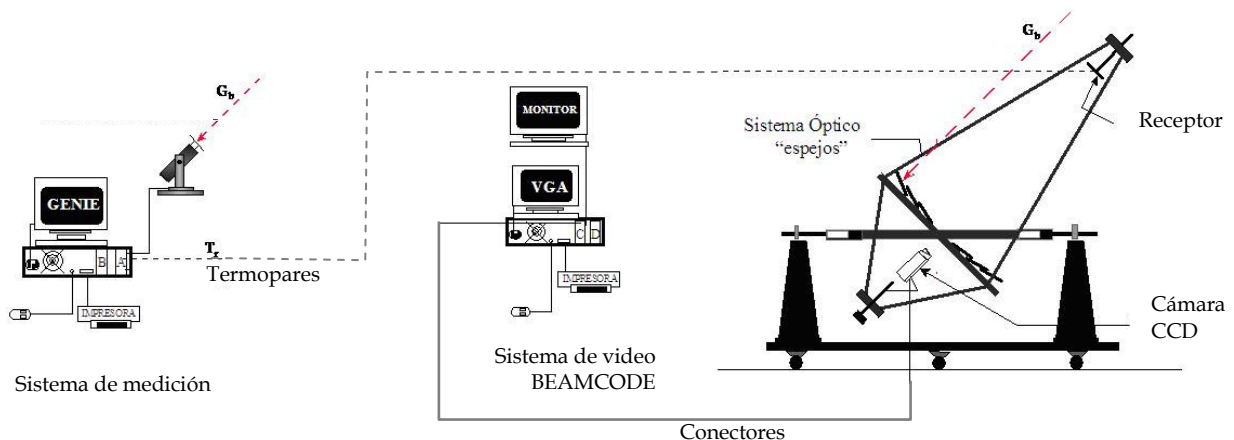


Figura 3.13: Dispositivo experimental para la caracterización óptica del DEFRAC (Quiñones, 1998).

La cámara CCD se montó en un soporte, con dos grados de libertad, en la parte inferior del marco hexagonal de los espejos. A dicha cámara se le implementó una lente con obturados de diafragma y acercamiento de imagen (Zoom óptico) con la finalidad de atenuar la intensidad de la imagen solar y no saturar el sensor de la cámara. Cada píxel, en el sensor, tiene una resolución de intensidad de 8 bits; es decir, tiene valores en unidades arbitrarias de 0 a 255 binario. Así que el obturador se ajustó en cada imagen para que la intensidad estuviera máxima entre 240 y 250. La matriz resultante, de píxeles, de fue normalizada y la curva de irradiancia se obtuvo de multiplicar la matriz nomalizada por un coeficiente que corresponde a la potencia total absorbida en forma calorimétrica. La modelación se realizó para una irradiancia directa de 822 W/m^2 . A continuación se muestra una gráfica de la distribución de energía obtenida con los 18 espejos que conforman al DEFAC.

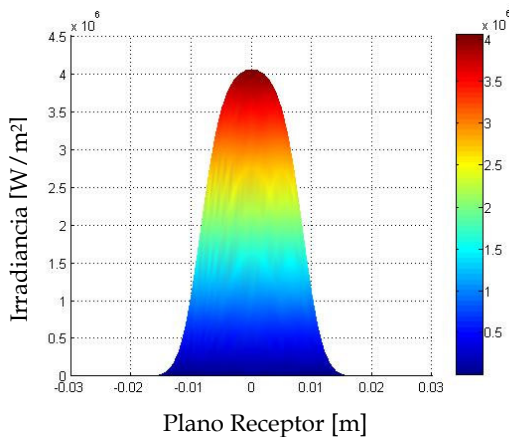


Figura 3.14: Distribución de irradiancia, obtenida con el programa Tonalli, para un plano receptor del concentrador DEFAC.

Esta gráfica es similar a las obtenidas experimentalmente para el concentrador DEFAC, el pico de la distribución (404.8 W/cm^2) difiere en un 4 % respecto al caso experimental. El error global asociado para esta modelación fue de 1.10 mrad que corresponde con el reportado en el estudio de caracterización del DEFAC (Quiñones, 1998). También se realizaron modelaciones para reproducir las curvas de irradiancia de los diferentes grupos de espejos.

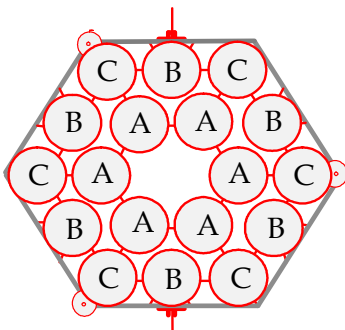


Figura 3.15: Ubicación de los espejos del DEFAC dentro de sus grupos A, B y C.

En la tabla 3.6 se muestran los resultados para los grupos A, B y C y la diferencia porcentual en el pico de irradiancia obtenido. Los errores ópticos reportados fueron ajustados, a partir de reproducir los datos experimentales con el programa Circe2, por lo que las diferencias con el programa Tonalli son las esperadas para este nivel de errores, según se concluyó de la gráfica 3.12.

Tabla 3.6 Comparación de las irradiancias experimentales con las obtenidas del programa Tonalli

Grupo	Error óptico	Irradiancia pico experimental (W/cm ²)	Irradiancia Tonalli (W/cm ²)	Diferencia (%)
A	0.90	158.4	148.8	5.9
B	0.50	147.7	143.3	3.0
C	0.43	137.3	138.5	0.8
A,B,C	1.10	425.0	407.8	4.2

3.4 Validación experimental con HSPSA

Entre las tareas de validación del modelo matemático se realizó la simulación de datos experimentales obtenidos en el horno solar de Almería en España. Esta validación es importante por tratarse de un horno solar de facetas múltiples como el que se esta proyectando para El CIE en Temixco. Su sistema óptico cuenta con 92 facetas de poco más de 1 m² cada una. Y tiene una capacidad efectiva de captación de casi 98.5 m². Los parámetros de la modelación se obtienen directamente de las características físicas del horno, que están reportadas en su documentación y en los informes de la campaña experimental del día 20 de septiembre de 2004 (Monterreal, 2005) (Del Arco, 1991).

Los datos experimentales consisten en las medidas de irradiancia en planos colocados en forma perpendicular al eje focal, mediante un barrido en torno al punto focal (7.435 m), en 17 etapas para completar un intervalo de 30 cm (15 cm antes y después del punto focal). La modelación se realizó con las mediciones tomadas con el atenuador al 100% de apertura, sobre un blanco lambertiano refrigerado de 0.371 m x 0.371 m. Las reflectancias medidas promedio del horno y del heliostato (GM-140) son 93.4% y 92.5% respectivamente. En la figura 3.16 y en la tabla 3.6 se muestra el arreglo experimental y las características de los equipos utilizados para la campaña experimental.

Para realizar la modelación se introdujeron los valores individuales de reflectividad efectiva de las facetas que se obtuvieron del sombreado de los diversos componentes del horno como son: la mesa de experimentación, placas del atenuador, mesa de ensayos y estructuras de soporte.

Dichos sombreadamientos están reportados en la ficha técnica del horno. En la siguiente tabla podrá encontrarse un resumen del sombreadamiento porcentual por faceta.

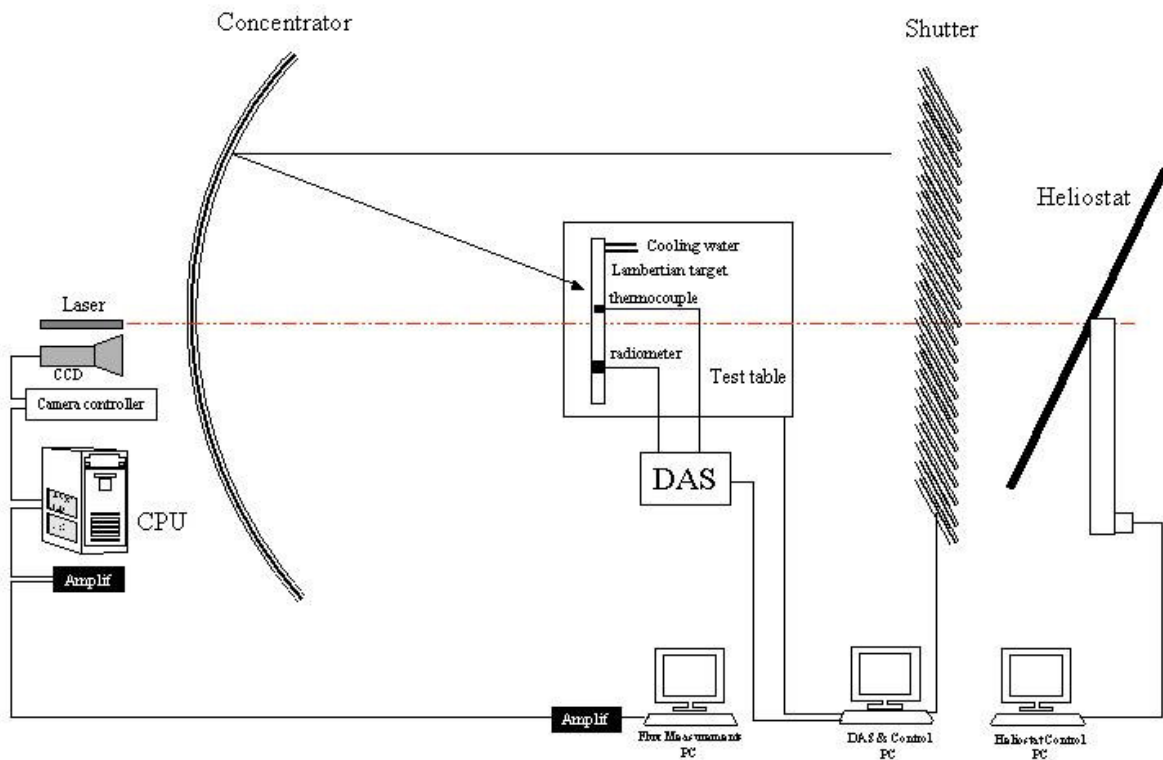


Figura 3.16: Dispositivo experimental para la caracterización óptica del horno de la PSA (Cortesía de Rafael Monterreal).

Tabla 3.7 Descripción de los componentes principales del equipo utilizado para la campaña experimental (Monterreal, 2005)

Equipo	Características
Cámara CCD & Controlador	Cámara refrigerada de modo dual Hamamatsu C4880-21 series Full-frame transfer CCD solid image element Nº efectivo de pixeles: 512 x 512 Tamaño de pixel 24 μm x 24 μm Rango dinámico 1:25.000
Lentes	Zoom óptico 88-200 Número F 4,5 – 22 Filtro B + W de densidad neutral
Blanco Lambertiano refrigerado	Material del sustrato: Aluminio Dimensiones: 580mm x 380mm x 34mm Recubrimiento: Alumina (spray de plasma) Temperatura del agua: 40 $^{\circ}\text{C}$ Flujo de agua: 1.67 m^3/h
Radiómetro	Tipo Gardon, HYCAL n.s. 82754 Rango de medición: 3000 kW/m^2 Constante de calibración: 356523.089 $\text{kWm}^{-2}\text{V}^{-1}$

Tabla 3.8 Resumen del sombreado para cada faceta, debido a los diferentes componentes del sistema

	Mesa XYZ	Lado del plano receptor	Pasillo de acceso	Barandal pasillo de acceso	Placas del atenuador (100%)	Soporte central del atenuador	Tubos de soporte (vert)	Tubos de soporte (horiz)
Espesor (m)	-----	0.371	0.14	0.04	0.028	0.095	0.04	0.04
Área sombreada p/faceta (m ²)	0.7290	0.06882	0.1711	0.04485	0.03422	0.08715	0.03670	0.04889
Porcentaje sombreado p/faceta	65.0%	6.1%	15.26%	4.0%	3.05%	7.8%	3.3%	4.4%

Tabla elaborada a partir de datos reportados en la documentación del horno solar de la PSA (Del Arco et al, 1991)

La reflectividad equivalente, tomando en cuenta el sombreado, se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_{hor} \rho_{hel} (1 - A_{rel})$$

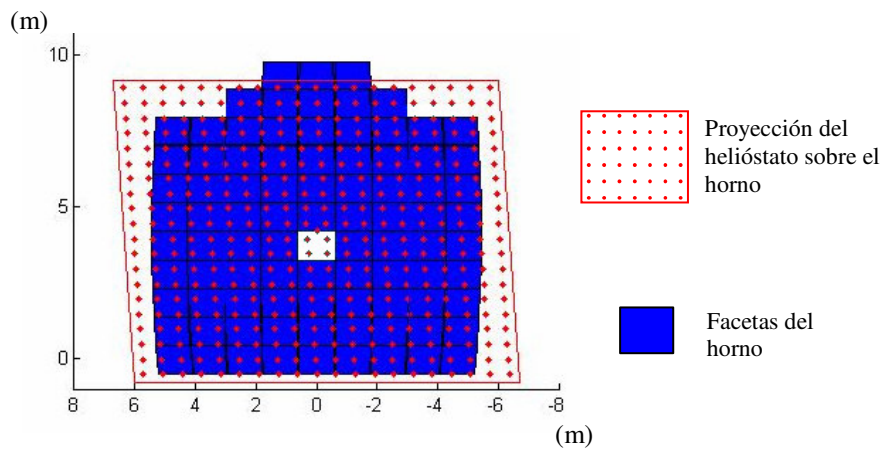
Donde

ρ_{hor} = reflectividad promedio de las facetas del horno

ρ_{hel} = reflectividad promedio del helióstato

A_{rel} = razón de área sombreada de cada faceta

También se tomó en cuenta la proyección del helióstato GM-140 sobre las facetas del horno, para el día y la hora aproximada de la campaña experimental. El helióstato esta formado con facetas de 3.22 (base) x 1.36 (alto) en un arreglo plano de 4 (horizontales) x 8 (verticales). El área total del helióstato es de 140 m² (reporte anual de la PSA 2006). En la imagen se muestra que las facetas superiores del horno no fueron iluminadas durante los ensayos.



Finalmente, se calcularon las reflectividades equivalentes de cada faceta tomando en cuenta los sombreadamientos correspondientes y la proyección del heliostato. Los valores asignados, se reportan en la figura 3.19.

			0.000	0.000	0.000			
		0.8376	0.8376	0.7704	0.8376	0.8376		
0.8376	0.8376	0.8376	0.8376	0.7704	0.8376	0.8376	0.8376	0.8376
0.8376	0.8376	0.8376	0.8376	0.7704	0.8376	0.8376	0.8376	0.8376
0.8112	0.8112	0.8112	0.8112	0.7441	0.8112	0.8112	0.8112	0.8112
0.8376	0.8376	0.8376	0.2088	0.7174	0.8376	0.8376	0.8376	0.8376
0.8376	0.8376	0.8376	0.8376		0.8376	0.8376	0.8376	0.8376
0.8030	0.8030	0.8030	0.8030	0.2088	0.8376	0.8376	0.8376	0.8376
0.7057	0.7057	0.7057	0.6775	0.6009	0.8093	0.8376	0.8376	0.8376
0.8376	0.8376	0.8376	0.8093	0.7328	0.8093	0.8376	0.8376	0.8376
0.8112	0.8112	0.8112	0.8112	0.7441	0.8112	0.8112	0.8112	0.8112

Figura 3.19: Reflectividades de las facetas considerando los sombreadamientos y la proyección del heliostato sobre el horno.

Notas:

- 1) Todas las medidas normalizadas a $DNI = 1kW/m^2$
- 2) La incertidumbre del sistema de medición de irradiancia asociada a la potencia total puede considerarse $< 5\%$.

Primer ensayo

Con los parámetros anteriores, se realizaron varias modelaciones para ajustar el error óptico del sistema hasta que los resultados numéricos, de la potencia total e irradiancia pico, igualaran a los reportados experimentalmente. Una vez realizado el ajuste, la diferencia entre la modelación y los datos experimentales fue de aproximadamente 1.6%, para un error óptico global de 6.6 mrad. Sin embargo al realizar la modelación para planos fuera del foco, las imágenes muestran diferencias significativas. Aun cuando la potencia total y el radio correspondiente a un 90% de la potencia captada, presentan un buen acuerdo entre la modelación y el experimento, la curva experimental muestra que no hay correspondencia con los resultados de la modelación.

Tabla 3.9 Comparación entre la modelo- experimento para un plano en el punto focal y un error óptico global de 6.6 mrad.

	Experimentación PSA	Modelación	Diferencia %
Pico (kW/m ²)	3034	3008	0.8
Potencia total en el plano (kW)	69	70.1	1.6
Radio promedio (90% de captación) (cm)	13.1	13.2	0.8

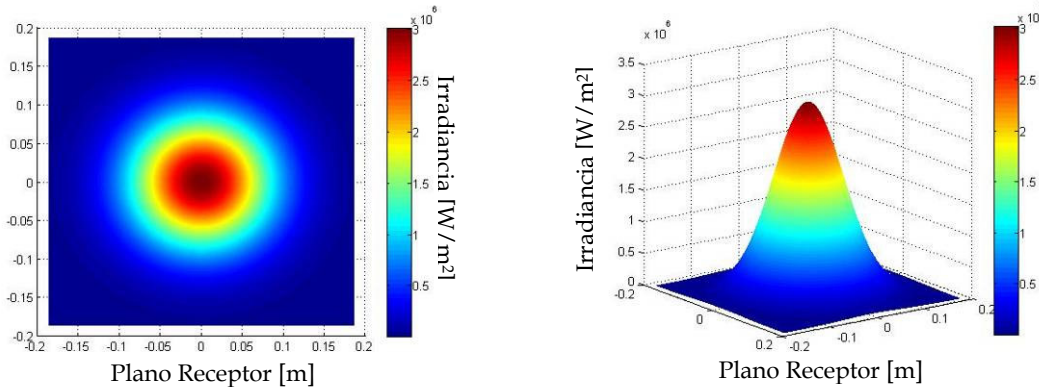


Figura 3.20: Distribución de irradiancia en un planos situado en el punto focal, para un error de 6.6 mrad.

Tabla 3.10 Comparación entre la modelo- experimento para un plano a -15 cm del punto focal y un error óptico global de 6.6 mrad.

	Experimentación PSA	Modelación	Diferencia %
Pico (kW/m ²)	1100	1566	42
Potencia total en el plano (kW)	65	65.9	1.3
Radio promedio (90% de captación) (cm)	16.5	16.8	1.7

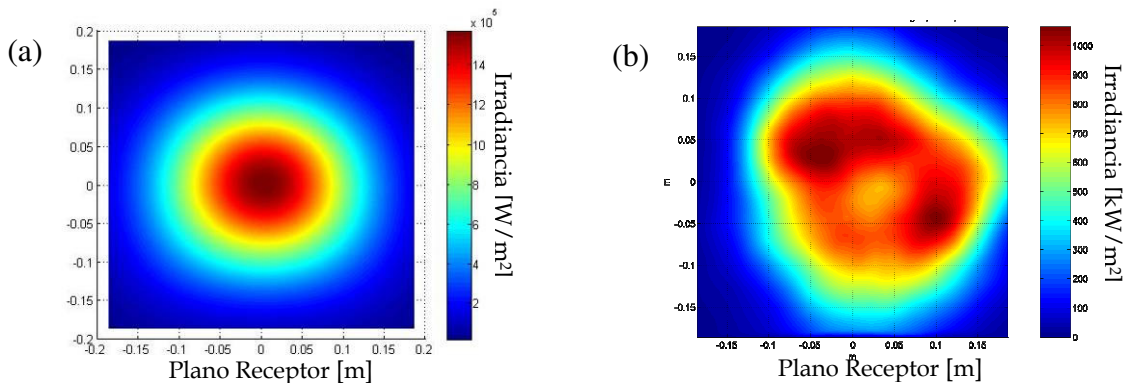


Figura 3.21: Distribuciones de Irradiancia, en planos situados 15 cm antes del punto focal, correspondientes a: (a) la modelación por trazado de rayos, (b) las imágenes obtenidas experimentalmente.

Segundo ensayo

En un principio, se consideró que los sombreamientos podrían ser la causa de las irregularidades en la distribución de irradiancia sobre planos fuera del foco. Sin embargo la figura 3.21 muestra que no es así. Una propuesta que permite simular dicha forma irregular, consiste en que a cada faceta del horno se le asigne un punto de ataque en forma aleatoria alrededor del punto focal. Aunque esta no es la única posibilidad para modelar tales irregularidades, es una prueba que puede implementarse fácilmente con el programa Tonalli.

