

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA



TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL

ESPECIALIDAD: MECÁNICA

DISEÑO DE LA GEOMETRÍA ÓPTICA DE UN ESPEJO
CONCENTRADOR FACETADO PARA UN HORNO SOLAR DE
EJE VERTICAL Y CANTEO FINAL DE FACETAS.

Alumno: Rubén Ortega Sánchez.

Directores: Alejandro López Martínez.
José Rodríguez García.

Almería, Julio 2011.

ÍNDICE GENERAL

1.- Interés y objetivos.	1
1.1.- Interés.	2
1.2.- Objetivos.	3
2.- Revisión bibliográfica.	4
2.1.- Introducción.	5
2.2.- La PSA como gran instalación solar.	8
2.2.1.- Descripción general de la PSA.	9
2.2.2.- Datos generales.	11
2.2.3.- Estructura funcional.....	12
2.2.4.- Entorno de colaboración.....	13
2.3.- Funcionamiento general del horno.	13
2.4.- Tipos de hornos solares.	14
2.5.- Seguimiento solar.	15
2.6.- Aplicaciones.	16
2.7.- Otros hornos solares.	18
2.7.1.- Horno Solar de Sandia National Laboratories.	18
2.7.2.- Horno Solar de National Renewable Energy Laboratories (NREL).	19
2.7.3.- Horno Solar del Paul Sherrer Institute (PSI).....	20
2.7.4.- Horno Solar del DLR.	21
2.7.5.- Hornos solares de Odeillo.	22
3.- Material y métodos.	25
3.1.- Principales componentes del horno solar de eje vertical.	26
3.1.1.- Helióstato.	26
3.1.2.- Concentrador.	28
3.1.3.- Errores de las superficies reflectantes.	31
3.1.4.- Atenuador.	34
3.1.5.- Mesa de ensayos.	36
3.1.6.- Sistema de adquisición de datos y control.	37

3.2.- Métodos.	37
3.2.1.- Determinación de la posición bidimensional del centro de las facetas 'x, y'.	37
3.2.2.- Cálculo de la cota 'z' del centro de cada faceta para las superficies de focal 2 m... 38	38
3.2.3.- Cálculo de los vectores normales de orientación de cada faceta..... 40	40
3.2.4.- Simulación y comparación de las superficies de focal 2 m. 41	41
3.2.5.- Optimización y comparación de las superficies de focal 2 m. 42	42
3.2.6.- Comparación y comprobación de los datos obtenidos para las superficies optimizadas..... 43	43
3.2.7.- Simulación desplazando el foco para las superficies optimizadas. 44	44
3.2.8.- Desarrollo de la superficie parabólica estimada como óptima. 44	44
3.2.9.- Elección de la técnica de canteo..... 45	45
3.2.10.- Desarrollo del protocolo para la técnica de canteo. 46	46
4.- Resultados y discusión.	48
4.1.- Cotas 'z' y distancias 'R' de las facetas para las superficies de focal 2 m..... 49	49
4.2.- Vectores directores de las facetas para las superficies de focal 2 m..... 50	50
4.3.- Simulación de las superficies de focal 2 m..... 52	52
4.4.- Optimización de las superficies de focal 2 m..... 56	56
4.5.- Simulación y comparación de las superficies optimizadas. 56	56
4.6.- Comprobación de las superficies optimizadas..... 60	60
4.7.- Simulación y comparativa para diferentes posiciones del foco. 61	61
4.8.- Características obtenidas para el concentrador seleccionado..... 68	68
4.9.- Coordenadas de canteo para el concentrador seleccionado..... 70	70
5.- Conclusiones.	73
6.- Bibliografía	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El Sol.	5
Figura 2. Espectro visible.	6
Figura 3. Instalaciones PSA.	9
Figura 4. Radiación en España.	10
Figura 5. Sectores PSA.	11
Figura 6. Tipos de hornos solares.	15
Figura 7. Esfera celeste.	16
Figura 8. Horno Solar de Sandia National Laboratories.	19
Figura 9. Horno Solar de NREL.	20
Figura 10. Horno Solar del PSI.	21
Figura 11. Horno Solar del DLR.	22
Figura 12. Horno Solar 6 kW de Odeillo.	23
Figura 13. Horno Solar 2 kW de Odeillo.	23
Figura 14. Horno Solar 1000 kW de Odeillo.	24
Figura 15. Helióstato.	27
Figura 16. Concentrador.	30
Figura 17. Aberración esférica.	32
Figura 18. Coma.	32
Figura 19. Astigmatismo.	33
Figura 20. Atenuador.	35
Figura 21. Mesa de ensayos.	36
Figura 22. Numeración de las facetas.	38
Figura 23. Distribución de la radiación concentrada por la superficie esférica de focal 2 m.	53
Figura 24. Distribución de la radiación concentrada por la superficie parabólica de focal 2 m.	53
Figura 25. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie esférica de focal 2 m.	54
Figura 26. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie esférica de focal 2 m subdivididas en elementos finitos.	55
Figura 27. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie parabólica de focal 2 m.	55
Figura 28. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie parabólica de focal 2 m subdivididas en elementos finitos.	56
Figura 29. Distribución de la radiación concentrada por la superficie esférica optimizada.	57
Figura 30. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie esférica optimizada.	57
Figura 31. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie esférica optimizada subdivididas en elementos finitos.	58
Figura 32. Distribución de la radiación concentrada por la superficie parabólica optimizada.	58
Figura 33. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie parabólica optimizada.	59

Figura 34. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie parabólica optimizada subdivididas en elementos finitos.	59
Figura 35. Comprobación de la focal optimizada.	61
Figura 36. Radiación pico (kW/m ²) en función del desplazamiento del foco de las superficies optimas (m).....	62
Figura 37. Gaussiana superficie esférica.....	63
Figura 38. Gaussiana superficie parabólica.....	64
Figura 39. Distribución de la radiación concentrada por la superficie esférica optimizada (con el foco desplazado 50 mm).	65
Figura 40. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie esférica optimizada (con el foco desplazado 50 mm).....	66
Figura 41. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie esférica optimizada (con el foco desplazado 50 mm) subdivididas en elementos finitos.	66
Figura 42. Distribución de la radiación concentrada por la superficie parabólica optimizada (con el foco desplazado 50 mm).	67
Figura 43. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie parabólica optimizada (con el foco desplazado 50 mm).	67
Figura 44. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie parabólica optimizada (con el foco desplazado 50 mm) subdivididas en elementos finitos.	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas 'x, y' de los centros de las facetas del concentrador (mm).	38
Tabla 2. Resultados de la simulación de las superficies de focal 2 m.	41
Tabla 3. Resultados de la optimización de las superficies de focal 2 m.	42
Tabla 4. Cotas 'z' y distancias 'R' de las facetas para las superficies de focal 2 m.	49
Tabla 5. Vectores directores de las facetas para las superficies de focal 2 m.	50
Tabla 6. Radiación pico obtenida en la simulación para las superficies de focal 2 m.	52
Tabla 7. Radiación pico de las superficies optimizadas.	56
Tabla 8. Radiación pico de la superficie esférica optimizada.	57
Tabla 9. Radiación pico de la superficie parabólica optimizada.	58
Tabla 10. Comparativa de las radiaciones pico de las superficies optimizadas.	60
Tabla 11. Comprobación de la focal optimizada.	60
Tabla 12. Radiación pico para diferentes posiciones del foco.	62
Tabla 13. Datos concentrador de focal 1.025 m y foco a 2 m del vertice.	68
Tabla 14. Coordenadas de canteo para la superficie seleccionada.	70

1.- Interés y objetivos

1.1.- Interés.

El proyecto “Diseño de la Geometría Óptica de un Espejo Concentrador Faceteado para un Horno Solar de Eje Vertical y Canteo Final de Facetas” tiene por finalidad, como su nombre indica, el diseño de la geometría óptima del concentrador de un horno solar de eje vertical (HS5) de muy alta concentración, así como el desarrollo de una técnica de orientación de las facetas que lo componen que satisfaga las necesidades del sistema.

El motivo de llevar a cabo dicha investigación, consiste en la reciente instalación de un horno solar de este tipo en la Plataforma Solar de Almería, por lo que es necesario desarrollar un estudio pormenorizado de todo lo relacionado con los componentes del horno en cuestión. Aunque el proyecto se centra exclusivamente en la geometría del espejo concentrador y en el canteo de las facetas que lo componen.

El motivo de la instalación de este tipo de horno solar en la Plataforma Solar de Almería, se debe a que en sus instalaciones ya cuentan con dos hornos solares de eje horizontal, pero no contaban hasta ahora con ninguno de eje vertical, lo que es necesario para poder llevar a cabo cierto tipo de ensayos que con los horizontales no sería posible con una calidad óptima.

La principal ventaja de los hornos verticales, consiste en que permiten realizar ensayos en los que se produzca la fusión superficial de la muestra sin que el material se desprenda por efecto de la gravedad, ya que en este caso las muestras se colocan en posición horizontal y no en vertical como en los hornos horizontales.

Esto sólo sería posible en un horno de eje horizontal introduciendo otra superficie de reflexión en el foco, entre el concentrador y la mesa de ensayos, para redirigir la luz concentrada en dirección vertical hacia la muestra, lo que supone una mayor pérdida de radiación debida a las múltiples reflexiones.

La composición de ambos hornos es prácticamente la misma, pero la instalación y puesta en funcionamiento del horno de eje vertical presenta más dificultades que el de eje horizontal, ya que el concentrador va instalado en una torre a 18 m de altura enfocado hacia el suelo, lo que reduce y dificulta las técnicas de canteo disponibles para orientar sus facetas y conseguir la geometría óptica deseada.

1.2.- Objetivos.

El objetivo principal del trabajo que se presenta, es el de llevar a cabo la calibración y puesta a punto del concentrador del horno solar de eje vertical, recientemente instalado en la PSA.

Para la consecución del objetivo principal, se han planteado los siguientes objetivos secundarios:

- Determinar el diseño de la geometría óptica que optimice el rendimiento del concentrador. Para lo que se van a estudiar dos geometrías posibles, en esfera y en paraboloides, mediante programas de simulación y optimización que nos ayudaran a determinar con cual de las dos podemos conseguir una mayor concentración en el plano focal.
- Determinar la técnica de canteo de facetas más adecuada para la geometría elegida. Para lo que se realizará un estudio de las técnicas de canteo de facetas empleadas con anterioridad en la PSA para otros concentradores, teniendo en cuenta aspectos como disponibilidad de instrumentación, complejidad del procedimiento, recursos humanos, espacio de maniobra, etc.
- Elaborar un protocolo detallado de la técnica desarrollada, para que pueda ser ejecutada por parte del personal de la plataforma ajeno al proyecto.

2.- Revisión bibliográfica

2.1.- Introducción.

El sol es la estrella más cercana a la tierra y está catalogada como una estrella enana amarilla (Fig. 1), por efecto gravitacional de su masa domina el sistema planetario que incluye a la Tierra. Mediante la radiación de su energía electromagnética, aporta directa o indirectamente toda la energía que mantiene la vida en la Tierra, todo el alimento y el combustible proceden en última instancia de las plantas, que utilizan la energía de la luz del Sol para desarrollarse.

La energía radiante producida en el Sol, es el resultado de reacciones nucleares de fusión. Esta energía llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones (paquetes de energía con dualidad onda-corpúsculo), que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres (Honoré, 1987). Sus regiones interiores son totalmente inaccesibles a la observación directa y es allí donde se alcanzan temperaturas de unos 20 millones de grados, necesarios para producir las reacciones nucleares que producen su energía (Cabirol, 1989).

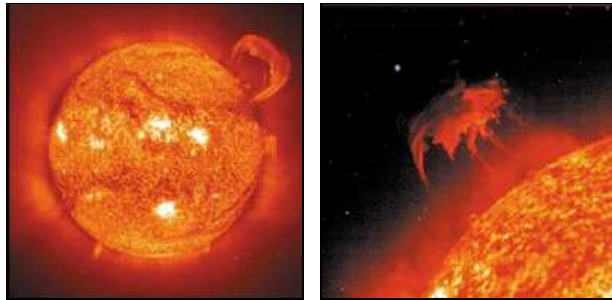


Figura 1. El Sol.

La capa más externa que es la que produce casi toda la radiación observada, se llama fotosfera y alcanza una temperatura de 6000 °K, con una anchura de entre 200 y 300 km. Por encima de ella está la cromosfera con una anchura de unos 15000 Km. Más exterior aún se encuentra la corona solar, una parte muy tenue y caliente que se extiende varios millones de kilómetros y que sólo es visible durante los eclipses solares totales. (Cabirol, 1989).

La radiación solar se distribuye desde infrarrojo hasta ultravioleta (Fig. 2). No toda la radiación alcanza la superficie de la tierra, pues las ondas ultravioletas, más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera, fundamentalmente por el ozono.

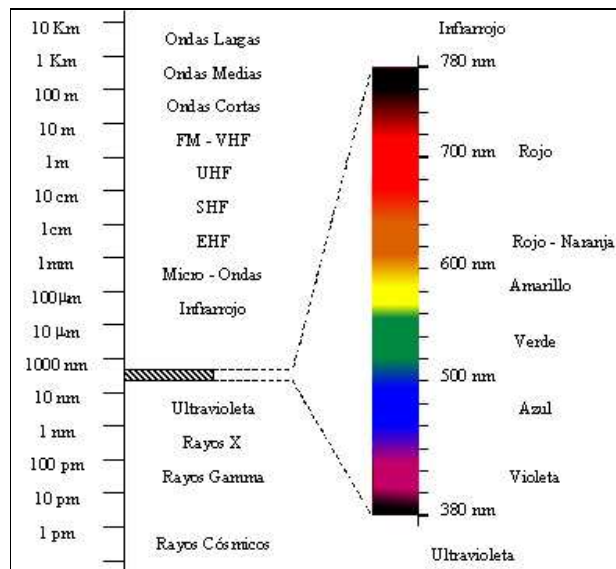


Figura 2. Espectro visible.

La atmósfera de la tierra constituye un importante filtro que hace inobservables radiaciones de longitud de onda inferior a los $0.29 \mu\text{m}$, por la fuerte absorción del ozono y oxígeno, ello nos libra de la radiación ultravioleta más peligrosa para la salud.

La atmósfera es opaca a toda radiación infrarroja de longitud de onda superior a las 24 micras, lo que no afecta a la radiación solar, pero si a la energía emitida por la tierra que llega hasta las $40 \mu\text{m}$ y que es absorbida. A este efecto se le conoce como efecto invernadero. (Reyes Bonacasa, 1990).

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la tierra es la irradiancia, que mide la energía que, por unidad de área, alcanza a la tierra. Su unidad es el W/m^2 .

La potencia de la radiación varía según el momento del día debido a las condiciones atmosféricas que la amortiguan y a la latitud. Se puede asumir que en buenas condiciones de irradiación el valor es de aproximadamente $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ en la superficie terrestre. (Monterreal, 2004).

La radiación es aprovechable en sus componentes directa y difusa, o en la suma de ambas. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres.

La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones. La

irradiancia directa normal fuera de la atmósfera, recibe el nombre de constante solar y tiene un valor medio de 1354 W/m^2 . (Honoré, 1987).

La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el sol. La radiación solar que alcanza la Tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce, como también a través de la absorción de la radiación.

Es una de las llamadas energías renovables particularmente del grupo no contaminante, conocido como energía limpia o energía verde. Encontrar recursos energéticos casi inagotables, baratos y no contaminantes, ha sido un afán del hombre a lo largo de la historia.

El sol se ha usado desde antiguo para obtener alta temperatura, Arquímedes en el siglo III AC incendio las naves romanas concentrando la radiación solar en los barcos con un gran número de espejos planos, posteriormente y aún en tiempos del imperio romano se produjeron otros ejemplos del uso de radiación solar concentrada como arma de guerra, y ya en la Edad Moderna, a principios del siglo XVIII, en Inglaterra, Francia y Alemania se fundieron metales y otros materiales mediante una lente de cristal. (Reyes Bonacasa, 1990).

Los primeros intentos de usar hornos solares en la industria comenzaron en 1935, pero a pesar de las ventajas que presentan no han conseguido imponerse debido, en parte, a los siguientes motivos:

- La inversión inicial es muy alta.
- Funcionamiento intermitente debido a la propia naturaleza de la radiación solar.
- Los hornos solares alcanzan muy alta temperatura en un área muy pequeña, y el gradiente de temperaturas en el foco es muy alto. (del Arco J. A. *et al.*, 1991).

El primer horno solar se construyó en Odeillo, en los Pirineos franceses, en la década de los 50, y está compuesto básicamente por un gran espejo parabólico de 1830 m^2 y 56 helióstatos planos situados en la ladera de una colina, de tal manera que cada helióstato cubre una pequeña porción del paraboloide. (Rodríguez, 2006).

Los hornos solares son sistemas ópticos que concentran la radiación solar en un área pequeña en la que se pueden alcanzar muy altas temperaturas y flujos energéticos. Estos sistemas son ideales para el estudio de las propiedades ópticas, químicas, eléctricas y termodinámicas de materiales a alta temperatura, tales como estudios de fase y vaporización, fundido, purificación y estabilización de materiales

cerámicos y refractarios, crecimiento de cristales, calor específico, conductancia térmica, etc. (Garg y Prakash, 2000).

Los hornos solares se pueden considerar como fuentes naturales de radiación solar concentrada que, por su tamaño, se emplean principalmente en la realización de ensayos de materiales y experimentos de química solar a escala de laboratorio o para llevar a cabo ensayos preliminares a pequeña escala que sirvan de base para ensayos posteriores a escala industrial. (Rodríguez, 2006).

En general son instalaciones pequeñas con gran facilidad de acceso, lo que permite modificaciones simples en el área de ensayos para el intercambio de experimentos. Todo esto unido a un mínimo equipo de laboratorio, los convierten en una herramienta muy versátil con la que pueden realizarse gran variedad de ensayos.

Estos sistemas logran los máximos niveles de concentración alcanzables en instalaciones solares de concentración (del orden de decenas de miles de soles, 1 sol = 1000 W/m²), muy por encima de los conseguidos en cualquier otro sistema de concentración solar. (Monterreal, 2004).

Las principales ventajas de los hornos solares son:

- Alto flujo radiante (pueden alcanzarse temperaturas de 3500 °K).
- Calentamiento sin contaminación.
- Sistemas comparativamente simples.
- Observación continua de las muestras. (del Arco J. A. *et al.*, 1991).

Otros equipos de alta temperatura (mayor de 2000 °C), como los hornos de inducción y arco, o la antorcha de plasma, en diversas atmósferas, se usan en el tratamiento y estudio de materiales. En todos estos equipos es muy difícil evitar la contaminación de las muestras. (Rodríguez, 2006).

2.2.- La PSA como gran instalación solar.

Las características de las instalaciones de la PSA, que se detallan a continuación, se han consultado en la página web oficial de la PSA.

2.2.1.- Descripción general de la PSA.

La historia de la plataforma solar de Almería como centro de pruebas e investigación de tecnología solar, comenzó en 1981 con los proyectos Small Solar Power Systems (SSPS) y la planta de energía solar CESA-I.

