



Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO DE LA CALIDAD ÓPTICA DE UN CONCENTRADOR DE DISCO PARABÓLICO

MÁSTER EN SISTEMAS DE ENERGÍA TÉRMICA

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Autora:

ROSA MARÍA BLÁZQUEZ CARNERERO

Tutor:

MANUEL SILVA PÉREZ

Sevilla, Noviembre 2014

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. OBJETIVO	6
3. ANTECEDENTES.....	7
3.1. Sistema Disco Parabólico.....	7
3.1.1. Concentrador.....	8
3.1.2. Tipos de concentradores	11
3.1.3. Determinación de la calidad óptica de superficies reflectoras.....	16
3.1.4. Desbordamiento	22
3.2. Técnicas de caracterización	24
3.2.1. Antecedentes relativos a la caracterización de superficies reflectivas	24
3.2.2. Métodos escáner láser SHOT, 2f y On sun testing.....	24
3.2.3. Fotogrametría digital de rango cercano	25
3.2.4. Método V-SHOT.....	27
3.2.5. Método SSCAN	27
3.2.6. Método del objetivo con código de colores	27
3.2.7. Deflectometría óptica	29
3.2.8. Caracterización mediante flujo lunar	30
3.3. Análisis de viabilidad de los diferentes métodos.....	30
3.4. Selección del método	31
4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	32
4.1. Descripción del concentrador	32
5. METODOLOGÍA	33
5.1. Tarea 1: Caracterización superficial del concentrador mediante fotogrametría	34
5.1.1. Descripción	35
5.1.2. Procedimiento	37
5.1.3. Adquisición de las imágenes.....	38
5.1.4. Análisis del software	39
5.2. Ajuste mediante “best fit” de la nube de puntos.....	41
5.3. Tarea 3: Simulación con herramienta de trazado de rayos	44

5.3.1.	Tonatiuh.....	44
5.3.2.	Descripción del procedimiento.....	45
5.3.3.	Resultados obtenidos de la simulación	47
5.4.	Tarea 4: Medición de la distribución de flujo lunar.....	49
5.5.	Tarea 5: Comparación de las distribuciones de flujo obtenidas	51
6.	CONCLUSIONES.....	55
7.	REFERENCIAS.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Sistema disco parabólico DS1	7
Figura 2.	Esquema de componentes de un SDP	8
Figura 3.	Esquema de una superficie concentradora de disco parabólico [4].....	9
Figura 4.	Tipos de concentradores utilizados en la tecnología de disco parabólico [4]	9
Figura 5.	Diferentes curvaturas de concentradores de disco parabólico [4].....	10
Figura 6.	Sistema Vanguard [6]	11
Figura 7.	Izq. Sistema SBP de 50 kW; der. Sistema Distal I de SBP	12
Figura 8.	Sistema Distal II de SBP	12
Figura 9.	Sistema Eurodish [5]	13
Figura 10.	Izq. Sistema SUNDISH de SAIC/STM; der. Sistema CPG [6].....	15
Figura 11.	Izq. Sistema Infinia; der. Planta demo en Solúcar, Sevilla	15
Figura 12.	Diferentes tipos de errores en concentradores reales [5].....	17
Figura 13.	De izquierda a derecha, reflexión perfectamente especular y reflexión difusa (falta de especularidad)	17
Figura 14.	Esquema gráfico del error de contorno.....	18
Figura 15.	Esquema gráfico del error local de pendiente.....	19
Figura 16.	Pérdidas por desbordamiento en torre	23

Figura 17. Efecto de desbordamiento en el disco Stirling de la ESI [4]	24
Figura 18. Caracterización por fotogrametría del sistema Eurotrough	26
Figura 19. Montaje del método Ulmer para evaluación del error de pendiente	28
Figura 20. Errores de pendiente radial (izquierda) y tangencial (derecha), obtenidos del sistema Distal II	29
Figura 21. Principio de la deflectometría óptica	29
Figura 22. Comparación de los métodos de caracterización óptica propuestos.....	31
Figura 23. Izq. Modelo de estructura soporte; der. Estructura real del concentrador	33
Figura 24. Cámara NIKON D3X	35
Figura 25. Elementos retrorreflectantes	36
Figura 26. Barra de escala	36
Figura 27. Triángulo de referencia	37
Figura 28. Elementos retrorreflectantes y targets-code sobre una de las facetas del captador	37
Figura 29. Imagen tomada de noche de la distribución de los targets retrorreflectantes sobre la superficie del concentrador	38
Figura 30. Personal de CTAER realizando los ensayos de fotogrametría del disco	39
Figura 31. Nube de puntos obtenida durante el procesamiento de datos	39
Figura 32. Información aportada por el software acerca de cada punto	40
Figura 33. Nube de puntos final del concentrador obtenida por fotogrametría	40
Figura 34. Distribución de flujo para una inclinación del concentrador de 30 grados y error óptico de 3.5 mrad introduciendo directamente la nube de puntos generada en la fotogrametría	41
Figura 35. Diferencias en mm entre los valores z obtenidos por fotogrametría y los obtenidos por best fit para 0, 30, 60 y 90 grados respectivamente	43
Figura 36. Puntos reales superpuestos sobre la superficie teórica de “best fit” para una inclinación del concentrador de 30 grados	43
Figura 37. Interfaz de Tonatiuh con la representación del sistema óptico de un disco parabólico. Las líneas de color amarillo representan los rayos solares que nacen del Sol (plano de color gris), se reflejan en la superficie del disco (superficie negra) y terminan concentrándose en el receptor (superficie blanca)	45
Figura 38. Definición de la posición del concentrador respecto al Sol en Tonatiuh	47

Figura 39. Interfaz de Tonatiuh con la representación del proceso de raytracing con superficie ideal	47
Figura 40. Distribución de flujo para un concentrador ideal de focal 5.426 m, error de pendiente 3.5 mrad y una inclinación de 30 grados	48
Figura 41. Izquierda) Imagen solar saturada sin filtro ND; Derecha) Imagen solar con filtro ND donde se aprecia la distribución sin saturar	49
Figura 42. Imagen tomada durante el ensayo de medición de flujo lunar.....	50
Figura 43. Diana o blanco lambertiano utilizado para el ensayo. La imagen proyectada en la diana corresponde al reflejo de uno de los focos de alumbrado de la instalación.....	50
Figura 44. Distribución de flujo en el plano de apertura obtenida mediante caracterización lunar.....	51
Figura 45. Distribución de flujo en 3D en el plano de apertura obtenida mediante caracterización lunar	51
Figura 46. Variación de la distribución de flujo obtenida mediante raytracing para diferentes errores ópticos	52
Figura 47. Ajuste curva experimental y teórica	53
Figura 48. Superposición curvas experimental y teórica que mejor se ajustan	53
Figura 49. Spillage.....	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de diferentes concentradores [5]	11
Tabla 2. Datos técnicos de Distal I & II.....	13
Tabla 3. Datos técnicos de los Sistemas EuroDish	14
Tabla 4. Valores típicos de errores para SDP [7]	22
Tabla 5. Especificaciones técnicas del concentrador.....	32
Tabla 6. Número de elementos utilizados en los diferentes ensayos	38
Tabla 7. Coeficientes de la ecuación de “best fit” para cada una de las inclinaciones estudiadas	42
Tabla 8. Inputs en Tonatiuh.....	46

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de mejorar la durabilidad de los receptores utilizados en los sistemas solares de concentración es necesario minimizar el estrés térmico durante la operación de los mismos. Con este fin, es necesario garantizar que la densidad de flujo sea lo más homogénea posible (o al menos que no se sobrepasen las restricciones en lo concerniente a los valores máximos de la misma) en la superficie de los mismos. Para ello el estudio del concentrador es una pieza clave, ya que los errores ópticos en la superficie del concentrador, así como el efecto de la forma del espejo, pueden conducir a distribuciones de flujo que provoquen puntos calientes en la superficie del receptor. Al mismo tiempo, es conveniente limitar la cantidad de radiación que incide sobre los alrededores de la cavidad (desbordamiento o *spillage*). Estos efectos están cuantificados de manera global en la calidad óptica del concentrador.

En fase de diseño, estos efectos se pueden estudiar apoyándose en el cálculo de las distribuciones de flujo mediante códigos de trazado de rayos, con los que se estima la distribución de flujo teórica de diseño. Una vez construido el concentrador, es necesario medir en condiciones de operación que efectivamente este cumple con las especificaciones de diseño calculadas, y la distribución de flujo en la apertura del receptor es la esperada.

El presente documento describe los ensayos realizados a un concentrador de disco parabólico con el objetivo de determinar la distribución de flujo radiante y la calidad óptica del mismo.

2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es la caracterización de los principales parámetros ópticos del denominado DS1, prototipo de disco parabólico con motor Stirling desarrollado en el marco del proyecto “SOLARDIS” y ubicado en la central hidroeléctrica que Endesa Generación tiene en Guillena (Sevilla). Para ello es necesario conocer la distribución de flujo teórica de diseño y la distribución de flujo real una vez construido.

La distribución teórica es una especificación de diseño. Debido a que no se participó en las tareas de diseño del disco, y que no se tenía información suficiente de esta etapa, se ha supuesto un diseño teórico a partir de mediciones de la superficie del disco por fotogrametría. Esta técnica permite, mediante triangulación, obtener una nube de puntos que representa la superficie del concentrador de manera discretizada. A partir de ahí, se ajusta la nube de puntos a una superficie teórica y se simula, mediante un código de raytracing, la distribución teórica de diseño.

La distribución de flujo real se ha determinado mediante un apunte lunar. Este método permite registrar la distribución de flujo generada sobre una superficie situada en el plano de apertura del receptor del disco, cuando este apunta a la Luna. La distribución de flujo obtenida es similar a la que se obtendría en condiciones reales de operación, cuando la fuente luminosa es el Sol.



Figura 1. Sistema disco parabólico DS1

3. ANTECEDENTES

3.1. Sistema Disco Parabólico

El sistema disco parabólico (SDP), como su nombre indica, está compuesto por una superficie concentradora de forma parabólica capaz de concentrar la componente directa de la radiación solar sobre el foco geométrico de dicha superficie. En el foco se sitúa un elemento capaz de aprovechar la energía térmica alcanzada en esa zona. Normalmente este elemento convierte la energía térmica incidente en energía mecánica a través de un motor Stirling, cuya salida es aprovechada por un alternador para generar energía eléctrica. Aunque ésta ha sido la principal aplicación, es posible aprovechar dicha energía térmica para otras aplicaciones como generar vapor directamente [1] o utilizarlo como calor de proceso [2].

Estos sistemas se caracterizan por su eficiencia, modularidad, funcionamiento autónomo y la capacidad de trabajar, ya sea con energía solar o combustible convencional. Entre todas las tecnologías solares, estos sistemas son los considerados con la más alta eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica, casi el 31,25% [3].

Hay tres componentes básicos: concentrador parabólico, receptor (intercambiador de calor) y el motor de Stirling (combustión externa). La siguiente figura muestra esquemáticamente los componentes de un SDP.