Las coordenadas de los puntos de ataque corresponden a una distribución normal tanto en el eje vertical como el horizontal (figura 3.22). El valor de la desviación estándar de los puntos de ataque se determinó analizando la forma de la distribución de irradiancia, tanto en planos sobre el punto focal como a 15 cm de este. Si la desviación estándar es mayor a 6 cm, la irradiancia en el punto focal presenta irregularidades que no son compatibles con las imágenes experimentales; por otro lado, si la desviación estándar es inferior a 3.5 cm, la distribución en el plano a 15 cm del foco presenta pocas irregularidades y en el planos focal el pico de irradiancia es demasiado alto para ser compatible con el reportado experimentalmente. Después de diversas modelaciones, la desviación estándar se fijó en 4.5 cm, mientras que el error óptico global fue de 4 mrad. Cabe mencionar que la reflectividad promedio del horno y del heliostato, utilizada para la modelación, es ligeramente inferior a las obtenidas experimentalmente, asignándose un mismo valor de 0.915 para el horno y el heliostato (2% menor al promedio de las mediciones). En la tabla 3.11 se muestran los resultados de algunas modelaciones a manera de ejemplo. Con estos parámetros, la diferencia entre la modelación y los datos experimentales es igual o inferior a 3.6 %.

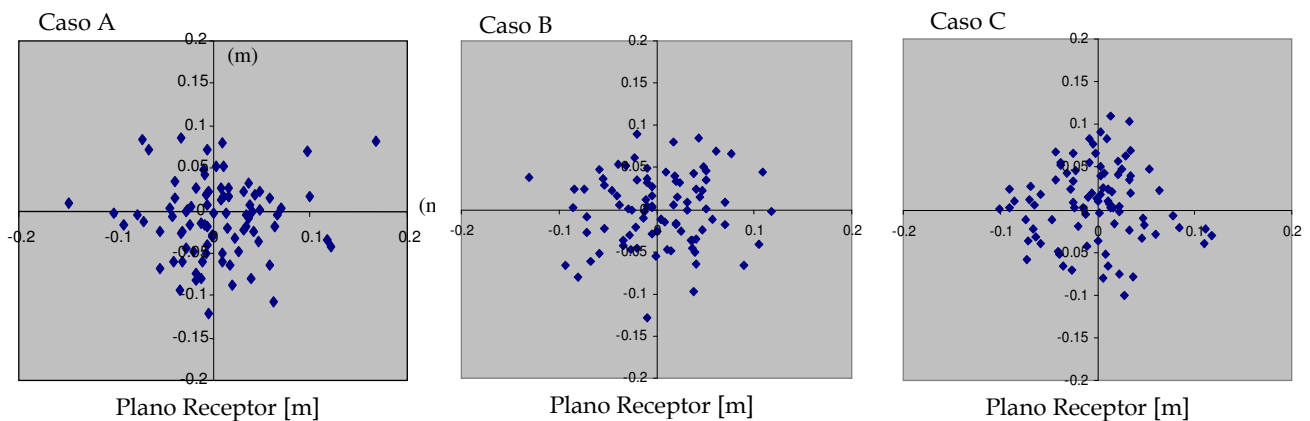


Figura 3.22: Tres casos de distribución de los puntos de ataque de las facetas, alrededor del punto focal ubicado en el origen de la figura.

Tabla 3.11 Posición del plano receptor = 7.285 m (-15 cm desde el punto focal)

	Experimentación	Modelación 1	Modelación 2	Modelación 3	Diferencia máxima %
Pico (kW/m ²)	1100	1352	1458	1421	32
Potencia total en el plano (kW)	65.8	65.0	66.1	66.4	1.2
Radio promedio (90% de captación) (cm)	17.1	16.5	17.0	17.2	3.6

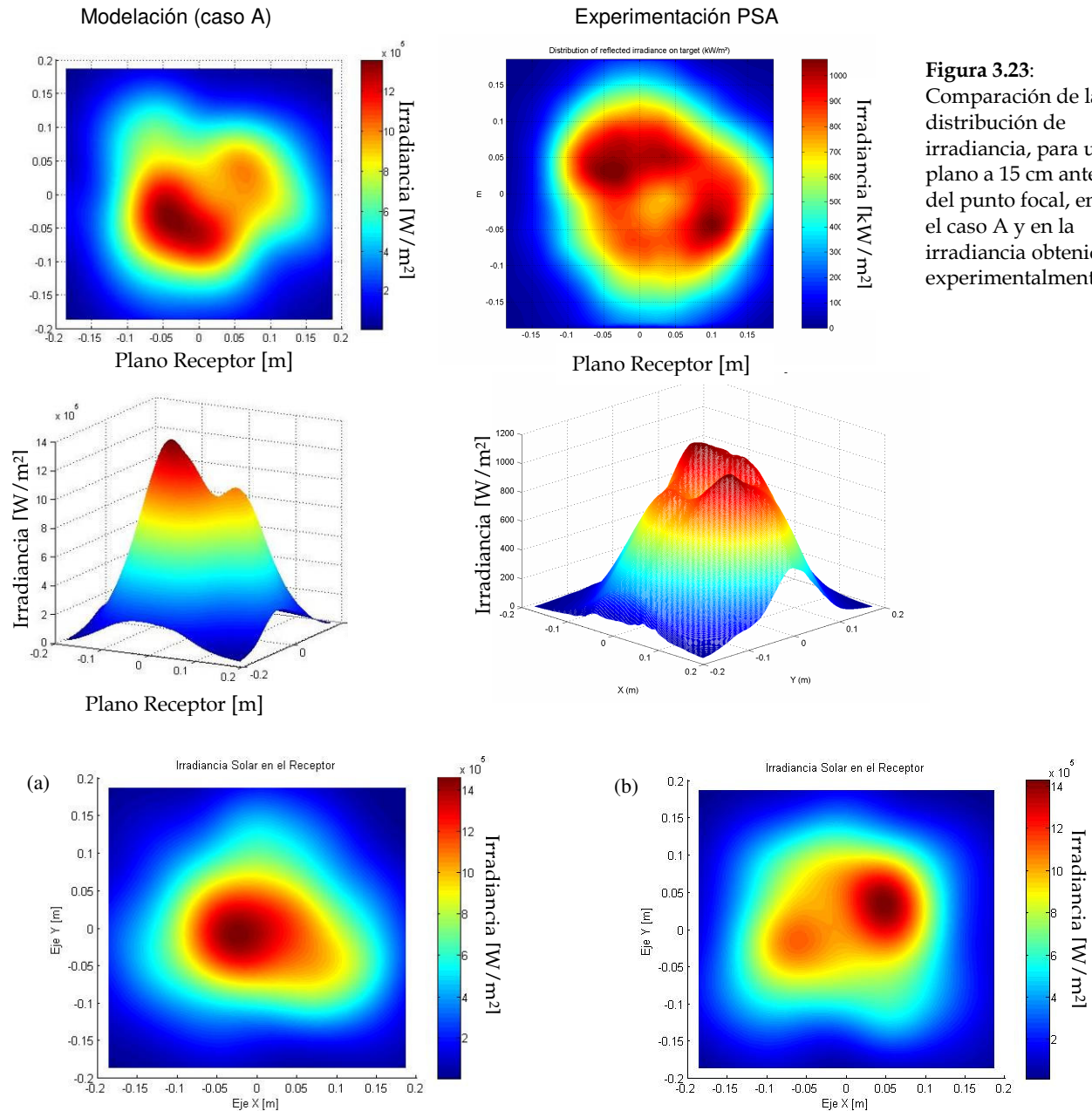


Figura 3.23: Comparación de la distribución de irradiancia, para un plano a 15 cm antes del punto focal, en el caso A y en la irradiancia obtenida experimentalmente.

Figura 3.24: Distribución de irradiancia, para un plano a 15 cm antes del punto focal. (a) caso B . (b) caso C.

Cabe señalar que la diferencia en los picos de irradiancia para el plano a 15 cm del foco no debe tomarse en cuenta pues la forma de las irregularidades esta muy relacionada con la posición aleatoria de los puntos de ataque. Estos mismos parámetros reproducen adecuadamente la irradiancia del plano ubicado en el punto focal, en ese caso la diferencia con los datos experimentales es inferior al 3% para el calculo del radio promedio de la mancha solar (considerando el 90% de captación), para el pico de irradiancia y para la potencia total captada por el plano y (tabla 3.12) (figura 3.25).

Tabla 3.12 Posición del plano receptor = 7.435 m (plano sobre el punto focal)

	Experimentación	Modelación	Diferencia %
Pico (kW/m ²)	3034	3084	1.6
Potencia total en el plano (kW)	69	69.9	1.3
Radio promedio (90% de captación) (cm)	13.1	13.4	2.3

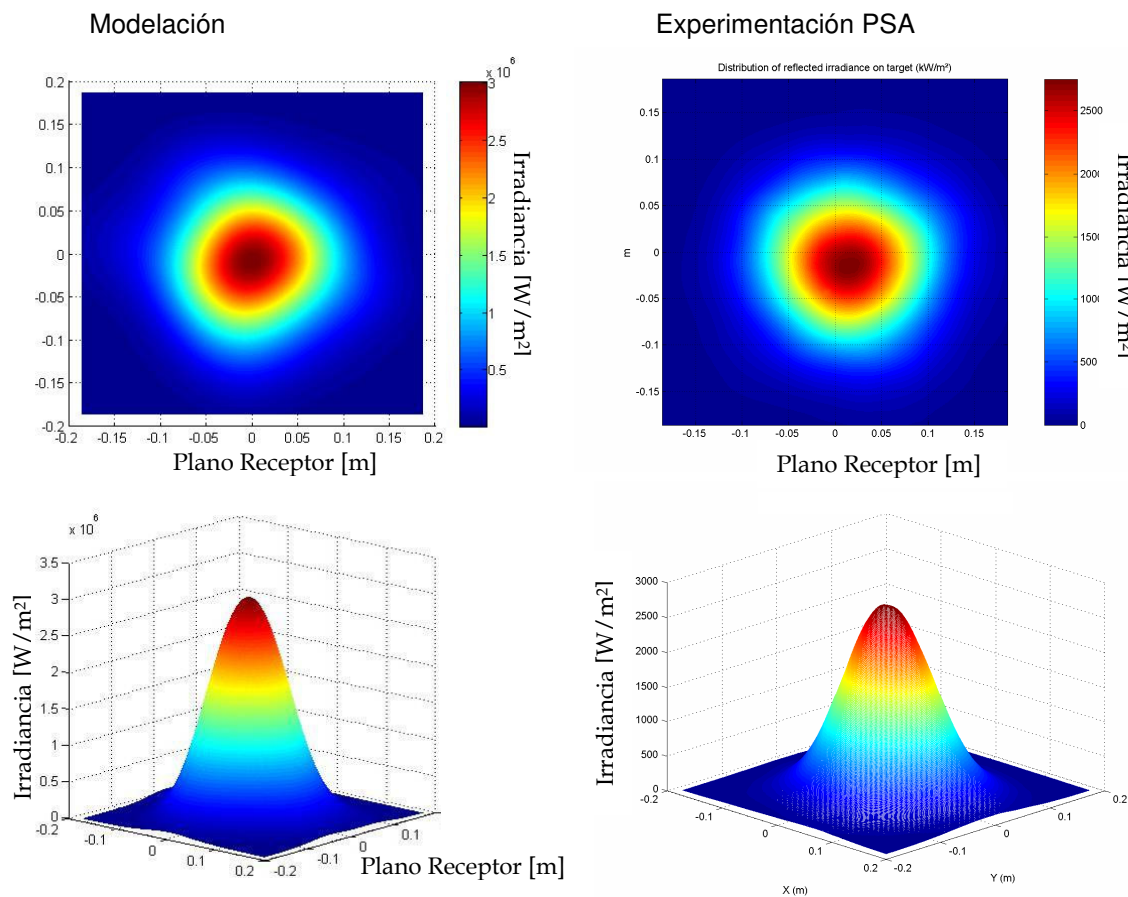


Figura 3.25: Comparación de la distribución de irradiancia, para un plano en el punto focal, en el caso A y en la irradiancia obtenida experimentalmente.

Finalmente se realizó una modelación reduciendo a cero la dispersión de los puntos de ataque y se encontró que para un planos en el punto focal la irradiancia pico es de 6400 soles, mientras que el radio que incluye al 90 % de la potencia captada es de 9.7 cm. Sin embargo, en caso de verificarse la dispersión de los puntos de ataque, aun se debe determinarse si es un problema de alineación de las facetas del helióstato, del horno o de ambos.

Capítulo 4

Estudios paramétrico

...

¿O tesoro repleto de un sueño inaprensible
que tal vez algún día
se nos pose en las manos?
¡Gajo de luz tan blanco, tan de oro
una nueva presencia cada día,
no te quiero perder pues eres todavía
la tabla de luz viva
que aleja mi naufragio!

Ernestina de Champourcin
(Poema, fragmento)

4.1 Distancia focal del canteo y número de facetas

La distancia focal óptica en sistemas de concentración solar está bien caracterizada para geometrías simples como es el caso de los platos parabólicos. Sin embargo, en concentradores facetados con espejos de curvatura esférica, no se ha estudiado la influencia del tamaño de las facetas en el factor de concentración. Dado que el horno solar propuesto para el CIE, estaría constituido por un sistema de facetas, se consideró pertinente realizar esta caracterización.

Se probaron diferentes geometrías en los espejos del horno solar y se calculó el área efectiva de reflexión que ofrece el horno en cada caso. En la siguiente figura se muestra la configuración del horno solar obtenida para el caso de facetas hexagonales, cuadradas y circulares. El número debajo de cada figura representa el área efectiva que se obtiene para cada configuración. Con esto podemos observar que las facetas cuadradas presentan una mejor ocupación del espacio por lo que el área efectiva es mayor que en el caso hexagonal o el caso circular.

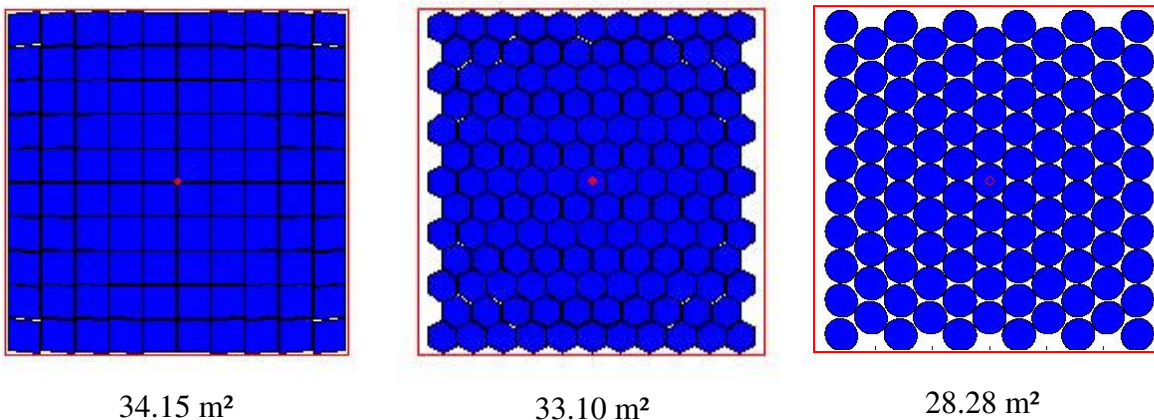


Figura 4.1: Área efectiva cubierta por facetas de diferentes formas.

A pesar de que las facetas rectangulares aprovechan mejor el espacio cuando se tiene que cubrir una ventana cuadrangular, la fabricación de las esquinas se dificulta en el momento de dar la curvatura a los espejos y al pulir la superficie, dando lugar a un efecto de deformación respecto a la curvatura ideal. Por esto se ha optado por facetas hexagonales.

Tampoco es muy factible poner las facetas sobre un mismo plano pues esto conlleva a dos problemas: el primero que los espejos se bloquean unos a otros, y el segundo que las distancias focales aumentan produciendo una reducción en el factor de concentración del sistema. Para evitar este bloqueo sería necesario aumentar el espacio entre facetas, lo que reduce el área efectiva del concentrador (ver figura 2.16, pag.46). En el presente trabajo se consideran canteos parabólico y esférico.

El estudio de este capítulo, se realizó para un sistema óptico de forma cuadrangular de 6 m de lado y con diversos números de facetas. Por motivos de generalidad en el estudio, cada espejo, por la ocupación de área, es de forma cuadrada y su perfil es parabólico de revolución. La distancia focal de cada faceta es igual a la distancia entre su vértice y el punto focal del sistema. Los vértices de cada faceta son ubicados de acuerdo a una estructura de canteo parabólico. La separación entre facetas en el plano XY es 0, sin embargo cuando cada faceta toma su posición en el canteo, estas quedan ligeramente separadas por la inclinación que se les asigna. El modelo solar utilizado corresponde al Sol estándar cuyo cono solar tiene un radio aproximado de 4.6 mrad.

Lado del sistema (D)	6 m
Forma de facetas:	Cuadrada
Perfil de facetas:	Parabólico de revolución
Tipo de canteo:	Parabólico de revolución
Distancia focal de facetas:	Ajustado a su distancia con el foco del sistema
Distancia focal del sistema (F)	2.4 a 6 m (F/D =0.4 a 1.0)
Receptor	Plano
Porcentaje de captación (receptor)	90%

En la figura 4.2, se muestra la irradiancia promedio sobre un receptor cuyo tamaño es ajustado para captar el 90% de la radiación total reflejada. Para cada número de espejos se varía la distancia focal, con el fin de encontrar la relación F/D óptima, según el número de facetas. En esta gráfica no se considera ningún error óptico del espejo y muestra que el factor de concentración aumenta a un mayor número de facetas. Lo anterior es de esperarse pues un mayor número de facetas implica un mayor acercamiento a un paraboloide continuo e ideal.

Por otro lado la distancia focal óptima aumenta conforme el número de facetas disminuye. Por ejemplo para un concentrador de 144 facetas (12 facetas de cada lado), la distancia focal óptima se encuentra a 0.8 veces el diámetro (F/D = 0.8), mientras que para un concentrador ideal la relación F/D óptima es de 0.52 (para una captación de 90%).

Sería de esperarse que si el tamaño de facetas continuara reduciéndose en algún momento el área efectiva del horno sería afectada por los espacios en los intersticios, Sin embargo para los tamaños considerados en las modelaciones, este efecto es despreciable. Los tamaños de las facetas asociados a la modelación se encuentran reportados en la tabla 4.1. El área efectiva corresponde a una distancia focal de 4.6 m. Debe tomarse en cuenta que el área efectiva cambia según sea la distancia focal seleccionada. En la tabla puede observarse que la diferencia numérica en el área efectiva del horno, para los casos de 400 y 900 facetas, es inferior al 0.1%.

Este error es inferior al que posiblemente pueda obtenerse directamente de la medición experimental del área de las facetas y su proyección efectiva por el ángulo de inclinación asignado.

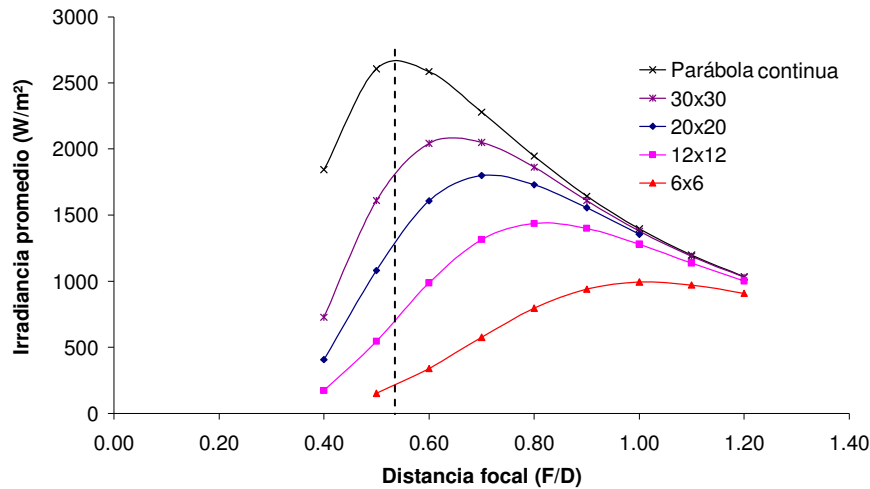


Figura 4.2. Curvas de irradiancia promedio para los diferentes niveles de facetas (Error óptico = 0 mrad).