La PSA está situada en el sudeste de España, en el desierto de Tabernas a 37° 05' 27.8" Latitud Norte y 2° 21' 19" Latitud Oeste (Fig. 3). Recibe una insolación directa anual por encima de los 1900 kWh/(m²·año) y la temperatura media anual está en torno a los 17 °C.



Figura 3. Instalaciones PSA.

La capacidad que tiene la PSA de ofrecer a los investigadores una localización de características climáticas y de insolación similares a las de los países en vías de desarrollo de la franja ecuatorial (donde radica el mayor potencial de energía solar) (Fig. 4), pero con todas las ventajas propias de los países europeos más avanzados, la convierten en un lugar privilegiado para la evaluación, la demostración y la transferencia de las energías solares.

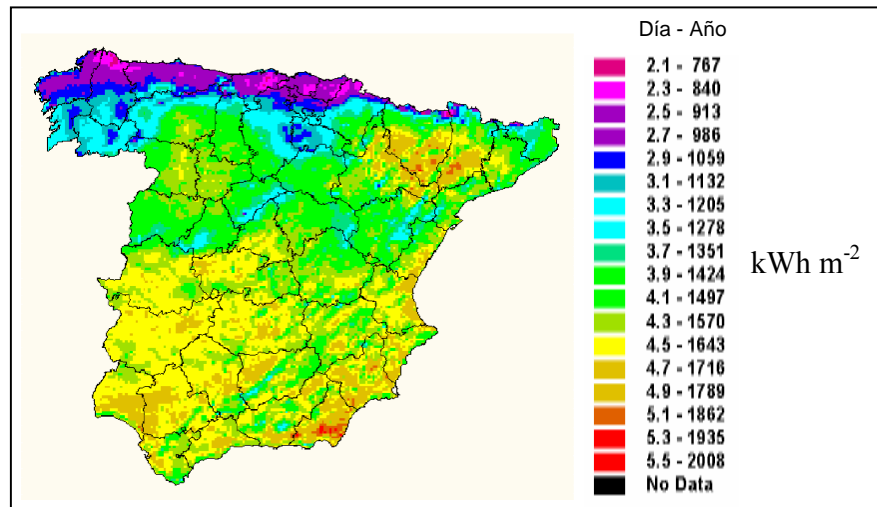


Figura 4. Radiación en España.

En la actualidad, las principales instalaciones de ensayos disponibles en la PSA son (Fig. 5):

- Los sistemas de receptor central CESA-1 y SSPS-CRS de 7 y 2.7 MWt, respectivamente.
- El sistema de colectores cilindro-parabólicos SSPS-DCS de 1.2 MWt, que tiene asociado un sistema de almacenamiento térmico y una planta de desalinización de agua.
- El lazo de ensayos DISS de 1.8 MWt, que constituye un excelente sistema para la investigación del flujo bifásico y la generación directa de vapor para producción de electricidad.
- El lazo de ensayos HTF, dotado de un completo circuito de aceite que permite la evaluación de nuevos componentes para colectores cilindro-parabólicos.
- El lazo de tecnología 'Fresnel lineal', denominado FRESDEMO.
- El sistema de colectores cilindro-parabólicos denominado 'Lazo de Ensayos para Fluidos Innovadores'.
- Una instalación con 6 sistemas disco-Stirling denominado DISTAL.
- Un horno solar de 60 kWt para procesos de tratamiento térmico de materiales.
- Un horno solar de 70 kWt para procesos termoquímicos a alta temperatura.

- Una instalación múltiple para aplicaciones de destoxificación solar, compuesta de un lazo de colectores cilindro-parabólicos con seguimiento en dos ejes y tres lazos de motorreactores tipo CPC, para la realización de diferentes tipos de ensayos.
- El Laboratorio de Ensayo Energético de Componentes de la Edificación (LECE).
- El edificio ARFRISOL, parte integrante del 'Proyecto Singular Estratégico' del mismo nombre, y que es un contenedor-demostrador de las más avanzadas tecnologías para el ahorro y la eficiencia energética en la edificación.
- Una estación meteorológica integrada en la 'Baseline Surface Radiation Network' (BSRN).

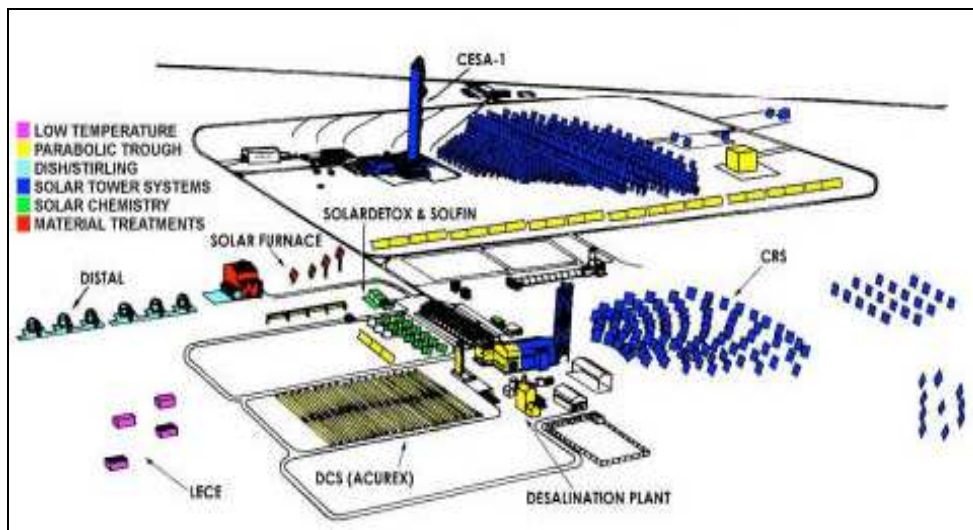


Figura 5. Sectores PSA.

2.2.2.- Datos generales.

La Plataforma Solar de Almería (PSA), perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), es el mayor centro de investigación, desarrollo y ensayos de Europa dedicado a las tecnologías solares de concentración y desarrolla sus actividades integrada como una división de I+D dentro de la estructura del departamento de energía del CIEMAT.

Los objetivos que inspiran su actividad investigadora son los siguientes:

- Contribuir al establecimiento de un esquema de suministro energético mundial limpio y sostenible.
- Contribuir a la conservación de los recursos energéticos de Europa y a la protección de su clima y medio ambiente.
- Promover la introducción en el mercado de las energías termosolares y las derivadas de los procesos de química solar.
- Contribuir al desarrollo de una industria termosolar española exportadora y competitiva.
- Reforzar la cooperación entre el sector empresarial y las instituciones científicas en el campo de la investigación, el desarrollo, la demostración y el marketing de las tecnologías termosolares.
- Potenciar innovaciones tecnológicas orientadas a la reducción de costes que contribuyan a incrementar la aceptación en el mercado de las tecnologías termosolares.
- Promover la cooperación tecnológica Norte-Sur, especialmente en el Área Mediterránea.
- Apoyar a la industria en la identificación de oportunidades de mercado relacionadas con las tecnologías termosolares.

2.2.3.- Estructura funcional.

Desde el año 2004, la actividad investigadora que se lleva a cabo en la Plataforma Solar de Almería está estructurada en torno a dos unidades de I+D:

- Unidad de sistemas solares de concentración.
- Unidad de aplicaciones medioambientales de la energía solar.

La primera está dedicada al estudio y desarrollo de nuevas y más eficientes tecnologías para producir electricidad por medios termosolares, mientras que la segunda tiene por objeto explorar las posibles aplicaciones químicas de la energía solar, sobre todo en lo que se refiere a su potencial para la destoxificación, desalación y desinfección de aguas.

En los últimos años está adquiriendo fuerza una nueva línea de investigación denominada Hidrógeno Solar y Procesos Industriales, esta línea de trabajo trata la aplicación de la energía solar concentrada a procesos no eléctricos, como la producción

de hidrógeno (que será el vector energético del futuro), o calor para procesos industriales que ocurren a altas temperaturas.

2.2.4.- Entorno de colaboración.

La PSA es objeto desde el año 1987 de un convenio de colaboración hispano-alemán, concretamente entre el CIEMAT y el DLR (Instituto de Investigación Aeroespacial Alemán), habitualmente conocido como el CHA. Dicho convenio recoge el compromiso de mantener una delegación permanente del DLR en la PSA durante los años 2009 a 2011.

El entorno de colaboración en que se mueve la PSA es notablemente amplio. En el ámbito internacional, la PSA participa activamente en el programa 'SolarPACES' (Solar Power and Chemical Energi Systems) de la Agencia Internacional de la Energía, donde se intercambia información y se realizan tareas a costes compartidos con centros homólogos en varios países (EEUU, México, Italia, Alemania, Francia, Suiza, Comisión Europea, Sudáfrica, Israel, Argelia, Corea del Sur, Austria y Egipto).

Por otro lado, la PSA-CIEMAT es miembro fundador del 'Laboratorio Asociado Europeo de Energía Solar' (SoLAB). Este laboratorio virtual está constituido por los principales institutos europeos de investigación en energía solar concentrada, es decir: el PROMES-CNRS de Odeillo (Francia), la división de energía solar del DLR en Colonia (Alemania), el laboratorio de energías renovables del Instituto Tecnológico Federal de Zürich (Suiza), el Paul Scherrer Institut (Suiza) y el propio CEMAT.

Más próximo geográficamente, se mantiene una continuada e intensa colaboración con la Universidad de Almería (UAL), consolidándose en la creación de un centro mixto para la investigación conjunta de aplicaciones de la energía solar, CIESOL, que consiste en un edificio de laboratorios que se inauguró el 16 de diciembre de 2006.

2.3.- Funcionamiento general del horno solar de eje vertical.

El horno solar es un sistema diseñado para la consecución de altas densidades de energía, con el fin de cubrir todo el campo de investigación sobre energía solar concentrada. (Rodríguez *et al.*, 2001).

Su funcionamiento consiste en que un espejo captador plano (helióstato), refleja los rayos solares de forma vertical y paralelos, en dirección a un disco parabólico

(concentrador) enfocado hacia el suelo, el cual los vuelve a reflejar concentrándolos en su foco (área de ensayos).

La cantidad de luz incidente se regula mediante un atenuador (shutter) situado entre el concentrador y el helióstato. En el área focal se encuentra una mesa de ensayos que sirve para posicionar las probetas en el foco.

Todos los componentes del horno serán analizados con detalle más adelante, en el apartado 3.1. Material.

2.4.- Tipos de hornos solares.

Los hornos solares se pueden clasificar según su funcionamiento en: hornos de incidencia directa (sólo concentrador que hace el seguimiento solar), y de tipo helióstato (concentrador fijo y helióstato que hace el seguimiento solar) (Fig. 6). (Rodríguez, 2006).

Los de incidencia directa pueden ser de lente simple, de lente múltiple y de reflector parabólico. Los concentradores parabólicos se pueden hacer de gran tamaño (faceteados), de metal estirado, plástico o fibra de vidrio.

En los hornos solares de tipo directo se obtienen los más altos flujos, pero tanto el concentrador como la muestra se mueven siguiendo el movimiento aparente del sol, componiendo un sistema poco práctico y difícil de usar. Por el contrario en los hornos solares de tipo helióstato, el concentrador parabólico y la muestra permanecen estáticos y accesibles, mientras que el helióstato se encarga del seguimiento del sol y de reflejar los rayos solares al concentrador parabólico, que a su vez los concentra en su foco donde se encuentra la muestra, conformando así un sistema mucho más práctico.

Los hornos solares de tipo helióstato presentan algunas desventajas como:

- Son más caros.
- Hay más pérdidas de radiación debidas a las múltiples reflexiones.
- Requieren más mantenimiento. (del Arco J. A. *et al.*, 1991).

Estos hornos se pueden clasificar en hornos de eje óptico horizontal y hornos de eje óptico vertical. Entre estos, los de eje óptico horizontal son los más extendidos, sobre todo para tamaños mayores, si bien los de eje vertical tienen la ventaja de que en ellos

se pueden llevar a cabo experimentos en los que se produce fusión superficial de las muestras sin pérdidas de material.

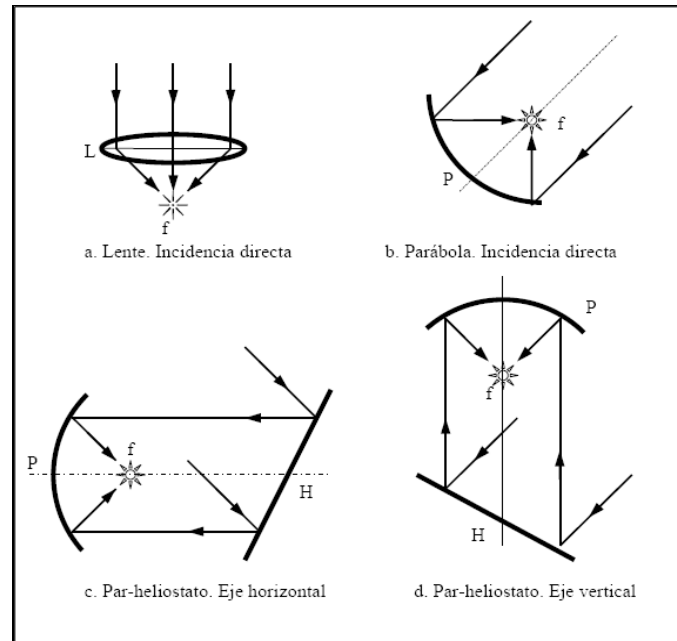


Figura 6. Tipos de hornos solares.

Están compuestos básicamente por uno o más espejos captadores planos (helióstatos) que hacen seguimiento solar continuo (Trucking), un espejo parabólico concentrador y la zona de ensayos situada en el foco del concentrador.

La instalación se completa con el atenuador que sirve para regular la cantidad de luz que llega al concentrador y con la mesa de ensayos que se utiliza para posicionar en el foco, con la máxima precisión, los materiales a ensayar.

2.5.- Seguimiento solar.

El concentrador, en un horno solar de incidencia directa, y el helióstato, en los hornos de tipo helióstato, hacen el seguimiento del movimiento aparente del sol, y para ello hay diferentes métodos para conseguirlo. El seguimiento manual, el seguimiento "astronómico", el seguimiento mediante servos y el seguimiento mediante algoritmo y autómatas PLC. (Rodríguez, 2006).

En cuanto al seguimiento manual podemos descartarlo por impreciso y poco práctico. El método astronómico consiste en instalar el concentrador en un montaje ecuatorial y su movimiento es controlado por un motor paso a paso que se mueve siguiendo el movimiento aparente del sol. Con este método es necesario ajustar la declinación (δ) manualmente al menos una vez al día. (Fig. 7)

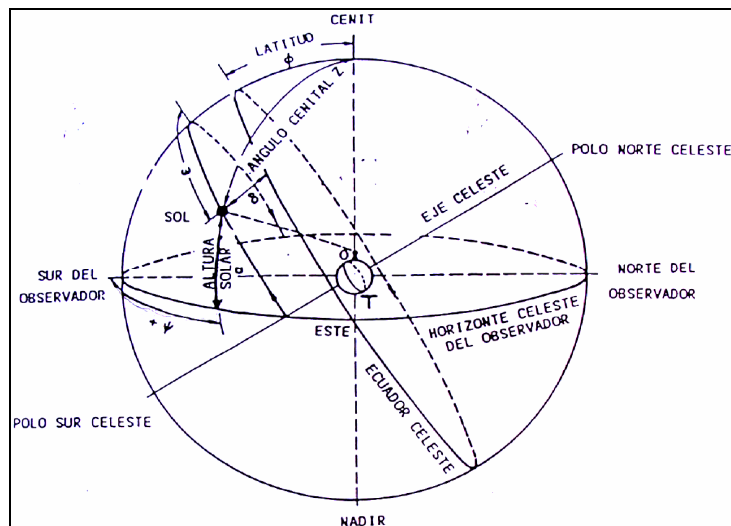


Figura 7. Esfera celeste.

En el seguimiento mediante servos, el concentrador va provisto de cuatro fotocélulas que detectan cualquier desviación de la posición solar y activan los motores de azimut (Ψ) y elevación (α) del concentrador en la dirección adecuada, para posicionarlo de forma que reciba la luz solar paralela al eje óptico del concentrador.

Por último tenemos los sistemas controlados mediante algoritmo de control y autómatas PLC que son los más precisos, hacen seguimiento en dos ejes, azimut (Ψ) y elevación (α), y son los más empleados actualmente.

2.6.- Aplicaciones.

La gran variedad de nuevas aplicaciones que la energía solar ofrece, ha impulsado durante los últimos años el diseño y la construcción de hornos solares para la realización de experimentos físicos y químicos, y la investigación en ciencia de los materiales.

Este tipo de instalaciones por sus especiales características de trabajo en ambientes limpios, se convierten en la mejor opción para llevar a cabo calentamientos rápidos de cualquier tipo de material.

Debido a ello, la investigación se ha dirigido fundamentalmente al estudio de los fenómenos de interacción entre fotones y moléculas, así como al tratamiento de materiales clasificados como estratégicos o avanzados y de aplicación final en atmósferas hostiles y extremas. (Rodríguez *et al.*, 2001).

También se usan en el estudio del comportamiento de materiales que son sometidos a tensiones térmicas durante su uso, como puede ser la determinación del umbral de fallo de materiales refractarios y cerámicos a alta temperatura.

En el campo de la metrología, se utilizan para la medida de los parámetros térmicos y de las propiedades termo-físicas de materiales sometidos a radiación solar intensa, como el calor específico, dilatación, conductividad y difusividad térmica, características mecánicas, emisividad y absorción espectral.

Además los hornos solares tienen aplicación en problemas complejos en los que las tensiones térmicas están asociadas a otros comportamientos, como la gasificación de combustibles sólidos y biomasa, destrucción de residuos químicos peligrosos y la simulación de los efectos térmicos en materiales después de una explosión nuclear o el ensayo de células fotovoltaicas de concentración. (Rodríguez *et al.*, 2001).

Actualmente, el horno solar de la PSA esta orientado hacia dos líneas básicas de investigación en el tratamiento de materiales: la aplicación de radiación solar concentrada directa en el tratamiento superficial de materiales y la aplicación de calor solar de proceso al tratamiento de materiales y residuos contaminantes.

El horno solar horizontal es la instalación con más alta concentración de la Plataforma Solar de Almeria, con un flujo pico en el foco de 3000 kW/m^2 . Esto es debido a las propiedades geométricas de la parábola, por la que todos los rayos que le llegan paralelos a su eje óptico los concentra en el punto focal. (Rodríguez, 2006).

La luz solar reflejada por los 100 m^2 del paraboloide es concentrada en su foco en un círculo de aproximadamente 25 cm de diámetro, lo que permite alcanzar los altos flujos que se consiguen en el horno.