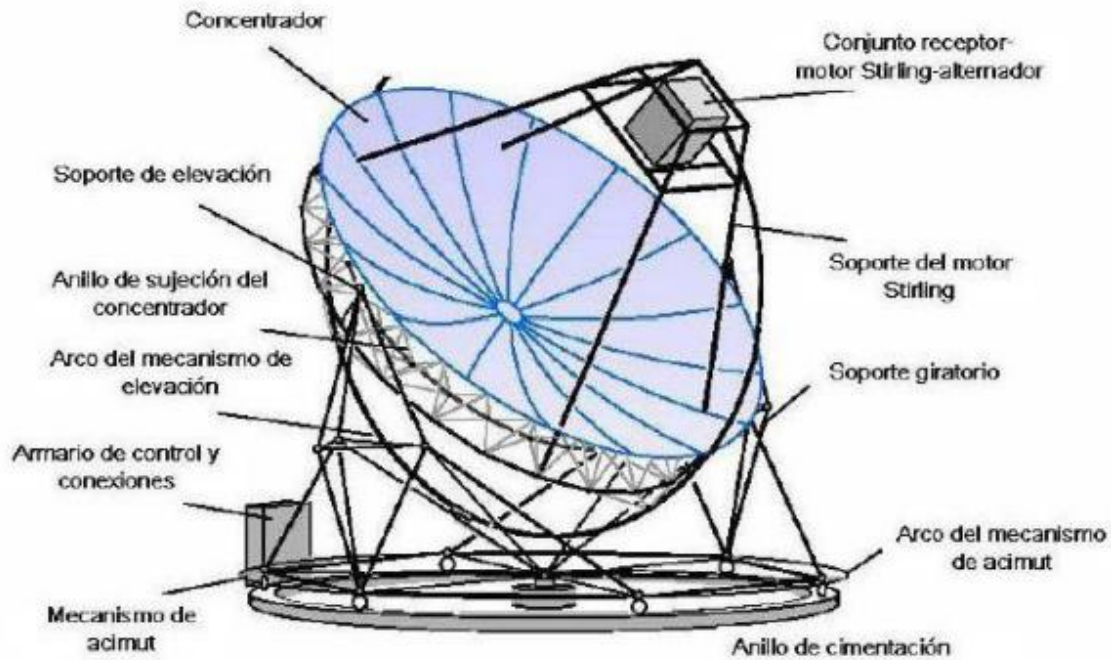


Figura 2. Esquema de componentes de un SDP

A continuación se describe el concentrador, componente sobre el que se centran los estudios realizados en este documento.

3.1.1. Concentrador

Como toda tecnología de concentración solar, la reflexión de la componente directa de la radiación solar se consigue a través de una superficie de alta calidad óptica para disminuir posibles errores que se comentarán posteriormente. El concentrador es idealmente una superficie de revolución, generada mediante la rotación de una curva plana (generatriz) alrededor de una recta directriz (eje de rotación) situada en el mismo plano de la curva. La generatriz de esta curva es una parábola, cuyo giro entorno a la directriz es la superficie de revolución denominada “paraboloide de revolución” o “concentrador disco parabólico” (CDP), cuya expresión es la siguiente:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde x e y son las coordenadas sobre la superficie del concentrador y z es la coordenada que define los puntos que salen de dicha superficie.

Esta superficie se caracteriza por tener un punto focal a una distancia f del vértice, en el que todos los rayos que llegan paralelos al eje de la superficie son reflejados por ésta hacia él. Así, las ondas incidentes (solar, sonido o radio) son concentradas hacia ese punto.

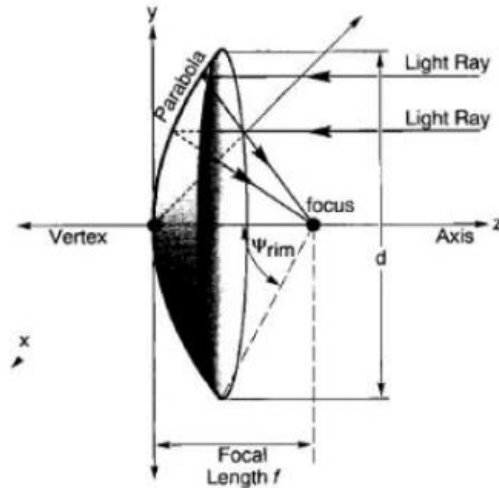


Figura 3. Esquema de una superficie concentradora de disco parabólico [4]

Los discos parabólicos empleados en sistemas termosolares de concentración históricamente han intentado acercarse lo máximo posible a esta superficie ideal, ya sea por facetas o por grandes superficies curvadas, como se puede observar en la siguiente figura.

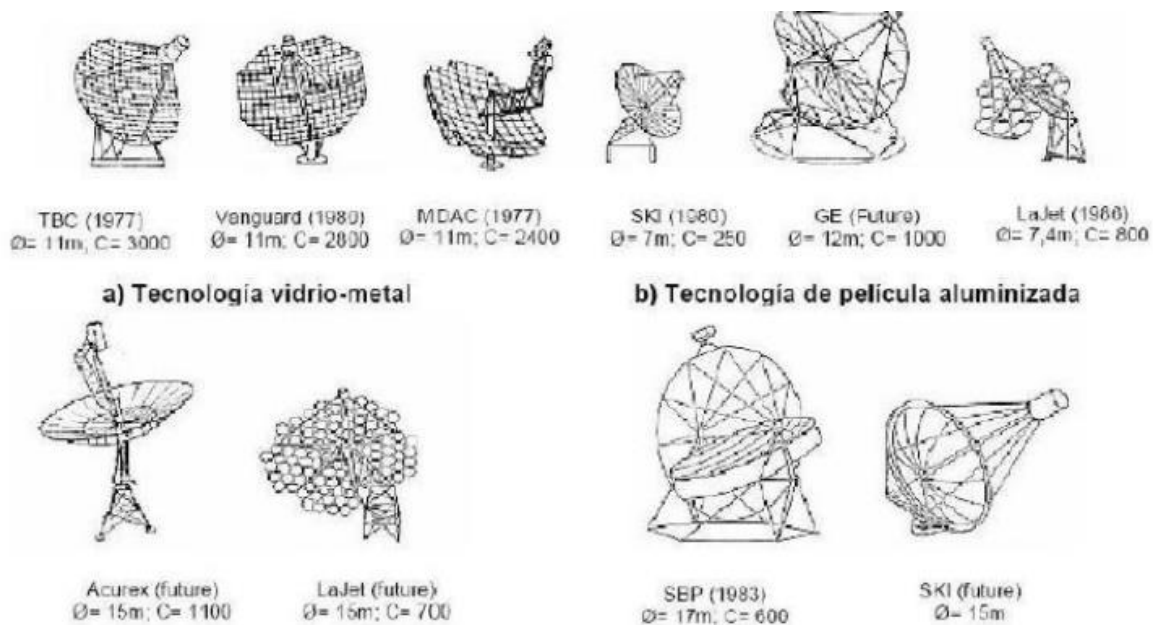


Figura 4. Tipos de concentradores utilizados en la tecnología de disco parabólico [4]

Geométricamente, la curvatura del concentrador es expresada a través del “ángulo de borde” o “rim angle” (ψ_{rim}), en su término anglosajón. Dicho parámetro es el ángulo entre el eje del concentrador y el borde del mismo, como se puede observar en la siguiente figura para diferentes curvaturas con el mismo diámetro de concentrador.

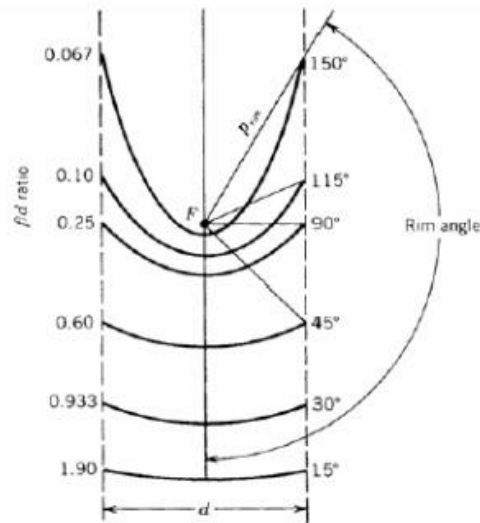


Figura 5. Diferentes curvaturas de concentradores de disco parabólico [4]

Como se puede observar en la figura anterior, para valores del ángulo de borde menores de 50-55° aproximadamente, los rayos reflejados por el concentrador inciden sobre el plano receptor por un mismo lado, por lo que en estos casos el receptor a utilizar es de cavidad. Sin embargo, para valores superiores a este valor es muy difícil o casi imposible instalar una cavidad para su recepción, por lo que se opta por utilizar receptores externos. Cabe señalar que hasta día de hoy los discos parabólicos dotados con motor Stirling como unidad de conversión de potencia han utilizado siempre receptores de cavidad. La Tabla 1 muestra las propiedades ópticas de los concentradores utilizados en diferentes discos, además del ángulo de borde estimado por la ecuación anterior.

Como es de suponer, el ángulo de borde es un parámetro de diseño del concentrador que influye sobre el factor de interceptación (que se definirá posteriormente), la razón de concentración, el error de superficie y las pérdidas en la cavidad (principalmente radiantes y convectivas), por lo que el ángulo de borde debe estar definido a la hora de diseñar la apertura de la cavidad donde está alojado el receptor.

Tabla 1. Características de diferentes concentradores [5]

Concentrador	SAIC/STM	SBP	SES	WGA (Mod 1)	WGA (Mod 2)
Tipo	Aproximado	Paraboloide	Aproximado	Paraboloide	Paraboloide
Nº de facetas	16	12	82	32	24
Área (m²)	117,2	60,0	91,0	42,9	42,9
Diámetro (m)	12,00	8,50	10,50	7,24	7,24
Área apertura (m²)	113,5	56,7	87,7	41,2	41,2
Reflectividad	0,95	0,94	0,91	0,94	0,94
Longitud focal (m)	12,00	4,50	7,45	5,45	5,45
Ángulo de borde (°)	28,10	50,55	39,04	36,74	36,74

En la tabla anterior se describen las principales características de algunos de los concentradores de disco parabólico utilizados hasta el momento, aunque no se incluyen los más recientes, de los cuales se hablará en el siguiente apartado.

3.1.2. Tipos de concentradores

En este apartado se muestran diferentes tipos de concentradores utilizados en algunos de los sistemas desarrollados en los últimos años. Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de todos ellos es aproximarse en lo posible a un disco parabólico de superficie continua.

En primer lugar se presentan aquellos concentradores diseñados a partir de la disposición de facetas independientes, curvadas y alineadas entre sí de forma que la superficie final sea una superficie de revolución. Este tipo de concentrador fue diseñado para el sistema Vanguard.



Figura 6. Sistema Vanguard [6]

El principal problema de este diseño es la necesidad de conseguir un alineamiento muy preciso de una gran cantidad de espejos, lo que encarece su coste de fabricación. Sin embargo, al tratarse de espejos pequeños, la curvatura necesaria es fácil de conseguir en el proceso de canteo.