En los gráficos de la figura 4.3 muestran resultados similares a la figura anterior para errores ópticos promedio de 2 y 3 mrad respectivamente. Al observar las tres gráficas, en las figuras 4.2 y 4.3, se observa que la distancia focal óptima depende del error óptico de los espejos. En la línea punteada que se colocó en los máximos correspondientes al concentrador de 20x20 facetas, puede observarse que la distancia focal óptima disminuye conforme aumenta el error óptico global del concentrador.

Tabla 4.1: Tamaño de las facetas y área efectiva del horno para sistemas ópticos con diferentes números de facetas.

Número de facetas	Tamaño de las facetas	Área efectiva del horno
6x6 = 36	1 x 1 m ²	34.178 m ²
12x12 = 144	0.5 x 0.5 m ²	34.146 m ²
20x20 = 400	0.3 x 0.3 m ²	34.139 m ²
30x30 = 900	0.2 x 0.2 m ²	34.137 m ²

Por otro lado, para el caso de 20x02, si se estima que el error óptico del horno pudiera situarse entre 2 y 3 mrad, significa que la distancia focal óptima estará alrededor de una relación F/D de 0.6. Esto da mayor importancia a la necesidad de una estimación de los errores que serán introducidos por los diferentes parámetros de ajuste del horno. Pues el nivel de errores define

parámetros que no pueden ser modificados una vez terminada la construcción del horno. Además del error óptico de las facetas, es necesario estimar los errores introducidos por el alineamiento de facetas en la estructura del horno y del heliostato, así como errores en la planitud de las facetas del heliostato.

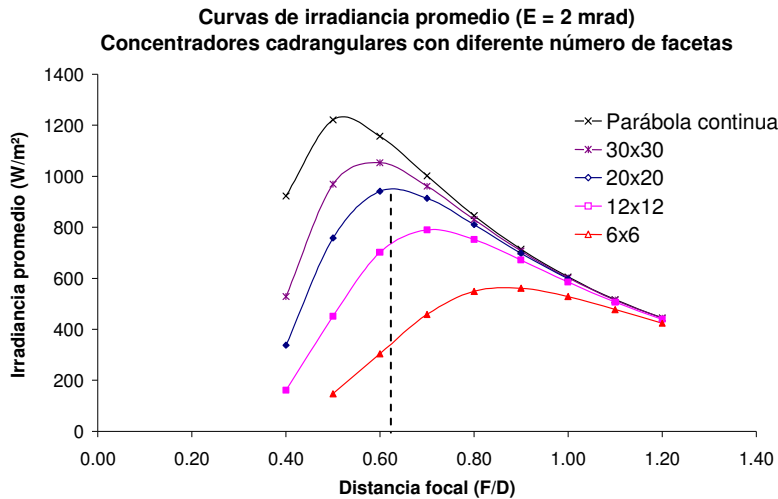
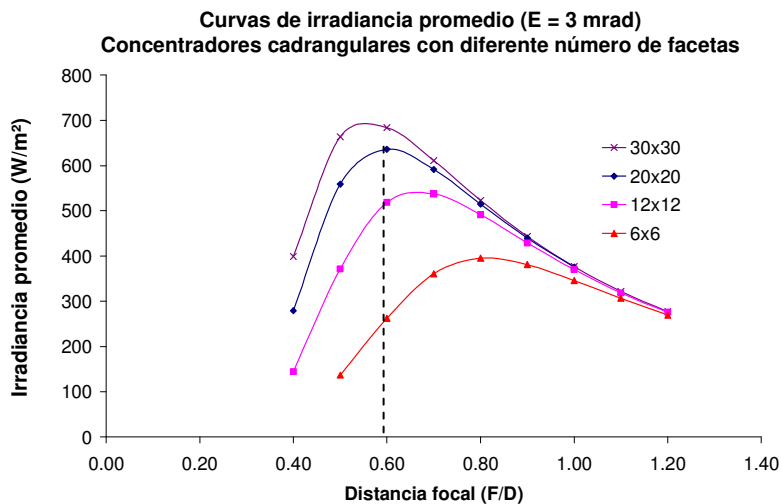


Figura 4.3. Dependencia de la irradiancia promedio con el número de facetas y la distancia focal para errores ópticos globales de 2 y 3 mrad.



En la concentración pico y la distancia focal óptima, puede observarse una dependencia similar con el número de facetas (figura 4.4). También se observa que la distancia focal, para una concentración pico óptima, varía con el error óptico promedio en los espejos. En el caso de concentradores parabólicos continuos no parece haber una distancia focal óptima; en pruebas realizadas, con planos receptores sin considerar sombreamientos, se observa que la concentración pico aumenta conforme la distancia focal es cada vez más próxima al vértice del espejo. Pero en los concentradores de facetas, lo anterior deja de ser cierto, por lo que la distancia focal óptima dependen tanto del número de facetas como del error óptico global asociado.

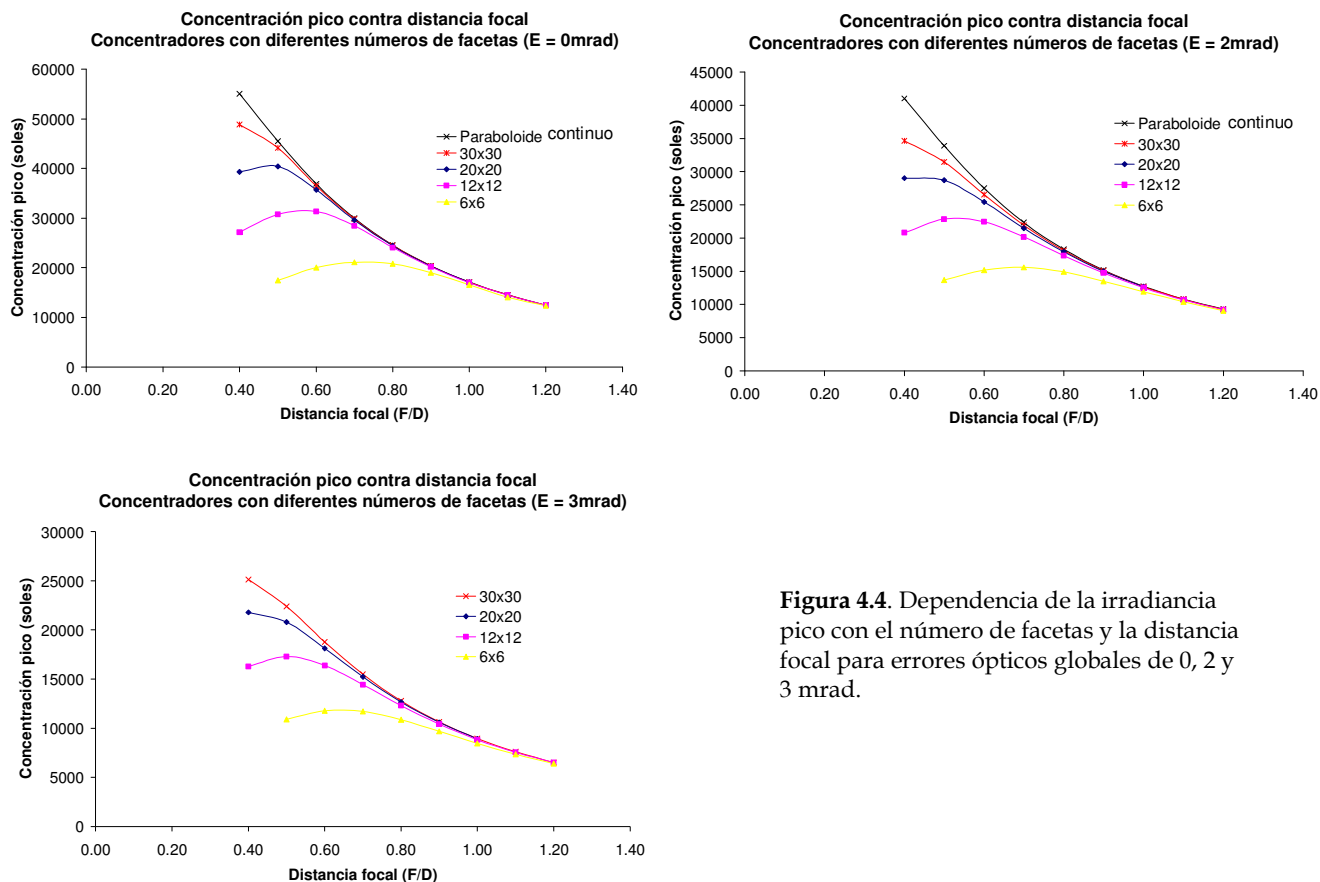


Figura 4.4. Dependencia de la irradiancia pico con el número de facetas y la distancia focal para errores ópticos globales de 0, 2 y 3 mrad.

Un aspecto a considerar, en la elección del tamaño de facetas, es la capacidad de los dispositivos de construcción para el pulido y el depósito de aluminio. Los actuales centros de investigación consultados, que tienen capacidad para realizar los espejos con la calidad óptica necesaria, están limitados a un tamaño máximo de facetas de 40 cm de diámetro. Esta condición impone un límite inferior al número de facetas que serán utilizadas. Esto concuerda con los resultados anteriores sugieren que el mayor número de facetas posibles es lo más adecuado para obtener un mejor factor de concentración. Sin embargo, aun cuando es posible hacer facetas más pequeñas, no podemos dejar de lado que un número excesivo de facetas podría ser poco manejable al tener que aplicar metodologías para su alineación. Por otro lado, deben considerarse los costos asociados a la construcción del horno; si estos fueran demasiado altos, podría resultar más económico buscar construir el horno por segmentos de un paraboloide ideal.

4.2 Distancia focal de facetas

La tolerancia en la distancia focal es un parámetro importante a ser determinado pues cambios en la distancia focal pueden afectar el desempeño esperado para el horno. En la siguiente gráfica se muestra la variación de la irradiancia pico con errores en la distancia focal del sistema. La geometría considerada en este caso es de un concentrador de 15x15 facetas, cada una de 40 cm por lado. La distancia focal fue de 4.6 m, la reflectividad de los espejos fue de 1.0 y el error óptico global en los espejos es de 4 mrad. La irradiancia solar directa se consideró de 1000 W/m².

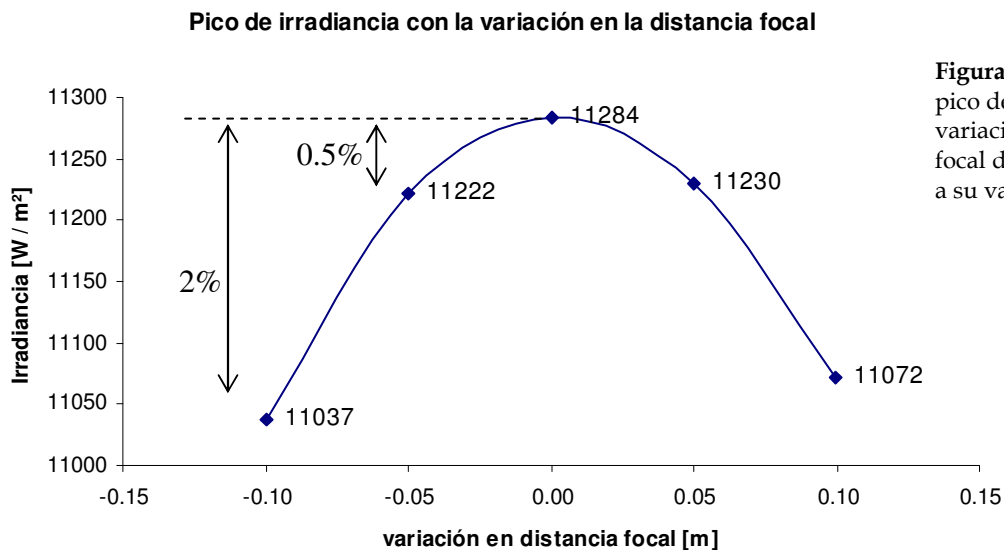


Figura 4.5. Dependencia del pico de irradiancia con la variación de la distancia focal de las facetas respecto a su valor óptimo.

Los errores, en distancia focal, fueron aplicados de manera uniforme a todos los espejos en el entendido que este sería el peor caso que podría presentarse en la variación de las distancias focales. En el gráfico puede observarse que para errores de hasta 10 cm alrededor de la distancia focal óptima, el cambio en la irradiancia pico es inferior al 2% y si el error es de 5 cm la variación de la irradiancia es inferior al 0.5%. Esto indica que para propósitos de la concentración esperada, ésta no será afectada significativamente para errores aleatorios en la distancia focal inferiores a 5 cm y una distancia focal del sistema de 4.6 m.

Por otra parte, en condiciones ideales, se considera que cada faceta tiene una distancia focal determinada por la distancia del punto focal del sistema al centro geométrico de la faceta. Aunque esta condición fue implementada de manera ideal para los cálculos realizados en la sección anterior, en la práctica resulta más conveniente agrupar a los espejos para reducir el número de distancias focales a fabricar. Por este motivo, se realizó el cálculo de la irradiancia a fin de comparar el desempeño de la situación ideal con la situación en que se utilizan grupos de espejos. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente las distancias focales para cada una de las facetas de un horno de 15x15 facetas. Por otro lado, los grupos de colores representan la

propuesta para agrupar a los espejos. El total de distancias focales distintas en este horno son 57 y se reduce a 6 en la propuesta de agrupamiento.

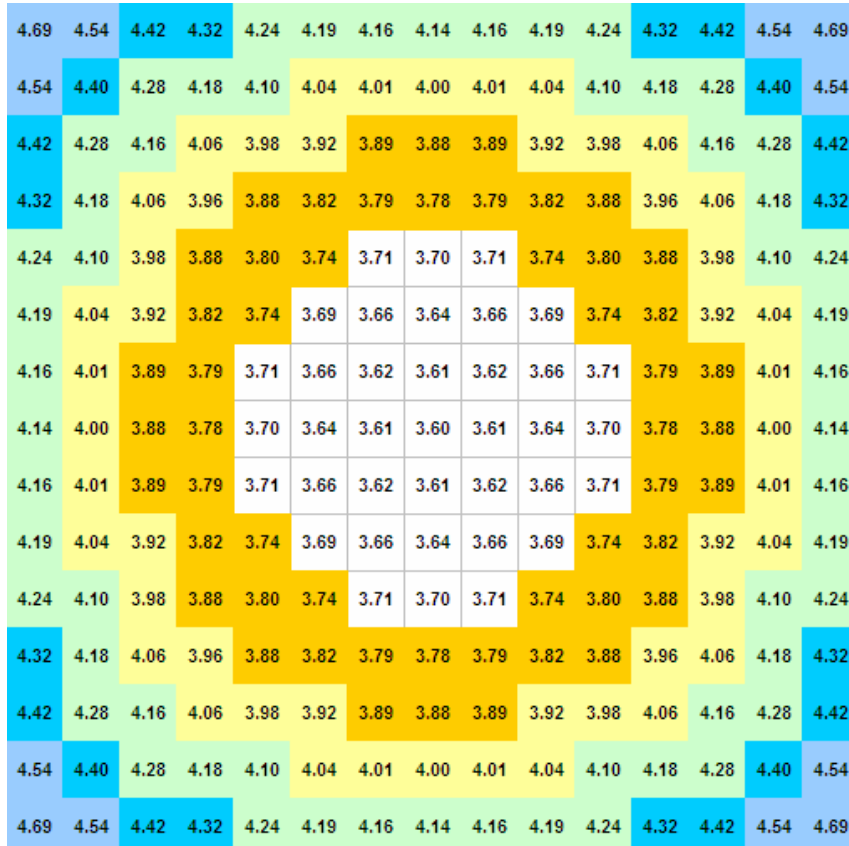


Figura 4.6: Esquema con las distancias focales óptimas para cada faceta de acuerdo a su posición en el sistema óptico.

Los espejos fueron agrupados en 6 conjuntos que se indican mediante los colores en la figura. Las distancias focales para cada grupo de espejos son las siguientes.

- A = 3.61; 36 espejos
- B = 3.82; 52 espejos
- C = 3.99; 48 espejos
- D = 4.17; 56 espejos
- E = 4.35; 20 espejos
- F = 4.61; 12 espejos

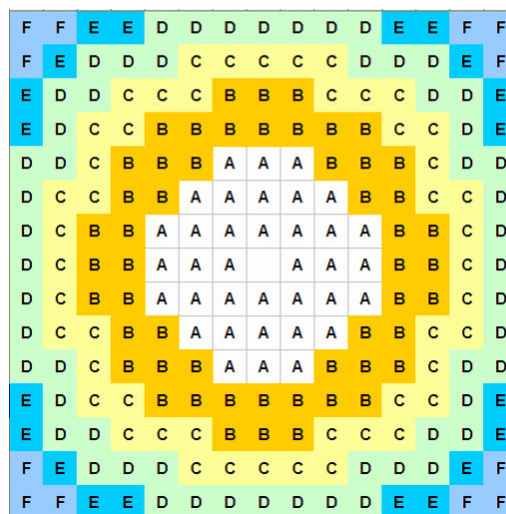


Figura 4.7: Esquema con la ubicación de los diferentes grupos de facetas.

Se hizo la simulación tanto para el caso de 57 distancias focales como de 6. La diferencia en la irradiancia pico que se obtiene para los dos casos estudiados no es significativa. Y la variación es inferior al 0.5%. Sin embargo no resulta conveniente reducir las distancias focales a un grupo único pues en este caso la variación en la irradiancia puede disminuir aproximadamente 10% (figura 4.8) para una distancia focal de 3.82 m. En estudios realizados para hornos solares, el uso de una distancia focal única puede reducir hasta un 30% en factor de concentración esperado (Neumann, 1996). También se estudió el efecto de diferentes distancias focales únicas dada una distancia focal de canteo de 3.6 m. En la figura 4.9 puede observarse que la distancia focal de facetas óptima para la irradiancia promedio no coincide con la requerida para la irradiancia pico. Debemos recordar que para distancias focales más pequeñas la irradiancia pico aumenta aun cuando la irradiancia promedio disminuye. Sin embargo, en cualquier caso el uso de una misma distancia focal siempre ocasionará reducciones en los factores de concentración esperados (figura 4.9).

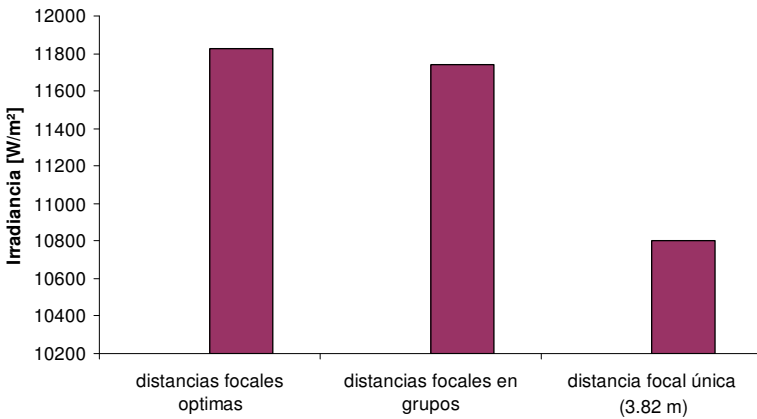


Figura 4.8: Gráfica de la irradiancia pico para diferentes configuraciones de distancias focales.

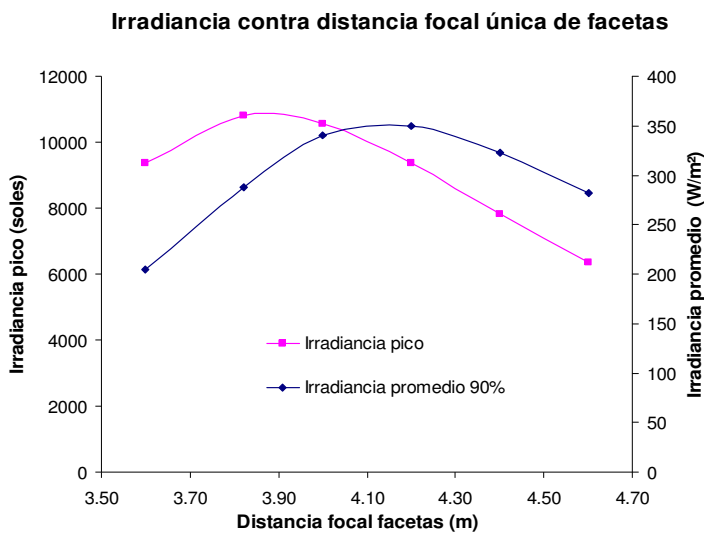


Figura 4.9: Gráfica de la irradiancia pico y promedio para diferentes distancias focales únicas.