Desde su inauguración el horno solar se ha dedicado principalmente al tratamiento superficial de materiales, tanto metálicos como cerámicos. Algunos de los tratamientos que se llevan a cabo son: temple, sinterización, nitruración, recubrimientos,

carburización, espumación, etc. En los últimos años se dedica además a la producción de aire caliente para calor de proceso (cocción de baldosas cerámicas), a la eliminación de contaminantes (descontaminación de tierras contaminadas con Hg procedente de la industria minera), al ensayo de absorbedores porosos (los absorbedores son las partes de los receptores expuestas al foco), se han ensayado absorbedores de SiSiC y de alúmina a temperaturas de hasta 1500 °C y al ensayo de células fotovoltaicas de concentración, que alcanzan rendimientos superiores en un 30% al de las células fotovoltaicas convencionales y son sometidas a concentraciones de hasta 1000 soles. (Rodríguez *et al.*, 2001).

2.7.- Otros hornos solares.

La información obtenida acerca de los siguientes hornos solares ha sido obtenida en (Rodríguez, 2006).

2.7.1.- Horno Solar de Sandia National Laboratorios (Fig. 8).

Las características principales del horno solar de Sandia son:

- Una superficie del helióstato de 95 m² y un diámetro del concentrador de 6.7 m.
- Potencia pico: 16 kW.
- Flujo pico: 5000 kW/m².

Aplicaciones:

- Simulación de los efectos térmicos de explosiones nucleares en materiales y componentes.
- Investigación de propiedades termofísicas de materiales (expansión térmica, conductividad térmica y difusividad, calor específico, propiedades mecánicas, emisividad espectral y absorptividad).
- Determinación del rendimiento y umbral de fallo de materiales refractarios y de cerámicas de alta temperatura.



Figura 8. Horno Solar de Sandia National Laboratories.

2.7.2.- Horno Solar de National Renewable Energy Laboratories (NREL) (Fig. 9).

Las características principales del horno solar del NREL son:

- Un concentrador compuesto por 25 facetas exagonales.
- Potencia pico: 10 kW.
- Flujo pico: 2500 kW/m².

Aplicaciones:

- Ensayos de materiales a alta temperatura, recubrimientos en materiales cerámicos y metálicos, ensayos de prototipos de convertidores avanzados y reactores químicos para producción de electricidad y aplicaciones de química solar.



Figura 9. Horno Solar de NREL.

2.7.3.- Horno Solar del Paul Sherrer Institute (PSI) (Fig. 10).

Las características principales del horno solar del PSI son:

- Una superficie del heliostato de 120 m^2 y un diámetro del concentrador de 8.5 m.
- Potencia pico: 40 kW.
- Flujo pico: 5000 kW/m^2 .

Aplicaciones:

- Investigación y desarrollo en procesamiento termoquímico de combustibles solares a alta temperatura, como la producción de metales mediante la reducción térmica y carbotérmica de óxidos metálicos (Fe_2O_3 , ZnO , SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO_2), estas reacciones son muy endotérmicas y tienen lugar a temperaturas entre 1200 y 2500 K.



Figura 10. Horno Solar del PSI.

2.7.4.- Horno Solar del DLR (Fig. 11).

Las características principales del horno solar del DLR son:

- Una superficie del helióstato de 57 m^2 y un concentrador con 159 facetas esféricas dispuestas en lente de frésnel de 42 m^2 de superficie total.
- Potencia pico: 25 kW.
- Flujo pico: 5000 kW/m^2 .

Aplicaciones:

- Experimentos de química solar mediante receptores asociados a reactores, ensayo de materiales en vacío y producción de H_2 .



Figura 11. Horno Solar del DLR.

2.7.5.- Hornos solares de Odeillo.

Horno Solar de 6 kW (Fig. 12).

Las características principales del horno solar de 6 kW son:

- Una superficie del concentrador de 12.5 m^2 .
- Potencia pico: 5.5 kW.
- Flujo pico: 4700 kW/m^2 .

Aplicaciones:

- Calentamiento de probetas en atmosfera controlada y vacío, dentro de los reactores de que dispone la instalación.



Figura 12. Horno Solar 6 kW de Odeillo.

Hornos Solares de 1 y 2 kW (Fig. 13).

Las características principales de los hornos solares de 1 y 2 kW son:

- Un diámetro del concentrador de 2 m.
- Potencia pico: 1 y 2 kW.
- Flujo pico: 15000 kW/m².

Aplicaciones:

- Templado rápido, elaboración y tratamiento de materiales (fusión, vaporización-condensación, sublimación...) en aire y atmósfera controlada.



Figura 13. Horno Solar 2 kW de Odeillo.

Horno Solar de 1000 kW (Fig. 14).

Las características principales del horno solar de 1000 kW son:

- Es el más grande del mundo, compuesto por 9130 espejos de aproximadamente 0.5 m de lado y una superficie total de 1830 m².
- Potencia pico: 1000 kW.
- Flujo pico: 10000 kW/m².

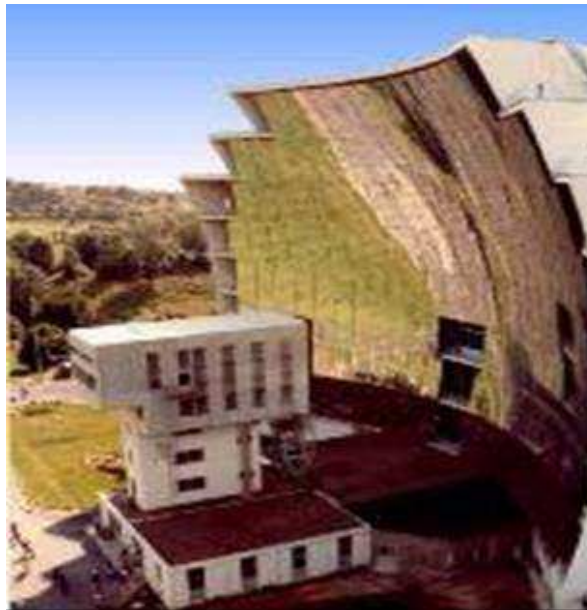


Figura 14. Horno Solar 1000 kW de Odeillo.

3.- Materiales y métodos

3.1.- Principales componentes del horno solar de eje vertical.

Primero vamos a empezar por realizar un análisis más exhaustivo de las diferentes partes del horno, para poder entender mejor tanto su funcionamiento como sistema, como la de cada uno de sus componentes por separado:

3.1.1.- Helióstato.

El helióstato refleja la luz procedente directamente del sol hacia el concentrador parabólico. Los hornos solares pueden estar compuestos de un concentrador con un helióstato de gran tamaño (que es nuestro caso) o de un concentrador con varios helióstatos pequeños.

El helióstato tiene que cubrir toda la superficie del concentrador durante el periodo operativo, y su tamaño depende de la apertura del concentrador, de la latitud del lugar, la declinación y el ángulo de incidencia de los rayos reflejados por el helióstato.

Se puede componer de un gran número de pequeñas facetas planas alineadas formando una superficie plana continua o de una única faceta plana si el helióstato no es demasiado grande. Un montaje de faceta muy empleado es el tipo sándwich, que consiste en dos placas de vidrio entre las cuales se encuentra el plateado.

El helióstato lo podemos subdividir en cuatro partes principales: la superficie reflectora, la unidad de accionamiento incluido el pedestal, la cimentación y la electrónica de control.

El helióstato refleja la luz solar hacia el concentrador parabólico, por lo que es imprescindible que realice un seguimiento continuo del disco solar.

Este seguimiento es controlado mediante un software instalado en el ordenador de control, que manda las consignas de posicionamiento a un autómata PLC, que en función del día y la hora, calcula las posiciones instantáneas de enfoque del helióstato y las convierte en pulsos o señales que son enviadas a los motores de azimut y elevación del helióstato para su posicionamiento.

La principal característica del helióstato es su planitud, ya que es imprescindible que los rayos solares lleguen al concentrador de forma paralela, ya que de lo contrario este último no los reflejaría haciéndolos coincidir en su foco.

El helióstato del horno solar de eje vertical de la PSA, está formado por 25 facetas plateadas planas de 3 mm de espesor, subdivididas a su vez en cuatro, y que conforman en su totalidad una superficie total de 25 m² (Fig. 15).

Cada una de las 25 facetas va fijada al marco por ventosas, provistas de espárrago roscado que permite ajustarlas a la forma plana deseada. Las facetas están canteadas entre si, de manera que conforman una superficie plana continua, que refleja los rayos solares verticales y paralelos al eje óptico del concentrador.

Además de las facetas, el helióstato está formado por las cerchas portantes de las facetas, el brazo en el que se apoyan que va acoplado al cabezal donde están los mecanismos de accionamiento y los motores de azimut y elevación.

Finalmente el pedestal soporta todo el conjunto e incluye la caja de control con la alimentación eléctrica a los motores, el autómatá PLC y toda la electrónica necesaria para su funcionamiento.

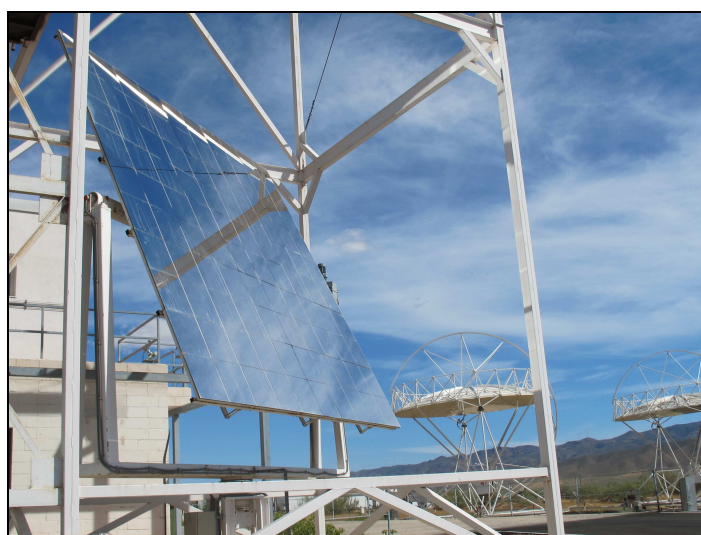


Figura 15. Helióstato.

La superficie de reflexión tiene una reflectividad del 90% y calidad óptica de 1.8 mrad, puede girar de 0° a 90° en elevación y de -90° a $+90^{\circ}$ en azimut para hacer el seguimiento del disco solar.

El concentrador debe recibir la luz solar paralela y vertical para concentrarla en su foco, por tanto, se requiere una superficie mínima de reflexión del heliostato para que cubra toda la superficie del concentrador durante el período operativo.

Para el horno es muy importante tener la radiación solar incidente en el concentrador paralela a su eje óptico. Cualquier desviación del paralelismo causara una distorsión del foco y, por tanto, una reducción del flujo focal.

Para conseguir el paralelismo de los rayos reflejados, las facetas del heliostato tuvieron que ser niveladas en una superficie plana con la ayuda de un nivel de precisión, ajustando las ventosas que fijan la superficie de reflexión de cada faceta a su marco.

El error total del heliostato incluye la inclinación y la ondulación superficial, el error de canteo, la precisión de apunte, la deformación estructural debida a la temperatura y el error de especularidad.

3.1.2.- Concentrador.

Tanto en los hornos solares de incidencia directa como en los de tipo heliostato, el concentrador ha de ser parabólico o esférico, aunque en la práctica se utilizan concentradores parabólicos, ya que los esféricos presentan una gran aberración que se explicará más adelante.

El vidrio es el material más empleado como reflector debido a su estabilidad dimensional y la facilidad que ofrece para conseguir una superficie óptica lisa. El vidrio lleva un recubrimiento de aluminio o plata depositado químicamente o en vacío.

La plata depositada mediante vacío o "sputtering" se adhiere a la placa de vidrio mejor que la depositada químicamente.

Los recubrimientos de plata y los de aluminio se emplean indistintamente en los reflectores de vidrio, ya sea en la parte delantera (primera superficie) o en la trasera (segunda superficie). Estos dos sistemas presentan ventajas y desventajas.

Una placa de vidrio pulida ópticamente con aluminio depositado en vacío en la superficie frontal dará una reflectividad mayor del 90%, pero será preciso proteger el recubrimiento generalmente mediante un film de material dieléctrico como el SiO_2 o el Al_2O_3 , para proteger la superficie reflectora de la corrosión.

Aunque los espejos de primera superficie presentan mayor reflectividad, no son los más adecuados ya que son muy delicados y necesitan mantenimiento adicional, por lo que los de segunda superficie son más empleados, a pesar de tener más pérdidas de reflectividad debidas a la absorción y refracción del vidrio.

La mayor parte de los concentradores están compuestos de facetas, ya que los fabricados con un sólo espejo parabólico continuo son más difíciles de fabricar, sobre todo si es de grandes dimensiones. Las facetas consisten en general en pequeños espejos curvados mecánicamente, los cuales se calientan hasta un punto en que pueden ser curvados en un molde parabólico o esférico.

Las imperfecciones de la superficie de los espejos pueden ser minimizadas usando un gran número de facetas. Para tamaños lo suficientemente pequeños de faceta, incluso una faceta plana puede dar una imagen correcta del sol.

El concentrador es el componente principal del horno solar. Concentra la luz solar incidente proveniente del heliostato, multiplicando la energía radiante en el foco. Sus propiedades ópticas afectan especialmente a la distribución de flujo en el foco.

Generalmente consiste en una superficie de reflexión parabólica faceteada en cuyo foco la luz solar es concentrada. Cada faceta puede ser ajustada (canteada) independientemente para reflejar la luz solar en el punto focal de la parábola.

El concentrador de la PSA ocupa una posición fija y su eje óptico esta alineado con el centro de giro del heliostato, conformando un horno solar de tipo "on axis", en el que el concentrador, el punto focal y el heliostato están alineados con el eje óptico del paraboloide. Otro tipo de horno solar es el llamado "off axis" en el que el heliostato es oblicuo al concentrador y no esta alineado con su eje óptico.

El concentrador del horno solar de eje vertical, que está compuesto por 54 facetas, está situado en lo alto de una torre de 18 m de altura, tiene un diámetro de 3.5 m y su distancia focal es de 2 m, por lo que su relación de apertura es de $2/3.5$ (Fig. 16).

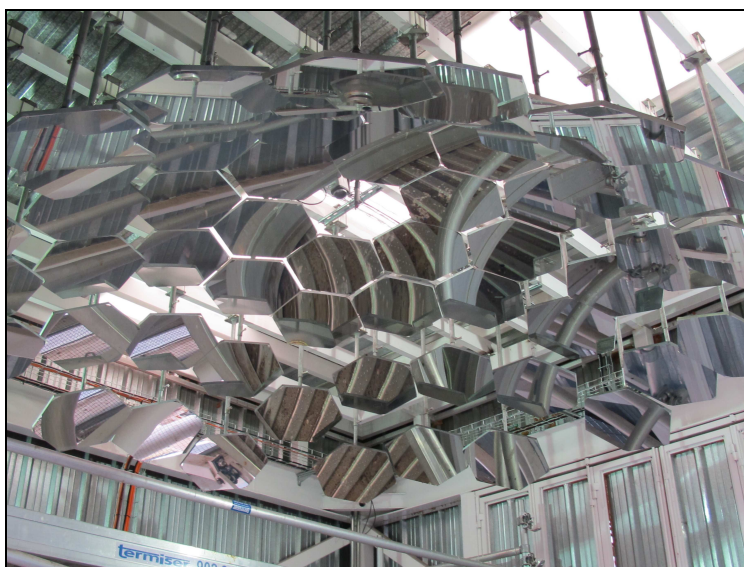


Figura 16. Concentrador.

Las facetas son proporcionadas por una empresa especializada en el sector, con las siguientes características: calidad óptica, hexagonales, de 250 mm de lado y 4 m de radio de curvatura esférica, e incorporan la capa de aluminio reflectante en la cara frontal (1ª superficie), lo que incrementa su calidad.

Las facetas tienen todas las mismas dimensiones, ya que el encargo de facetas con dimensiones diferentes según su situación en el concentrador, supondría un encarecimiento del sistema demasiado elevado, por lo que todas tienen un radio de curvatura esférico de 4 m.

Este factor ha sido el condicionante que ha hecho necesario el desarrollo de este trabajo, ya que si a cada una de las facetas se le pudiese dar la curvatura que precisa para formar un paraboloide perfecto, esta sería la mejor opción para conseguir la máxima concentración en el foco, ya que esta es una de las cualidades que lo

caracteriza y la esfera comete una aberración que vamos a analizar junto con otros errores a continuación.

3.1.3.- Errores de las superficies reflectantes.

El flujo máximo alcanzable en un horno solar depende principalmente de la calidad y precisión de los componentes ópticos que lo integran. El funcionamiento de los hornos solares consiste en una doble reflexión de la luz solar, el helióstato refleja los rayos solares sin concentración hacia el disco parabólico, el cual los vuelve a reflejar concentrándolos en su foco.

En cada reflexión la concentración máxima disminuye debido principalmente a dos tipos de errores, los producidos por aberración óptica causados por defectos de conformación de helióstato y concentrador y los debidos a defectos de fabricación que dan lugar a irregularidades en la superficie reflectante provocando errores de especularidad. (Rodríguez, 2006).

- Errores de conformación.

Los errores ópticos causados por defectos de conformación de una superficie reflectante pueden subdividirse en los tres siguientes:

Aberración esférica:

Este error sólo se da en superficies esféricas y consiste en que los rayos que inciden en el concentrador a diferentes radios enfocan en puntos diferentes. Los rayos que llegan más alejados del eje óptico del reflector enfocan en un punto más próximo al vértice del concentrador (Fig. 17).

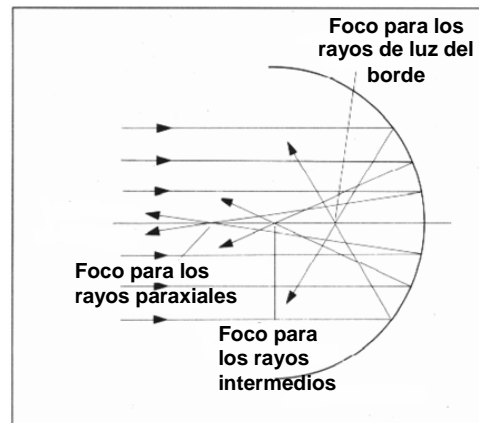


Figura 17. Aberración esférica.

Coma:

La imagen de una fuente puntual en el centro del campo, es enfocada perfectamente en el punto focal del espejo. Cuando la fuente de luz está alejada del eje óptico, no refleja en el mismo punto, sino que es deformada y desplazada radialmente de manera incremental (Fig. 18).

La imagen resultante se asemeja a un objeto triangular con base difusa que recuerda la forma de un cometa, de donde le viene el nombre a esta aberración.

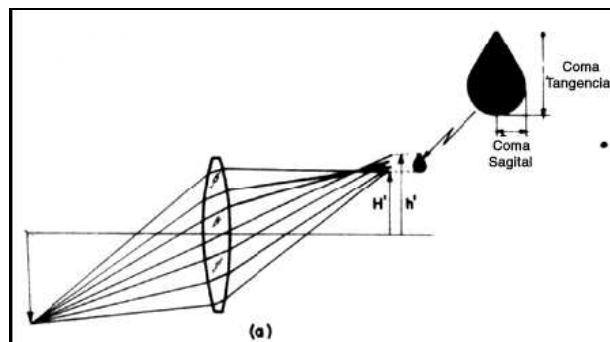


Figura 18. Coma.