Por otro lado, se han desarrollado concentradores con una superficie continua, conseguida mediante el uso de pequeñas facetas solidarias a una superficie trasera que sirve de lecho. Dicha superficie es una membrana estirada o tensada, y ha sido utilizada en algunos diseños de discos parabólicos de Schlaig, Bergermann und Partner (SBP). Este es el caso del concentrador utilizado en el sistema Eurodish, que es sucesor de otros modelos anteriormente desarrollados [6].



Figura 7. Izq. Sistema SBP de 50 kW; der. Sistema Distal I de SBP



Figura 8. Sistema Distal II de SBP

Tabla 2. Datos técnicos de Distal I & II

	Distal I	Distal II
Localización	Almería, España	Almería, España
Número de discos	3 (9kW _e cada uno)	3 (10kW _e cada uno)
Propietario	BMFT, SBP	StiftungEnergieforschung, SBP
Fecha de finalización	1992	1997
Diámetro del concentrador	7.5 m	8.5 m
Área efectiva de reflexión	44 m ²	57 m ²
Factor de concentración	3000	2400
Seguimiento	Polar	Acimutal
Sistema de control	Semi automático	Automático
Control remoto	Ninguno	Ninguno
Motor	SOLO V 160	SOLO V 160
Tipo	2 cilindros a 90° V	2 cilindros a 90° V
Fluido de trabajo	Helio	Helio



Figura 9. Sistema Eurodish [5]

Tabla 3. Datos técnicos de los Sistemas EuroDish

Localización	Almería, España	Milán, Italia	Vellore, India	Eibelstadt, Alemania	Odeillo, Francia	Sevilla, España
Número de discos	2 (10kW _e cada uno)	1 (10kW _e)	1 (10kW _e)	1 (10kW _e)	1 (10kW _e)	1 (10kW _e)
Propietario	EU- Kommission, SBP	CESI	KEMS Ltd., VIT	Bundesumw eltministeriu m, Robert KrickVerlag GmbH, Eibelstadt	Bundesum weltminist erium, PROMES- CNRS, Odeillo	Bundesu mwelmin isterium, ESI
Fecha de finalización	2000	2002		2004		
Diámetro del concentrador	8.5 m					
Área efectiva de reflexión	57 m²					
Factor de concentración	2400					
Seguimiento	Acimutal					
Sistema de control	Automático					
Control remoto	Vía internet	Vía intranet	Ninguno	Vía internet		
Motor	SOLO Stirling V 161					
Tipo	2 cilindros a 90° V					
Fluido de trabajo	Hidrógeno	Helio			Hidrógeno	

Se han desarrollado también concentradores formados por varias facetas (multifacetas), como se puede observar en la siguiente figura, modelo SAIC de finales de los 90 y sistema CPG.

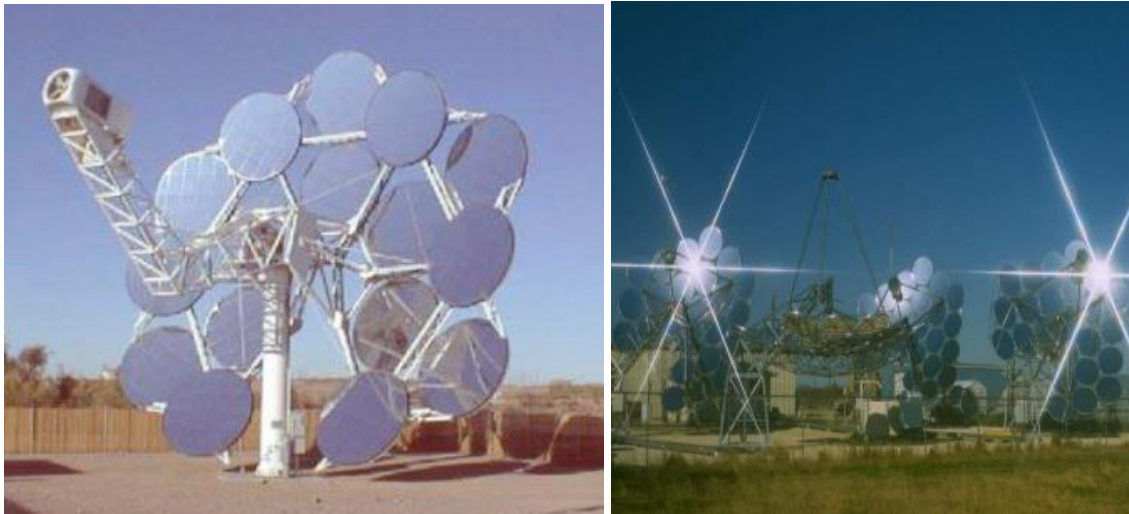


Figura 10. Izq. Sistema SUNDISH de SAIC/STM; der. Sistema CPG [6]

En cuanto a los sistemas de disco parabólico desarrollados recientemente, ya sean concentradores de superficie continua o multifaceta, destacan los desarrollados por Infinia y Abengoa, respectivamente, ver Figura 11.



Figura 11. Izq. Sistema Infinia; der. Planta demo en Solúcar, Sevilla

En cuanto a la estructura soporte, los principales modelos desarrollados hasta ahora son los siguientes:

- estructura a base de pedestal con un sistema de seguimiento de acimut / elevación montado en el pedestal (por ejemplo sistema Vanguard).
- estructura de carrusel con un sistema de seguimiento de acimut en la base del soporte circular y de elevación en la base del concentrador (por ejemplo sistema Eurodish).

Con el fin de realizar el seguimiento del Sol, los concentradores deben ser capaces de moverse en dos ejes. En general, hay dos formas de implementar esto, ambos con ventajas y desventajas:

- El primero es el seguimiento de acimut-elevación, en el que el concentrador gira en un plano paralelo a la tierra (acimut) y en otro plano perpendicular a la misma (elevación).
- En el método de seguimiento polar, el concentrador gira alrededor de un eje paralelo al eje de rotación de la tierra. El concentrador gira a una velocidad constante de 15 grados por hora, la misma velocidad de rotación que la tierra. El otro eje de rotación, el eje de declinación, es perpendicular al eje polar. El movimiento en este eje se produce lentamente (una tasa máxima de 0.016 grados por hora).

3.1.3. Determinación de la calidad óptica de superficies reflectoras

Ciertos modelos matemáticos permiten simular el comportamiento óptico de los sistemas concentradores; en ellos las superficies reflectoras se adaptan a determinadas geometrías ideales.

En cambio, en la realidad los elementos reflectores no se fabrican para adaptarse a esta clase de formas geométricas, al menos no sin hacer una gran inversión económica. Por tanto, el perfil global de los reflectores usados diferirá, en general, de las formas ideales, pudiendo existir por ejemplo ondulación o rugosidad en la superficie. Estas diferencias, denominadas errores ópticos suelen cuantificarse por diferentes métodos a partir del origen y el tipo de cada uno de ellos. Mientras mejor sea el control de la calidad en la manufactura del reflector, menores serán desviaciones respecto de una superficie ideal.

Un reflector especular perfecto es microscópicamente suave, lo que significa que la superficie normal en cualquier punto no está asociada de forma ambigua con la geometría de la superficie. Un reflector real, sin embargo, tiene una superficie rugosa que crea ambigüedad en la dirección real de la superficie normal realizando una reflexión difusa.

Este planteamiento toma en cuenta los defectos físicos que por diversos factores desvían a las normales a la superficie especular del centro de curvatura (o foco) que debería conformar. De manera que el rayo reflejado sufrirá en cada uno de los puntos de la superficie reflectiva una desviación angular respecto de su trayectoria teórica.

En la figura siguiente se puede observar un esquema que representa la influencia que tienen las distintas clases de errores presentes en un concentrador solar real y que serán detallados en la sección siguiente.

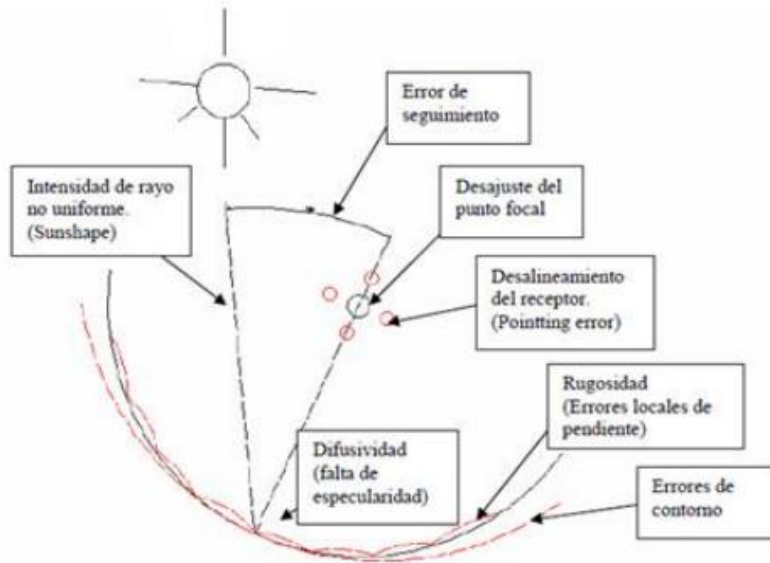


Figura 12. Diferentes tipos de errores en concentradores reales [5]

A continuación se procede a definir las causas reales de las incertidumbres planteadas anteriormente, atendiendo en primer lugar a una clasificación según su lugar de origen.

- Material.

El material con el que se realiza la reflexión es clave a la hora de una correcta evaluación. Desde este punto de vista, cabe resaltar un fenómeno en particular, la especularidad.

La reflexión perfectamente especular es la característica por la cual la radiación reflejada cumple exactamente la ley de Snell, es decir, el ángulo de incidencia es igual al de reflexión (tomando como referencia la dirección normal a la superficie). Dicho fenómeno no se cumple tratando con materiales reales. Aun considerando una superficie con forma ideal, se da lo que se conoce como reflexión difusa. La causa de este fenómeno radica en imperfecciones a nivel microscópico que o bien son intrínsecas del material, o bien tienen origen en la continua deposición de partículas sobre la superficie reflectora por encontrarse los concentradores a la intemperie [4].



Figura 13. De izquierda a derecha, reflexión perfectamente especular y reflexión difusa (falta de especularidad)

Esta difusión tiene una influencia clara en la distribución angular final del flujo radiante reflejado. Un incremento en la falta de especularidad provoca que el cono de luz reflejado se ensanche, lo que da lugar a que el área de intersección de dicho cono con el plano receptor aumente su dimensión y por lo tanto se agrave el efecto del desbordamiento (ver definición en la sección 3.1.4).

Esta característica cobra especial relevancia a la hora de analizar el efecto de la suciedad en los espejos, aspecto que se detallara claramente más adelante cuando se analicen los fallos en la manipulación y operación de cada sistema termosolar de concentración.