4.3 Determinación de iso-superficies en el horno solar

Las tecnologías de concentración solar son convenientes para la generación de potencia debido a la alta temperatura que alcanzan por la gran densidad de radiación solar. La durabilidad de componentes claves, como los receptores solares, esta relacionada con el costo final de la energía que se obtiene de este tipo de plantas de generación. Una idea para mejorar la durabilidad de receptores es de reducir los picos de irradiancia y obtener en el receptor un flujo radiativo homogéneo o casi homogéneo [Romero, et al. 2002]. Esto disminuiría la tensión térmica causada por altos gradientes de temperaturas, así como los posibles daños y mejoraría su durabilidad. Un punto de partida para reducir picos de flujo puede ser la determinación de una superficie en la zona focal donde la densidad de radiación sea homogénea (iso-superficie). La distribución de energía solar en la región focal depende completamente del diseño del concentrador óptico.

Para obtener iso-superficies de irradiancia en un concentrador solar de foco puntual se propuso una metodología y, a partir de la cual, se elaboró la rutina “**isosuperf.m**”. El programa trabaja con los resultados de la distribución de energía obtenidos sobre receptores planos colocados de manera próxima a la región focal de un concentrador de foco puntual.

Como primer paso, la concentración de irradiancia se calcula sobre un plano perpendicular al eje óptico del concentrador y colocado en su punto focal. Posteriormente se realiza el mismo cálculo en diferentes planos posicionados en lugares cada vez más lejana al foco del concentrador (figura 4.10).

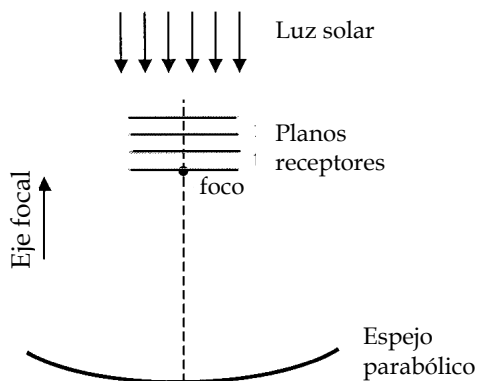


Figura 4.10: Esquema de la disposición de un concentrador y de los planos sobre los cuales se calcula la distribución de irradiancia.

Este procedimiento nos da un conjunto de planos donde se conocen las distribuciones de irradiancia. Por lo tanto, es posible calcular, por interpolación, todos aquellos puntos que

corresponden a un mismo nivel de irradiancia y generan una superficie como la mostrada en la figura 4.11, y que le hemos llamado protosuperficie.

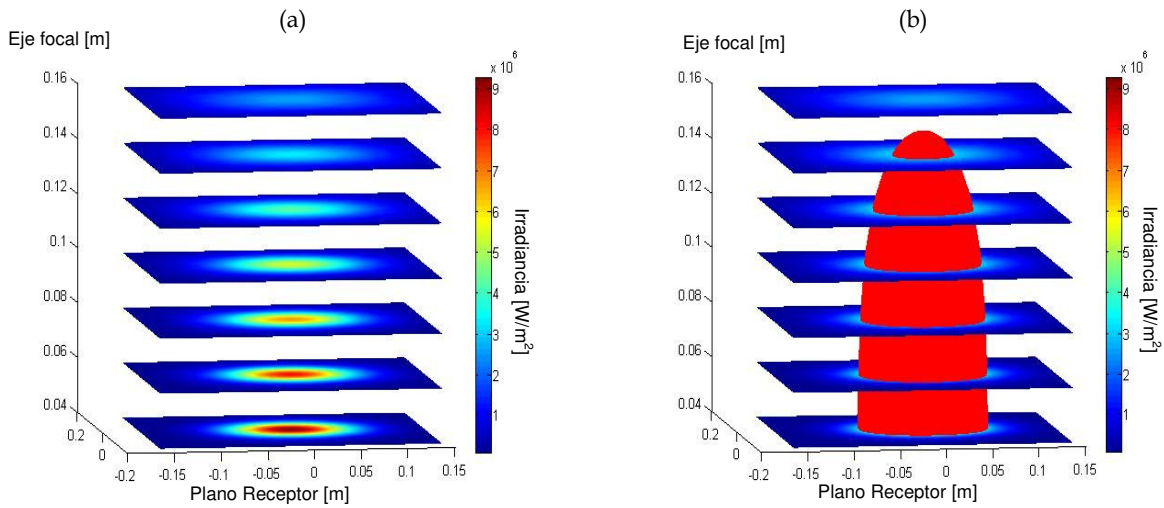


Figura 4.11. (a) Planos de irradiancia alrededor del punto focal. (b) Interpolación para obtener una superficie con puntos de igual irradiancia entre planos (protosuperficie).

Sin embargo, la protosuperficie no puede ser considerada una iso-superficie pues si se colocara una cavidad receptora de esta forma en la zona focal, los puntos cuya tangente no corresponde a un plano horizontal (que son casi todos) tendrían valores de irradiancia muy diferentes al esperado (figura 4.12). Por esto es necesario obtener superficies de irradiancia homogénea para conjuntos de planos con diferentes inclinaciones respecto al eje focal y también con diferentes orientaciones.

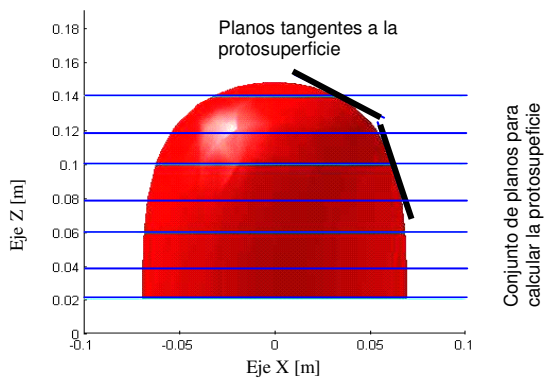


Figura 4.12: Diferencia entre los planos tangentes a una protosuperficie y los planos paralelos con que se calculó la protosuperficie.

Por lo anterior, como un segundo paso, se considera una dirección diferente en los planos para calcular la distribución de irradiancia. Para ello, se realizan los cálculos con conjuntos de planos que están inclinados respecto al eje focal del concentrador. Nuevamente, partimos de un plano en el punto focal y después se realiza el mismo cálculo para planos cada vez más alejados (figura

4.13a). De esta forma podemos generar una segunda protosuperficie como la que se muestra en la figura 4.13b. El procedimiento de interpolación puede aplicarse a los diferentes conjuntos de planos con diferentes inclinaciones y obtener, para cada uno, una protosuperficie.

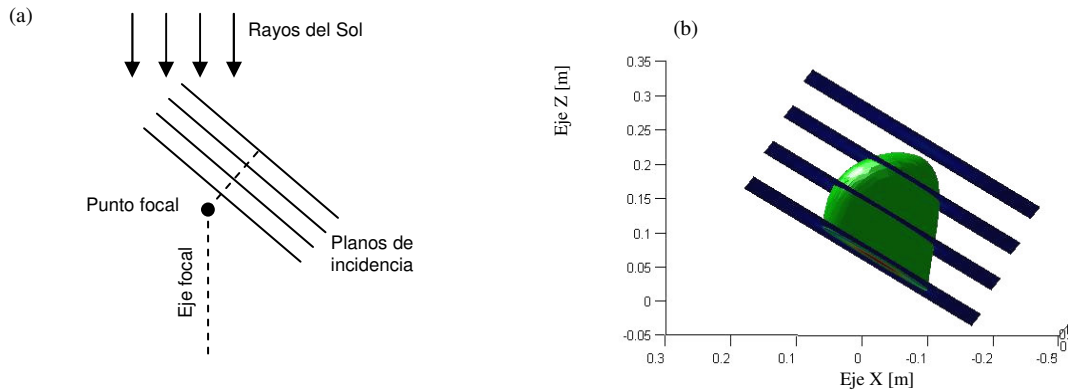


Figura 4.13: (a) disposición de los planos inclinados sobre los cuales se calcula la distribución de irradiancia. (b) Conjunto de planos con las distribuciones de irradiancia y una protosuperficie.

Si realizamos una superposición de todas las protosuperficies calculadas de los conjuntos de planos, para una irradiancia dada a diferentes inclinaciones; obtendremos una región volumétrica cuya superficie envolvente contiene puntos con el mismo nivel de irradiancia (figura 4.14a) de las protosuperficies originales. La ventaja es que la orientación de los planos tangenciales a esta superficie, se aproxima mejor a la orientación de los planos que dieron lugar a la protosuperficie correspondiente (figura 4.14). Llamaremos a esta superficie próxima al eje focal, una iso-superficie. En el caso de un espejo parabólico, y debido a su simetría axial, es suficiente calcular el conjunto de protosuperficies de una dirección azimutal. La figura 4.14(b) muestra la superposición de todas las protosuperficies así calculadas.

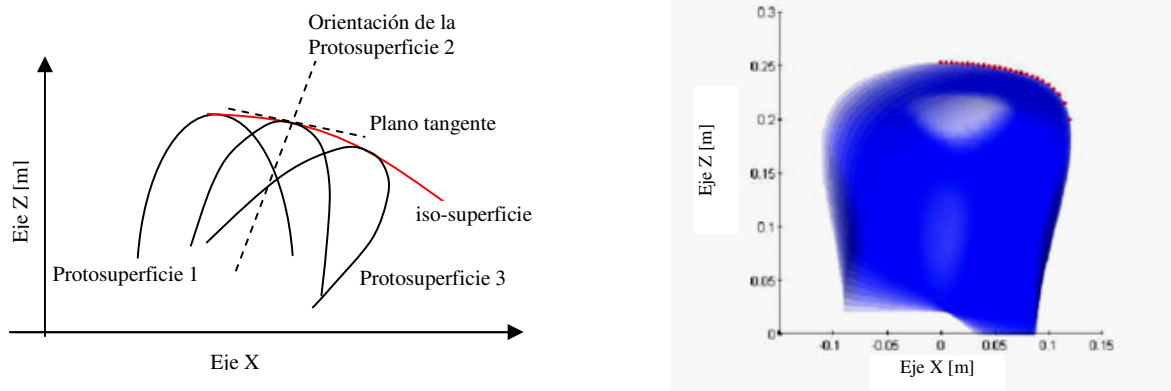


Figura 4.14: (a) Vista esquemática de la superposición de protosuperficies para generar un iso-superficie. (b) Superposición de protosuperficies a lo largo del eje X, los puntos en rojo corresponden a la iso-superficie.

El tercer paso consiste en la obtención de una muestra de puntos que están sobre la iso-superficie de irradiancia. Para hacer esto, se determinaron los puntos pertenecientes a la región volumétrica más lejanos al plano focal, asumiendo que aquellos puntos pertenecen a la iso-superficie. La figura 4.15 muestra algunos de aquellos puntos en color rojo.

Cuando se está calculando el caso de un concentrador de simetría axial, basta con obtener un conjunto de puntos como el de la figura 4.14 y rotarlos para obtener la forma de la iso-superficie. Pero en general, será necesario obtener las protosuperficies de irradiancia para diferentes direcciones azimutales respecto al eje focal. El conjunto de puntos sobre la envolvente corresponderán a la isosuperficie de irradiancia. En la figura 4.15 se muestra la isosuperficie obtenida para un concentrador de facetas múltiples de forma cuadrangular.

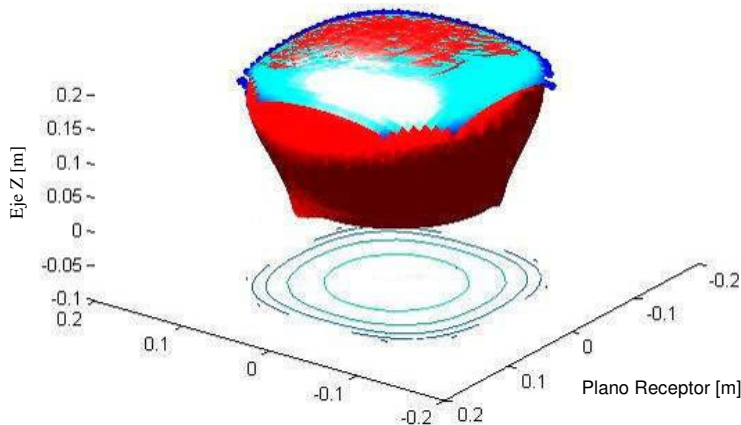


Figura 4.15: Iso-superficie obtenida para un concentrador de simetría cuadrangular.

El primer caso resuelto corresponde a las iso-superficies para un concentrador de plato parabólico, porque ésta es la geometría más típica para un concentrador de foco puntual. Un concentrador de 12 m en el diámetro y de longitud focal de 8 m fue modelado para errores ópticos diferentes. La figura 4.16 muestra el corte transversal de iso-superficies para irradiancias diferentes con un espejo cuyo error óptico es de 4 mrad. Es interesante notar que los puntos en el gráfico se adaptan a un perfil parabólico (la línea sólida) con una diferencia cuadrática media inferior al 5%. Cuando la iso-superficie está localizada más cerca al foco del concentrador, el nivel de irradiancia aumenta, mientras que el área de la iso-superficie se disminuye. Esto es de esperarse porque una vez que el foco es sobrepasado, la radiación solar diverge disminuyendo su densidad de potencia.

Paralelamente se realizó un estudio sobre el efecto de los errores ópticos en las iso-superficies de irradiancia. La figura 4.17 muestra las iso-superficies correspondientes a tres diferentes errores ópticos para un nivel de irradiancia de $4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$. Puede observarse que entre mayor sea el error

óptico la iso-superficie estará más cercana al punto focal del sistema. Esto también sería de esperarse pues a mayor error óptico los rayos divergen con ángulos de mayor amplitud, respecto al eje focal, lo que obligaría a colocar las isosuperficies de un cierto nivel en posiciones más próximas al punto focal

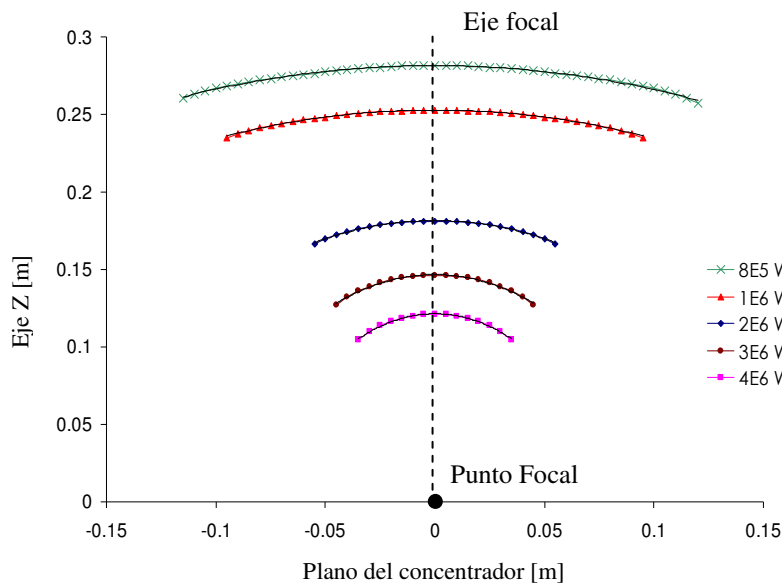


Figura 4.16. Sección transversal de iso-superficies de irradiancia obtenidas de un concentrador parabólico de revolución.

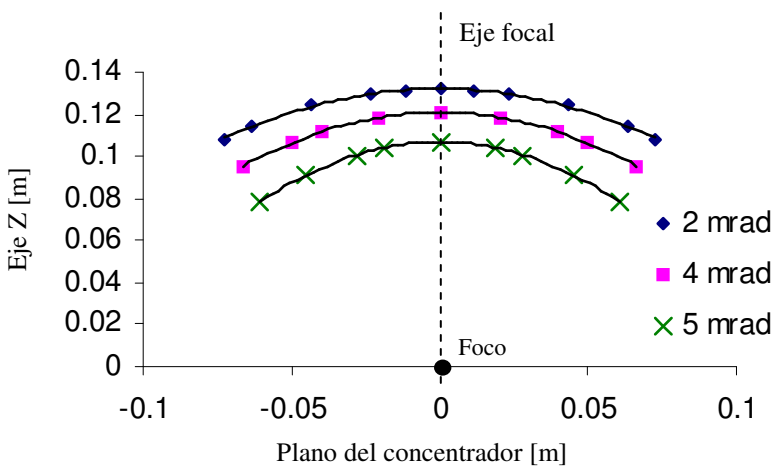


Figura 4.17: Sección transversal de iso-superficies de irradiancia de $4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$, suponiendo diferentes errores en la superficie de los espejos.

Se realizó una verificación numérica para las iso-superficies correspondiente a los niveles de 8×10^5 y $1 \times 10^6 \text{ W/m}^2$. Para ello se ajustó una curva empírica a cada sección transversal de las iso-superficies y con ella se seleccionaron un conjunto de puntos los que se les calculó las pendientes de las rectas tangentes correspondientes. Posteriormente se colocó un plano en la

posición de cada punto y se calculó la irradiancia correspondiente. En la figura 4.18(a) puede observarse que la irradiancia permanece prácticamente constante. Por otro lado, la figura 4.18(b) corresponde a un receptor plano localizado a la misma distancia que la iso-superficie de $8E5$ la W/m^2 ; sin embargo, la irradiancia varía considerablemente respecto a la calculada para la iso-superficie.

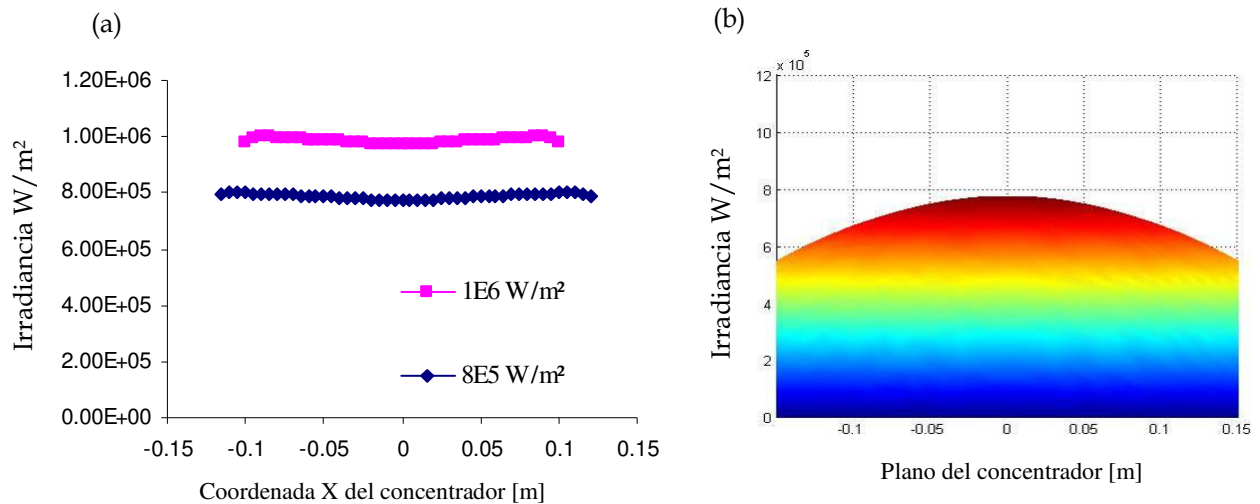


Figure 4.18: (a) Irradiancia sobre dos iso- superficies de 1×10^6 y $8 \times 10^5 W/m^2$. (b) Irradiancia sobre un plano colocado en la misma posición de la iso-superficie de $8 \times 10^5 W/m^2$.

Este procedimiento puede aplicarse a cualquier tipo de concentrador de foco puntual, incluyendo concentradores de facetas múltiples y platos parabólicos tipo dish-stirling. El receptor suele tener un costo considerable en los sistemas de concentración y la posibilidad de poder aumentar su durabilidad debe reducir los costos de mantenimiento y el costo final de la energía, lo cual justifica ampliamente el posible costo adicional de fabricar un receptor de geometría especial.