Astigmatismo:

El astigmatismo se produce cuando la distancia focal de los rayos en el plano vertical es distinta de la distancia focal de los rayos en el plano horizontal, esto da lugar a una imagen focal alargada en un sentido en el plano focal y, alargada a 90° respecto a la posición anterior, fuera de foco (Fig. 19).

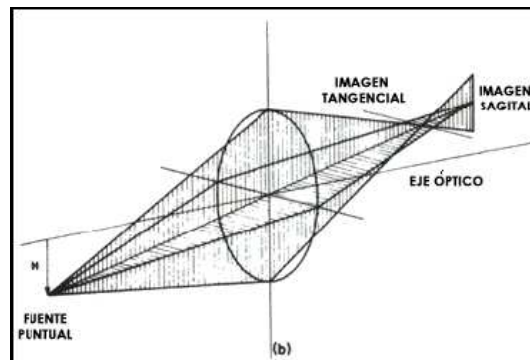


Figura 19. Astigmatismo.

Estos errores se pueden corregir mediante un alineamiento preciso de las facetas del concentrador (canteo).

- Errores por irregularidades de la superficie.

Este tipo de errores debidos a defectos en la fabricación de los espejos que componen el concentrador casi nunca pueden corregirse, entre estos errores están la desviación sobre la curva de diseño (error de curvatura o "slope"), ondulación "waviness" y rugosidad superficial.

3.1.4.- Atenuador.

Hay diferentes maneras de regular el flujo en el foco, en función del tipo de aplicación a que vaya a ser destinado el horno solar. Las siguientes características son decisivas a la hora de elegir el atenuador adecuado para un horno solar:

- Dimensiones del concentrador.
- Precisión de regulación de flujo.
- Emplazamiento del atenuador.
- Velocidad de regulación.

Hay distintos tipos de atenuadores: de lamas, de cortinilla, de disco (rotativos con un número determinado de agujeros que dejan pasar intermitentemente la radiación solar hacia las muestras), de apertura horizontal o de apertura vertical. La precisión depende del tamaño de las lamas y de las características de los mecanismos de accionamiento.

Se puede reducir el tamaño del atenuador situándolo entre el concentrador y el foco, aunque en este caso se incrementa el flujo incidente en el atenuador. Para aumentar la precisión de ajuste se pueden colocar dos atenuadores cruzados uno de eje horizontal y otro de eje vertical, de esta forma, un atenuador puede utilizarse para el ajuste grueso del flujo y el otro para el ajuste fino.

El atenuador regula la cantidad de luz solar incidente en el concentrador, y por lo tanto la energía radiante en el foco, mediante el movimiento angular de las lamas. También se utiliza para comenzar y terminar los ensayos y para finalizar automáticamente la operación por motivos de seguridad (Fig. 20).



Figura 20. Atenuador.

Cualquier objeto que obstruya el paso de la luz solar reflejada por el helióstato hacia el concentrador, reduce la potencia total y el flujo incidente en el foco. El atenuador está diseñado para sombrear el concentrador, regulando de esta manera el flujo focal, por lo que es importante determinar el área de sombra producida por el atenuador cuando está completamente abierto, puesto que las pérdidas en posición $\alpha = 0^\circ$ reducen la potencia y el flujo pico.

Al ser constante el área del foco, el flujo en el foco es proporcional a la radiación que pasa a través del atenuador. Geométricamente el foco se define por la geometría del concentrador y el error inducido por cualquier elemento situado entre el sol y el foco.

La precisión de regulación de flujo es proporcional a la radiación que pasa a través del atenuador y como el flujo es constante en el plano del atenuador, la precisión de regulación es proporcional a la precisión del movimiento de las lamas.

3.1.5.- Mesa de ensayos.

La mesa de ensayos es un soporte móvil situado bajo el foco del concentrador, que sirve para situar, con gran precisión, las probetas a ensayar en el foco (Fig. 21).

Además se utiliza para la instalación de los distintos soportes y dispositivos auxiliares necesarios para la realización de los ensayos, como el atenuador rápido o guillotina, con la que se libera o interrumpe, instantáneamente, de toda la energía del foco a las muestras.



Figura 21. Mesa de ensayos.

La mesa contribuye al sombreado del concentrador junto con el atenuador, lo que unido a la sombra del soporte, reduce el flujo en el foco. La mesa, así como sus soportes, fueron diseñados de manera que su contribución al sombreado del concentrador fuese mínima.

3.1.6.- Sistema de adquisición de datos y control.

El sistema de adquisición de datos y control es el encargado de la recogida, monitorización y almacenamiento de las variables de los ensayos y del control de equipos básicos para el funcionamiento del horno solar, como el control de la mesa de ensayos, el atenuador y el atenuador rápido.

3.2.- Métodos.

Una vez que conocemos con mayor detalle las diferentes partes del horno, así como todo lo relacionado con sus características e influencia en el funcionamiento del sistema, vamos a proceder a la descripción y enumeración de las diferentes técnicas y metodologías empleadas en el desarrollo de la investigación.

3.2.1.- Determinación de la posición bidimensional del centro de las facetas 'x, y'.

El primer paso consiste en determinar la posición bidimensional de los centros de las 54 facetas que conforman la superficie especular del concentrador (Fig. 22).

Para ello vamos a elegir una distribución de las facetas en el plano 'x, y' o 'z=0', paralelo al suelo, que nos permita un aprovechamiento óptimo del espacio, de forma que se reduzcan al máximo las dimensiones del heliostato encargado de reflejar los rayos procedentes del sol de forma paralela hacia cada una de las facetas que componen el concentrador, y que a su vez permita la orientación (cateo) de cada una de ellas para conseguir la máxima concentración de la luz procedente del heliostato en el foco del concentrador (Tab. 1).

Origen de coordenadas en el centro (0,0).

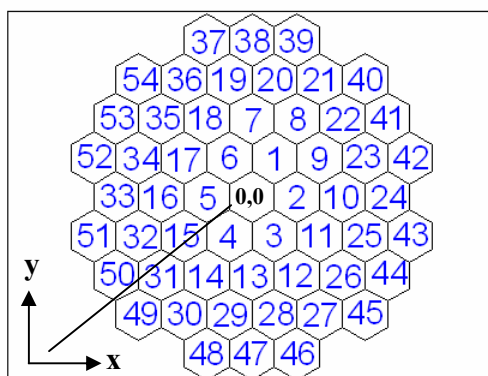


Figura 22. Numeración de las facetas.

Tabla 1. Coordenadas 'x, y' de los centros de las facetas del concentrador (mm).

Faceta	X	Y	F.	X	Y	F.	X	Y
1	225.00	389.71	19	-224.00	1156.14	37	-450.00	1538.84
2	450.00	0.00	20	224.00	1156.14	38	0.00	1538.84
3	225.00	-389.71	21	669.00	1156.14	39	450.00	1538.84
4	-225.00	-389.71	22	897.50	779.42	40	1109.00	1156.14
5	-450.00	0.00	23	1120.00	389.71	41	1324.00	779.42
6	-225.00	389.71	24	1335.00	0.00	42	1557.50	389.71
7	0.00	779.42	25	1120.00	-389.71	43	1557.50	-389.71
8	450.00	779.42	26	897.50	-779.42	44	1324.00	-779.42
9	675.00	389.71	27	669.00	-1156.14	45	1109.00	-1156.14
10	900.00	0.00	28	224.00	-1156.14	46	450.00	-1538.84
11	675.00	-389.71	29	-224.00	-1156.14	47	0.00	-1538.84
12	450.00	-779.42	30	-669.00	-1156.14	48	-450.00	-1538.84
13	0.00	-779.42	31	-897.50	-779.42	49	-1109.00	-1156.14
14	-450.00	-779.42	32	-1120.00	-389.71	50	-1324.00	-779.42
15	-675.00	-389.71	33	-1335.00	0.00	51	-1557.50	-389.71
16	-900.00	0.00	34	-1120.00	389.71	52	-1557.50	389.71
17	-675.00	389.71	35	-897.50	779.42	53	-1324.00	779.42
18	-450.00	779.42	36	-669.00	1156.14	54	-1109.00	1156.14

3.2.2.- Cálculo de la cota 'z' del centro de cada faceta para las superficies de focal 2 m.

Una vez hecho esto, procederemos al cálculo de la coordenada 'z' del centro de cada una de las facetas, para dos geometrías superficiales diferentes a analizar, la esférica y la parabólica. La primera porque es la misma con la que se han diseñado cada una de las facetas por separado y la segunda porque es la única capaz de

concentrar en su foco, los rayos de luz que inciden paralelos a su eje de simetría sobre su superficie cóncava.

Para ello introduciremos las coordenadas 'x, y' predeterminadas, en un programa de cálculo (Excel), al cual le solicitaremos las coordenadas 'z' para las dos geometrías en cuestión. El origen de coordenadas se ha tomado en el vértice del concentrador y la focal para ambas superficies se ha tomado a dos metros, ya que es la focal con la que se han diseñado todas las facetas.

Las funciones utilizadas para el cálculo de 'z' en ambas superficies son las siguientes:

- Sup. Parabólica:
$$z = \frac{1}{4 \cdot d} \cdot (x^2 + y^2)$$

Donde $d = 2$ m (distancia focal)

- Sup. Esférica:
$$z = c - \sqrt{(r^2 - x^2 - y^2)}$$

Donde $c = 4$ m (distancia del vértice al centro de la esfera)

$r = 4$ m (radio de la esfera)

También se han calculado las distancias desde el centro de cada faceta hasta el foco, para ambas superficies, con la siguiente función. Lo que nos será de gran ayuda en el cálculo de los vectores normales a los espejos del concentrador esférico, además de ser un dato interesante a la hora de comparar ambas superficies.

$$R^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$$

Donde $x_0; y_0; z_0$ son las coordenadas del foco.

Los datos obtenidos se recogen en una tabla incluida en el apartado de resultados.

3.2.3.- Cálculo de los vectores normales de orientación de cada faceta.

Una vez que tenemos posicionadas las facetas en el espacio para las dos geometrías, podemos proceder al estudio de los vectores unitarios normales, que serán los que determinen la orientación de cada faceta con centro en $z = f(x, y)$.

Para ello trabajaremos según las siguientes directrices:

La ecuación vectorial de una superficie con forma explícita $z = f(x, y)$ es:

$$r(x, y) = x i + y j + f(x, y) k$$

El vector unitario normal a la superficie asociado al punto $z = f(x, y)$ vale:

$$\hat{N} = \frac{\frac{\partial r}{\partial x} x \frac{\partial r}{\partial y}}{\left| \frac{\partial r}{\partial x} x \frac{\partial r}{\partial y} \right|}$$

Donde:

$$\frac{\partial r}{\partial x} x \frac{\partial r}{\partial y} = -\frac{\partial f}{\partial x} \hat{i} - \frac{\partial f}{\partial y} \hat{j} + \hat{k}$$

y

$$\left| \frac{\partial r}{\partial x} x \frac{\partial r}{\partial y} \right| = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}$$

De esta manera obtenemos el vector director, de cada una de las facetas del concentrador parabólico, que pasa por el punto focal. Con lo que tendríamos perfectamente apuntado el rayo central reflejado hacia el punto focal, ya que es una de las características que definen a este tipo de superficie.

Para el caso particular de la esfera, debido a la aberración esférica mencionada anteriormente, será necesario “forzar” los rayos reflejados a pasar por el foco, para lo que le daremos al vector \hat{N} el siguiente valor:

$$\hat{N} = \frac{\hat{S} + \hat{R}}{|\hat{S} + \hat{R}|}$$

Donde el vector unitario $\hat{S} = [0; 0; 1]$ representa al rayo solar incidente paralelo al eje 'z' del sistema de referencia, y \hat{R} es el vector unitario que representa la dirección del rayo reflejado que nosotros queremos forzar a pasar por el foco, cuya dirección es la misma que la de la recta que une cada punto $f(x, y)$ con el punto focal.

Para el cálculo de esta \hat{R} en cada faceta, sólo tenemos que restar las coordenadas de cada faceta a las del punto focal y dividir las por la R calculada anteriormente, con lo que tendremos el vector unitario que buscamos.

Los datos obtenidos se recogen en una tabla incluida en el apartado de resultados.

3.2.4.- Simulación y comparación de las superficies de focal 2 m.

Una vez que tenemos los datos necesarios, podemos pasar al estudio y comparación de la radiación reflejada por cada una de las dos superficies sobre el plano focal. Este proceso lo llevaremos a cabo mediante técnicas ray-tracing de simulación con matlab y un programa de estadística de rayos.

Los hornos solares se caracterizan por ser los sistemas solares que alcanzan los más altos índices de concentración en el foco. Por lo que es de gran importancia conocer el tamaño y la distribución de la densidad de flujo en el foco.

Una vez realizadas las simulaciones con las dos superficies obtenidas hasta ahora, el programa nos devuelve la siguiente información (Tab. 2), y alguna más incluida en el apartado de resultados.

Tabla 2. Resultados de la simulación de las superficies de focal 2 m.

Superficie	Esférica	Parabólica
Focal	2 m	2 m
Radiación Pico	11413.32 kW/m ²	11208.65 kW/m ²

De esta manera tendríamos la configuración del concentrador para las dos superficies, de forma que los vectores directores del centro de las facetas pasen justo por el punto focal. Esto quiere decir que las superficies conformadas por los centros de las 54 facetas, tanto la esférica como la parabólica, están perfectamente enfocadas.

Ahora es necesario mejorar el enfoque de cada una de las facetas por separado, ya que cada una tiene un radio de curvatura de cuatro metros y con las posiciones que se les ha dado para conseguir el enfoque del conjunto, posiblemente no estén en su posición óptima para ofrecer la máxima radiación pico.

El procedimiento para conseguirlo, además de proporcionarnos una mayor radiación pico, nos reportará una mayor cantidad de información con la que poder tomar una decisión a la hora de elegir una de las dos superficies. Ya que la información ofrecida hasta ahora por el simulador no es ni mucho menos definitiva, ya que ambas ofrecen una radiación pico similar.

3.2.5.- Optimización y comparación de las superficies de focal 2 m.

Para llevar a cabo este procedimiento, vamos a optimizar la radiación que consigue cada concentrador, modificando su focal hasta conseguir, de esta manera, un mejor enfoque para cada una de las facetas por separado. Aun que para ello sea necesario modificar las cotas 'z' y por consiguiente recalcular los vectores directores para no perder el enfoque del conjunto, ya que el foco seguirá estando a dos metros.

Este proceso es llevado a cabo a través de un programa de optimización desarrollado con Matlab, el cual hace una comparativa de las características de la radiación que proporciona cada una de las superficies que va simulando, devolviendo al final los datos referentes a la mejor radiación y a la superficie que la proporciona.

Como dato de partida le damos las características de las superficies que hemos conseguido hasta ahora, y a partir de ahí el programa nos devuelve la siguiente información (Tab. 3).

Tabla 3. Resultados de la optimización de las superficies de focal 2 m.

Superficie	Esférica	Parabólica
Focal	1.150 m	1.025 m
Radiación Pico	16896 kW/m ²	17415 kW/m ²

Con esta información, ya si nos encontramos en condiciones de tomar una decisión definitiva, en cuanto a que superficie elegir. Pero primero vamos a corroborar la información ofrecida por el programa de optimización, realizando una serie de comprobaciones con la ayuda del programa de simulación. Esto nos ofrece además, una información complementaria acerca de la radiación obtenida y del comportamiento de la radiación pico ante la variación de la focal de ambas superficies.

3.2.6.- Comparación y comprobación de los datos obtenidos para las superficies optimizadas.

Para ello, vamos a introducir los datos obtenidos por el programa de optimización, de las superficies con mayor radiación pico, en el programa de simulación. Además de unas cuantas más cuyas focales se encuentren próximas a ellas, obteniendo de esta manera los datos de dichas radiaciones, para poder hacer un estudio de dicha información.

Dicha información la podemos encontrar en el apartado de resultados.

Con la información obtenida hasta ahora, podemos decir que el programa de optimización y el de simulación presentan los mismos resultados de radiación pico, para las superficies declaradas como óptimas por el de optimización. Con lo que dicha información queda verificada.

Ahora vamos a estudiar los resultados obtenidos por el simulador para superficies con focales próximas a las declaradas como óptimas por el programa de optimización, con el fin de verificar que en realidad las declaradas como óptimas son la mejor opción.

Dicha información la podemos encontrar en el apartado de resultados.

Como podemos observar en los datos representados en la gráfica (Fig. 35), queda también verificado que las superficies obtenidas por el programa de optimización, son las que consiguen maximizar la radiación pico para sus respectivas geometrías.

Esta información es definitiva, y como podemos observar en los resultados obtenidos, la mejor parábola supera a la mejor esfera en 519 kW/m^2 . Pero de todas formas vamos a estudiar también el comportamiento del flujo ante el desplazamiento

del foco, para ver su comportamiento y la función que lo define, ya que supone una información muy útil para los operadores de la sala de control, a la hora de llevar a cabo los ensayos.

3.2.7.- Simulación desplazando el foco para las superficies optimizadas.

Para ello, hemos realizado simulaciones en diez puntos más, cinco más lejanos al foco óptimo y otros cinco más cercanos, a intervalos de diez milímetros, con las dos mejores superficies.

Dicha información la podemos encontrar en el apartado de resultados.

Por último, para finalizar todo el trabajo llevado a cabo hasta ahora, es necesario calcular las coordenadas y los vectores directores, que definen la posición en las tres dimensiones, de las 54 facetas que componen la superficie del concentrador parabólico estimado como óptimo, ya que los programas de simulación y optimización no proporcionan dicha información.

3.2.8.- Desarrollo de la superficie parabólica estimada como óptima.

El procedimiento a seguir, es el mismo que empleado al principio, para desarrollar el concentrador parabólico, de focal 2 m, a partir de las coordenadas 'x, y' que se estimaron al inicio del trabajo:

$$\text{Sup. Parabólica: } z = \frac{1}{4 \cdot d} \cdot (x^2 + y^2)$$

Donde $d = 1.025$ m (distancia focal)

Para el cálculo de los vectores normales a los espejos del concentrador, se han calculado las distancias desde el centro de cada faceta hasta el foco, a través de la siguiente función:

$$R^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$$

Donde x_0, y_0, z_0 son las coordenadas del foco.

La única modificación consiste en que en esta ocasión la focal es de 1.025 m, pero el foco del concentrador sigue estando en el mismo sitio, a 2 m. Lo que supone, situar los centros de las facetas en la superficie de la parábola de focal 1.025 m, y después “forzar” a sus vectores directores a pasar por el foco situado a 2 m, utilizando la expresión que empleamos para la esfera:

$$\hat{N} = \frac{\hat{S} + \hat{R}}{|\hat{S} + \hat{R}|}$$

Donde el vector unitario $\hat{S} = [0; 0; 1]$ representa al rayo solar incidente paralelo al eje ‘z’ del sistema de referencia, y \hat{R} es el vector unitario que representa la dirección del rayo reflejado que nosotros queremos forzar a pasar por el foco, cuya dirección es la misma que la de la recta que une cada punto $f(x, y)$ con el punto focal.