- **Manufactura y montaje.**

La idea de concentrar la radiación viene directamente asociada a un determinado tipo de superficie de revolución que cumple la peculiaridad de reflejar todos los rayos que inciden paralelamente al eje de revolución sobre un mismo punto.

El lugar geométrico de los puntos que conforman dicha superficie viene determinado por un parámetro fundamental que se denomina foco. Este parámetro marca el lugar por el que pasan todos los rayos que inciden de manera paralela al eje de revolución, además de dar forma a la expresión matemática de dichas superficies.

Como puede suponerse, construir este tipo de superficies no es fácil, cometiéndose en su proceso inexactitudes. A continuación se enumeran cada una de las imperfecciones que se dan a este nivel:

- Errores globales de contorno de superficie.

Este error enmarca una desviación global de la forma de la superficie. Este tipo de errores tiene como efecto principal un desajuste de la distancia focal respecto a la supuesta ideal.

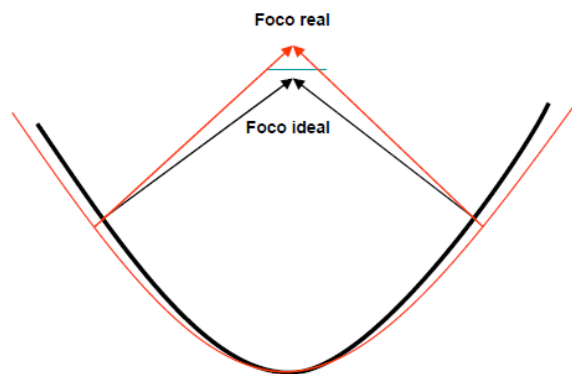


Figura 14. Esquema gráfico del error de contorno

Dicho error viene determinado principalmente por fallos en la estructura soporte del concentrador o en su caso a deformaciones globales debido al peso del sistema, la acción el viento o la temperatura.

Como primera consecuencia de esta irregularidad en la manufactura se destaca el desajuste de la posición del receptor. Como se ha comentado el punto focal marca el lugar donde el área de influencia del flujo concentrado se minimiza, dando lugar al ratio de concentración máximo. Si el receptor se coloca según la distancia focal ideal y no según el foco real, el ratio de concentración no será el óptimo, y por lo tanto el funcionamiento del sistema será susceptible de mejorarse.

- Errores locales de pendiente de superficie.

Es conveniente destacar en primer lugar, que este tipo de errores son considerados los de mayor importancia en sistemas de concentración. Si los nombrados anteriormente atienden a una desajuste global del contorno o forma de la superficie, estos derivan de realizar un análisis más local y focalizado de cada región del concentrador. La superficie no es uniforme y continua, y este hecho se pone de manifiesto en una desviación de la dirección normal respecto la marcada por la superficie perfectamente continua e ideal.

Es evidente que dicha desviación, según la ley de Snell, tiene como consecuencia directa una influencia importante a la hora de determinar la dirección de salida del rayo reflejado y por lo tanto, en qué punto del plano receptor incidirá. Una desviación angular excesiva de la normal provocaría que dicho rayo incidiese en un punto del plano receptor muy alejado del absorbedor, incrementándose así el fenómeno de desbordamiento.

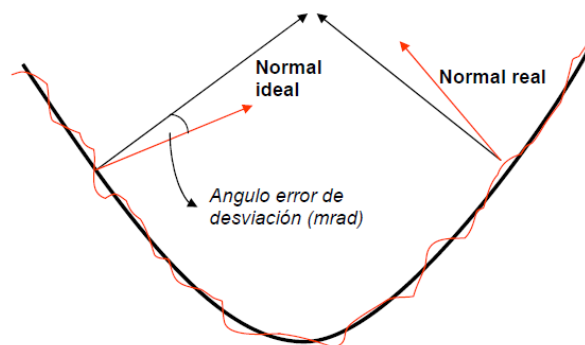


Figura 15. Esquema gráfico del error local de pendiente

- Colocación incorrecta del receptor. Error de apunte.

Idealmente el receptor debe colocarse allí donde teóricamente incidirán todos los rayos reflejados, es decir en el punto focal. La mala colocación del plano receptor respecto al foco se debe, en primer lugar a la falta de exactitud del valor de dicho punto focal. Dicho punto es intrínseco a cada superficie por lo que las imperfecciones que existen a la hora de la fabricación darán lugar también a variaciones del punto focal. Además, se producen desalineamientos del receptor por desajustes del punto focal debido a deformaciones en la estructura debido al propio peso, al efecto del viento, dilataciones térmicas o simplemente al envejecimiento por el paso del tiempo. En un segundo plano, existen inexactitudes a la hora del montaje que dan lugar nuevamente a que el receptor no se coloque adecuadamente.

Como es natural deducir, un error en la colocación dará lugar a una falta de optimización a la hora de que todos los rayos reflejados desde el espejo sean interceptados por el receptor, efecto que se conoce como error de apunte.

- **Operación**

En este nivel destacan fundamentalmente dos tipos de errores, seguimiento y limpieza.

- Seguimiento.

Para la concentración a través de superficies reflexivas es fundamental que se guarden unas posiciones relativas determinadas entre el Sol y la superficie especular para cada instante. Dicha posición se fija al resolver el sistema de ecuaciones que marca las leyes de la reflexión y la imposición de que el rayo reflejado incida sobre el receptor tras ser redireccionado por el concentrador. En el caso de la concentración en tres dimensiones en la que se pretende concentrar la radiación sobre un punto, es necesario seguir al Sol girando sobre dos ejes simultáneamente, lo que implica disponer de sistemas muy exactos.

Aunque en el principio del desarrollo de este tipo de aprovechamiento energético los sistemas de seguimiento suponían grandes pérdidas de eficiencia por error de apunte, en la actualidad, la mejora en la electrónica y el control han permitido que dichas pérdidas se reduzcan drásticamente. La incertidumbre de error se sitúa en aproximadamente $\pm 0,1$ grados, lo que implica una distribución de error en el ángulo de salida de 1,5 mrad aproximadamente.

- Limpieza.

La necesidad de la limpieza de los captadores varía considerablemente según el tipo de captador y el ambiente en el que se instala el mismo. Para entender los efectos de la suciedad sobre los diferentes tipos de captadores es necesario presentar el modo en el que interactúan las partículas depositadas sobre la superficie reflectora y los rayos luminosos.

La suciedad agrava dos efectos ya conocidos y explicados con anterioridad. El primero es que aumenta la absorción por parte del material, disminuyendo por lo tanto la reflectividad. El segundo es que disminuye la especularidad. Es decir, la reflexión sobre un material sucio es más difusa y tiene como consecuencia un “ensanchamiento” de la distribución radiante reflejada tal y como se explicó anteriormente.

Son diferentes los factores que influyen en la acumulación de suciedad en la superficie reflexiva. El ambiente en el que se instala el captador, la calidad y composición del aire, el tamaño de partículas, la velocidad del viento y la forma de la superficie.

La humedad atmosférica cobra un papel muy importante en este fenómeno, ya que dicha humedad incrementa las fuerzas de atracción entre las partículas suspendidas en el aire y la superficie, favoreciendo el proceso de unión. Así, la acumulación de polvo se hace más intensa en la noche con el rocío, actuando éste como un pegamento entre suciedad y superficie. Precipitaciones leves sin la suficiente intensidad como para limpiar los espejos, tienen el mismo efecto.

Estudios de la influencia de la suciedad en propiedades como la reflectividad o la falta de especularidad, desvelan una fuerte influencia de la suciedad sobre dichas características, llegando a variar el valor de la reflectividad entre un 10% y un 20% dependiendo de la frecuencia de limpieza.

- **Absorción por parte del aire.**

Por último, es necesario señalar otro aspecto que es de importancia a la hora de evaluar el comportamiento óptico y energético del sistema, aunque no tenga una relación directa con el mismo. Es el caso de la absorción y difusión de la radiación reflejada en su camino desde el espejo hasta el plano receptor por parte de la atmósfera.

Aunque en sistemas de captadores cilindro parabólicos o de discos parabólicos estas pérdidas pueden suponerse insignificantes, en sistemas de torre central donde las distancias entre el captador y el receptor pueden llegar a alcanzar más de 1 km, la absorción que sufre el flujo radiante es considerable. Esta absorción depende fundamentalmente de la calidad del aire y su composición.

Todos estos errores provocan que en la realidad el desbordamiento aumente (disminuya el factor de interceptación) y por tanto la energía absorbida por el receptor sea diferente. Por tanto, para modelar un comportamiento suficientemente preciso de un sistema concentrador de este tipo se han de tener en cuenta estos fenómenos. Los valores de estos errores se representan como una desviación estándar en el sistema captador, como se ilustra a modo de ejemplo en la tabla siguiente.

Tabla 4. Valores típicos de errores para SDP [7]

Tipo de error	Desviación estándar σ (mrad)
Superficie (slope error)	2,5 (x2)
Sensor de seguimiento	2
Actuador de seguimiento	2
Apunte del receptor	2
Especlaridad	0,25 (x2)
Forma solar	2,8

Por último, también se encuentra el error debido a la forma solar o “sunshape” (en inglés). Se denomina así a la distribución angular de energía con respecto al rayo central que parte desde el centro del disco solar. Si el Sol fuese lo suficientemente pequeño, o estuviese lo suficientemente lejos, como es el caso de las estrellas, la radiación que nos llega a cada punto de la Tierra podría considerarse como un único rayo. La relación geométrica entre el radio del Sol y su distancia media a la Tierra hace que este sea visto como un disco cuyo diámetro se subtiende bajo un ángulo de 9,3 mrad. Esto implica, que a cada punto de la Tierra llega un rango de rayos procedentes de cada uno de los puntos de dicho disco, formando un cono solar con una apertura definida por el diámetro angular antes nombrado.

El error total del CDP puede ser estimado por la siguiente expresión, que proporciona un valor aproximado de 6,7 mrad de error [7].

$$\sigma_{tot} = \sqrt{(2 \cdot \sigma_{sup})^2 + \sigma_{sensor}^2 + \sigma_{actuador}^2 + \sigma_{apunte}^2 + (2 \cdot \sigma_{reflectividad})^2 + \sigma_{sol}^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

3.1.4. Desbordamiento

A causa de errores ópticos y de operación del sistema, la concentración no es ideal y por tanto no todos los rayos alcanzan el mismo punto ideal localizado en el foco, sino que se distribuyen en un

cono a la salida del concentrador y, por tanto, al ser proyectados sobre el plano receptor, se sitúan alrededor de dicho punto ideal no entrando todos ellos en la cavidad. Este fenómeno es conocido como desbordamiento, y es un factor a tener en cuenta en los Sistemas Termosolares de Concentración (STC), como se muestra en la siguiente figura:



Figura 16. Pérdidas por desbordamiento en torre

En la Figura 16 se muestra el desbordamiento causado por el apunte del campo de heliostatos sobre el receptor de la torre. Por tanto, el desbordamiento, “spillage” o factor de intercepción, como también se conoce, es la cantidad de energía reflejada por el concentrador que por distintas causas no es aprovechada por el receptor y suele expresarse en un valor porcentual respecto al valor total de la energía concentrada.