Capítulo 5

Diseño óptico del horno solar del CIE

5.1 Configuración de facetas

El diseño óptico del horno solar, será definido en términos de los requerimientos que se han establecido para su operación. Se espera que el HSAFR genere una potencia térmica de 30 KW, con flujos radiativos picos de 12,000 soles (aproximadamente $12,000 \text{ kw/m}^2$) y una mancha solar menor o igual a 10 cm de diámetro. Para ello se realizó una modelación, a través de trazado de rayos para determinar la óptica óptima del concentrador y el helióstato para cumplir con estos requerimientos. Dicha modelación se realizó de manera conjunta con el departamento de óptica del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) y la Coordinación de Concentración Solar (CCS) del CIE.

Tanto el CIE como el INAOE, elaboraron, en forma independiente, una propuesta de diseño para el sistema óptico. Ambos diseños se conjuntaron para obtener el diseño final del HSAFR. El INAOE se encargará de desarrollar los componentes estructurales y ópticos del horno solar. La propuesta que consta de 409 facetas hexagonales en arreglo de panal (figura 5.1), con distancias focales agrupadas en 5 diferentes valores. Las facetas estarán soportadas por una estructura esférica, pero orientadas para que un rayo reflejado en centro de cada espejo incida sobre un punto focal común al arreglo (figura 5.2).

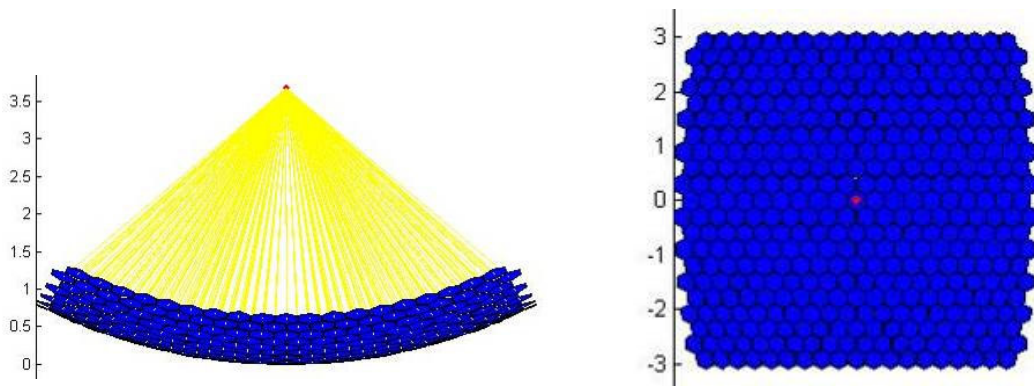


Figura 5.1: Disposición de las facetas en el diseño del INAOE-CIE.

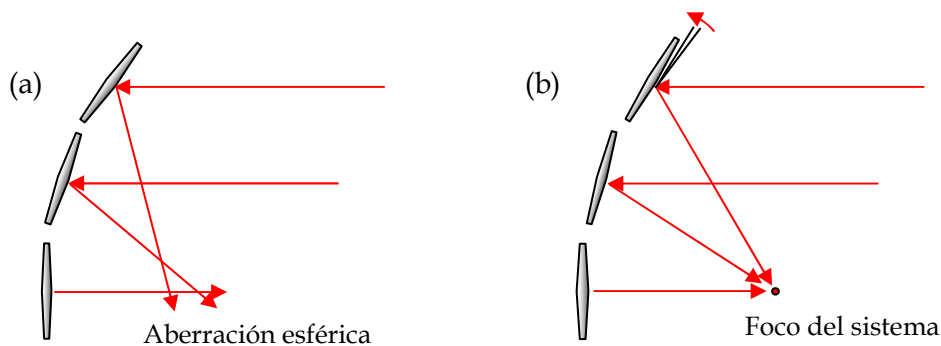


Figura 5.2: Las facetas sobre la esfera son reorientadas para lograr la concentración en el foco del sistema. (a) Facetas en un canteo esférico. (b) Canteo esférico modificado.

Esta forma de canteo tiene el problema de que las facetas hexagonales regulares no cubren totalmente el área de la esfera, por lo que las facetas fueron modificadas respecto a su forma ideal. Esto garantiza poder situar las facetas en la estructura con el mínimo de espaciamentos entre ellas. La deformación tiende a aumentar conforme las facetas se alejan del vértice del sistema óptico. A pesar de ello, la deformación es pequeña y la variación máxima del área es inferior al 10%. Debido a que el programa requiere de particionamientos regulares en las facetas para asignar los puntos de reflexión, el programa no tiene la capacidad de modelar facetas de formas irregulares, por lo que el estudio se realizó substituyendo cada faceta por una hexagonal de la misma área y ubicándola con las mismas coordenadas.

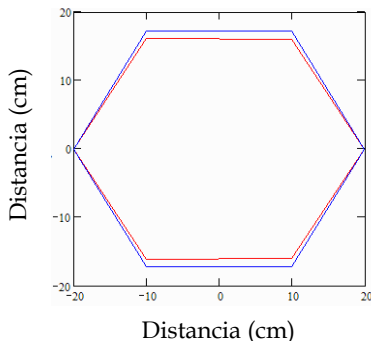


Figura 5.3: Ejemplo de la deformación de las facetas hexagonales del horno respecto a su forma ideal.

A fin de realizar las pruebas de comparación, todas las modelaciones numéricas reportadas en esta sección se consideraron ideales: la irradiancia solar se tomó con un valor de 1000 W/m^2 , la reflectividad se consideró igual a uno y no se consideraron errores de superficie. Las distancias focales y en número de espejos de cada grupo se reportan en la tabla 5.1 y su distribución se muestra en la figura 5.4.

Tabla 5.1 Grupos de distancias focales considerados para el HSAFR

Grupo	Distancia focal (m)	Num. de espejos
A	3.75	85
B	4.00	126
C	4.25	130
D	4.50	56
E	4.75	12

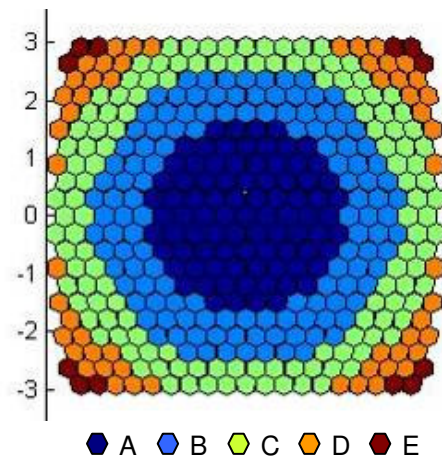


Figura 5.4: Distribución de las distancias focales y los grupos de espejos en el sistema óptico del HSAFR.

La propuesta del INAOE-CIE difiere de un diseño tradicional en que las facetas se acomodan en un canteo parabólico. No obstante, para la distancia focal considerada de 3.68 m, la diferencia del factor de concentración entre el canteo parabólico y el esférico es mínima (inferior al 1%), siendo ligeramente mejor para el caso esférico modificado (figura 5.5).

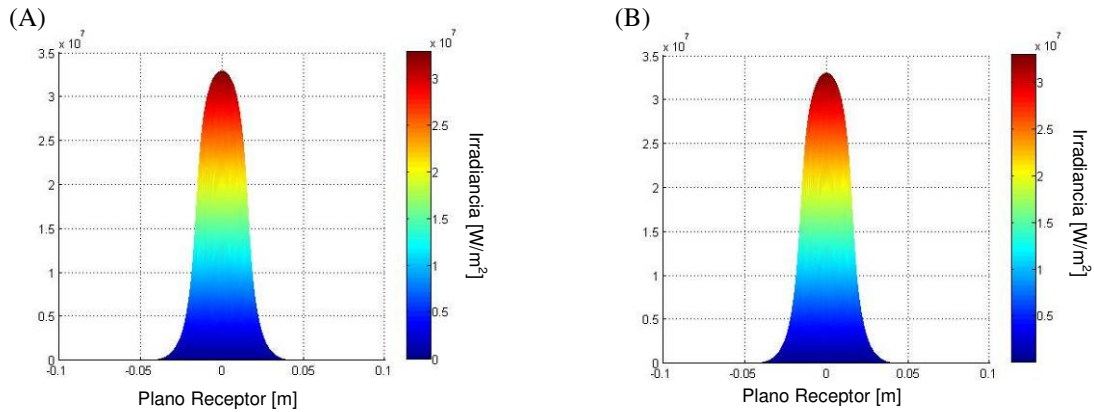


Figura 5.5: Distribución de irradiancia en el plano focal del sistema para el caso de: A) canteo parabólico, B) canteo esférico modificado.

Se analizó el diseño del INAOE-CIE para diferentes radios de la estructura esférica, bajo la suposición de que un radio más pequeño puede mejorar el factor de concentración. En la figura 5.7 se observa la variación de la concentración pico con el radio de canteo del arreglo. En ella se observa que para un radio entre 500 y 550 cm, se tiene un mejor factor de concentración. Sin embargo, la diferencia entre los factores de concentración de los casos estudiados tienen una variación máxima de aproximadamente 1.3%, mientras que el ángulo de apertura se incrementa considerablemente lo cual puede representar una desventaja para la implementación de dispositivos en la zona focal del arreglo (figura 5.6).

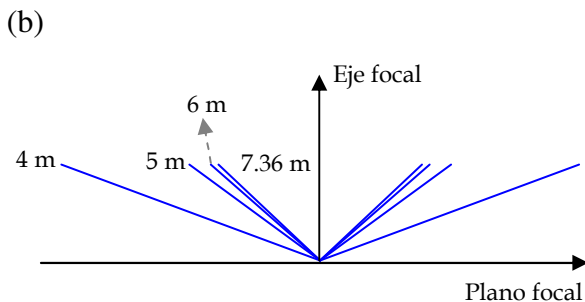
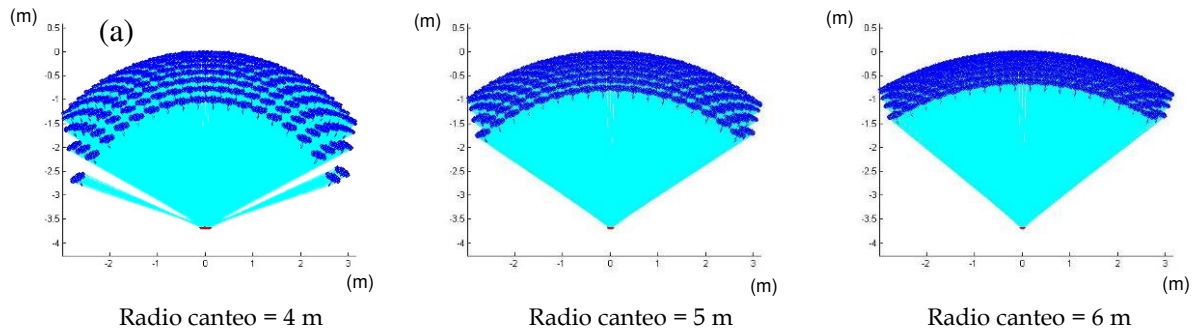
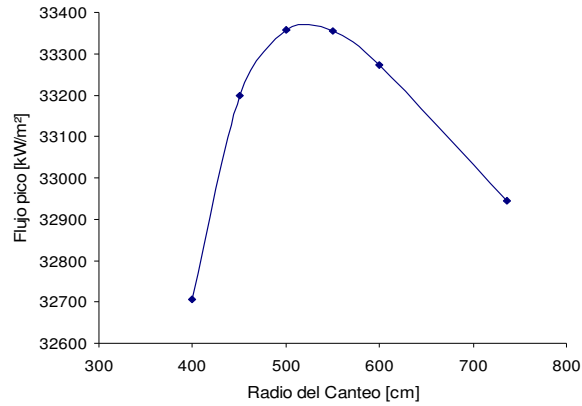


Figura 5.6: (a) Trazado de rayos para estructuras esféricas con diferentes radios de curvatura. (b) Comparación del ángulo de apertura de la incidencia de rayos para los diferentes radios de canteo.

Figura 5.7: Variación de la concentración pico con la distancia focal del arreglo para la propuesta del Horno solar INAOE-CIE.



Tanto el CIE como el INAOE, elaboraron, en forma independiente, herramientas de cómputo para la simulación de sistemas de concentración solar. El programa del INAOE fue desarrollado a partir de un programa comercial de trazado de rayos para óptica. Los resultados obtenidos se ingresan a una rutina desarrollada en el INAOE para realizar la integración de la energía en el receptor. A grandes rasgos, la diferencia entre ambos programas consiste en que Tonalli puede realizar el trazado de rayos utilizando la técnica de convolución, que permite realizar los cálculos de manera más rápida, además de que puede modelar errores ópticos en la superficie.

Con estos programas, se fijó una metodología para verificar la reproducibilidad de los resultados. El primer paso consistió en la revisión de los algoritmos de simulación a fin de entender los principios físicos de funcionamiento. El segundo paso consistió en adoptar un mismo criterio en la introducción de parámetros y en la forma del perfil solar utilizado en las simulaciones. Finalmente se realizaron cálculos preliminares con geometrías ópticas simples y posteriormente con los sistemas de facetas propuestos en los diseños iniciales de cada institución. Ambos programas pudieron validarse adecuadamente sin diferencias significativas.

Para la determinación del diseño óptico, se consideraron diferentes configuraciones que fueron probadas por ambos programas y que se describen en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Configuraciones consideradas para el diseño óptico del HSAFR

Caso	Montura	Canteo	Distancia focal facetas
E1	Esférica	Orientación corregida	Única
E2	Esférica	Orientación corregida	Múltiples (~ 80 o 100)
E3	Esférica	Orientación corregida	Discretas (5 grupos)
P2	Parabólica	Tangente	Múltiples (~ 80 o 100)
P3	Parabólica	Tangente	Discretas (5 grupos)
C	Parábola continua (misma área)	-----	Única

Estas configuraciones se modelaron para el caso de 19x18 (330 espejos) y 21x20 (409 espejos)

Se calcularon las curvas distribución de irradiancias sobre receptores de diferentes radios. Y a partir de estas curvas se obtuvo la potencia total en el receptor para porcentajes de captación que van de 0 a 100% (figura 5.8). Esto se hizo con ambos programas y se obtuvieron los mismos resultados, con diferencias que oscilan entre el 1 y 2%. Puesto que la comparación entre programas puede oscilar en promedio en un 5%, puede considerarse que la diferencia no es significativa. La gráfica muestra que utilizar una distancia focal única (caso E1) reduce significativamente la potencia captada en el receptor respecto al resto de los casos. Prácticamente no se observa diferencia entre las estructuras esféricas y parabólicas, ya sea que los espejos tengan distancias focales en grupos, o que cada espejo tenga su distancia focal óptima. El caso del paraboloide continuo, si mejora la captación de potencia; sin embargo, la diferencia es poco significativa. Por ejemplo, el estudio muestra que la diferencia, en flujo pico, entre el sistema con 5 grupos de focales y el de distancia focal única, es de aproximadamente 22%, pero difiere en menos del 1% respecto al caso ideal en que cada faceta tiene una distancia focal óptima (figura 5.9).

Al observar el radio de la mancha solar (captación de 90%), las diferencias son más evidentes, pero aun en esta gráfica, el radio es casi el mismo entre las estructuras esféricas y parabólicas, con las focales ajustadas (E2, E3, P2, P3). El caso E1 el radio de mancha se incrementa casi un 85%, lo que esta de acuerdo con la bajada de potencia captada para este radio.

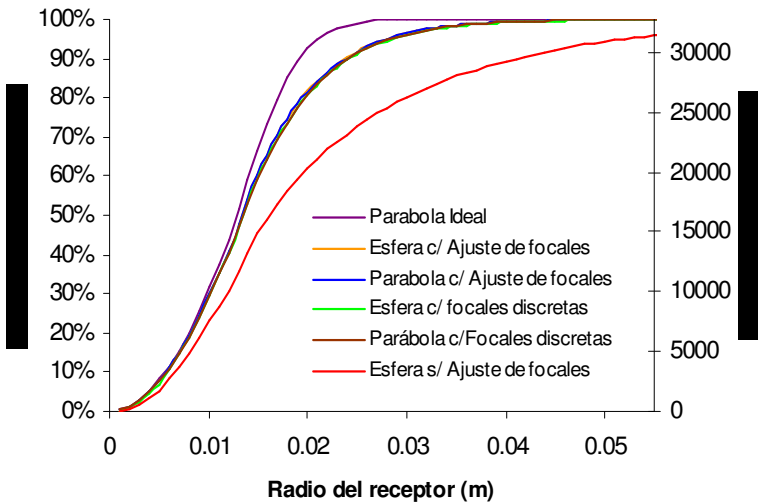
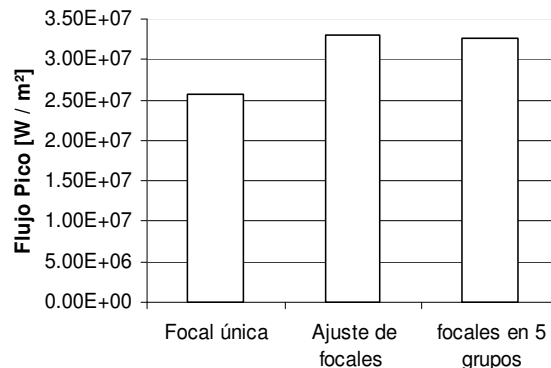


Figura 5.8: Potencia total para diferentes radios de captación

Figura 5.9: Flujo Pico obtenido en el receptor con diferentes ajustes de la distancia focal de las facetas.



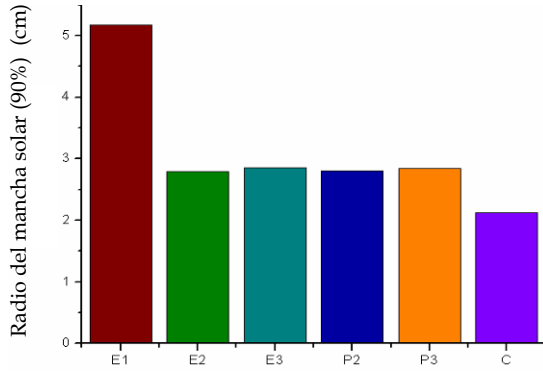


Figura 5.10: Radio de la mancha solar para cada una de las configuraciones del sistema óptico de 409 espejos.

En la tabla 5.3 se resumen los resultados de los estudios realizados con la propuesta INAOE-CIE. En esta tabla se resalta la diferencia de la propuesta de utilizar una distancia focal única para todas las facetas respecto a la de agrupar las distancias focales en 5 grupos. También puede observarse la diferencia entre la propuesta final del Horno respecto a lo que podría obtenerse si se usara un concentrador parabólico ideal. La diferencia entre estos dos últimos casos es de aproximadamente de 5%.

Tabla 5.3 Resumen del estudio de comparación entre las simulaciones efectuadas para diferentes configuraciones del Horno Solar CIE-UNAM

Configuración de facetas	Arreglo	Área efectiva m ²	Concentración pico		Radio del spot para una captación del 90% de la potencia total incidente		Radio del spot para una captación del 95% de la potencia total incidente	
			kW/m ² x10 ³	Dif. Entre programas	(cm)	(kW)	(cm)	(kW)
INAOE-CIE con focal única	19X18	32.78	25.8	2.3%	4.10	29.5	5.18	31.1
INAOE-CIE con ajuste de focales	19X18	32.78	32.9	1.5%	2.39	29.5	2.80	31.1
INAOE-CIE con 5 grupos focales	19X18	32.78	32.7	3.1%	2.43	29.5	2.85	31.1
Parábola con ajuste de focales	19X18	32.79	32.9	2.7%	2.40	29.5	2.81	31.1
Parábola con 5 grupos focales	19X18	32.79	32.7	2.4%	2.42	29.5	2.84	31.1
Concentrador ideal		32.79	34.1	2.0%	1.92	29.5	2.12	31.1
INAOE-CIE con focal única	21X20	38.67	27.2	2.4%	4.88	34.8	6.23	36.7
INAOE-CIE con ajuste de focales	21X20	38.67	36.3	2.0%	2.65	34.8	3.16	36.7
INAOE-CIE con 5 grupos focales	21X20	38.67	36.1	2.9%	2.67	34.8	3.19	36.7
Parábola con ajuste de focales	21X20	38.32	36.1	1.8%	2.61	34.5	3.10	36.4
Concentrador ideal		38.8	38.1	2.2%	2.02	34.9	2.26	36.9

La columna correspondiente a la diferencia entre programas se refiere a la diferencia porcentual entre los resultados obtenidos con el Programa de cómputo del INAOE respecto a los resultados obtenidos con el programa Tonalli. El estudio se llevo a cabo para un sistema sin errores de superficie y reflectividad ideal, con un perfil de sol estándar y una irradiancia incidente de 1000 W/m².