Para el cálculo de esta \hat{R} en cada faceta, sólo tenemos que restar las coordenadas de cada faceta a las del punto focal y dividir las por la R calculada anteriormente, con lo que tendremos el vector unitario que buscamos.

Los datos obtenidos se recogen en una tabla incluida en el apartado de resultados.

Una vez conseguido el objetivo principal que se buscaba con la realización de este proyecto, podemos pasar al desarrollo de una técnica que nos permita el canteo físico del concentrador, teniendo en cuenta las limitaciones que supone trabajar con un concentrador colocado en una torre de 18 m de altura y enfocado hacia el suelo.

3.2.9.- Elección de la técnica de canteo.

Para el canteo de las facetas del horno solar de eje horizontal de la PSA, instalado con anterioridad, se recurrió al llamado Método de Iluminación Inversa, el cual se rechazó por la inviabilidad del proceso, ya que con este método se utiliza un telescopio para observar el concentrador desde varios kilómetros de distancia.

En este caso necesitaríamos más de 1 Km de distancia para colocar el telescopio eliminando los errores de paralaje. Ya que el método consiste en colocar una luz coloreada en el foco del concentrador parabólico y observar, a través del telescopio, las facetas sin iluminar de la superficie del concentrador. Esto nos indica las que están desenfocadas y no concentran la luz en el foco, por lo que deberían ser recolocadas.

Ante la imposibilidad de volver a utilizar este método, del que se disponía de una experiencia previa, se ha optado por la utilización para el desarrollo del proceso de canteo, de un aparato de posicionamiento y medida de máxima precisión como es la estación total Lérica, de la que se dispone entre el instrumental propio de la PSA.

La necesidad de desarrollar un procedimiento que alcance las expectativas de precisión en el posicionamiento de las facetas, con el fin de alcanzar la máxima concentración en el foco, aproximándonos a los datos ofrecidos por el simulador, nos ha llevado a recurrir a este instrumento que es el que más se ajusta a nuestras necesidades de espacio y movilidad.

Una vez elegido el instrumento a utilizar para llevar a cabo el procedimiento de canteo de las facetas del concentrador, es necesario desarrollar un protocolo o procedimiento a seguir, a través del cual se posicionen de forma precisa cada una de las facetas, dándoles las coordenadas y orientación estimadas en el proceso de optimización.

3.2.10.- Desarrollo del protocolo para la técnica de canteo.

Para su desarrollo, vamos a empezar por identificar tres puntos de la faceta, para poder situarla en el espacio y darle la ubicación y orientación adecuada, de acuerdo con los datos obtenidos.

Tres vértices alternos del exágono que constituye la faceta, nos define su superficie suponiendo que fuese un plano. Por lo que supone la mejor opción para posicionar cada una de ellas con su orientación correspondiente, sin dar lugar a ambigüedades.

Una vez elegidos los tres puntos que van a definir la posición de cada faceta para su orientación, se estiman sus coordenadas definitivas a través del siguiente procedimiento:

Primero hacemos coincidir el centro de la faceta con el origen de coordenadas empleado hasta ahora, y la posicionamos de forma que la normal al plano que forman los tres puntos tenga como vector unitario $(0, 0, 1)$.

Una vez hecho esto y con los datos obtenidos en el proceso de optimización, podemos darle en primer lugar la inclinación correspondiente, girando los tres puntos con respecto al origen de coordenadas, los ángulos definidos por su vector director, para después trasladarla a su posición definitiva, sumándoles las coordenadas que sitúan el centro de la faceta en su posición correspondiente.

De esta manera ya tenemos los tres puntos que definen inequívocamente la posición de la faceta en el espacio, como parte de la superficie parabólica que da forma al concentrador.

Este procedimiento se ha llevado a cabo, para cada una de las 54 facetas, a través de un programa desarrollado con Matlab, el cual nos ha proporcionado las coordenadas de los tres puntos que definen la posición de cada una de ellas dentro de la superficie parabólica que da forma al concentrador.

Los datos obtenidos se recogen en una tabla incluida en el apartado de resultados.

Con estos datos y con la ayuda de la estación total, es posible el desarrollo del proceso de canteo y posicionamiento de las 54 facetas que conforman el concentrador del horno solar de eje vertical.

4.- Resultados y discusión

Para la exposición de los datos obtenidos en el apartado de resultados, vamos a seguir la misma secuencia que la que se ha seguido para su obtención en el apartado de metodología, con el fin de facilitar su exposición y la comprensión de su significado.

4.1.- Cotas 'z' y distancias 'R' de las facetas para las superficies de focal 2 m.

Los primeros datos obtenidos son las cotas 'z' de los centros de las 54 facetas en las dos primeras superficies estudiadas, la esférica y la parabólica de focal 2 m y con el foco a 2 m del vértice del concentrador para las coordenadas (x, y) predeterminadas. También podemos observar las distancias existentes entre los centros de cada faceta y el foco del concentrador 'R' (Tab. 4).

Tabla 4. Cotas 'z' y distancias 'R' de las facetas para las superficies de focal 2 m.

Faceta	Coordenadas en milímetros				Dist. Foco en mm	
	X	Y	Z_Esfer.	Z_Parab.	R_Esfer.	R_Paráb.
1	225.00	389.71	25.39	25.31	2025.23	2025.31
2	450.00	0.00	25.39	25.31	2025.23	2025.31
3	225.00	-389.71	25.39	25.31	2025.23	2025.31
4	-225.00	-389.71	25.39	25.31	2025.23	2025.31
5	-450.00	0.00	25.39	25.31	2025.23	2025.31
6	-225.00	389.71	25.39	25.31	2025.23	2025.31
7	0.00	779.42	76.67	75.94	2075.26	2075.94
8	450.00	779.42	102.56	101.25	2100.06	2101.25
9	675.00	389.71	76.67	75.94	2075.26	2075.94
10	900.00	0.00	102.56	101.25	2100.06	2101.25
11	675.00	-389.71	76.67	75.94	2075.26	2075.94
12	450.00	-779.42	102.56	101.25	2100.06	2101.25
13	0.00	-779.42	76.67	75.94	2075.26	2075.94
14	-450.00	-779.42	102.56	101.25	2100.06	2101.25
15	-675.00	-389.71	76.67	75.94	2075.26	2075.94
16	-900.00	0.00	102.56	101.25	2100.06	2101.25
17	-675.00	389.71	76.67	75.94	2075.26	2075.94
18	-450.00	779.42	102.56	101.25	2100.06	2101.25
19	-224.00	1156.14	177.28	173.35	2170.05	2173.35
20	224.00	1156.14	177.28	173.35	2170.05	2173.35
21	669.00	1156.14	229.62	223.03	2217.76	2223.03
22	897.50	779.42	180.71	176.63	2173.21	2176.63
23	1120.00	389.71	179.83	175.78	2172.40	2175.78
24	1335.00	0.00	229.35	222.78	2217.52	2222.78
25	1120.00	-389.71	179.83	175.78	2172.40	2175.78
26	897.50	-779.42	180.71	176.63	2173.21	2176.63
27	669.00	-1156.14	229.62	223.03	2217.76	2223.03
28	224.00	-1156.14	177.28	173.35	2170.05	2173.35
29	-224.00	-1156.14	177.28	173.35	2170.05	2173.35

30	-669.00	-1156.14	229.62	223.03	2217.76	2223.03
31	-897.50	-779.42	180.71	176.63	2173.21	2176.63
32	-1120.00	-389.71	179.83	175.78	2172.40	2175.78
33	-1335.00	0.00	229.35	222.78	2217.52	2222.78
34	-1120.00	389.71	179.83	175.78	2172.40	2175.78
35	-897.50	779.42	180.71	176.63	2173.21	2176.63
36	-669.00	1156.14	229.62	223.03	2217.76	2223.03
37	-450.00	1538.84	335.38	321.32	2311.17	2321.32
38	0.00	1538.84	307.85	296.00	2287.23	2296.00
39	450.00	1538.84	335.38	321.32	2311.17	2321.32
40	1109.00	1156.14	334.83	320.82	2310.70	2320.82
41	1324.00	779.42	306.83	295.06	2286.33	2295.06
42	1557.50	389.71	336.35	322.21	2312.01	2322.21
43	1557.50	-389.71	336.35	322.21	2312.01	2322.21
44	1324.00	-779.42	306.83	295.06	2286.33	2295.06
45	1109.00	-1156.14	334.83	320.82	2310.70	2320.82
46	450.00	-1538.84	335.38	321.32	2311.17	2321.32
47	0.00	-1538.84	307.85	296.00	2287.23	2296.00
48	-450.00	-1538.84	335.38	321.32	2311.17	2321.32
49	-1109.00	-1156.14	334.83	320.82	2310.70	2320.82
50	-1324.00	-779.42	306.83	295.06	2286.33	2295.06
51	-1557.50	-389.71	336.35	322.21	2312.01	2322.21
52	-1557.50	389.71	336.35	322.21	2312.01	2322.21
53	-1324.00	779.42	306.83	295.06	2286.33	2295.06
54	-1109.00	1156.14	334.83	320.82	2310.70	2320.82

Como podemos observar en los datos expuestos en la tabla anterior, el concentrador esférico tiene mayor profundidad que el parabólico, ya que las cotas 'z' son mayores para el esférico mientras que las distancias 'R' son mayores para la parábola.

4.2.- Vectores directores de las facetas para las superficies de focal 2 m.

En la siguiente tabla tenemos los vectores directores que dirigen el rayo central de cada una de las 54 facetas hacia el foco (Tab. 5), para las dos superficies expuestas hasta ahora.

Tabla 5. Vectores directores de las facetas para las superficies de focal 2 m.

Faceta	N_Esféra			N_Parábola		
	i	j	k	i	j	k
1	-0.06	-0.10	0.99	-0.06	-0.10	0.99

2	-0.11	0.00	0.99	-0.11	0.00	0.99
3	-0.05	0.10	0.99	-0.06	0.10	0.99
4	0.05	0.10	0.99	0.06	0.10	0.99
5	0.11	0.00	0.99	0.11	0.00	0.99
6	0.06	-0.10	0.99	0.06	-0.10	0.99
7	0.00	-0.19	0.98	0.00	-0.19	0.98
8	-0.13	-0.19	0.98	-0.11	-0.19	0.98
9	-0.18	-0.10	0.98	-0.17	-0.10	0.98
10	-0.21	0.00	0.98	-0.22	0.00	0.98
11	-0.15	0.10	0.98	-0.17	0.10	0.98
12	-0.09	0.19	0.98	-0.11	0.19	0.98
13	0.00	0.19	0.98	0.00	0.19	0.98
14	0.09	0.19	0.98	0.11	0.19	0.98
15	0.15	0.10	0.98	0.17	0.10	0.98
16	0.21	0.00	0.98	0.22	0.00	0.98
17	0.18	-0.10	0.98	0.17	-0.10	0.98
18	0.13	-0.19	0.98	0.11	-0.19	0.98
19	0.07	-0.28	0.96	0.05	-0.28	0.96
20	-0.07	-0.28	0.96	-0.05	-0.28	0.96
21	-0.20	-0.27	0.95	-0.16	-0.27	0.95
22	-0.25	-0.19	0.96	-0.22	-0.19	0.96
23	-0.28	-0.09	0.96	-0.27	-0.09	0.96
24	-0.30	0.00	0.95	-0.32	0.00	0.95
25	-0.24	0.09	0.96	-0.27	0.09	0.96
26	-0.18	0.19	0.96	-0.22	0.19	0.96
27	-0.12	0.27	0.95	-0.16	0.27	0.95
28	-0.04	0.28	0.96	-0.05	0.28	0.96
29	0.04	0.28	0.96	0.05	0.28	0.96
30	0.12	0.27	0.95	0.16	0.27	0.95
31	0.18	0.19	0.96	0.22	0.19	0.96
32	0.24	0.09	0.96	0.27	0.09	0.96
33	0.30	0.00	0.95	0.32	0.00	0.95
34	0.28	-0.09	0.96	0.27	-0.09	0.96
35	0.25	-0.19	0.96	0.22	-0.19	0.96
36	0.20	-0.27	0.95	0.16	-0.27	0.95
37	0.14	-0.36	0.93	0.10	-0.36	0.93
38	0.00	-0.36	0.93	0.00	-0.36	0.93
39	-0.14	-0.36	0.93	-0.10	-0.36	0.93
40	-0.31	-0.27	0.93	-0.26	-0.27	0.93
41	-0.35	-0.18	0.93	-0.31	-0.18	0.93
42	-0.37	-0.09	0.93	-0.36	-0.09	0.93
43	-0.31	0.09	0.93	-0.36	0.09	0.93
44	-0.25	0.18	0.93	-0.31	0.18	0.93
45	-0.19	0.27	0.93	-0.26	0.27	0.93
46	-0.07	0.36	0.93	-0.10	0.36	0.93
47	0.00	0.36	0.93	0.00	0.36	0.93
48	0.07	0.36	0.93	0.10	0.36	0.93
49	0.19	0.27	0.93	0.26	0.27	0.93
50	0.25	0.18	0.93	0.31	0.18	0.93

51	0.31	0.09	0.93	0.36	0.09	0.93
52	0.37	-0.09	0.93	0.36	-0.09	0.93
53	0.35	-0.18	0.93	0.31	-0.18	0.93
54	0.31	-0.27	0.93	0.26	-0.27	0.93

Las diferencias son mínimas, pero se puede observar que las coordenadas 'i' del concentrador esférico son algo mayores, lo que nos vuelve a indicar que se trata de un concentrador más profundo.

A continuación podemos observar todos los datos obtenidos por el simulador para las dos primeras superficies expuestas hasta ahora, tanto la esférica como la parabólica de focal 2 m.

4.3.- Simulación de las superficies de focal 2 m.

En la siguiente tabla podemos observar la radiación pico estimada para cada superficie por el simulador (Tab. 6), pero como podemos apreciar la diferencia entre ambas no es tan significativa como para dar por concluida la investigación, y menos aún antes de estudiar los datos del proceso de optimización.

Tabla 6. Radiación pico obtenida en la simulación para las superficies de focal 2 m.

Superficie	Esférica	Parabólica
Focal	2 m	2 m
Radiación Pico	11413.32 kW/m ²	11208.65 kW/m ²

En las siguientes gráficas quedan representadas las distribuciones de la radiación concentrada en el foco del concentrador por las dos superficies, en diferentes perspectivas (Fig. 23 y 24).

- Superficie esférica de focal 2m:

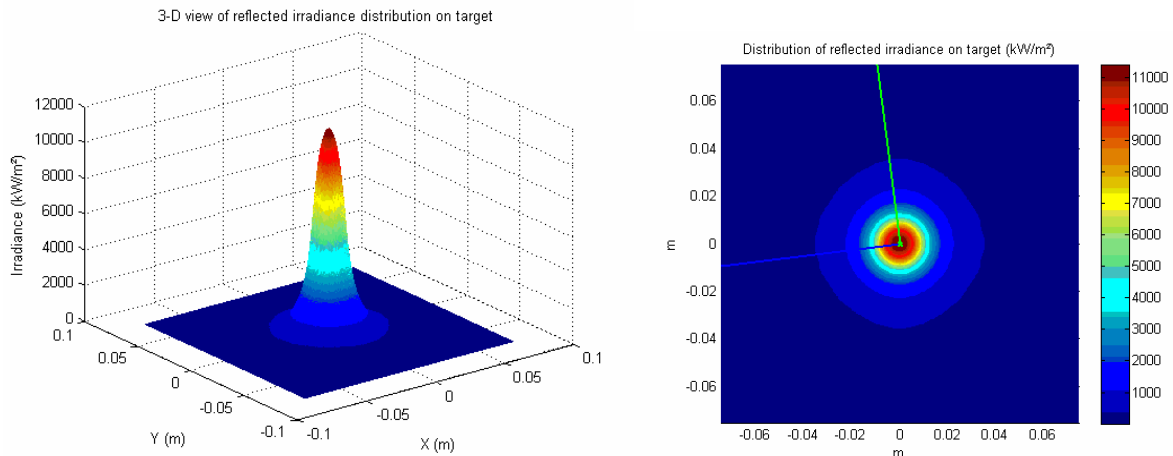


Figura 23. Distribución de la radiación concentrada por la superficie esférica de focal 2 m.

- Superficie parabólica de focal 2 m:

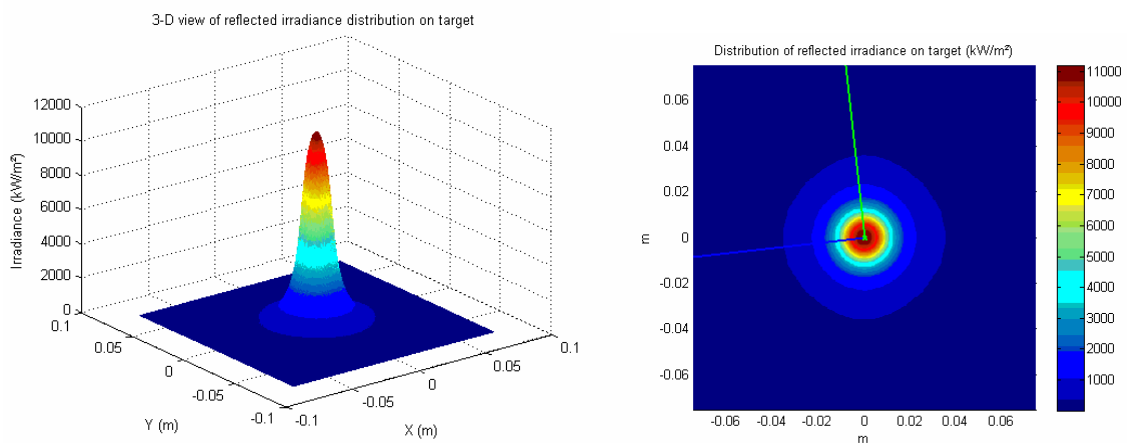


Figura 24. Distribución de la radiación concentrada por la superficie parabólica de focal 2 m.

Como ya hemos dicho las diferencias no son significativas entre las dos superficies, pero podemos observar que la mayor parte de la radiación queda concentrada en un foco de apenas 4 cm de diámetro, cinco veces más pequeño que el foco que proporciona el horno de eje horizontal de la PSA y con el doble de radiación.

En las siguientes figuras podemos observar los rayos reflejados por las 54 facetas, así como la imagen que proyectan sobre el plano focal, tanto para el rayo central de cada una de ellas, como para las facetas completas, subdivididas en elementos finitos, de ambos concentradores (Fig. 25 y 26).