El efecto en el disco Stirling es similar, puesto que el campo de heliostatos es al CDP su símil Fresnel. La siguiente figura muestra el desbordamiento en el disco Stirling de la Escuela Superior de Ingeniería de Sevilla en funcionamiento.

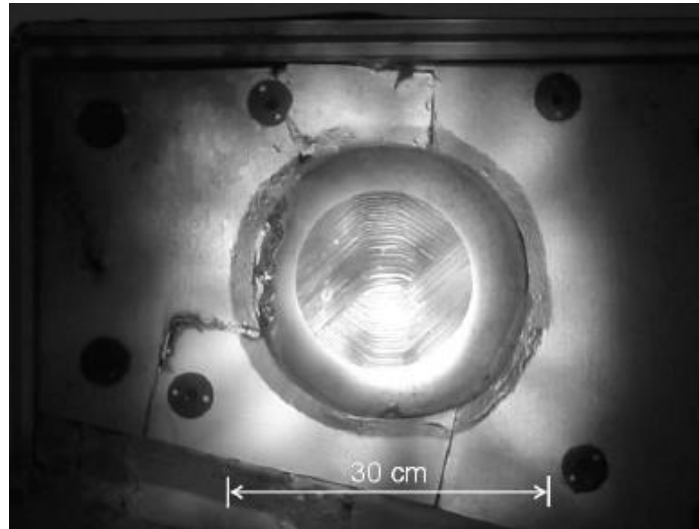


Figura 17. Efecto de desbordamiento en el disco Stirling de la ESI [4]

3.2. Técnicas de caracterización

En los sistemas de concentración solar, el concentrador solar es el principal componente de costos, y la calidad óptica, en particular la precisión geométrica de los concentradores solares tiene un impacto significativo en la eficiencia y por lo tanto en el rendimiento de la planta de energía. Cualquier desviación de la superficie óptima puede conducir a pérdidas ópticas, por lo tanto, es importante contar con una herramienta que puede medir estos errores con la precisión adecuada.

3.2.1. Antecedentes relativos a la caracterización de superficies reflectivas

Una evaluación geométrica, y por tanto óptica, confiable de los concentradores solares de cualquier forma o material, permitirá una adecuada predicción de la capacidad de generación de una central solar térmica de mayor magnitud. Los antecedentes muestran que desde mediados de la década de 1950 se ha intentado evaluar mediante distintas técnicas la densidad del flujo reflejado (característica relacionada con la precisión de los concentradores) de los denominados en aquel entonces hornos solares. En épocas más recientes y con el desarrollo de grandes superficies reflectivas, se han implementado diferentes procedimientos muchos de los cuales están basados en técnicas visuales y herramientas informáticas que permiten determinar su resolución óptica, ya sea en sistemas de foco lineal o bien de foco puntual. A continuación se describen brevemente algunos ejemplos destacados de métodos recientes que permiten caracterizar geométricamente esta clase de concentradores.

3.2.2. Métodos escáner láser SHOT, 2f y On sun testing

Wendelin y Grossman [8] publican un análisis comparativo entre tres diferentes métodos para la caracterización óptica de sistemas solares concentradores de foco puntual. Estos métodos

desarrollados tanto en el NREL como en los Laboratorios SANDIA de los EEUU, utilizan técnicas de escáner superficial y complejos sistemas de montaje y calibración de equipo.

En el primer método publicado en 1991, llamado SHOT (acrónimo del concepto en inglés Scanning Hartmann Optical Test) un haz de luz láser es dirigido desde un punto localizado a aproximadamente dos veces la distancia focal y a nivel del eje óptico del concentrador hacia la superficie reflectora de éste. El láser incide en el reflector y se refleja de vuelta hacia una pantalla-objetivo de color blanco. Un detector electrónico localiza el centroide de punto de retorno, determinando geométricamente la pendiente en el punto de origen del haz reflejado, para enseguida dirigir el haz de luz láser hacia un nuevo punto. El proceso, automático y computarizado, se repite hasta adquirir los datos en alrededor de 2000 puntos parando una vez que la superficie entera del concentrador se ha completado.

El método 2f hace uso de la técnica del “observador distante”, en donde una cámara observa el reflejo de un objetivo con forma de anillos concéntricos localizado en un dispositivo junto con la misma cámara. El espacio entre esta y el concentrador es equivalente al radio de curvatura, esto es aproximado al doble de la distancia focal (de ahí su nombre, 2f). Es un sistema de medición del desempeño óptico para concentradores solares de foco puntual con una relación f/D (distancia focal entre diámetro) mayor a 3,0. Un programa informático reconoce las imágenes obtenidas en un monitor, digitalizándolas, para que a través de un algoritmo, pueda obtenerse un número para cada faceta individual del concentrador llamado Figura de Mérito de Faceta (FFM en inglés), el cual no se considera un valor de error de pendiente verdadero debido a que está basado en un valor arbitrario, no obstante muestra una correlación aceptable con el método SHOT más sofisticado, es por eso que el método se considera sobre todo una herramienta para el control de calidad en producción.

El método On-sun Testing como su nombre lo indica, es una prueba realizada al concentrador operando con radiación solar y emplea una videocámara adaptada con filtros oscuros de protección, un digitalizador de imágenes y un software disponible comercialmente. El montaje tiene como finalidad proporcionar una imagen de la distribución energética del flujo concentrado en tiempo real, un valor-pico de temperatura y el valor de la energía total incidente en el absorbedor. Este complejo método se utiliza en conjunto con el código informático CIRCE2, el cual compara los cálculos teóricos ofrecidos por este programa con los resultados experimentales.

3.2.3. Fotogrametría digital de rango cercano

Shortis y Johnston [9] implementaron una técnica muy útil que permite la caracterización completa de cualquier tipo de superficie, incluida la reflectiva de un concentrador parabólico lineal o de disco, a la cual se ha denominado “Fotogrametría digital de rango cercano”. Esta técnica se apoya en la ciencia del análisis cuantitativo mediante mediciones en fotografías. La combinación de cámaras fotográficas digitales de alta calidad de imagen (mega-píxeles), un software y escalas de referencia apropiadas son casi todo lo necesario para proporcionar mediciones de coordenadas tridimensionales con una precisión igual o mayor a 1:50000. Las fotografías del objeto a evaluar se toman desde dos o más puntos de vista. Los “puntos-ubicación” de la imagen son luego medidos utilizando dispositivos manuales o semiautomáticos, tales como comparadores fotogramétricos, los

cuales son sistemas digitalizadores x-y muy precisos que tienen la facilidad de grabar estos “puntos-ubicación” de una forma legible para el ordenador. Los estéreo-plotters, utilizados también para este fin, son dispositivos analógicos que utilizan un sistema opto-mecánico para ver y medir la ubicación de las imágenes en las fotografías. Al observador, combinado con un algoritmo matemático, se le puede considerar un digitalizador tridimensional que localiza cualquier punto visible sobre la superficie del objeto.

La fotogrametría es una herramienta excelente para medir la exactitud de la forma estructural en concentradores solares de gran tamaño, y a pesar de no ser un procedimiento simple, se puede efectuar con objetivos “retro-reflectantes” y una linterna apropiados durante el día, aún con luz del Sol. Después de la instalación de los objetivos, el tiempo de medición es corto. Dependiendo del tamaño del concentrador, puede durar desde el inicio de la ubicación del objetivo a la extracción final de las coordenadas del objetivo desde alrededor de medio a un día entero.

En la Figura 18 se pueden observar imágenes obtenidas en la caracterización óptica del sistema CCP EuroTrough. En la imagen superior se tiene un módulo CCP con los puntos-objetivo retro-reflectantes convenientemente ubicados por toda la superficie reflectiva. En la imagen inferior se observa una imagen multicolor que indica las desviaciones angulares del sistema de acuerdo con la técnica utilizada.

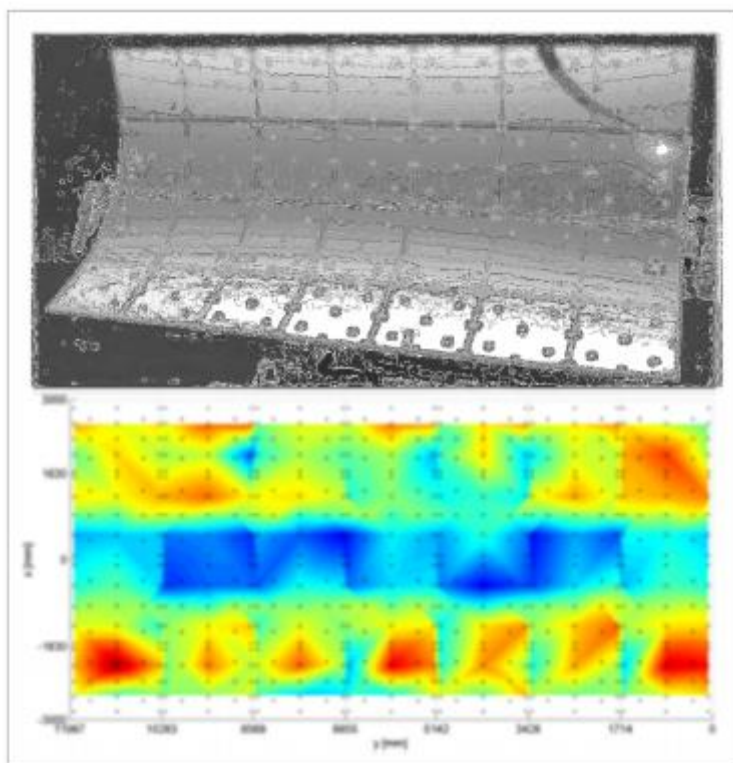


Figura 18. Caracterización por fotogrametría del sistema Eurotrough

3.2.4. Método V-SHOT

Jones [10] publica el método VSHOT (Video Scannig Hartmann Optical Tester), basado en el método SHOT desarrollado por Wendelin y Grossman en 1991 [8], muy similar y utilizado igualmente para evaluar el error de pendiente en los concentradores de disco parabólico, tal como el sistema DISTAL II de la Plataforma Solar de Almería (PSA). La principal diferencia es que el haz láser reflejado es grabado con una videocámara. Este procedimiento se puede usar para CDPs de entre 2.0 y 15.0 m de diámetro D , y para una relación f/D en el rango de 0.5 – 3.0. Para relaciones f/D mayores, se utiliza el método llamado $2f$ mencionado anteriormente. No obstante, estos métodos no se consideran aptos para la evaluación de reflectores con una distancia focal mucho mayor, como es el caso de los helióstatos de un sistema de torre central con 100 m o más de longitud.