5.2 Efecto de los errores ópticos

A partir de los parámetros de diseño del horno solar se procedió a realizar un estudio del efecto de los errores ópticos en la distribución de la irradiancia en el receptor. Para ello, se utilizó el programa Tonalli y el cálculo se realizó con las coordenadas y áreas de las facetas dispuestas en la estructura esférica descrita en la sección anterior. El cálculo se realizó para diferentes errores ópticos en los espejos, considerando una reflectividad de 0.81 y los valores de las distancias focales de acuerdo a los grupos descritos anteriormente. En la figura 5.11 se muestran los resultados, obtenidos en la modelación, de la irradiancia y del tamaño de la mancha solar en el receptor (para el 90% de la energía captada). La gráfica muestra la disminución de la irradiancia pico y el aumento del radio de la mancha solar conforme el error óptico aumenta. Si se considera que el error óptico del horno puede ubicarse entre 3 y 4 mrad, entonces la irradiancia pico se ubicará entre 15000 y 10500 soles.

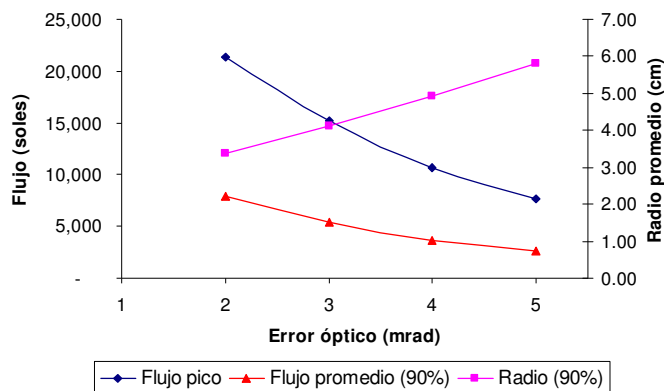


Figura 5.11: Radio de la mancha solar y Flujos pico y promedio para diferentes errores ópticos en los espejos.

Los errores ópticos, han mostrado que modifican no sólo el factor de concentración, sino otros parámetros como la distancia focal óptima y el tamaño del receptor. En las figuras 5.12 y 5.13 se muestran los valores de irradiancia pico y promedio para diferentes distancias focales del sistema y diferentes errores ópticos. Las distancias focales de cada faceta se ajustan de acuerdo a la distancia de cada una al punto focal del sistema.

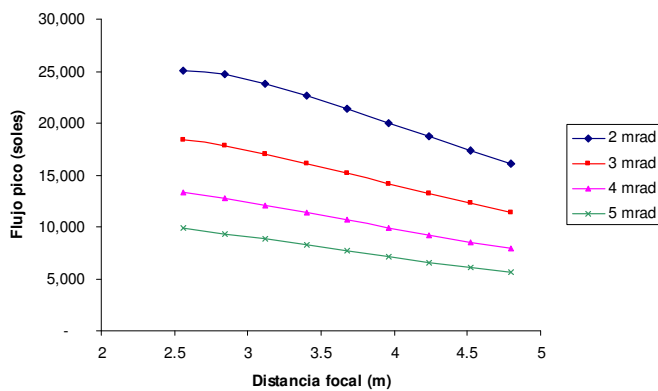


Figura 5.12: Flujos pico para diferentes distancias focales y errores ópticos en los espejos.

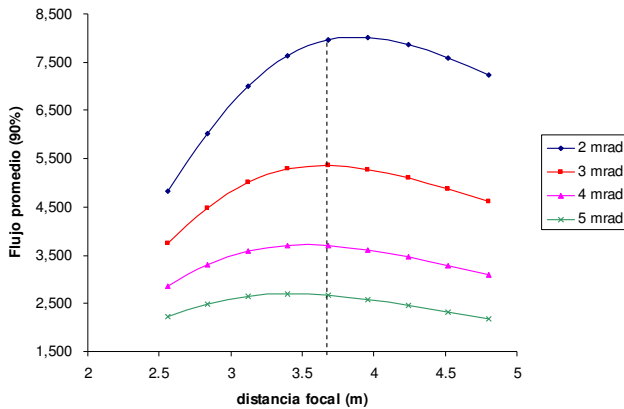


Figura 5.13: Flujos promedio para diferentes distancias focales y errores ópticos en los espejos.

La tendencia de los resultados para la irradiancia pico y promedio son similares a los obtenidos en el estudio paramétrico, en el sentido de que la irradiancia pico tiende a aumentar conforme la distancia focal del sistema disminuye. En la figura 5.13 puede observarse que la distancia focal de 3.68 seleccionada para el sistema focal del sistema corresponde aproximadamente bien con el máximo de irradiancia promedio que puede esperarse para errores ópticos entre 3 y 4 mrad. En cuanto al tamaño de la mancha solar, de acuerdo con la figura 5.11, su diámetro oscilará entre 8 y 10 cm, para el mismo intervalo de errores ópticos.

A partir de los parámetros de diseño establecidos y de un nivel global de errores de 4 mrad, se estudió la forma de la distribución volumétrica de irradiancia alrededor del punto focal. La modelación se realizó en planos ortogonales al eje del sistema. En la figura 5.14 se muestra la variación del pico de irradiancia a diferentes distancias al foco, y puede observarse que decae rápidamente al alejarse de este punto. Si el plano receptor se aleja 1 cm del punto focal, la irradiancia pico disminuye aproximadamente 3.5%. Sin embargo, si se aleja 2 cm, la reducción alcanza 27%, en 4.5 cm la reducción es casi de 50% y a 10 cm el pico ha disminuido casi 90%.

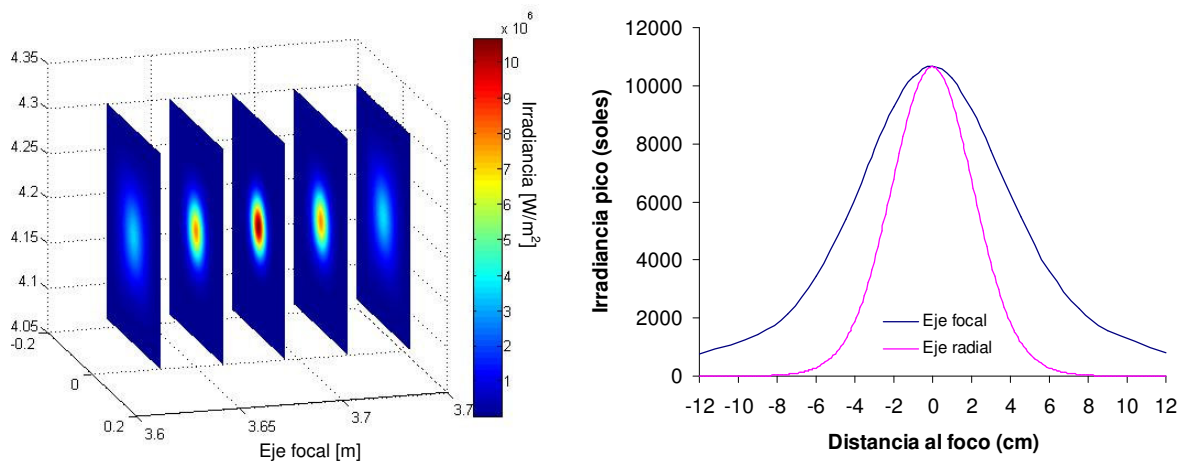


Figura 5.14: (a) Esquema de planos alrededor del punto focal del sistema con su respectiva distribución de irradiancia. (b) Irradiancia pico para los diferentes planos, ya sea a lo largo del eje focal, o bien a lo largo de un eje radial de un plano ubicado en el punto focal.

Si observamos el valor de la irradiancia al alejarnos en una línea perpendicular al eje focal (eje radial) la variación es aún más abrupta. Por ejemplo, a 5 cm del punto focal, la reducción es mayor a 90%. Esta característica es poco deseable si se requiere una densidad de irradiancia constante. En la figura 5.15 puede observarse en un corte transversal, la variación de la irradiancia alrededor del punto focal tanto a lo largo del eje del sistema como en puntos ubicados radialmente a partir de este eje.

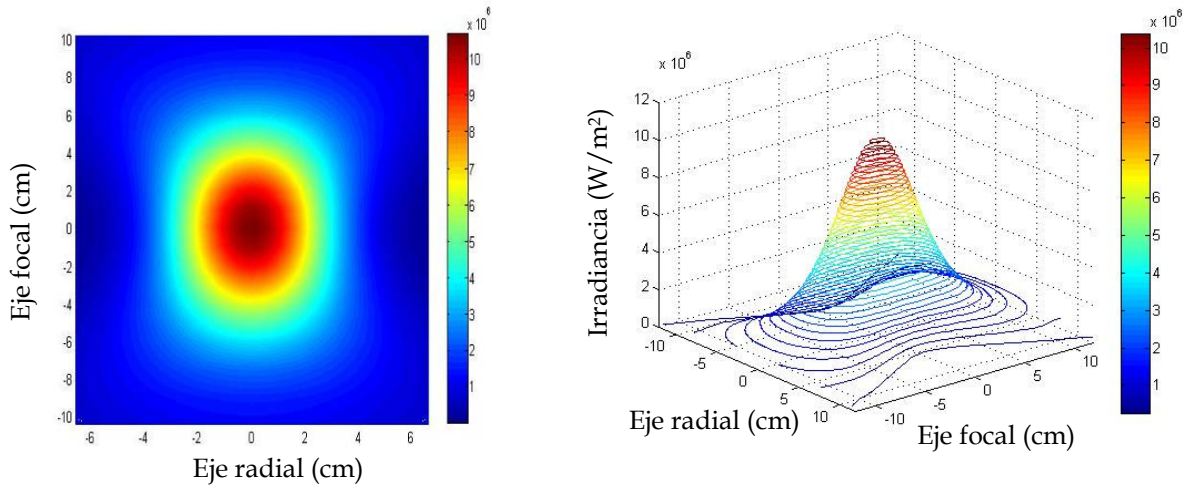


Figura 5.15: Irradiancia alrededor del punto focal en planos ortogonales al eje del sistema. (a) Corte transversal a lo largo del eje focal. (b) Curvas de nivel de la sección transversal.

Con estos resultados puede definirse una región volumétrica que encierre niveles de irradiancia superiores a un valor determinado. Por ejemplo, si se requieren niveles de irradiancia superiores a 1000 soles, la región estaría delimitada por un cilindro a lo largo del eje focal de 18 cm de longitud y de 9 cm de diámetro. La forma aproximada de estas regiones puede apreciarse mejor en la figura 5.16 que presenta una vista superior de las curvas de nivel.

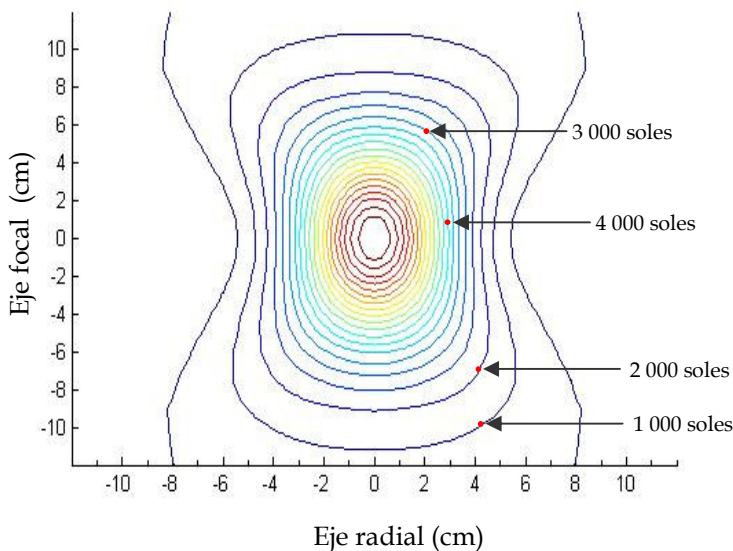


Figura 5.16: Corte transversal de las curvas de nivel alrededor del punto focal del sistema.

5.3 Tamaño del Helióstato

Se elaboró la rutina “**helióstato_horno.m**”. Esta rutina permite observar la forma de la mancha de luz que proyecta el helióstato sobre las facetas del horno solar. Con este programa se realizó un estudio para determinar el tamaño del helióstato que pudiera garantizar la iluminación total de las facetas del horno durante un año de operación. El programa permite identificar problemas de las dimensiones del helióstato respecto al tamaño del arreglo de facetas de concentración.

El helióstato estará formado por placas rectangulares que se consiguen comercialmente de $2.6 \times 1.8 \text{ m}^2$. Debido a que el diseño del helióstato es un factor crítico para la obtención del factor de concentración deseado en el horno. Estas placas no pueden cortarse, pues este proceso afectaría la planitud del helióstato. Tomando en cuenta la latitud geográfica de la ciudad de Temixco (18.88°) El helióstato debe cubrir a lo alto las dimensiones del horno para cualquier época del año. Las dimensiones del horno que deberán ser cubiertas por el helióstato son:

Altura del horno: 6.2 m

Base del horno: 6.7 m

EL día del año en que al mediodía solar, el Sol tiene el mayor ángulo cenital con orientación norte es el 21 de Junio con 4.57° . Esto implica que la inclinación del helióstato respecto al cenit es de 40.43° y que la altura del helióstato debe ser 9.13 m. Tomando en cuenta el tamaño de las placas, el horno puede cubrirse casi en su totalidad, al medio día del 21 de Junio, con un arreglo de 3×5 placas, lo que da un tamaño para el helióstato de:

Altura del helióstato: $5 \times 1.8 \text{ m} = 9.0 \text{ m}$

Base del helióstato: $3 \times 2.6 \text{ m} = 7.8 \text{ m}$

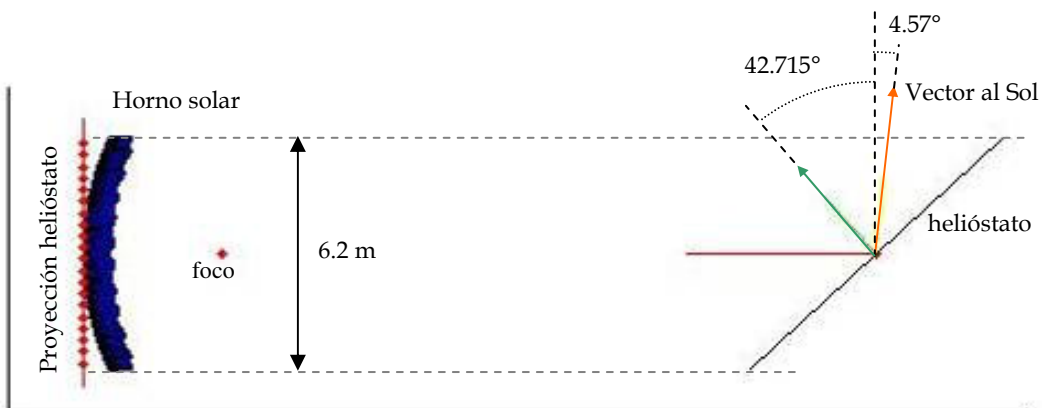
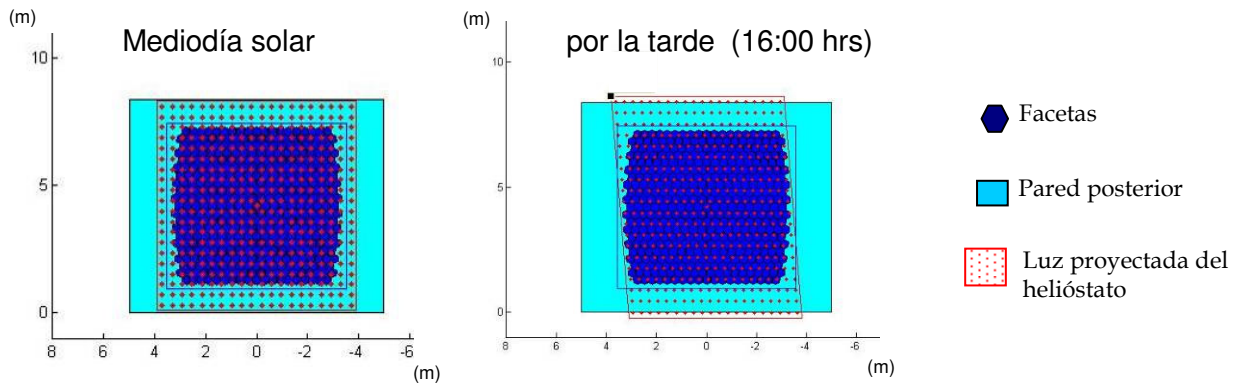


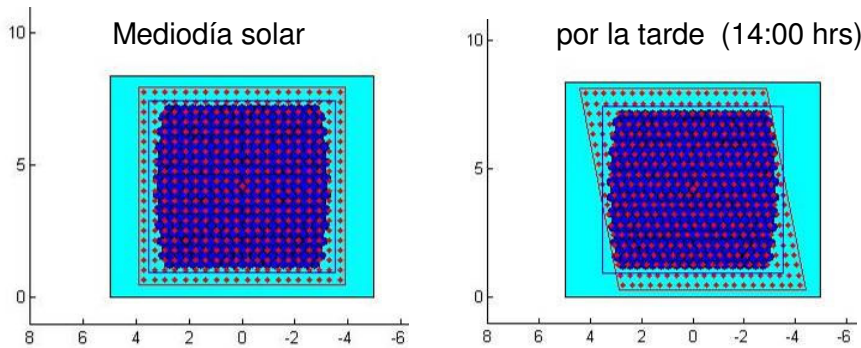
Figura 5.17: Esquema de la proyección del helióstato sobre el concentrador del horno en el solsticio de verano.

La proyección del heliostato varía a lo largo del día y a lo largo del año, esto define las horas de operación disponibles durante el día. El funcionamiento del horno sólo es posible cuando la proyección del heliostato cubre completamente las facetas del horno, de otra manera la cantidad de potencia que entra al sistema cambiaría con el tiempo, además de que no podría saberse con facilidad la potencia total captada a cada instante. A continuación se muestra en la figura 5.18 las proyecciones para los solsticios y equinoccios lo que da una idea de las horas de operación en cada época del año.

Proyección del Heliostato: Día **21 de Diciembre**. Horas de operación: ~ **8 hrs**.



Proyección del Heliostato: Día **21 de Marzo**. Horas de operación: ~ **4 a 5 hrs**.



Proyección del Heliostato: Día **21 de Junio**. Horas de operación: ~ **2 hrs**

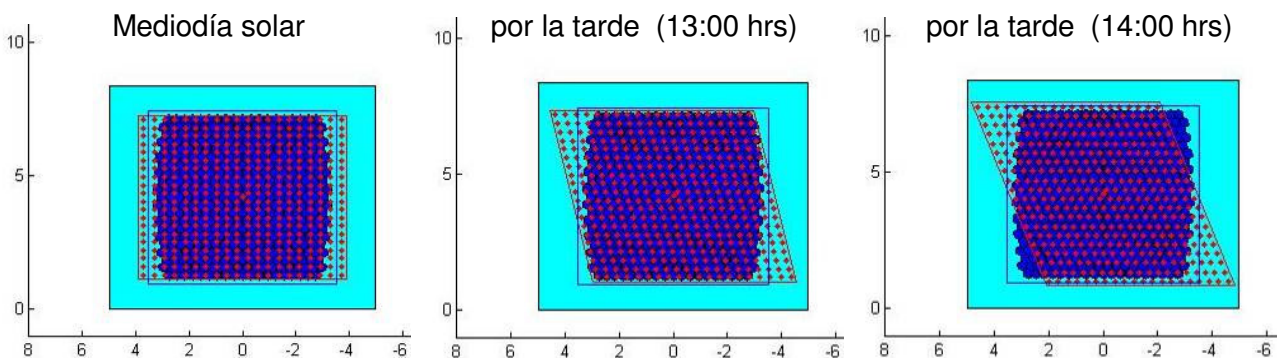


Figura 5.18: Esquemas de proyección del heliostato (7.8x9 m²) para los solsticios y equinoccios a diferentes horas del día.