- Superficie esférica de focal 2m:

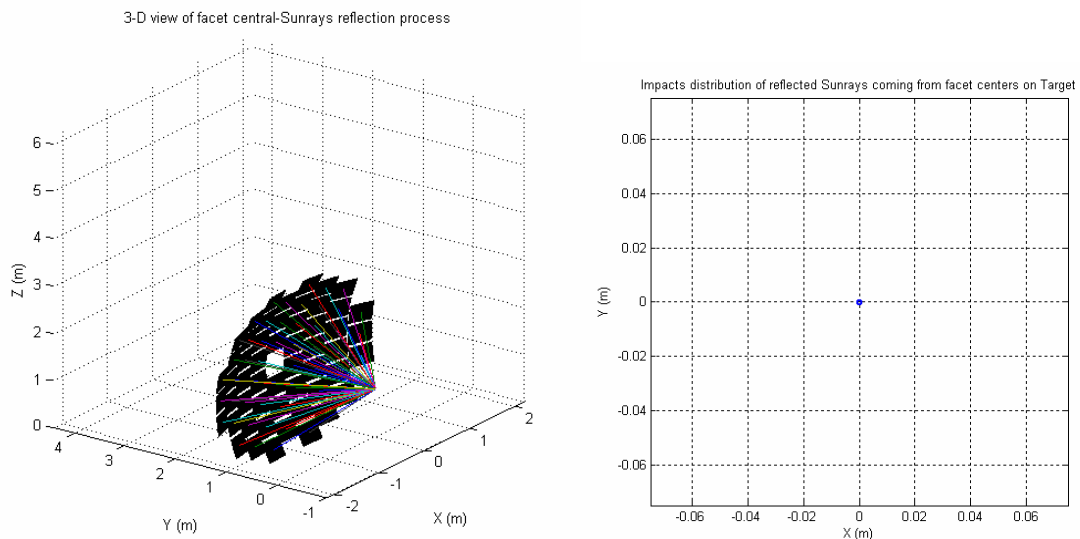


Figura 25. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie esférica de focal 2 m.

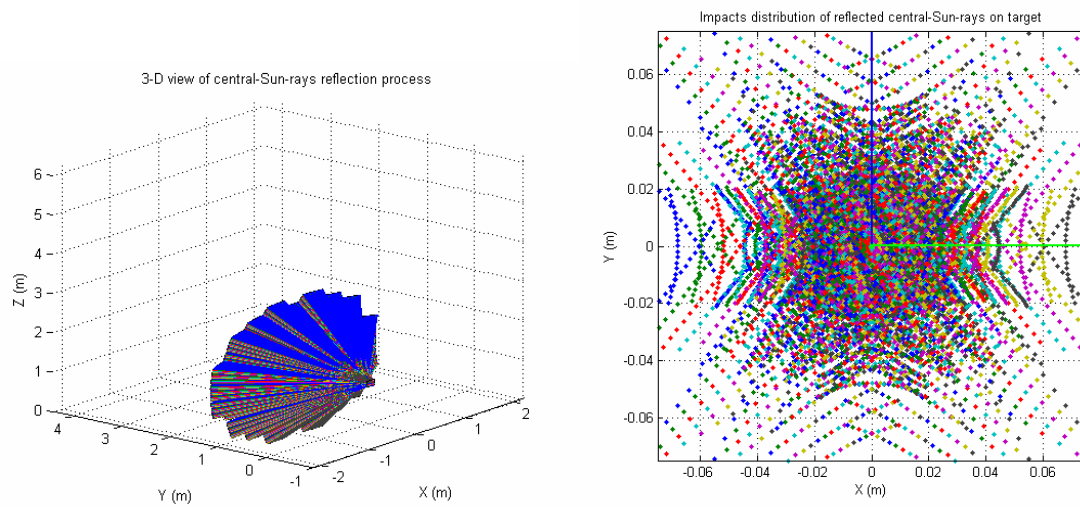


Figura 26. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie esférica de focal 2 m subdivididas en elementos finitos.

- Superficie parabólica de focal 2 m:

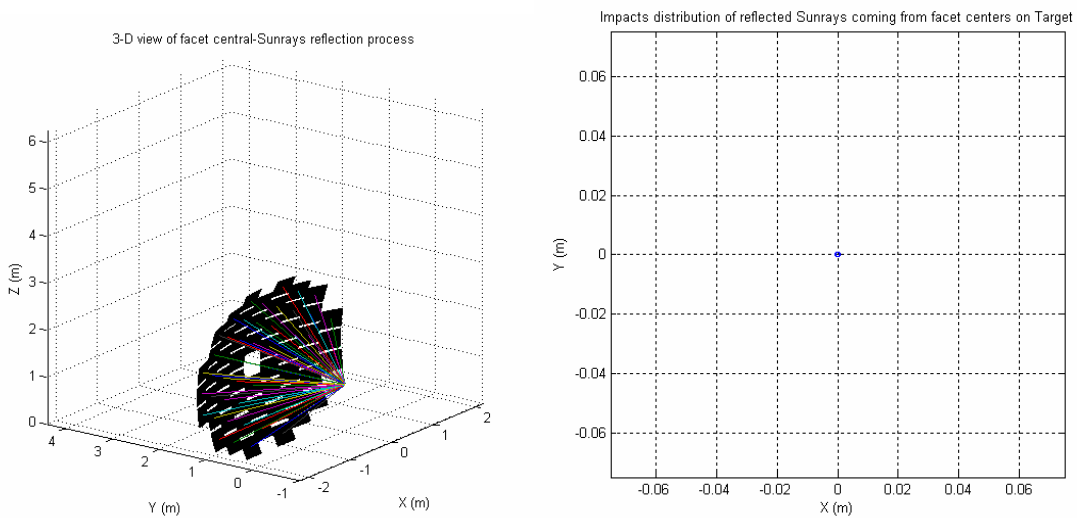


Figura 27. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie parabólica de focal 2 m.

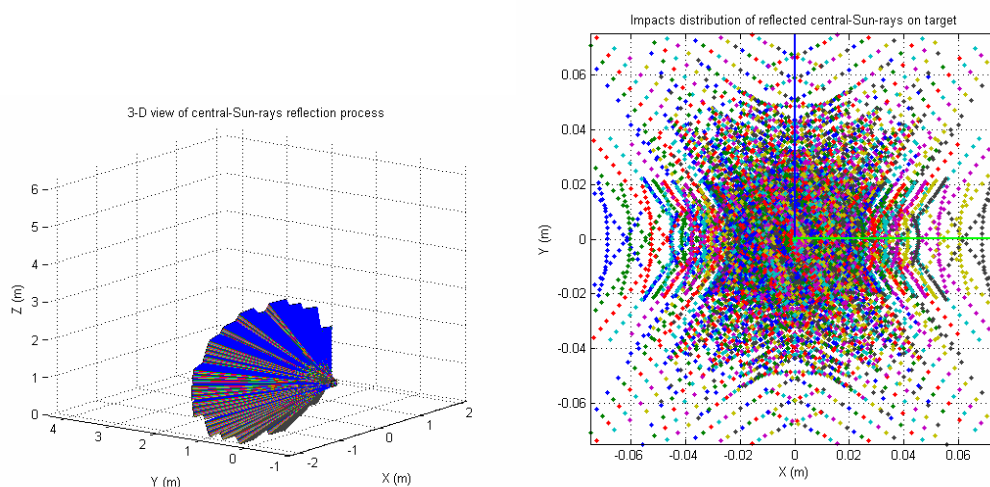


Figura 28. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie parabólica de focal 2 m subdivididas en elementos finitos.

Los resultados son casi idénticos, como era de esperar en vista de los demás resultados ofrecidos por el simulador.

4.4.- Optimización de las superficies de focal 2 m.

En la siguiente tabla podemos observar la información obtenida en el proceso de optimización para ambos concentradores (Tab. 7).

Tabla 7. Radiación pico de las superficies optimizadas.

Superficie	Esférica	Parabólica
Focal	1.150 m	1.025 m
Radiación Pico	16896 kW/m ²	17415 kW/m ²

Como podemos apreciar, después del proceso de optimización, ya si existe una diferencia considerable entre los resultados obtenidos para la radiación pico estimada para ambas superficies, con lo que la parábola empieza a decantarse como la mejor opción.

4.5.- Simulación y comparación de las superficies optimizadas.

Una vez realizadas las simulaciones para las dos superficies obtenidas con el programa de optimización (Tab. 8 y 9), podemos ver como las radiaciones pico coinciden, para cada una de las superficies, con las obtenidas con el programa de optimización, con lo que la información queda contrastada. Además podemos llevar a

cabo una comparativa del resto de la información que nos ofrece el simulador para ambas superficies (Fig. 27 y 28).

Tabla 8. Radiación pico de la superficie esférica optimizada.

Superficie	Esférica
Focal	1.150 m
Radiación Pico	16895.91 kW/m ²

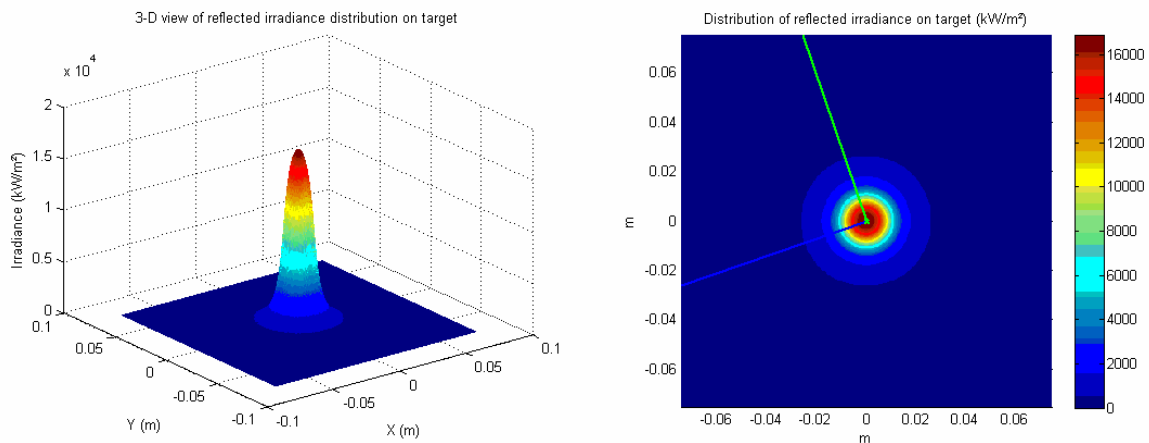


Figura 29. Distribución de la radiación concentrada por la superficie esférica optimizada.

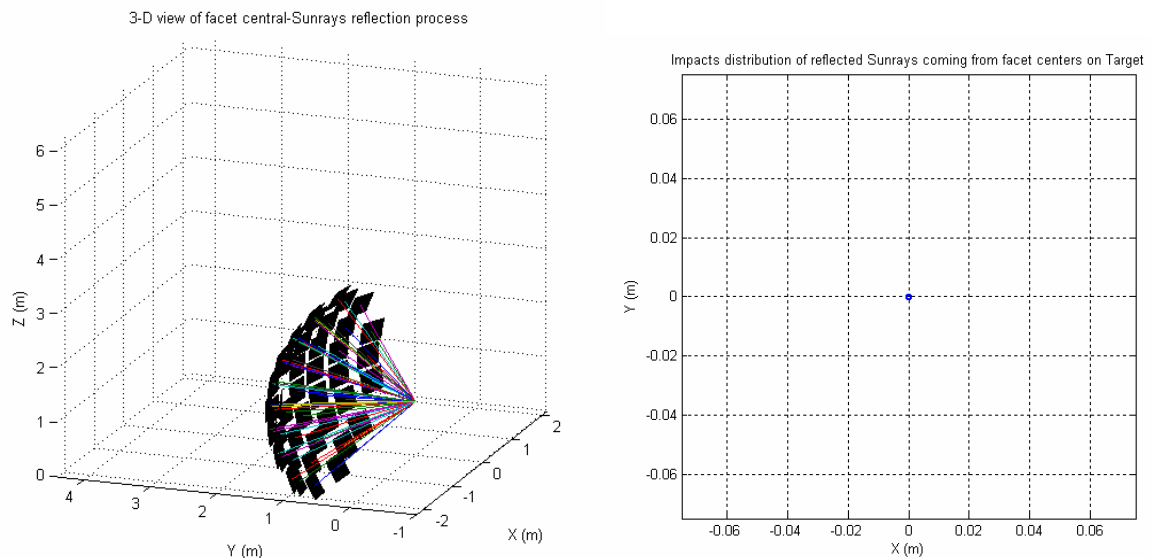


Figura 30. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie esférica optimizada.

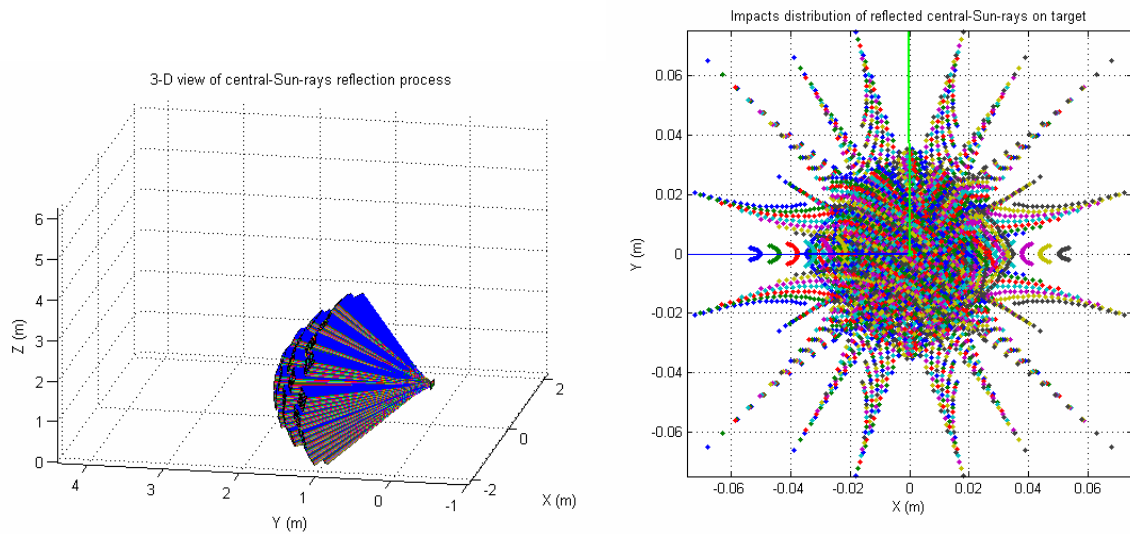


Figura 31. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie esférica optimizada subdivididas en elementos finitos.

Tabla 9. Radiación pico de la superficie parabólica optimizada.

Superficie	Parabólica
Focal	1.025 m
Radiación Pico	17415.44 kW/m ²

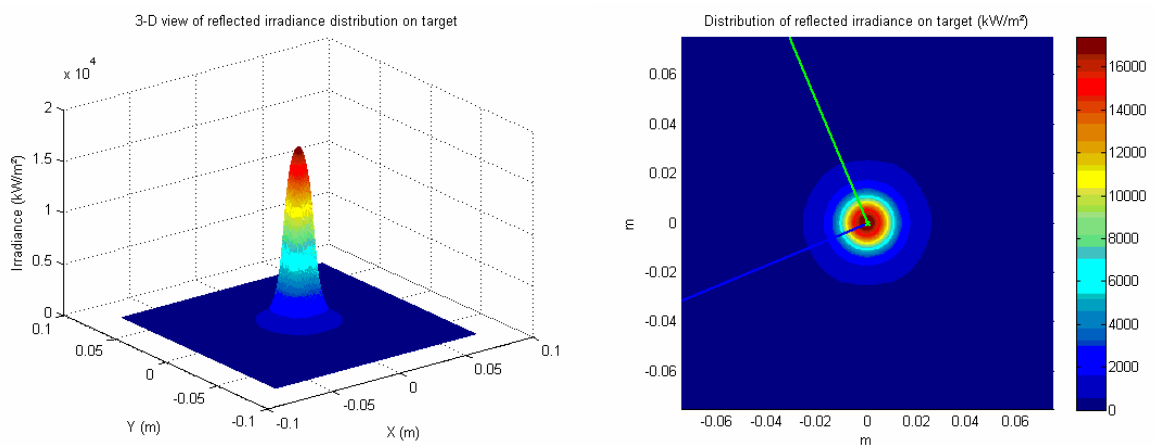


Figura 32. Distribución de la radiación concentrada por la superficie parabólica optimizada.

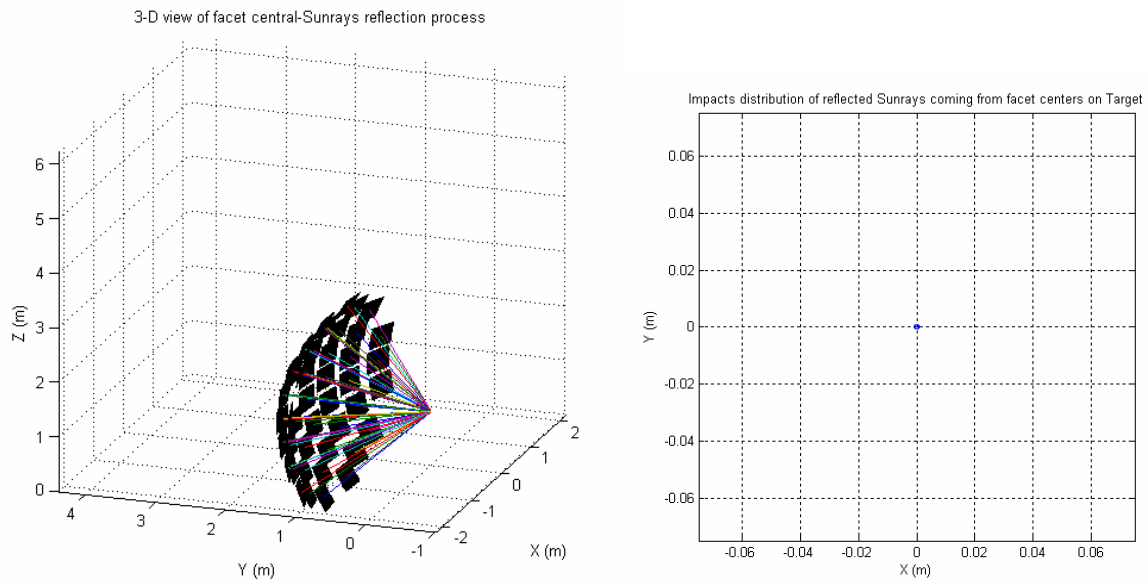


Figura 33. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie parabólica optimizada.

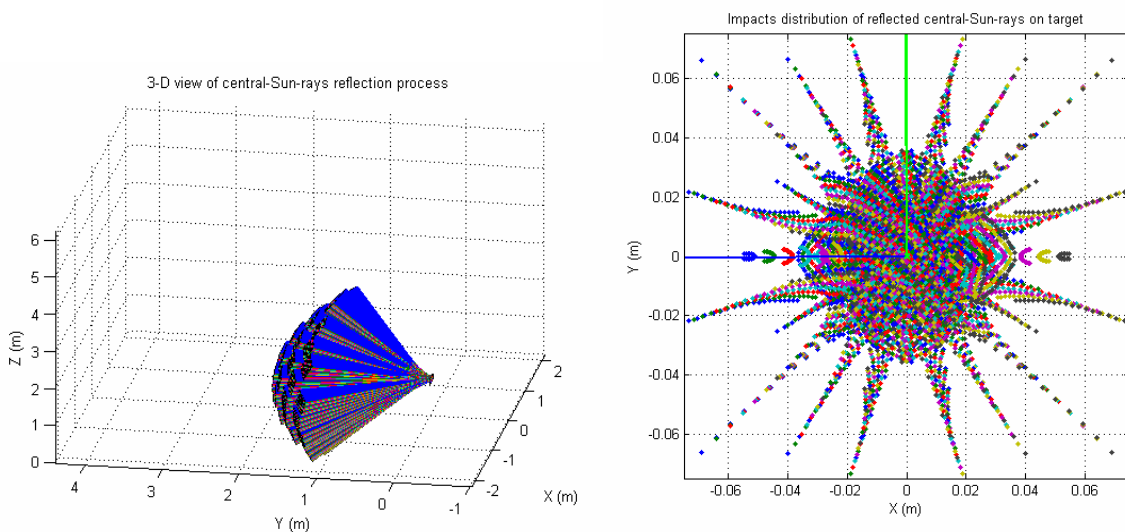


Figura 34. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie parabólica optimizada subdivididas en elementos finitos.