3.2.5. Método SSCAN

El método SSCAN, “Solar Concentrator Characterization At Night”, es un sencillo procedimiento de caracterización óptica desarrollado en la PSA por Arqueros y colaboradores [11], el cual es posible utilizarlo durante la noche en diferentes tipos de concentradores, incluidos los SDP. El proceso para caracterizar un helióstato de un sistema de torre central explica en que consiste este método. Se eligió una estrella convenientemente aislada que sirviera como “punto luminoso” con el fin de verificar el alineamiento de los reflectores, enfocando su luz hacia una cámara tipo CCD localizada en lo alto de la torre, desde donde se pueden observar estos puntos luminosos debido a la reflexión de la luz emitida por la estrella, pudiéndose comprobar que la posición de los puntos cambian con la posición de la cámara u observador. Tomando varias imágenes con la cámara se puede entonces medir con la ayuda de un software adecuado la ubicación de los puntos luminosos y determinar la pendiente de los reflectores de la misma forma que en el método SHOT, con la diferencia de que la luz de la estrella provee un haz que ilumina por completo la superficie del concentrador.

3.2.6. Método del objetivo con código de colores

Ulmer y colaboradores [12] han desarrollado una técnica de evaluación óptica basada en el método $2f$ que ha resultado muy conveniente para la medición del error de pendiente en concentradores de disco parabólico, la estimación de la distancia focal y la densidad de flujo en la zona focal. Probado en los sistemas DISTAL II y EuroDish de la PSA, este método utiliza un objetivo óptico consistente en una placa marcada con un patrón de 22 franjas de colores y unas dimensiones de 65 x 65 cm. que se coloca cerca del plano focal perpendicular al eje óptico del concentrador. Una cámara digital con lentes de tele-foto se coloca a unos 250 m del disco con el concentrador dirigido hacia esta. A esta distancia la imagen reflejada del objetivo “llena” la superficie completa del reflector parabólico. Luego, se toman dos imágenes fijas, una con las franjas del objetivo en forma horizontal, y la otra con las franjas en forma vertical. Las imágenes obtenidas son evaluadas con un algoritmo que utiliza un software de análisis de imagen disponible comercialmente, que reconoce los diferentes colores mediante un umbral y asigna a cada píxel la posición de la franja correspondiente en el objetivo. El esquema del montaje se puede observar en la Figura 19.

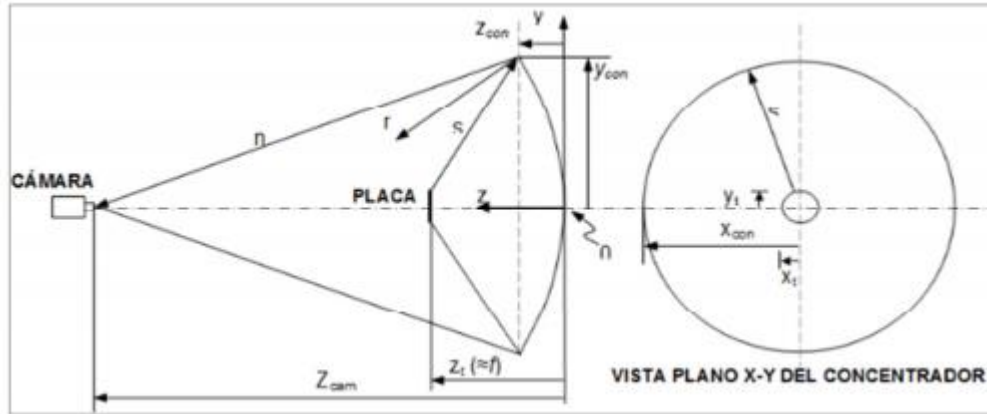


Figura 19. Montaje del método Ulmer para evaluación del error de pendiente

Una vez que las imágenes han sido analizadas, los valores obtenidos se exportan al programa Matlab en donde se calcula la pendiente de superficie real de acuerdo con unas ecuaciones que describen la reflexión teórica en una superficie especular. El resultado de este análisis óptico arroja, esquemáticamente, unas circunferencias que describen mediante una gama determinada de colores, las desviaciones angulares (en mili-radianes) de la superficie del concentrador con respecto a una parábola ideal.

En la Figura 20 se observan imágenes obtenidas en la caracterización del sistema de Disco/Stirling DISTAL-2 utilizando el método descrito anteriormente. El diagrama de la izquierda muestra los errores de pendiente con una distancia focal de 5.013 m en la dirección radial. Los valores positivos denotan desviaciones hacia dentro mientras que los valores negativos denotan desviaciones hacia fuera. Se pueden encontrar altos valores negativos, de hasta -10 mrad, principalmente en las áreas externas del concentrador, en tanto que valores positivos, de hasta 6 mrad, se localizan en una gran área central-superior y sobre todo el fondo del concentrador. En los límites entre facetas de espejos individuales se pueden observar cambios abruptos en los errores de pendiente. Esto indica que las facetas de espejo pegadas no se ajustan perfectamente a la forma básica de la membrana de acero. El diagrama de la derecha en la Figura 20 muestra los errores de pendiente tangenciales junto con los círculos alrededor del centro. Los valores positivos denotan ángulos de desviación en dirección de las manecillas del reloj y los valores negativos son ángulos de desviación en sentido contrario.

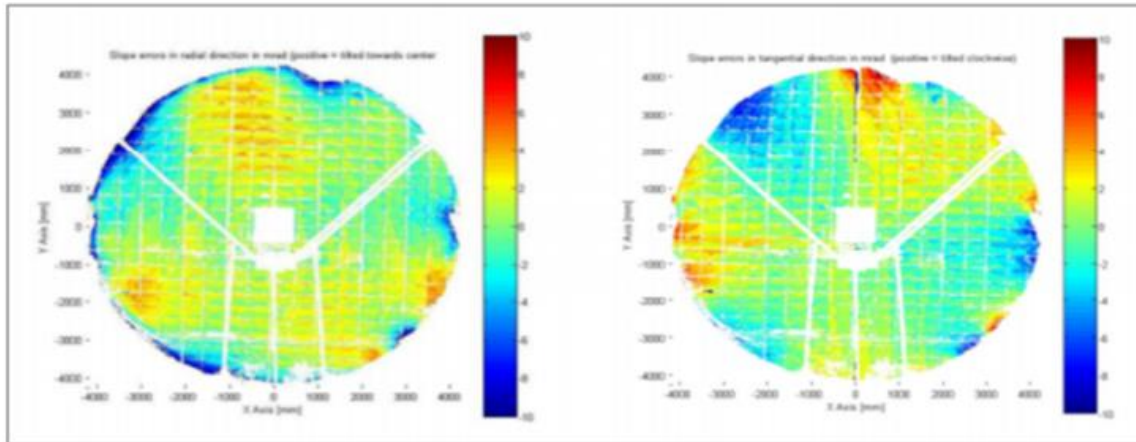


Figura 20. Errores de pendiente radial (izquierda) y tangencial (derecha), obtenidos del sistema Distal II

3.2.7. Deflectometría óptica

Algunos autores mencionan el método de la deflectometría óptica como otra de las técnicas utilizadas para caracterizar una superficie reflectiva curva. Es un método basado en las leyes de la reflexión y refracción de la luz, que consiste en la observación y el análisis de la imagen reflejada por la superficie. El principio fundamental se muestra en la Figura 21 donde se presenta el haz que incide sobre la superficie que se desea caracterizar y el rayo reflejado, que se capta por medio de una cámara CCD o un detector de posición. A partir de estas medidas se obtiene la desviación que sufre el haz de luz cuando interacciona con la superficie, teniendo información de la pendiente mediante la función tangente. Este método funciona de forma similar a los métodos SHOT, realizando la medición de la pendiente de superficie de forma directa, no obstante al igual que los otros y para el caso de superficies muy extensas es necesario que existan muchos puntos de muestreo.



Figura 21. Principio de la deflectometría óptica

También es importante el tamaño del haz láser que incide sobre la superficie: si se emplea un láser de diámetro grande, se realiza un promedio de la intensidad de la luz de todos los puntos abarcados dentro del diámetro; por tanto, el uso de un láser de diámetro grande es indicado para medir la topografía general de grandes superficies. También se puede utilizar un haz de diámetro más pequeño de modo que se obtendrá mucha más información de la topografía, es decir, es apropiado para caracterizar la nanotopografía de la superficie; aunque si se toma un haz láser demasiado pequeño pueden presentarse fenómenos difractivos que introducirían errores en las medidas.

3.2.8. Caracterización mediante flujo lunar

Este método está basado en el ya comentado anteriormente método de “On sun testing”. En este caso también se proporciona una imagen de la distribución de flujo concentrado en tiempo real sobre una diana o “target” situada a la distancia focal (o punto a medir). La diferencia principal radica en que este caso la prueba se realiza durante la noche y utilizando la luna como fuente luminosa.

La similitud en el ángulo subtendido de la Luna y el Sol permite utilizar esta técnica, cuya principal ventaja es evitar colocar un sistema de refrigeración en la diana, ya que se evita la concentración del alto flujo concentrado asociado a la radiación solar.

Hay pocos informes que hablen sobre este método: [13], [14]. El primer intento de medir la distribución de flujo usando imágenes de la luna llena proyectada sobre un objetivo plano fue descrito por Thomas y Whelan [15]. Más tarde, este método se usó para caracterizar la distribución de flujo en el plano focal del disco “Big Dish” de 400 m² perteneciente a la Universidad Nacional de Australia [16] y en el EuroDish de la Escuela de Ingenieros de Sevilla [4].

3.3. Análisis de viabilidad de los diferentes métodos

En la siguiente tabla se presenta de forma muy breve una relación comparativa de algunos de los métodos analizados en este trabajo referentes a la caracterización óptica de concentradores solares. El análisis de los diferentes procedimientos descritos anteriormente, los cuales reflejan una amplia gama de técnicas recientes para la evaluación eficiente de las superficies reflectivas en los concentradores de foco puntual.

Nombre	Año	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
<i>SHOT/VSHOT</i>	1991/ 1994	Concentradores de foco puntual.	- Alta resolución y elevada precisión. - No utiliza cámara CCD. - Determinación directa del error	- Costo elevado. - Tiempo de ejecución considerable.
<i>2f</i>	1991	Concentradores de foco puntual con una relación f/D mayor a 3.0.	- Se realiza en cualquier hora/lugar. - No utiliza cámara CCD. - No requiere una calibración precisa.	- Costo elevado. - Método de precisión limitada. - Tiempo de ejecución considerable.
<i>On-sun Test.</i>	1991	Concentradores de foco puntual.	- Alta fiabilidad. - Alta resolución y elevada precisión.	- Costo elevado. - Requiere software para digitalizar imagen y comparación resultados - Debe realizarse con radiación solar y sistema de refrigeración.
<i>Fotogrametría.</i>	1996	Cualquier superficie reflectiva, CDP, CCP, HLS.	- Utiliza cámara digital. - Determinación indirecta por medio de coordenadas 3-D.	- Costo moderado. - La calibración debe tener una gran exactitud. - Tiempo de ejecución medio.
<i>Objetivo c/ código de colores. (Método Ulmer-P.S.A)</i>	2006	Concentradores de foco puntual.	- Utiliza una cámara digital. - No requiere refrigeración. - Simple y rápido. - Bajo costo.	Depende del software de análisis de imagen para el cálculo del error.
<i>SCCAN.</i>	2003	Cualquier superficie reflectiva, CDP, CCP, HLS.	- Se realiza de noche, sin sistema de refrigeración del blanco. - Simple y rápido.	- Limitado a condiciones ambientales favorables. - Requiere software de análisis de imagen.