Las proyecciones anteriores muestran que durante el verano las horas de operación se verían reducidas a sólo una hora antes y después del mediodía solar. Esto se debe a que el heliostato, en su seguimiento del Sol, se proyecta de manera oblicua sobre el horno, dejando facetas descubiertas antes y después de dicho intervalo. Si se incrementara una placa más para ensanchar horizontalmente la proyección del heliostato, las horas de operación podrían incrementarse significativamente. Las dimensiones del heliostato en este caso serían:

Altura del heliostato: $5 \times 1.8 \text{ m} = 9.0$

Base del heliostato: $4 \times 2.6 \text{ m} = 10.4 \text{ m}$

La proyección del heliostato en este caso sería:

Proyección del Heliostato: Día **21 de Marzo**. Horas de operación: ~ **8 hrs**.

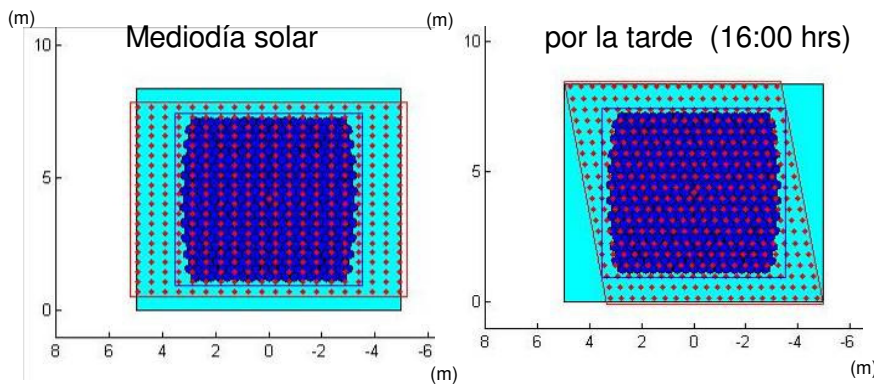
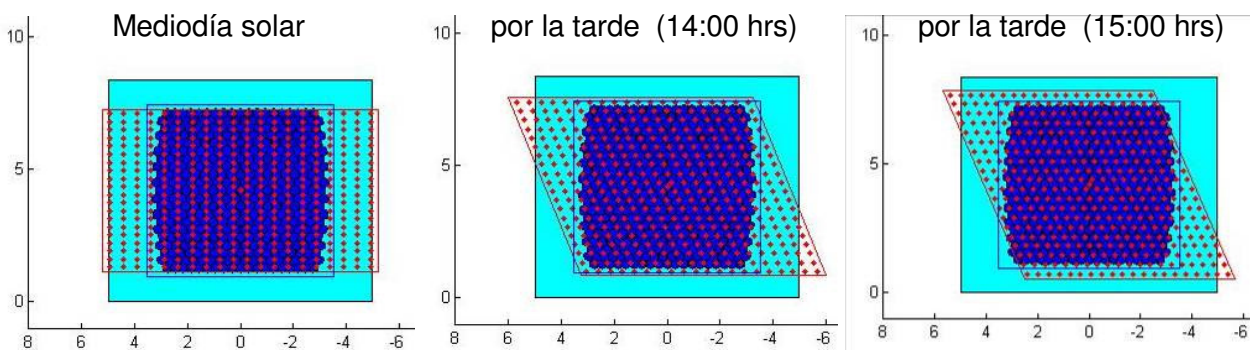


Figura 5.19: Esquemas de proyección del heliostato ($10.4 \times 9 \text{ m}^2$) para los solsticios y equinoccios a diferentes horas del día.

Proyección del Heliostato: Día **21 de Junio**. Horas de operación: ~ **6 hrs**



Las horas en primavera, verano y otoño se incrementan significativamente; sin embargo esta configuración compromete la calidad óptica del heliostato. Al ser una estructura de mayores dimensiones las tensiones en la estructura, asociadas al peso, se incrementan lo que puede provocar variaciones en la superficie plana del heliostato. Por otro lado se debe tomar en cuenta

que durante el verano se tienen pocos días favorables para la experimentación con energía solar¹² (figura 5.20). Con base en los datos de la estación meteorológica, ubicada en Temixco, Morelos, Junio es el mes del año que tiene menor número de días con horas completas por arriba de 800 W/m² de irradiancia promedio. Por lo anterior, sería cuestionable incrementar el costo del helióstato, al invertir en una estructura más rígida para obtener mayores horas de operación en una época poco favorable.

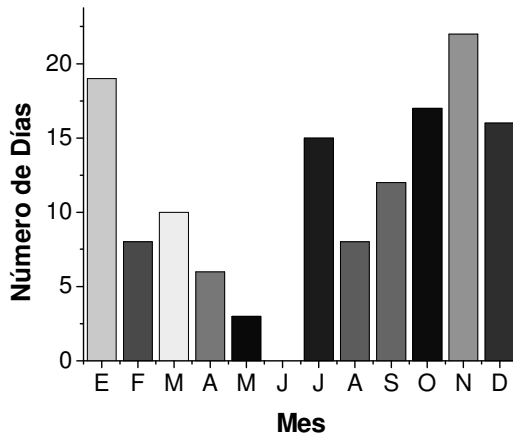


Figura 5.20: Número de días adecuados para operar el horno (año 2005).

5.4 Edificio del horno solar

El horno solar será ubicado dentro de las instalaciones del CIE, en Temixco, Morelos. Su emplazamiento responde a la necesidad de contar con el instrumento de investigación de manera próxima a los laboratorios de investigación y/o grupos de trabajo relacionados con fuentes renovables de energía; los cuales que ya operan en este centro. Su ubicación se especifica en el plano de la figura 5.21. Su posición garantiza el espacio suficiente para el movimiento del helióstato y evitar sombreamientos de plataformas solares cercanas.

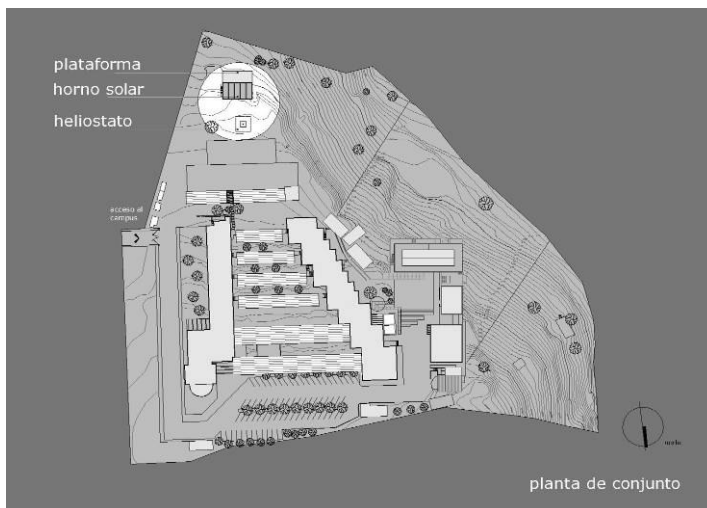


Figura 5.21: Ubicación del horno solar dentro de los terrenos del CIE.

¹² Se considera día favorable aquel que tiene una irradiancia por arriba de 800 W/m² durante un periodo mínimo de 2 horas.

A partir de las características ópticas del horno solar, así como del tipo de investigaciones que se esperan realizar, y los requerimientos de equipamiento para la instrumentación y control de dispositivos, la coordinación de proyectos especiales de la UNAM elaboró un diseño que alberga los siguientes elementos arquitectónicos:

- Recinto del horno: Contiene la estructura que soporta al sistema óptico concentrador, a la mesa de experimentación y al atenuador. Frente a la cara norte de este recinto se ubica la plataforma del heliostato.
- Cuarto de control: Aquí se encuentran los sistemas de control y adquisición de datos, cuya función será entre otras: determinar la posición de la mesa de ensayos, monitorear los experimentos en la zona focal, controlar el movimiento del heliostato y la apertura del atenuador. La posición de este espacio debe garantizar la visibilidad completa tanto al interior del recinto, como del exterior hacia el heliostato.
- Laboratorio de instrumentación: En este lugar se instrumentan los dispositivos y materiales que serán puestos en la mesa de experimentación. Por ello esta ubicada a la misma altura de la base de la mesa de ensayos. El laboratorio y la mesa de ensayos estarán conectados a través de un puente móvil.
- Laboratorio de química: En este espacio se implementan y analizan los experimentos de química solar que serán llevados a cabo, ya sea en el horno solar, o bien en la plataforma solar que será ubicada en la parte Sur del conjunto.
- Estación meteorológica: Esta será ubicada en el techo del horno solar y se colocaran los equipos necesarios para medir temperatura, viento, insolación global y directa, y precipitación pluvial. Se está considerando la posibilidad de poder tomar imágenes del Sol para determinar la forma del cono solar y la distribución circumsolar a lo largo del año.

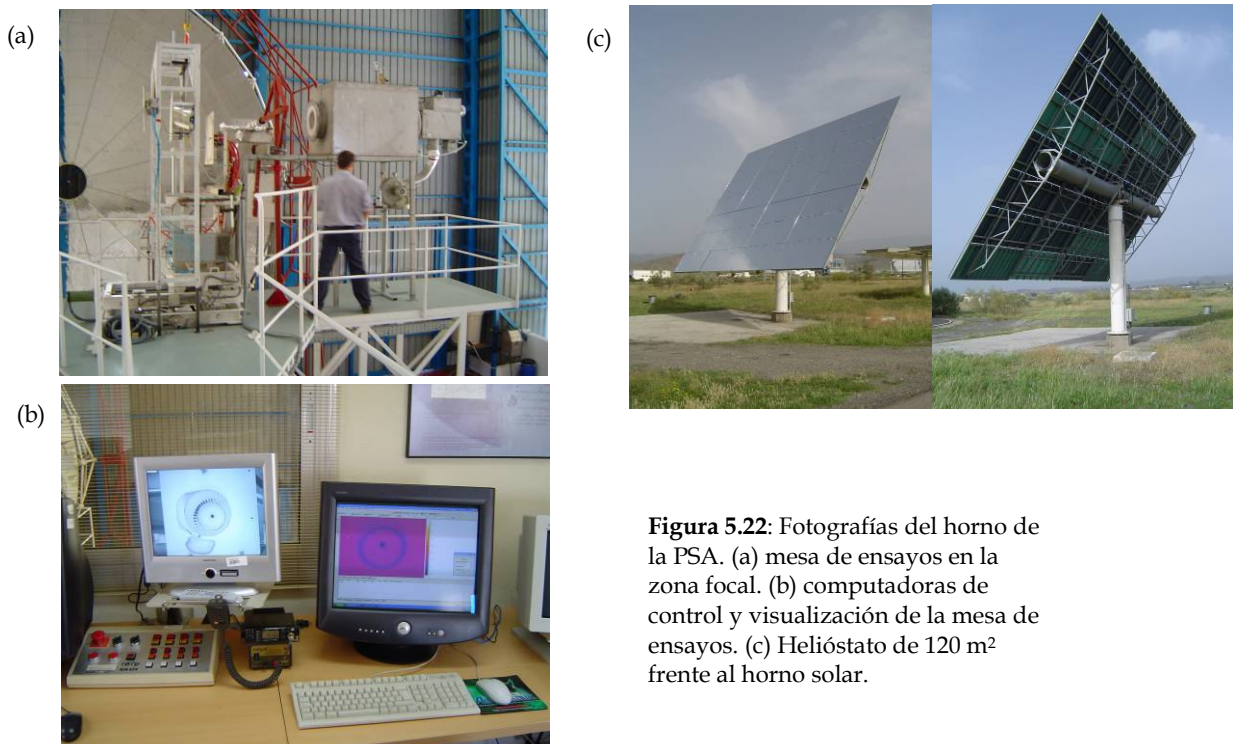


Figura 5.22: Fotografías del horno de la PSA. (a) mesa de ensayos en la zona focal. (b) computadoras de control y visualización de la mesa de ensayos. (c) Heliostato de 120 m² frente al horno solar.

Las plantas arquitectónicas se muestran en las figuras 5.23 y 5.24 y en las cuales se observan las dimensiones de cada uno de los recintos. El laboratorio de química solar tiene acceso directo a la plataforma solar Sur y una entrada por la puerta principal norte. En esta misma planta hay un acceso al recinto del horno.

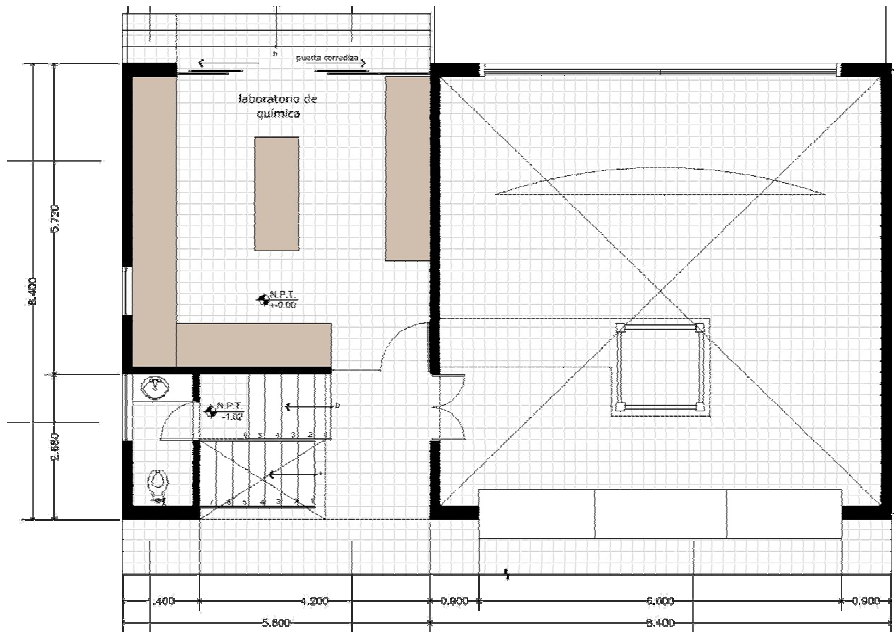


Figura 5.23: Plano planta baja, laboratorio de química solar y base de la estructura del concentrador.
Nivel +0.00 m
(Cortesía Xavier Hierro y Oriana Romero)

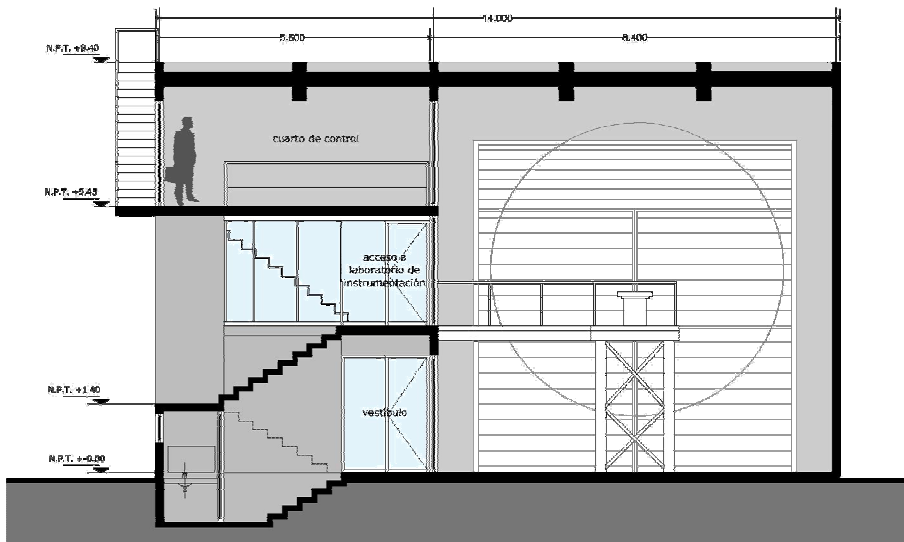


Figura 5.24: Vista en corte longitudinal de la cara norte del edificio del horno solar.
(Cortesía Xavier Hierro y Oriana Romero)

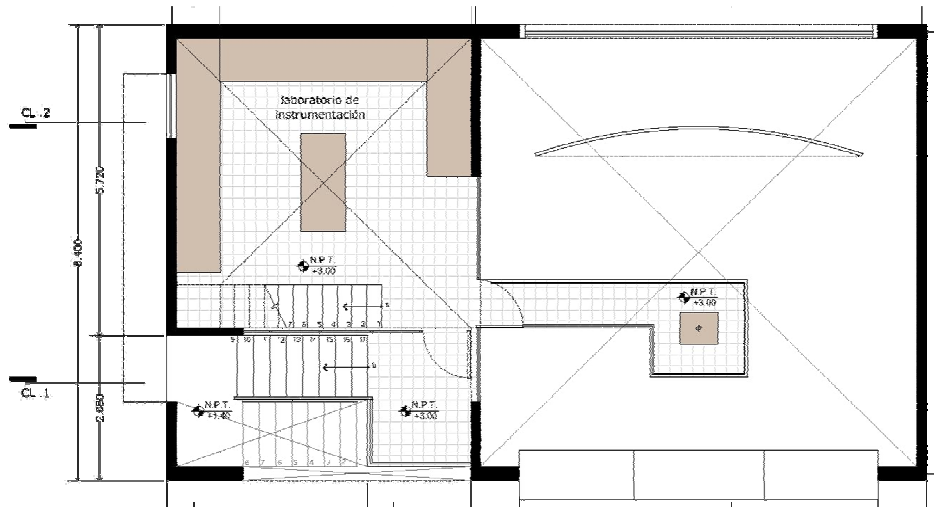


Figura 5.25: Plano planta del laboratorio de instrumentación. Nivel +3.00 m (Cortesía Xavier Hierro y Oriana Romero)

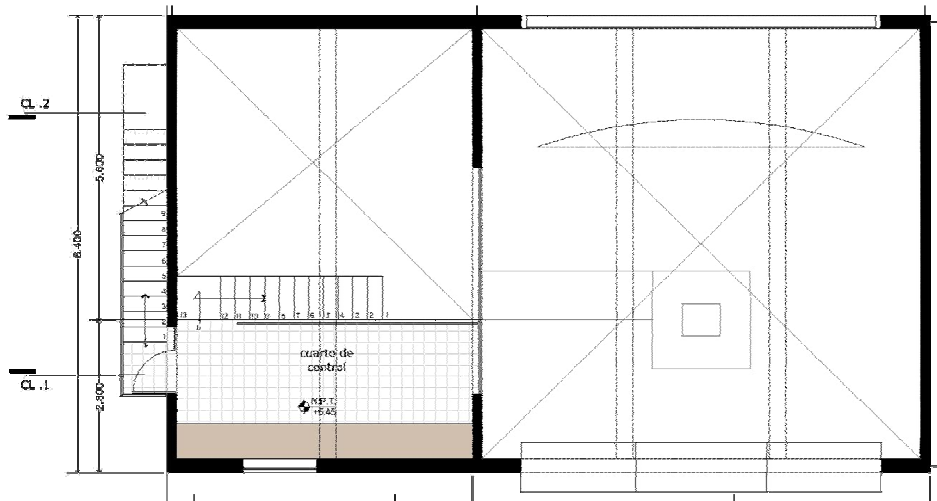


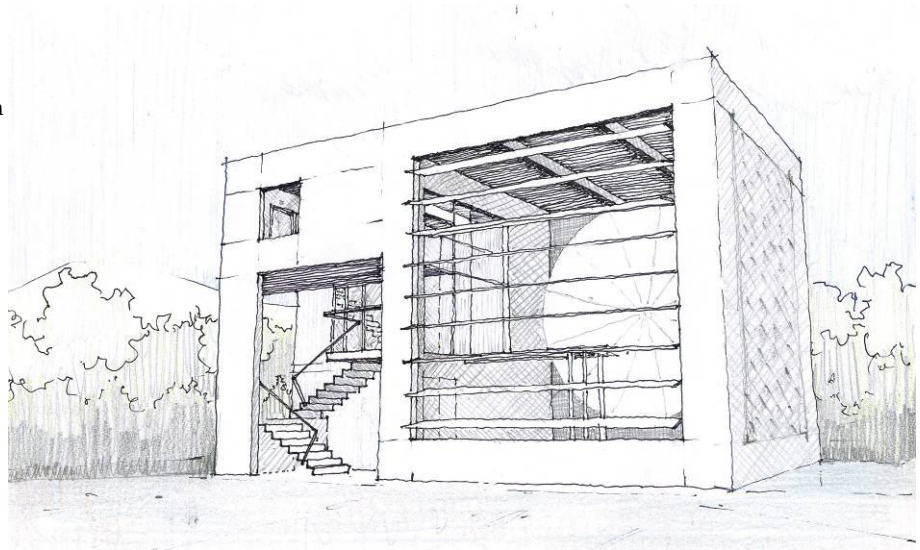
Figura 5.26: Plano planta alta, cuarto de control del horno solar. Nivel +5.45 m (Cortesía Xavier Hierro y Oriana Romero)

El cuarto de control está ubicado en la segunda planta del horno con ventanales para la visibilidad tanto del heliostato como de la mesa de ensayos y las facetas del concentrador. En la planta superior estará ubicada la estación meteorológica cuyo acceso será por escaleras exteriores al edificio. Finalmente, en las figuras 5.28 y 5.29 se muestran dibujos a mano alzada de las vistas norte y sur del edificio terminado. Desde el primer diseño arquitectónico a la actualidad se ha eliminado el acceso sur al recinto del horno y se ha substituido por ventanas superiores para la ventilación del recinto.