Como podemos observar, tanto la distribución de la radiación conseguida en el foco como la imagen proyectada en el plano focal por el concentrador parabólico, presentan una mejoría en sus características superior a las que ha experimentado el concentrador esférico. Lo que se ve reflejado en un aumento de la radiación pico estimada para el parabólico de 6206.79 kW/m^2 , mientras que el esférico sólo aumenta en 5482.59 kW/m^2 , lo que deja a cada uno con la siguiente radiación pico (Tab. 10).

Tabla 10. Comparativa de las radiaciones pico de las superficies optimizadas.

Superficie	Esférica	Parabólica
Focal	1.150 m	1.025 m
Radiación Pico	16895.91 kW/m ²	17415.44 kW/m ²

Como podemos apreciar la diferencia entre ambas es de 519 kW/m², por lo que parece definitivo que la parábola es la mejor opción a la hora de elegir una superficie con la que diseñar el concentrador, a pesar de disponer de facetas con la misma curvatura esférica para toda su superficie.

4.6.- Comprobación de las superficies optimizadas.

A continuación disponemos de la información obtenida con el simulador en una última comprobación, para verificar que las superficies obtenidas a través del programa de optimización, tanto para la esfera como para la parábola, en realidad son la mejor opción (Tab. 11).

Tabla 11. Comprobación de la focal optimizada.

Esfera		Paraboloide	
Focal (m)	Pico (kW/m²)	Focal (m)	Pico (kW/m²)
1.000	16384	0.900	16669
1.025	16555	0.925	16887
1.050	16696	0.950	17100
1.075	16791	0.975	17273
1.100	16846	1.000	17367
1.125	16886	1.025	17415
1.150	16896	1.050	17386
1.175	16883	1.075	17306
1.200	16842	1.100	17180
1.225	16736	1.125	17027
1.250	16606	1.150	16871
1.275	16460	1.175	16697

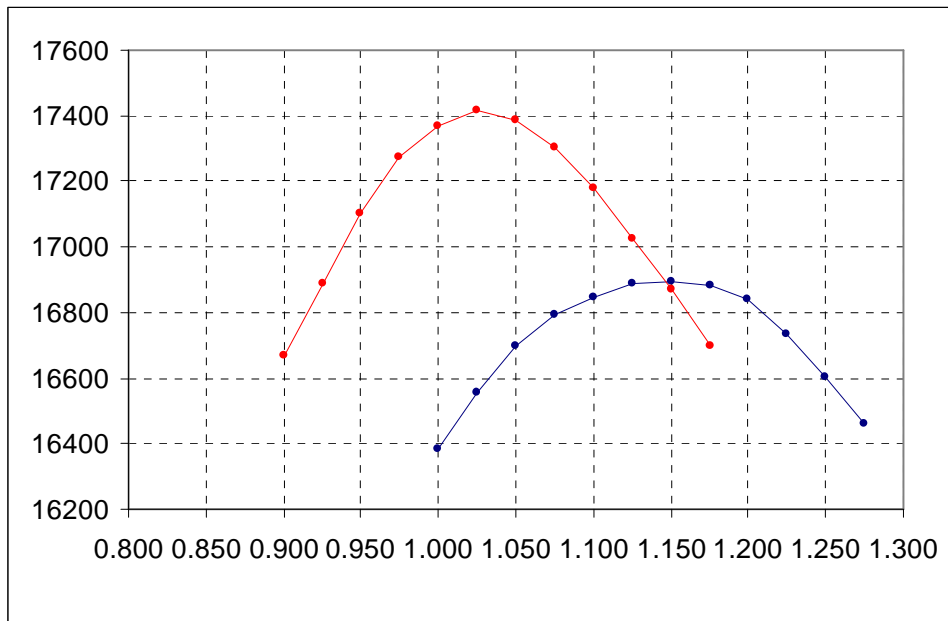


Figura 35. Comprobación de la focal optimizada.

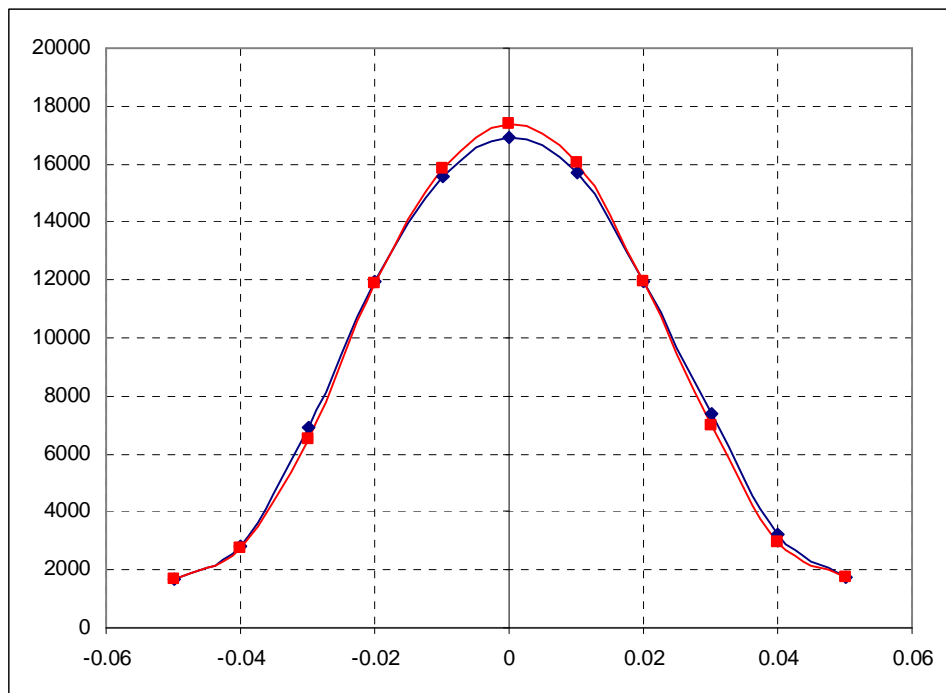
Como podemos observar tanto en la tabla como en la gráfica, esta información también queda contrastada (Fig. 29). Pudiendo apreciar además el comportamiento de la radiación pico que proporcionan cada una de las superficies ante la variación de su focal.

4.7.- Simulación y comparativa para diferentes posiciones del foco.

Como información complementaria, principalmente como herramienta para los operarios de la sala de control a la hora de desplazar la mesa de ensayos, disponemos de la siguiente información obtenida con el simulador para diferentes posiciones del foco, una vez conformados los dos concentradores optimizados (Tab. 12).

Tabla 12. Radiación pico para diferentes posiciones del foco.

Esfera		Paraboloide	
Desp. Foco (m)	Pico (kW/m ²)	Desp. Foco (m)	Pico (kW/m ²)
0.05	1775.19	0.05	1733.98
0.04	3239.76	0.04	2970.06
0.03	7387.03	0.03	6967.61
0.02	11954.27	0.02	11959.62
0.01	15731.65	0.01	16043.26
0	16895.91	0	17415.44
-0.01	15567.69	-0.01	15863.22
-0.02	11937.85	-0.02	11882.06
-0.03	6929.2	-0.03	6538.51
-0.04	2792.22	-0.04	2746.48
-0.05	1669.77	-0.05	1658.78

Figura 36. Radiación pico (kW/m²) en función del desplazamiento del foco de las superficies óptimas (m).

Como podemos observar, los resultados no ofrecen información significativa, en cuanto a diferencias importantes entre las dos superficies de concentración (Fig. 30), pero si nos indica que el comportamiento del flujo respecto al desplazamiento del foco viene definido por una gaussiana de grado dos, con las siguientes características, obtenidas con la ayuda de Matlab.

- Gaussiana superficie esférica (Fig. 31):

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2)$$

a1 = 7663 (-4.394e+004, 5.927e+004)
b1 = -0.01483 (-0.07235, 0.0427)
c1 = 0.02426 (0.002025, 0.0465)
a2 = 1.298e+004 (-2.65e+004, 5.245e+004)
b2 = 0.00861 (-0.05266, 0.06988)
c2 = 0.02755 (0.001608, 0.05349)

R-square: 0.9975

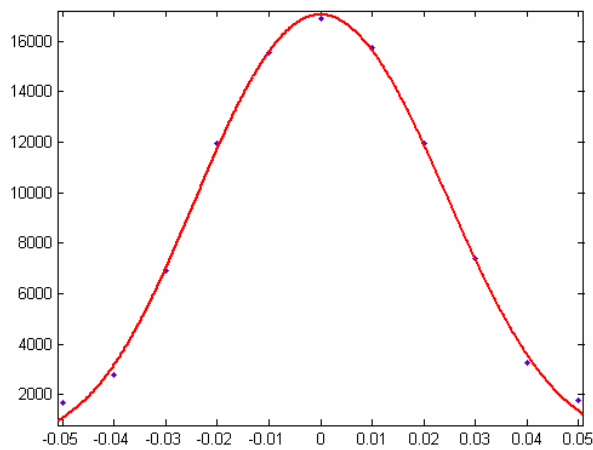


Figura 37. Gaussiana superficie esférica.

- Gaussiana superficie parabólica (Fig. 32):

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2)$$

$$a1 = 9.93e+016 \quad (-1.713e+025, 1.713e+025)$$

$$b1 = -94.84 \quad (-4.87e+008, 4.87e+008)$$

$$c1 = 16.36 \quad (-4.202e+007, 4.202e+007)$$

$$a2 = 1.749e+004 \quad (2224, 3.276e+004)$$

$$b2 = 0.0002919 \quad (-0.001255, 0.001838)$$

$$c2 = 0.03027 \quad (0.01708, 0.04345)$$

R-square: 0.9973

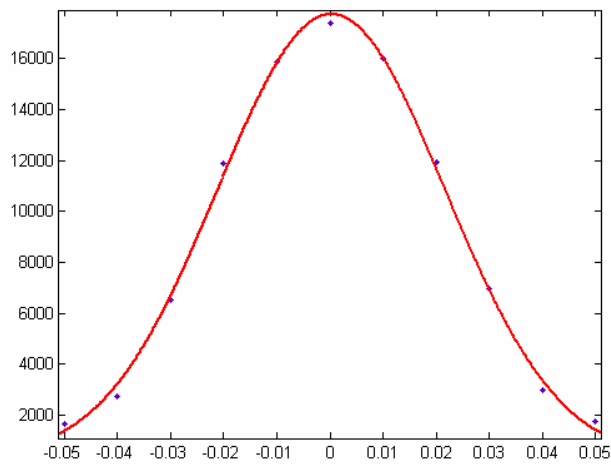


Figura 38. Gaussiana superficie parabólica.

Además, podemos observar la información que nos va ofreciendo el simulador para los dos concentradores, a medida que vamos desplazando el foco, sobre la distribución de la radiación incidente y sobre las imágenes de los rayos centrales de las facetas y las de las facetas completas subdivididas en elementos finitos sobre el plano focal.

Como ya hemos visto los resultados para los dos concentradores estimados como óptimos con el foco a 2 m en el proceso de optimización, vamos a ver sólo los resultados para los más desfavorables, con un desplazamiento del foco de 50 mm (Fig. 33 y 34), ya que los demás ofrecen resultados intermedios, menos representativos, y ocuparían demasiado espacio:

- Superficie esférica:

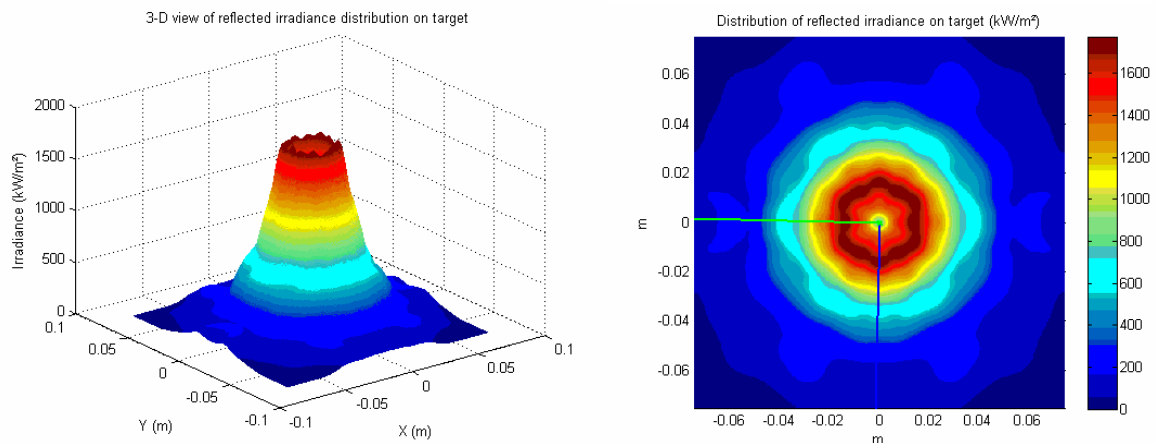


Figura 39. Distribución de la radiación concentrada por la superficie esférica optimizada (con el foco desplazado 50 mm).

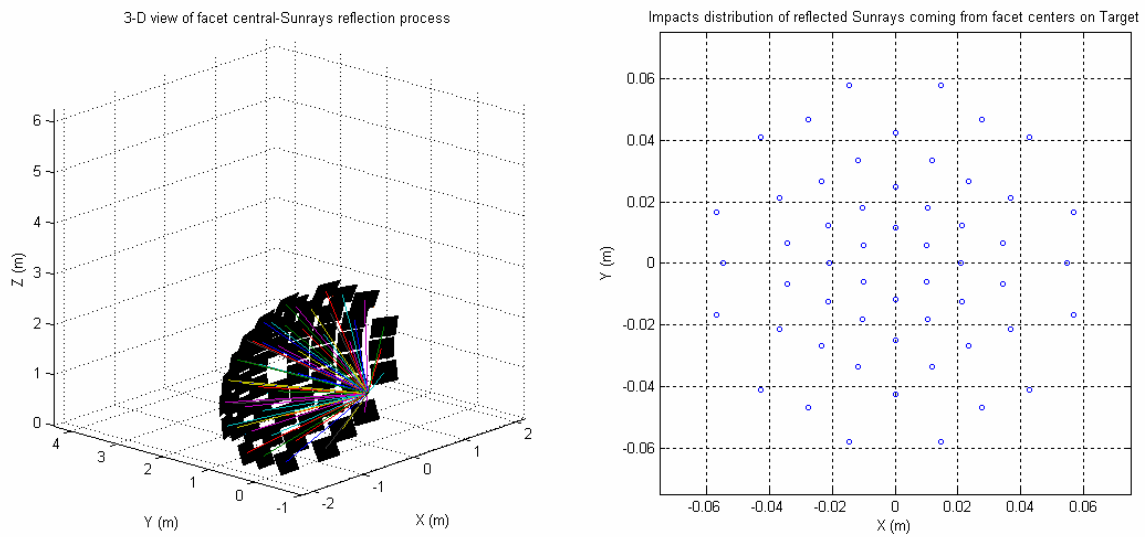


Figura 40. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie esférica optimizada (con el foco desplazado 50 mm).

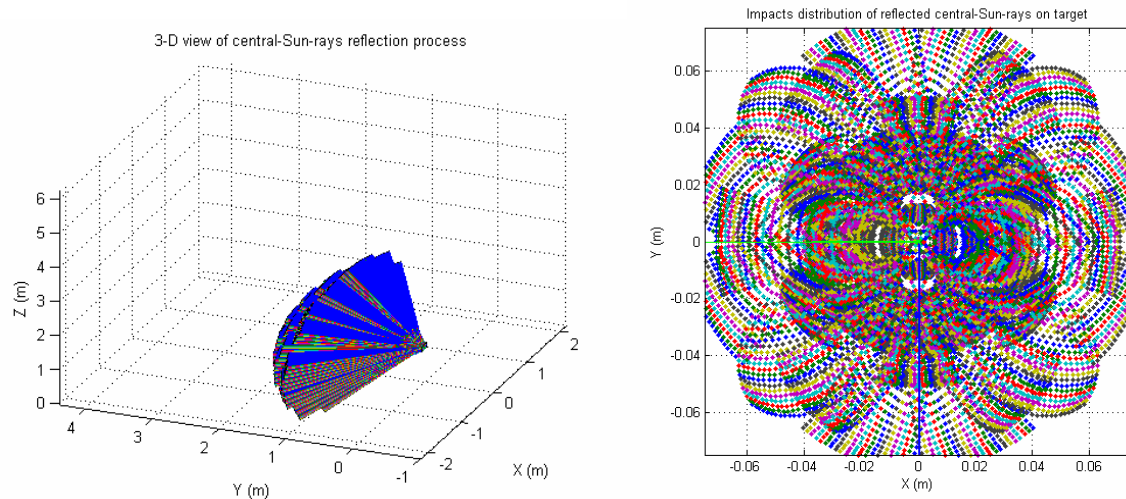


Figura 41. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie esférica optimizada (con el foco desplazado 50 mm) subdivididas en elementos finitos.

- Superficie parabólica:

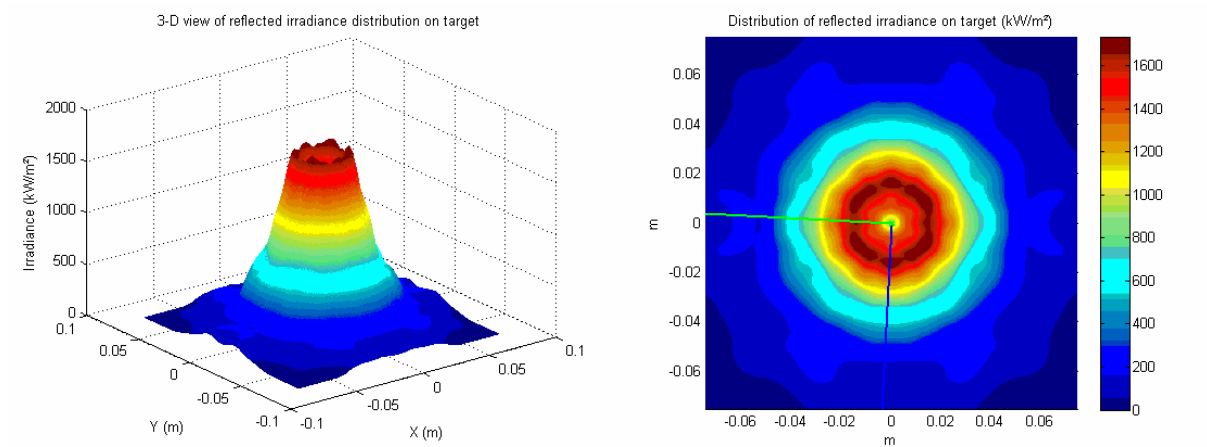


Figura 42. Distribución de la radiación concentrada por la superficie parabólica optimizada (con el foco desplazado 50 mm).