Figura 22. Comparación de los métodos de caracterización óptica propuestos

3.4. Selección del método

Teniendo en cuenta los diferentes métodos expuestos anteriormente, finalmente se optó por una combinación de dos de ellos para llevar a cabo la caracterización óptica del concentrador de disco parabólico aquí mencionada. Los métodos elegidos son la caracterización lunar y la medición mediante fotogrametría.

La utilización de ambos métodos tiene una razón simple; si bien la caracterización lunar aporta información sobre la distribución de flujo real del sistema una vez construido y en funcionamiento, se necesita conocer por otro lado las especificaciones de diseño para conocer la desviación de la calidad óptica del concentrador una vez construido con respecto a la de diseño o teórica. Al no conocerse estas especificaciones de diseño (en este caso no son aportadas por el fabricante del concentrador) se opta por utilizar la medición por fotogrametría. Este método permite obtener una nube de puntos lo suficientemente densa como para representar de manera precisa la superficie real del concentrador. Posteriormente mediante un post-procesamiento basado en best-fit y raytracing se obtiene la superficie teórica.

La caracterización lunar presenta grandes ventajas, entre ellas la principal es la no necesidad de utilizar un sistema de refrigeración. En cuanto a la fotogrametría como método de caracterización ofrece algunas características convenientes para el desarrollo del proyecto como son:

- La relación precisión-tiempo de la medición es muy buena ya que en lo que se emplea más tiempo en una medición es en montar y desmontar los elementos retroreflectantes que utiliza esta tecnología para detectar los puntos a medir; la adquisición y el procesamiento de las imágenes es sencilla gracias a los avances que han tenido los softwares para esta tecnología en los últimos años.
- La inversión inicial es moderada gracias a que no requiere ninguna instalación ni acondicionamiento para realizar las mediciones. El costo más representativo se lo lleva el software ya que el mantenimiento y calibración de los accesorios y cámara se ha minimizado bastante gracias a los sistemas de auto-calibración que tienen incorporados algunos softwares.

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

4.1. Descripción del concentrador

El concentrador de disco parabólico DS1 sobre el que se centran los estudios fue desarrollado en el marco del proyecto “SOLARDIS”. El concentrador (ver Figura 23) tiene una apertura circular de 9.2 m de diámetro, 5.54 m de longitud focal y un área efectiva mayor de 55 m². Está compuesto por 40 facetas de vidrio-metal y la estructura está montada sobre un pedestal central (estructura monoposte). El concentrador fue diseñado para la instalación de un motor Stirling de 10 kW_e. Se resumen a continuación algunas de las características principales de diseño suministradas por el fabricante.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del concentrador

Área efectiva concentrador (m²)	≥55
Diámetro de apertura (m)	9.2
Distancia focal (m)	5.54
Reflectividad facetas (%)	≥90
Nº facetas	40 ¹
Dimensiones caja que incluye cavidad-receptor-motor (m)	0.88x0.86 ²

¹ La superficie del captador está formada por 40 facetas, 13 interiores y 27 exteriores; para este estudio se desprecia una de las facetas exteriores debido a su mal estado.

² [22]

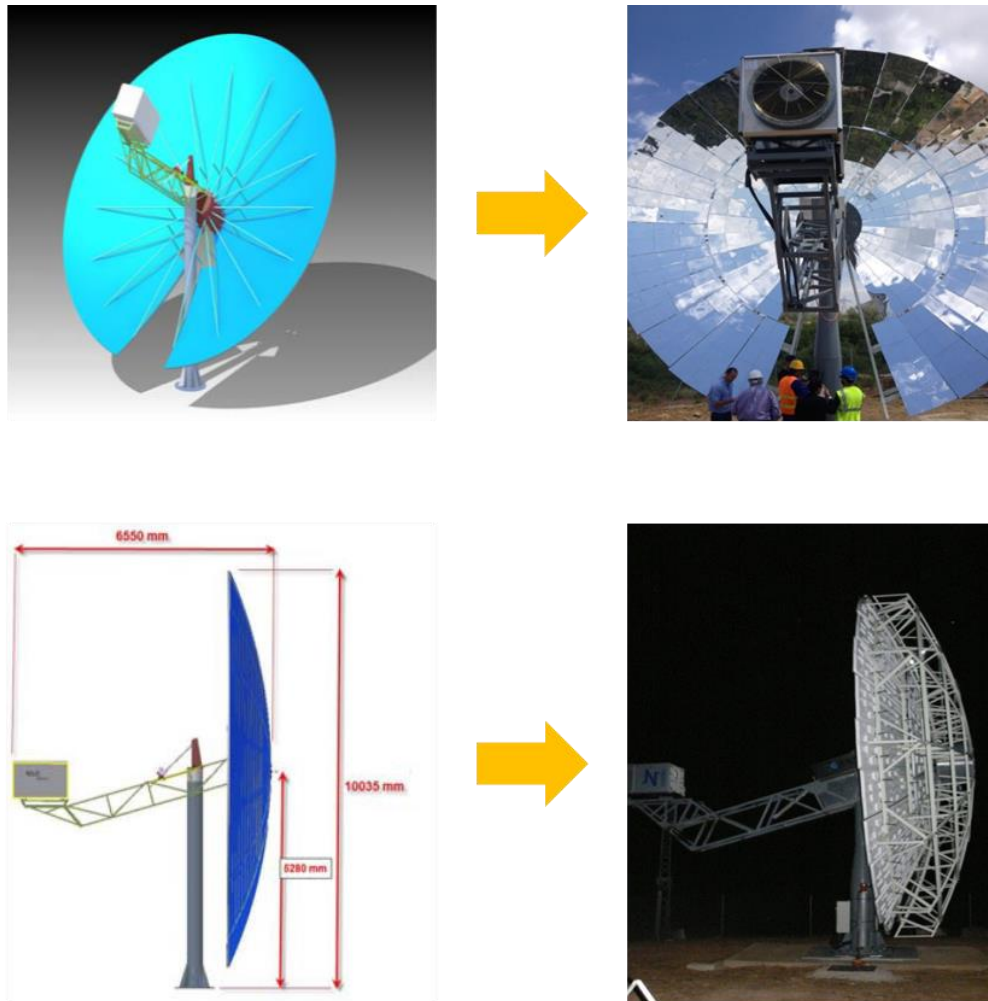


Figura 23. Izq. Modelo de estructura soporte; der. Estructura real del concentrador

5. Metodología

Las tareas planteadas para la caracterización óptica del concentrador de disco parabólico son las siguientes:

- **Tarea 1: Caracterización superficial del concentrador mediante fotogrametría.**

La medición por fotogrametría tiene como objetivo obtener una nube de puntos lo suficientemente densa como para representar de manera precisa la superficie real del concentrador.

- **Tarea 2: Ajuste “best-fit” de la nube de puntos.**

A partir de la información obtenida mediante los ensayos de fotogrametría, se realiza un “best fit” para conseguir la curva que mejor se ajusta a esa nube de puntos. De esta forma se obtiene la superficie parabólica teórica que mejor se aproxima a la real del concentrador.

- **Tarea 3: Simulación con herramienta de trazado de rayos.**

En esta tarea se simula, mediante ray-tracing, la distribución de flujo teórica que se obtiene con un concentrador, cuya superficie es la superficie parabólica teórica ajustada mediante el “best fit”.

- **Tarea 4: Medición de la distribución de flujo lunar.**

Para ello se enfocará el disco de manera que se refleje la imagen lunar sobre un blanco o diana (“target”) situado en la apertura de la cavidad del receptor. La ventaja de esta técnica es que la luna tiene un ángulo subtendido similar al del Sol y de esta forma se evitan complicaciones al no tener que introducir un sistema de refrigeración para el target utilizado. La medición debe llevarse a cabo en fase de luna llena.

- **Tarea 5: Comparación de las distribuciones de flujo obtenidas.**

Comparación de la distribución obtenida de manera teórica, mediante raytracing, con la medida real a través de la caracterización con flujo lunar. Obteniendo a partir de dicha comparación, una estimación de la calidad óptica del concentrador DS1.

5.1. Tarea 1: Caracterización superficial del concentrador mediante fotogrametría

La fotogrametría es un procedimiento simple que permite caracterizar prácticamente cualquier superficie de forma tridimensional mediante el cálculo de coordenadas a partir de imágenes tomadas desde diferentes puntos de la superficie a estudiar.

No es necesario el uso estricto de cámaras CCD, aunque sí se requiere colocar sobre el área a estudiar un determinado número de puntos-objetivo que servirán de referencia en las imágenes. Pottler [17] recomienda la utilización de material retro-reflectante en dichos puntos para su colocación en gran número a lo largo y ancho de la superficie de reflexión.

La precisión de la medida en fotogrametría depende de diferentes factores, los más significativos son la resolución del sensor de la cámara, la solidez geométrica de la red de puntos y el nivel de mediciones redundantes tomadas [17].

Debido a que la calibración de las distancias al momento de elaborar el conjunto de fotografías es un factor muy importante en este tipo de técnica, se requiere del montaje de una estación de trabajo y una estructura física para la obtención de la red fotográfica. La pendiente de la superficie reflectante se calcula a partir de coordenadas de puntos en el espacio con la ayuda de un software de medición visual.

Esta técnica se ha usado tanto para la construcción de discos como para la fabricación de espejos. El uso de la fotogrametría para el análisis geométrico de concentradores solares fue descrito por [17], [18] y [19].

5.1.1. Descripción

Las mediciones se realizaron para 4 inclinaciones diferentes del concentrador (0, 30, 60 y 90 grados). Con esto se pretendía comprobar, de manera adicional, cómo se comporta la estructura en distintas posiciones.

El equipamiento principal necesario para realizar los ensayos de fotogrametría constó de:

- Cámara Nikon D3X, calibrada para los ensayos, con flash de anillo.



Figura 24. Cámara NIKON D3X

- Targets o blancos retrorreflectantes. Se colocan en los puntos-objetivo a medir para obtener sus coordenadas 3D. El software solo es capaz de detectarlos pero no de identificarlos.
- Targets-code (blancos codificados). Estos targets son identificados automáticamente por el software y usados para referenciar y escalar las imágenes.