Figura 5.27: Dibujo a mano alzada de la cara Sur-Oriente del edificio del horno y la plataforma solar sur.
(Cortesía Xavier Hierro y Oriana Romero)

Figura 5.28: Dibujo a mano alzada de la cara Norte-Poniente del edificio del horno y la plataforma solar sur.
(Cortesía Xavier Hierro y Oriana Romero)



Conclusiones

Con el fin de desarrollar la infraestructura requerida para contribuir en el impulso de las tecnologías termosolares en nuestro país. En este trabajo de tesis se implementó un modelo numérico para la simulación y diseño del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR). Dicho horno será construido en las instalaciones del Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM en Temixco, Morelos.

Dado que el objetivo general de este trabajo, es estudiar diferentes configuraciones ópticas a través del cálculo de la distribución de irradiancia en la zona focal del HSAFR. El modelo fue implementado en el programa de cómputo, llamado Tonalli, utilizando el lenguaje de programación de MatLAB®. El programa de cómputo, permite la simulación de una gran diversidad de configuraciones ópticas, lo que facilitó la realización de los estudios paramétricos requeridos para la optimización del diseño.

Los resultados obtenidos en este documento son diversos, por esta razón las conclusiones han sido organizadas en torno a estos resultados en 6 apartados diferentes:

Conclusiones:

1. del programa de cómputo
2. del estudio de validación teórica
3. del estudio de validación experimental
4. del análisis paramétricos
5. del diseño óptico del horno

del programa de cómputo

- El programa de cómputo elaborado, permite la modelación de sistemas de facetas múltiples. En cada faceta, la reflectividad, el punto de ataque (aim point) y la distancia focal puede definirse de manera independiente. Esto permitió realizar el estudio de la distribución de irradiancia en la zona focal, para facetas móviles, considerando diferentes tipos de sombreamientos.
- Lo anterior permitió la modelación de sistemas de concentración actualmente en operación, como es el concentrador DEFRAC ubicado en las instalaciones del CIE en Temixco Morelos, y el horno solar de la plataforma solar de Almería en España.
- A partir de estas rutinas se realizó un estudio para la obtención de superficies, con distribución de irradiancia uniforme, en la región volumétrica en torno al punto focal del sistema. Con este programa se han determinado numéricamente iso-superficies para sistemas de facetas múltiples.
- El programa permite posicionar facetas hexagonales, circulares y rectangulares dentro de un área libre que representa la ventana de entrada al concentrador del horno. El programa

considera las dimensiones de las facetas y la separación entre ellas, para calcular internamente el número de facetas y sus coordenadas. Esta rutina fue fundamental para el estudio paramétrico sobre el tamaño de las facetas.

- El programa de cómputo, desarrollado para el diseño del horno, constituye una herramienta de modelación que permite una gran diversidad de configuraciones ópticas. Por ello, será de gran utilidad para el diseño de sistemas ópticos futuros.

de estudio de validación teórica

- La validación teórica consistió en la reproducción de resultados ya conocidos en la óptica de concentración. En el caso de un concentrador parabólico de revolución, el programa reprodujo que la concentración óptima se obtiene para una razón $F/D = 0.58$. El factor de concentración y el radio de la mancha solar fueron reproducidos con un error de 0.3% y 0.7% respecto a los calculados teóricamente.
- En el caso de espejos esféricos de revolución, el programa permite ubicar correctamente la distancia focal aproximada en un punto a la mitad del radio de la esfera. Los resultados obtenidos muestran que esta aproximación es válida para radios de curvatura es muy superiores al diámetro del espejo. En caso de que el radio de curvatura sea comparable al diámetro del espejo, entonces se puede obtener una distancia focal corregida.
- Se realizó la validación con resultados obtenidos por otros programas de simulación por trazado de rayos. En el caso del programa CIRCE2, la diferencia entre programas, al considerar un concentrador sin errores ópticos es inferior al 1%. En el caso de considerar errores ópticos la diferencia oscila entre un 4% y 9% para errores inferiores a 3 mrad, y la diferencia tiende a disminuir al aumentar la magnitud de errores. Para 4 mrad de error la diferencia es inferior a 3%, mientras que para 5 y 6 mrad la diferencia es inferior al 1%.
- En el caso del programa utilizado en el INAOE, la validación se realizó primero con configuraciones simples, como la del espejo parabólico de revolución, y después con configuraciones de facetas múltiples que se probaron para el diseño del horno solar. La diferencia entre ambos programas osciló en alrededor del 3% tanto en las irradiancias pico como promedio. La validación se realizó sin considerar errores ópticos, debido a que dicho programa no cuenta con esta característica.

de estudio de validación experimental

- La validación experimental se realizó con datos aportados por el concentrador DEFRAC y por el horno solar de la PSA.
- En el caso de la validación con el DEFRAC, se reprodujeron tanto la irradiancia pico como el radio de la mancha solar, con un error de 4% para el conjunto; y de 6%, 3% y 1% para cada uno de los grupos de espejos que constituyen al DEFRAC.

- En el caso de la validación con el horno solar de la PSA, en el estudio se encuentran diferencias entre 1% y 2% en la irradiancia pico y en la potencia total captada en un plano receptor ubicado en foco del sistema.
- En cuanto a los datos que corresponden a planos ubicados fuera del punto focal, las diferencias teórico-experimentales se encuentran entre 1% y 2%; ya sea para la potencia total o para la potencia correspondiente a un radio que cubra el 90% de la captación. La diferencia entre los radios teórico-experimentales es de aproximadamente 3.6%.
- La irradiancia pico no puede ser comparada por el hecho de que la forma experimental de la distribución de irradiancia en un plano fuera del punto focal, se deforma significativamente respecto al caso ideal.
- Esta deformación podría estar relacionada con problemas de alineación de las facetas del sistema óptico del horno o bien con problemas relacionados con la óptica del heliostato.

del análisis paramétrico

- A partir de los estudios paramétricos con sistemas de facetas múltiples, se determinaron las condiciones de diseño que debe cumplir el horno solar. El análisis se basó en estudiar el efecto de las dimensiones de las facetas, los errores ópticos y las distancias focales, en las razones de concentración que pueden esperarse en la zona focal.
- El estudio realizado al variar las dimensiones de las facetas, muestra que el factor de concentración mejora notablemente cuando aumenta el número de ellas, reduciendo la magnitud de sus dimensiones. La cuestión en torno a reducir el tamaño de las facetas se centra entonces en determinar cuál es el número de facetas que puede construirse con los recursos disponibles y que puedan manejarse para cuestiones de mantenimiento y alineación.
- El estudio también mostró que la distancia focal óptima del sistema depende tanto de la magnitud de los errores de superficie como del tamaño de facetas considerado. La distancia focal óptima seleccionada correspondió a un sistema de aproximadamente 400 facetas de $40 \times 40 \text{ cm}^2$ y un error óptico de aproximadamente 3 mrad.
- El estudio realizado en torno a las distancias focales muestra que agrupar las distancias focales del horno no modifica significativamente el factor de concentración respecto al caso en que se utilicen distancias focales ideales para cada faceta. Si las distancias focales se ajustan a 5 grupos, la concentración pico varía en menos de 1% respecto al caso ideal.
- El uso de una distancia focal única produce una reducción en la irradiancia pico de un 10% para el estudio realizado con facetas cuadradas y de un 30% para el estudio realizado con el diseño final del horno solar del CIE.
- El efecto de los errores, en la distancia focal de las facetas, muestran que variaciones máximas de 10 cm en menos del 2% al pico de irradiancia obtenida por un sistema

concentrador de 15x15 facetas rectangulares. Si la variación máxima es de 5 cm, entonces la irradiancia varía en 0.5%. Ambas diferencias no son significativas.

del diseño óptico del horno

- En el diseño óptico del horno contempla un arreglo de 409 espejos, para alcanzar una potencia nominal en el horno de 30 KWth. El área de captación es de 39 m² y el área efectiva considerando la reflectividad del heliostato y horno es de 31.7 m².
- La estructura de soporte tendrá forma esférica con facetas hexagonales modificadas para lograr una separación mínima entre los espejos. Las facetas deben ser reorientadas para lograr una distancia focal del arreglo de 3.68 m,
- Las facetas hexagonales modificadas tienen un radio aproximado de 40 cm. Las distancias focales de las facetas se ajustaron a 5 grupos (3.75, 4.00, 4.25, 4.50 y 4.75 m).
- Si se estima que el error óptico del horno podría situarse entre 3 y 4 mrad. La distancia focal óptima, para obtener el máximo de irradiancia promedio (90% de captación). coincidirá con la distancia focal seleccionada de 3.68 m,
- El tamaño de la mancha solar, oscilará entre 8 y 10 cm. Por otro lado el máximo de irradiancia pico podrán esperarse entre 10 500 y 15 000 soles.
- Se realizó una rutina para determinar la proyección de luz del heliostato sobre las facetas del horno solar y sobre el edificio a fin de contar con una herramienta que permite obtener el tamaño óptimo del heliostato de acuerdo a los días y horas de operación que se requieren para el uso del horno a lo largo del año.
- De acuerdo con la latitud en que se ubica el CIE, el heliostato debe tener una altura vertical aproximada de 9 m y un ancho de 7.8 m. Esto garantiza entre 4 y 8 horas de operación para aproximadamente 9 meses del año. Alrededor del 21 de junio el tiempo de operación se reducen a 2 horas.

Estudios y trabajos futuros

1. Se seguirá trabajando con este programa para incorporar dos o más reflexiones para el estudio de sistemas ópticos con reconcentradotes, así como del efecto de errores de curvatura del heliostato en distribuciones de irradiancia en la zona focal.
2. En este mismo sentido, el programa tiene el potencial de simular sistemas de concentración lineal, como es el caso de concentradores de canal parabólico o de tipo fresnel. Aunque sus parámetros se han limitado a sistemas de concentración puntual, se espera poder realizar las modificaciones necesarias para modelar este tipo de sistemas.
3. En sistemas de concentración lineal, la posición del Sol modifica la proyección del cono solar en el receptor, por lo que es conveniente incorporar una rutina que calcule la posición del sol para diferentes días a lo largo del año y a diversas horas del día.

4. Se trabajará la incorporación de receptores con formas distintas al plano. Este permitirá la modelación de la irradiancia incidente en diversos dispositivos como reactores, calorímetros y radiómetros, así como receptores cilíndricos para sistemas de concentración lineal.
5. A partir de la obtención teórica de iso-superficies de irradiancia, el programa será utilizado para la obtención de iso-superficies de irradiancia para el concentrador DEFAC. Las iso-superficies serán utilizadas para la fabricación de receptores con esta forma y su estudio experimental en la plataforma solar del CIE.

Bibliografía

- Abdurakhamanov A. A. Akbarov R.Y. Gulamov K.G. et al. "Operating Experience of a Big Solar Furnace 1000kW in Power" *Applied Solar Energy*, vol 34, No. 1, 1998.
- Arqueros, F. Jimenez, A. & Valverde, A. "A novel procedure for the optical characterization of solar concentrators" *Solar Energy*, vol. 75, pp. 135-142, 2003.
- Ballestrin, J. Ulmer, S. Morales, A. et al. "Systematic error in the measurement of very high solar Irradiance" *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 80, pp. 375-381, 2003.
- Biggs, Frank and Vittitoe Charles N. "The Helios Model for the Optical Behavior of Reflecting Solar Concentrators". Sandia Report, USA, 1994.
- Bliss, Raymond W. "Notes on performance design of parabolic solar furnaces". *Solar Energy*, Volume 1, Issues 1, pp. 22-29, January 1957.
- Brenden, B. B. NewKirk H. W. & Woodcock S. H. "A study of temperature measurement in a solar furnace" *Solar Energy*, vol. 2, Issues 1, pp. 13-17, January 1958.
- Buie D., Monger A.G. and Dey C.J. "Sunshape distributions for terrestrial solar simulations" *Solar Energy* vol. 74, pp. 113-122, 2003.
- Del Arco, J.A., Müller, R., García, J.L. PSA SOLAR FURNACE DOCUMENTATION. Plataforma Solar de Almería, España, 1991.
- Duffie J. and Beckman W. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1991.
- Estrada, C.A., J.G. Cervantes, A. Oskam, F. Cruz and J. Quiñones. "Thermal and Optical Characterization of a Solar Concentrator for High Radiative Flux Studies" *Proceedings of the 1998 Annual Conference, American Solar Energy Society*. Vol 1, pages.259-266. Editado por R. Campbell-Howe, T Cortéz and B. Wilkins-Crowder ASES, USA, 1998.
- Ferriere, A. Rodriguez G. P. & Sobrino J. A. "Flux Distribution Delivered by a Fresnel Lens Used for Concentrating Solar Energy" *Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 126, pp. 654-660, February 2004.
- Friedman, R. P. Gordon J. M. & Ries H. "New High-Flux Optical Designs for Parabolic Solar Concentrators" *Solar Energy*, vol. 51, No. 5, pp. 317-325, 1989.
- German Advisory Council on Global Change. *Climate Protection Strategies for the 21st Century: Kyoto and beyond* WGGU, Berlin, 2003. <http://www.wbgu.de>
- German Advisory Council on Global Change. *World in Transition Towards Sustainable Energy Systems* WGGU, Berlin, 2003. <http://www.wbgu.de>
- Glaser, Peter E. "A solar furnace for use in applied research". *Solar Energy*, vol. 1, Issues 2-3, pp. 63-67, April-July, 1957.
- Glaser, Peter E. "Engineering research with a solar furnace" *Solar Energy*, vol. 2, Issues 2, pp. 7-10, April 1958.
- Greenpeace. *Solar Thermal Power*. Greenpeace International, 2001.
- Hecht E., Zajac A. *Óptica*. Addison-Wesley Iberoamericana. Delaware, USA, 1986.
- Heinisch R. P. Sparrow E. M. & Shamsundar N. "Radiant emission from baffled conical cavities" *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 63, 152-158, 1973.
- Hisada T., Mii H., Noguchi C., Noguchi T., Hukuo N., and Mizuno M. "Concentration of the Solar Radiation in a Solar Furnace" *Solar Energy*. Vol. 1, No. 4, pp 14-18, 1957.

- Jarosch, H. S. "Estimation of Parameters for a Solar Furnace" *Solar Energy*, vol. 43, No. 2, pp. 67-70, 1989.
- Johnston, G. Flux "Mapping the 400m² 'Big Dish' at the Australian National University". *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 117, No. 4, pp 290-293, 1995.
- Johnston G, "Focal Region Measurements of the 20 m² Tiled Dish at the Australian National University". *Solar Energy* 1998. 63(2): 117-24.
- Jose, Paul D. "The design of the heliostat mirror for a solar furnace" *Solar Energy*, Volume 1, Issues 2-3, pp. 23-27, April-July 1957.
- Kevane, C. J. "Construction and operation of the Arizona State College solar furnace". *Solar Energy*, vol. 1, Issues 2-3, pp. 99-101, April-July 1957.
- Laherrere. Jean. "Petrotech 2003 Hydrocarbon Ressources". 9 de enero de 2003 <http://www.hubbertpeak.com/LaHerrere/Petrotech090103.pdf>
- Lando, M. et al. "An astigmatic corrected target-aligned solar concentrator" *Optics Communications*, 180, pp 127-132, 2000.
- Loh, Eugene et al. "Heat flux measurements at the sun image of the California institute of technology lens-type solar furnace" *Solar Energy*, vol. 1, Issues 4, pp. 23-26, October 1957.
- Monterreal, R. *Test Installation Documentation for Testing at PSA*. Ref. Doc.: PSACIEMAT01-2005. Work Package 5.3. Deliverable 5.4.
- Neumann, A. and Groer, U. "Experimenting with concentrated sunlight using the DLR solar furnace" *Solar Energy*, vol. 58, Issues 4-6, pp. 181-190, October-December 1996.
- Neumann, A. and Witzke, A. "The influence of sunshape on the DLR solar furnace beam" *Solar Energy*, vol. 66, Issues 6, pp. 447-457, 1999.
- Pérez-Rábago et al. "Heat Transfer in a Conical Cavity Calorimeter to Measure the thermal Power of a Point Focus Concentrator". EUROSUN 2004, Freiburg, Germany. June 20-23, 2004.
- Ries, Harald and Schubnell, Markus. "The optics of two-stage solar furnace" *Solar Energy Materials*, vol. 21, pp. 213-217, 1990.
- Plataforma Solar de Almería. *Informe anual 2006*. Ciemat, España, 2006.
- Quiñones, J. "Caracterización óptica del dispositivo para el estudio de flujos radiativos concentrados". Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, FES Cuatitlán. 1998
- Riveros-Rosas, D. "Computer ray-tracing method for a 19 mirror solar energy concentrator". CAM 94, Cancun, QR. México. Septiembre 26 al 30, 1994.
- Riveros H., Oliva I. "Graphical Analysis of Sun Concentrating Collectors". *Solar Energy* vol. 4 No. 4. 1986.
- Riveros-Rosas, D. "Curvas de distribución de energía de un concentrador solar de 19 espejos parabólicos" Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1996.
- Robinson N. *Solar Radiation*. Elsevier. Amsterdam, 1966.
- Romero M, Reiner B and Pacheco J, "An Update on Solar Central Receiver Systems, Projects and Technologies" *Journal of Solar Energy Engineering*. 124(May): 98-107, 2002
- Romero, Vicente J. "CIRCE2/DEKGEN2: A Software Package for Facilitated Optical Analysis of 3-D Distributed Solar Energy Concentrators". Sandia Report, USA, 1984
- Rosen J. "Solar Furnaces: Concentrating 100,000 Suns" *Mechanical Engineering*, vol. 42, February, 1991.

- Schramek, P., Mills D.R., Stein W. & Le Lièvre P. "Design of the Heliostat Field of the CSIRO Solar Tower". SolarPACES 2006, Sevilla, Spain. June 20, 2006.
- Schubnell, M. "Sunshape and its influence on the flux distribution in imaging solar concentrators" *Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 113, pp. 112-116, May 1991.
- Schubnell, M., M. Kelle J, and Imhof A "Flux Density Distribution in the Focal Region of a Solar Concentrator System" *Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 113, pp. 112-116, May 1991.
- Sparrow, E. M. Heinisch R. P. & Shamsundar, N. "Apparent Hemispherical Emittance of Baffled Cylindrical Cavities" *Journal of Heat Transfer*, vol. 96, pp. 112-114, 1974.
- Sparrow, E. M. and Jonson, V. K. "Radiant Emission Characteristics of Diffuse Conical Cavities" *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 53, 1963.
- Steinfeld, A. & Schubnell, M. "Optimum Aperture Size and Operating Temperature of solar cavity-receiver" *Solar Energy*, vol. 50, No. 1, pp 19-25, 1993.
- Stine, W. & Diver, R. "A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology". Sandia National Laboratories. USA, 1994.
- Suresh D. et al. "Use of Solar Furnaces-I" *Solar Energy*, vol. 26, pp. 377-390, 1981.
- Trombe, Felix & Le Phat Vinh, Albert "Thousand kW Solar Furnace, Built by the National Center of Scientific Research, in Odeillo (France)" *Solar Energy*, vol. 15, pp. 57-61, 1973.
- Ulmer, S. Reinalter W, Heller P, Lüpfer E, and Martinez D "Beam Characterization and Improvement with a Flux Mapping System for Dish Concentrators" *Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 124, pp. 182-188, May 2002.
- Zarza Moya E., Sánchez González M. y Téllez Sufrategui F.M. "3.2 Estado del arte de las plantas solares termoleéctricas" *Energía*, No. 187, edición especial, 2005.