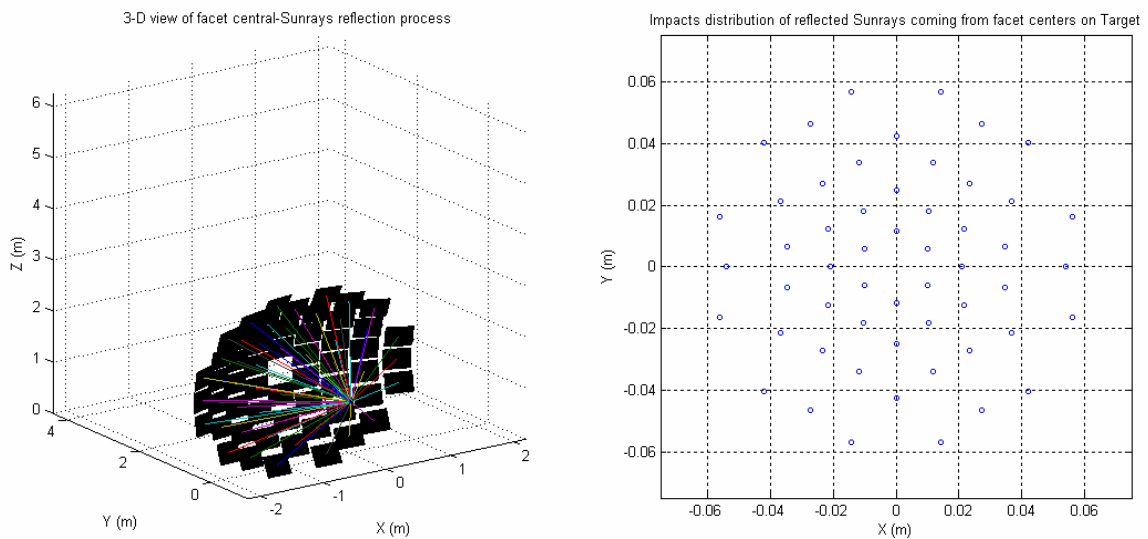


Figura 43. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos centrales de las facetas de la superficie parabólica optimizada (con el foco desplazado 50 mm).

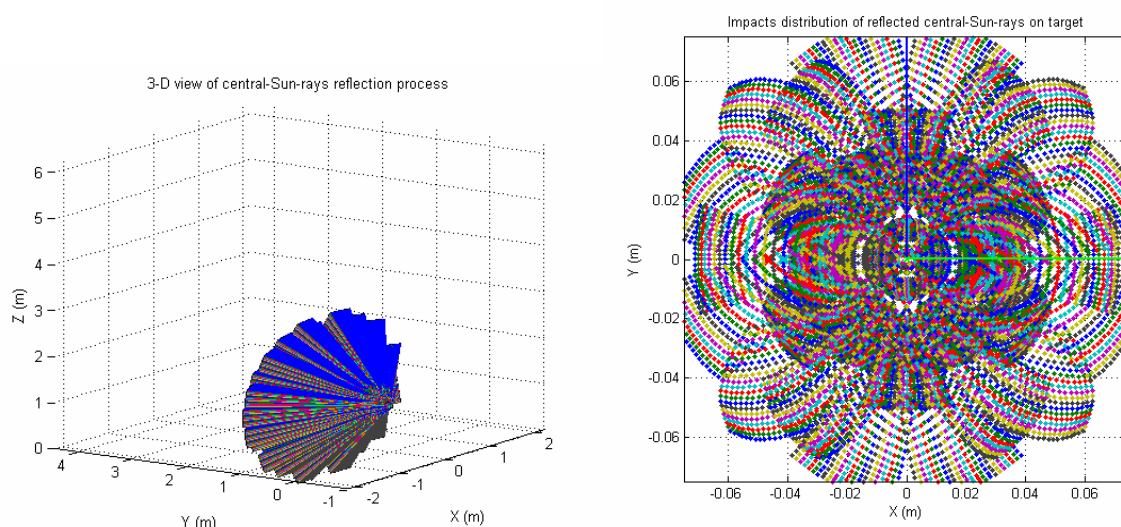


Figura 44. Dirección e impactos en el foco (izquierda y derecha respectivamente) de los rayos de la totalidad de las facetas de la superficie parabólica optimizada (con el foco desplazado 50 mm) subdivididas en elementos finitos.

Como podemos observar, la precisión en este tipo de instrumental es de vital importancia, ya que una variación de apenas unos milímetros en la mesa de ensayos, respecto a la posición estimada, supondría una reducción en la radiación pico alcanzada en el foco del 90%.

4.8.- Características obtenidas para el concentrador seleccionado.

En la siguiente tabla tenemos la información definitiva para el concentrador parabólico, de focal 1.025 m y foco a 2 m del vértice, declarado como la mejor opción (Tab. 13).

Tabla 13. Datos concentrador de focal 1.025 m y foco a 2 m del vertice.

Faceta	Coordenadas en milímetros			i	N_Parábola			R_Paráb. (mm)
	X	Y	Z_Parab.		j	k		
1	225.00	389.71	49.39	-0.06	-0.10	0.99	2001.84	
2	450.00	0.00	49.39	-0.11	0.00	0.99	2001.84	
3	225.00	-389.71	49.39	-0.06	0.10	0.99	2001.84	
4	-225.00	-389.71	49.39	0.06	0.10	0.99	2001.84	
5	-450.00	0.00	49.39	0.11	0.00	0.99	2001.84	
6	-225.00	389.71	49.39	0.06	-0.10	0.99	2001.84	
7	0.00	779.42	148.17	0.00	-0.20	0.98	2009.17	
8	450.00	779.42	197.56	-0.11	-0.20	0.97	2014.64	
9	675.00	389.71	148.17	-0.17	-0.10	0.98	2009.17	
10	900.00	0.00	197.56	-0.23	0.00	0.97	2014.64	
11	675.00	-389.71	148.17	-0.17	0.10	0.98	2009.17	

12	450.00	-779.42	197.56	-0.11	0.20	0.97	2014.64
13	0.00	-779.42	148.17	0.00	0.20	0.98	2009.17
14	-450.00	-779.42	197.56	0.11	0.20	0.97	2014.64
15	-675.00	-389.71	148.17	0.17	0.10	0.98	2009.17
16	-900.00	0.00	197.56	0.23	0.00	0.97	2014.64
17	-675.00	389.71	148.17	0.17	-0.10	0.98	2009.17
18	-450.00	779.42	197.56	0.11	-0.20	0.97	2014.64
19	-224.00	1156.14	338.25	0.06	-0.30	0.95	2036.72
20	224.00	1156.14	338.25	-0.06	-0.30	0.95	2036.72
21	669.00	1156.14	435.18	-0.17	-0.30	0.94	2057.40
22	897.50	779.42	344.63	-0.23	-0.20	0.95	2037.95
23	1120.00	389.71	342.99	-0.29	-0.10	0.95	2037.63
24	1335.00	0.00	434.69	-0.35	0.00	0.94	2057.29
25	1120.00	-389.71	342.99	-0.29	0.10	0.95	2037.63
26	897.50	-779.42	344.63	-0.23	0.20	0.95	2037.95
27	669.00	-1156.14	435.18	-0.17	0.30	0.94	2057.40
28	224.00	-1156.14	338.25	-0.06	0.30	0.95	2036.72
29	-224.00	-1156.14	338.25	0.06	0.30	0.95	2036.72
30	-669.00	-1156.14	435.18	0.17	0.30	0.94	2057.40
31	-897.50	-779.42	344.63	0.23	0.20	0.95	2037.95
32	-1120.00	-389.71	342.99	0.29	0.10	0.95	2037.63
33	-1335.00	0.00	434.69	0.35	0.00	0.94	2057.29
34	-1120.00	389.71	342.99	0.29	-0.10	0.95	2037.63
35	-897.50	779.42	344.63	0.23	-0.20	0.95	2037.95
36	-669.00	1156.14	435.18	0.17	-0.30	0.94	2057.40
37	-450.00	1538.84	626.96	0.12	-0.40	0.91	2110.87
38	0.00	1538.84	577.57	0.00	-0.40	0.92	2095.55
39	450.00	1538.84	626.96	-0.12	-0.40	0.91	2110.87
40	1109.00	1156.14	625.99	-0.29	-0.30	0.91	2110.56
41	1324.00	779.42	575.72	-0.34	-0.20	0.92	2095.00
42	1557.50	389.71	628.70	-0.41	-0.10	0.91	2111.43
43	1557.50	-389.71	628.70	-0.41	0.10	0.91	2111.43
44	1324.00	-779.42	575.72	-0.34	0.20	0.92	2095.00
45	1109.00	-1156.14	625.99	-0.29	0.30	0.91	2110.56
46	450.00	-1538.84	626.96	-0.12	0.40	0.91	2110.87
47	0.00	-1538.84	577.57	0.00	0.40	0.92	2095.55
48	-450.00	-1538.84	626.96	0.12	0.40	0.91	2110.87
49	-1109.00	-1156.14	625.99	0.29	0.30	0.91	2110.56
50	-1324.00	-779.42	575.72	0.34	0.20	0.92	2095.00
51	-1557.50	-389.71	628.70	0.41	0.10	0.91	2111.43
52	-1557.50	389.71	628.70	0.41	-0.10	0.91	2111.43
53	-1324.00	779.42	575.72	0.34	-0.20	0.92	2095.00
54	-1109.00	1156.14	625.99	0.29	-0.30	0.91	2110.56

4.9.- Coordenadas de canteo para el concentrador seleccionado.

Por último tenemos una tabla con la información necesaria para materializar el canteo físico del concentrador parabólico declarado como la mejor opción (Tab. 14), cuyas características se han expuesto en la tabla anterior, con la ayuda de la estación total Léica.

Se trata de las coordenadas de los puntos elegidos para desarrollar la técnica de canteo seleccionada y expuesta anteriormente, para dar el último paso en el proceso de conformación de la superficie de concentración seleccionada.

Tabla 14. Coordenadas de canteo para la superficie seleccionada.

Coord (mm)	Faceta	Punto			Faceta	Punto		
		a	b	c		A	b	c
x	1	8,14	440,34	226,52	28	10,30	442,40	219,30
y		514,08	514,08	140,98		-1037,05	-1037,05	-1395,08
z		49,95	23,75	74,47		389,50	362,20	263,10
x	2	234,82	665,18	450,05	29	-442,40	-10,30	-219,30
y		125,08	125,08	-250,05		-1037,05	-1037,05	-1395,08
z		73,30	25,48	49,39		362,20	389,50	263,10
x	3	9,66	441,86	223,48	30	-888,80	-462,70	-655,50
y		-265,30	-265,30	-638,40		-1037,05	-1037,05	-1394,08
z		75,03	48,83	24,31		434,02	511,10	360,40
x	4	-441,90	-9,66	-223,50	31	-1114,06	-693,10	-885,40
Y		-265,30	-265,30	-638,40		-657,10	-657,10	-1024,02
z		48,83	75,03	24,31		318,70	420,60	294,60
x	5	-665,20	-234,80	-450,05	32	-1331,02	-916,80	-1112,05
y		125,08	125,08	-250,05		-265,40	-265,40	-638,30
z		25,48	73,30	49,39		292,30	418,72	318,02
x	6	-440,30	-8,13	-226,50	33	-1538,02	-1132,05	-1335,08
y		514,08	514,08	140,98		125,08	125,08	-250,05
z		23,75	49,95	74,47		359,10	510,20	434,70
x	7	-216,50	216,50	0	34	-1323,02	-909,10	-1128,05
y		901,90	901,90	534,47		514,02	514,02	141,10
z		123,18	123,18	198,16		267,30	393,68	368,05
x	8	232,03	662,28	455,69	35	-1102,01	-681,03	-909,60
y		901,84	901,84	534,57		901,70	901,74	534,78
z		196,87	148,08	247,72		268,70	370,55	394,69
x	9	459,52	886,15	679,34	36	-875,30	-449,20	-682,50
y		514,06	514,06	141,02		1275,20	1275,20	917,98
z		172,67	98,66	173,18		359,30	436,30	509,98

x	10	689,34	1110,70	900,01	37	-658,10	-228,80	-463,20
y		125,08	125,08	-250,05		1653,30	1653,30	1310,02
z		247,51	147,60	197,56		548,80	605,40	726,70
x	11	463,85	890,48	670,66	38	-216,50	216,50	0
y		-265,40	-265,40	-638,40		1653,50	1653,50	1309,60
z		197,68	123,67	123,17		527,70	527,70	677,30
x	12	237,72	667,97	444,30	39	228,80	658,10	463,20
y		-657,01	-657,01	-1024,02		1653,30	1653,30	1310,02
z		247,04	198,25	147,40		605,40	548,80	726,70
x	13	-216,50	216,50	0	40	890,80	1303,40	1132,80
y		-656,90	-656,90	-1024,02		1274,90	1274,90	918,70
z		173,17	173,17	98,20		654,40	523,01	700,60
x	14	-668,02	-237,70	-444,30	41	1111,70	1517,90	1342,40
y		-657,01	-657,01	-1024,02		901,60	901,60	535,10
z		198,25	247,04	147,40		625,90	475,80	625,50
x	15	-890,50	-463,90	-670,70	42	1354,50	1749,30	1568,70
y		-265,40	-265,40	-638,40		514,02	514,02	141,20
z		123,67	197,68	123,17		705,20	527,30	653,60
x	16	-1111,01	-689,30	-900,01	43	1365,70	1760,50	1546,30
y		125,02	125,02	-250,05		-265,50	-265,50	-638,20
z		147,60	247,51	197,56		730,10	552,20	603,80
x	17	-886,10	-459,50	-679,30	44	1130,10	1536,30	1305,60
y		514,06	514,06	141,02		-657,30	-657,30	-1024,05
z		98,66	172,67	173,18		675,70	525,60	525,90
x	18	-662,30	-232,02	-455,70	45	914,60	1327,20	1085,20
y		901,84	901,84	534,57		-1037,05	-1037,05	-1394,02
z		148,08	196,87	247,72		729,02	597,50	551,40
x	19	-437,70	-5,60	-228,70	46	241,90	671,20	436,80
y		1275,30	1275,30	917,74		-1424,02	-1424,02	-1768,03
z		287,02	314,30	413,38		705,10	648,50	527,20
x	20	5,60	437,70	228,75	47	-216,50	216,50	0
y		1275,30	1275,30	917,74		-1424,01	-1424,01	-1768,03
z		314,30	287,02	413,38		627,40	627,40	477,90
x	21	449,20	875,30	682,53	48	-671,20	-241,90	-436,80
y		1275,20	1275,20	917,98		-1424,02	-1424,02	-1768,03
z		436,30	359,30	509,98		648,50	705,10	527,20
x	22	681,02	1101,90	909,62	49	-1327,03	-914,60	-1085,02
y		901,74	901,70	534,78		-1037,05	-1037,05	-1394,05
z		370,55	268,70	394,69		597,50	729,08	551,40
x	23	909,11	1323,20	1127,60	50	-1536,03	-1130,03	-1306,05
y		514,02	514,02	141,10		-657,30	-657,30	-1024,02

z		393,68	267,30	368,02		525,60	675,70	525,90
x	24	1132,10	1537,90	1335,05	51	-1761,01	-1366,03	-1546,02
y		125,08	125,08	-250,05		-265,50	-265,50	-638,20
z		510,20	359,10	434,70		552,20	730,10	603,80
x	25	916,75	1330,90	1112,40	52	-1749,05	-1355,01	-1569,05
y		-265,40	-265,40	-638,30		514,02	514,02	141,20
z		418,72	292,30	318,01		527,30	705,20	653,60
x	26	693,14	1114,01	885,40	53	-1518,03	-1112,01	-1342,02
y		-657,10	-657,10	-1024,02		901,60	901,60	535,10
z		420,60	318,70	294,60		475,80	625,90	625,50
x	27	462,70	888,80	655,50	54	-1303,05	-890,80	-1133,01
y		-1037,02	-1037,02	-1394,01		1274,90	1274,90	918,70
z		511,10	434,02	360,40		523,03	654,40	700,60

5.- Conclusiones

El trabajo en el que consistía este proyecto ha sido llevado a cabo con éxito, ya que los objetivos principales que se perseguían desde un principio se han alcanzado con creces, aportando una gran cantidad de información de suma importancia a la hora de desarrollar el diseño del concentrador, así como a la hora de su posterior manipulación y comprensión de su comportamiento.

Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo son:

Con el tipo de facetas estudiado, la mejor opción para la geometría del concentrador es una superficie de concentración parabólica de focal 1.025 m y foco a 2 m del vértice del concentrador. Esta opción nos ofrece 519 kW/m² más de radiación pico que la mejor configuración para la superficie esférica.

Se ha desarrollado satisfactoriamente una técnica de canteo acorde a las necesidades del sistema y el protocolo de actuación que permite su ejecución, consiguiendo el posicionamiento deseado de las facetas del concentrador de forma precisa, consiguiendo de esta manera la conformación de la superficie estimada como óptima.

6.- Bibliografía

- del Arco J. A., Muller R., Garcia J.L., 1991. Documentación del Horno Solar Horizontal de la Plataforma solar de Almería.
- Rodríguez J., Martínez D., Guerra Rosa L., Cruz Fernandes J., Amaral P. M., Shohoji N. 2001. Photochemical Effects in Carbide Synthesis of d-Group Transition Metals (Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W) in a Solar Furnace at PSA. Proceedings of Solar Forum 2001; Solar Energy: The Power to Choose; April 21-25, 2001, Washington DC.
- Monterreal R., 2004. Documentación Medida de Flujo del Horno Solar Horizontal de la Plataforma solar de Almería.
- Rodríguez J., 2006. Hornos Solares – Uso de Hornos Solares en I+D (I) Hornos Solares, Tecnología y Aplicaciones. En: Energía Solar Térmica de Alta Temperatura. Material docente del Master en Energía Solar del CIESOL (1ª Edición).
- H. P. Garg; J. Prakash., 2000. Solar Energy: fundamentals and applications. Tata. Ed. Mc Graw Hill, Nueva Delhi, India.
- Cabirol, Thierry., 1989. Construcción Artesanal de Captadores Solares. Ed. Ediciones Marzo del 80, Barcelona, España.
- Reyes Bonacasa, Josefa., 1990. La Crisis Energética. Ed. Cincel, Madrid, España.
- Honoré, Carlos., 1987. El Sol. Ed. Imprenta á Vapor de la Nación, Montevideo, Uruguay.

Direcciones web:

- Web oficial de la Plataforma Solar de Almería: www.psa.es.