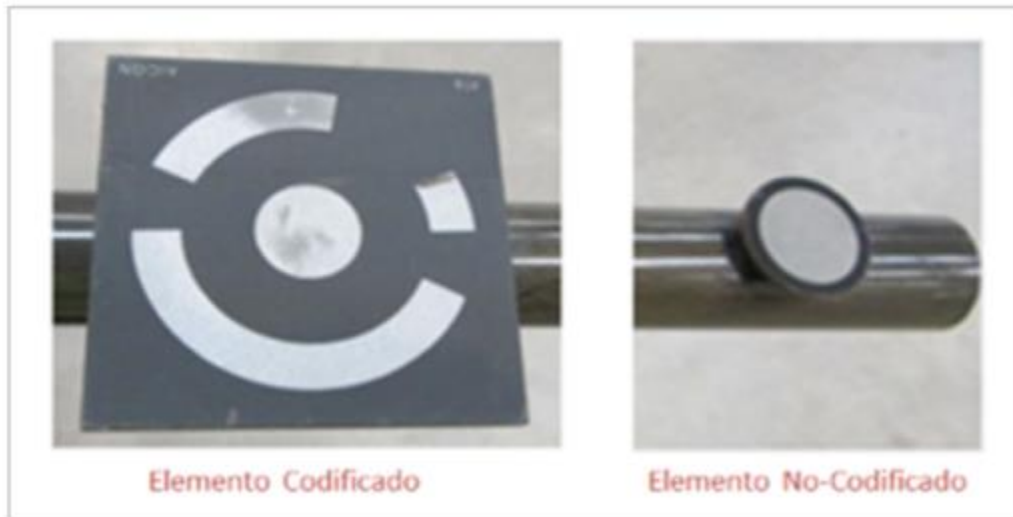


Figura 25. Elementos retrorreflectantes

- Barras de escala de fibra de carbono de 2 m de longitud con una precisión mayor de 0.05 mm para escalar la distancia entre targets. Como su nombre indica son los elementos que el software utiliza para escalar las medidas obtenidas de los puntos a analizar; tienen una longitud de 2 m y a lo largo de ellas se encuentran montados 4 elementos codificados y 5 elementos no codificados. Estas barras están perfectamente calibradas, conociéndose de esta forma la medida exacta entre cada uno de sus puntos.



Figura 26. Barra de escala

- Triángulo de referencia. Necesario para fijar el origen del sistema de referencia en el post-procesamiento de las imágenes. Es el elemento que el software reconoce y toma por defecto como el eje de coordenadas de la medición; tiene distribuidos 6 elementos codificados, los cuales se encuentran perfectamente calibrados.



Figura 27. Triángulo de referencia

- Plataforma elevadora. Necesaria para la colocación de los targets, barras y la toma de imágenes.
- Software de post-procesamiento AICON DPA.

5.1.2. Procedimiento

La colocación de los elementos retrorreflectantes se realizó tal como se muestra en la Figura 28. Se colocaron 12 targets por faceta. Estos se dispusieron en diferentes puntos de interés: esquinas de las facetas y puntos centrales de las subfacetas que componen cada faceta. También se colocó un target-code (elemento que el software usa para orientar las imágenes) por faceta.

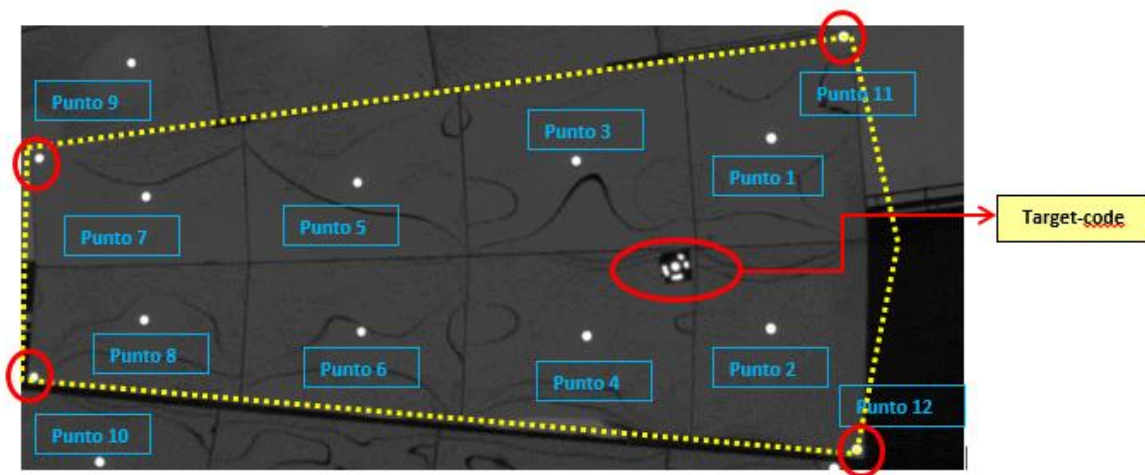


Figura 28. Elementos retrorreflectantes y targets-code sobre una de las facetas del captador

En este ensayo el número de targets de cada tipo utilizado se indica a continuación:

Tabla 6. Número de elementos utilizados en los diferentes ensayos

Targets retrorreflectantes	468
Target-code	39
Barras de calibración de 2 m de longitud	4
Triángulo de referencia	1

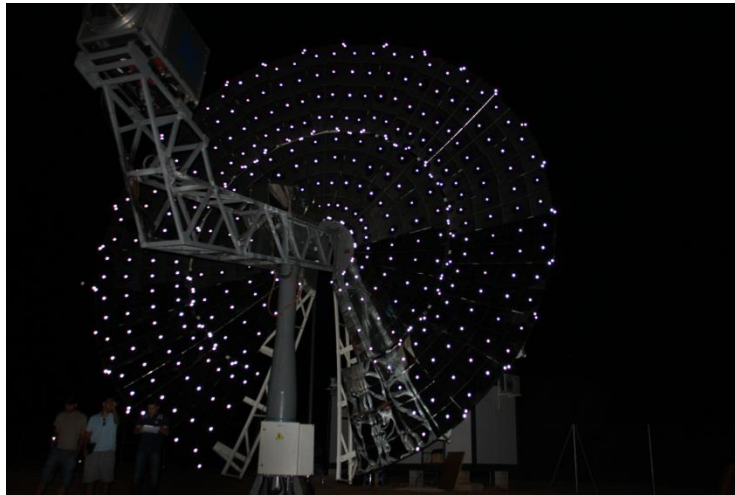


Figura 29. Imagen tomada de noche de la distribución de los targets retrorreflectantes sobre la superficie del concentrador

5.1.3. Adquisición de las imágenes

Las imágenes fueron tomadas mediante una cámara Nikon D3X, 28mm, precalibrada y con sus parámetros ajustados a las condiciones en las que se realizó la adquisición de las imágenes (iluminación y calidad) requeridas para que el software pueda detectar los targets.

Las imágenes fueron tomadas desde distintas posiciones y a distintas elevaciones de la superficie (0, 30, 60 y 90 grados) gracias a una plataforma elevadora de brazo articulado, con el fin de hacer un barrido de toda la superficie reflectante. Para asegurar la calidad de la medición, son necesarias un promedio de 350 fotos por medición.



Figura 30. Personal de CTAER realizando los ensayos de fotogrametría del disco

5.1.4. Análisis del software

Como se mencionó anteriormente el análisis de las imágenes se realizó mediante el software Aicon 3D Studio. Al comienzo del proyecto, se crea una plantilla o template en el cual se seleccionan e introducen una serie de parámetros para que el software pueda reconocer los objetivos que se desean medir, como son: la cámara y sus parámetros, las barras utilizadas con sus respectivas medidas, el triángulo de referencia utilizado y el tipo de elementos codificados.

Después se cargan las imágenes obtenidas, con lo cual el programa comienza con el reconocimiento y ubicación de los puntos. Una vez que termina genera una nube de puntos con la cual se puede comenzar a trabajar (ver Figura 31).



Figura 31. Nube de puntos obtenida durante el procesamiento de datos

Para cada punto se obtiene su coordenada (X, Y, Z), la desviación estándar de la medición y el número de veces que el programa detectó ese punto. También permite realizar operaciones como

cambiar el eje de referencia a otro lugar, reenumerar o cambiar el nombre de los puntos obtenidos, medir distancias de un punto a otro y comparar dos nubes de puntos para calcular las deformaciones.

	Pnt. no.	Pnt. name	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Sx [mm]	Sy [mm]	Sz [mm]	Rays	Active	Visible
1	5000		336,3820	511,7872	6751,5887	0,0817	0,0803	0,1107	23	✓	✓
2	5001		-20,0798	879,4673	6674,5712	0,0775	0,0682	0,0850	40	✓	✓
3	5002		655,7871	905,1675	6675,1832	0,0777	0,0667	0,0851	44	✓	✓
4	5003		663,4023	185,8497	6676,2828	0,0777	0,0698	0,0846	45	✓	✓
5	5004		-32,4934	190,3056	6675,9572	0,0781	0,0726	0,0898	34	✓	✓
6	5005		-115,8842	148,4832	5452,8809	0,1347	0,0823	0,1083	6	✓	✓
7	5007		743,3629	157,5911	5449,8589	0,2289	0,1005	0,2680	5	✓	✓
8	5008		735,2525	939,7381	5450,7568	0,2033	0,0989	0,2479	5	✓	✓
9	10000		-0,0000	0,0000	-4,3394	0,0277	0,0271	0,0509	54	✓	✓
10	10001		-221,4533	157,8957	-3,5607	0,0247	0,0247	0,0483	67	✓	✓
11	10002		-243,2616	192,4517	4,4898	0,0251	0,0246	0,0500	67	✓	✓
12	10003		-382,8144	427,2017	3,2376	0,0202	0,0213	0,0372	77	✓	✓
13	10004		-395,2275	469,0675	4,1571	0,0202	0,0211	0,0371	77	✓	✓
14	10006		-418,3232	783,6494	-0,9886	0,0190	0,0188	0,0340	87	✓	✓
15	10007		-338,0576	1042,1099	-2,1394	0,0172	0,0170	0,0298	103	✓	✓
16	10008		-316,5379	1082,3658	2,7401	0,0173	0,0170	0,0303	104	✓	✓
17	10009		-133,7814	1288,0920	-0,0111	0,0168	0,0167	0,0295	111	✓	✓
18	10010		-99,7797	1319,2166	-3,3768	0,0158	0,0155	0,0278	120	✓	✓
19	10011		154,4571	1427,2427	-3,8941	0,0142	0,0144	0,0255	145	✓	✓
20	10012		197,0278	1437,1127	-1,2262	0,0144	0,0143	0,0265	144	✓	✓
21	10013		472,0150	1438,3058	-0,2433	0,0138	0,0136	0,0269	163	✓	✓
22	10014		512,9634	1421,5961	0,5319	0,0141	0,0140	0,0274	159	✓	✓
23	10015		764,7539	1314,7432	0,8927	0,0155	0,0157	0,0324	138	✓	✓
24	10016		802,5218	1285,7871	3,9558	0,0154	0,0157	0,0309	142	✓	✓
25	10017		988,1572	1085,7450	5,0866	0,0168	0,0169	0,0353	131	✓	✓
26	10018		1008,1061	1049,3416	-1,2758	0,0166	0,0168	0,0340	134	✓	✓
27	10019		1089,5595	790,4760	0,7562	0,0186	0,0212	0,0449	108	✓	✓
28	10020		1095,6452	744,6380	-3,9309	0,0183	0,0210	0,0403	107	✓	✓
29	10021		1066,6474	476,5923	-0,6902	0,0204	0,0253	0,0470	84	✓	✓
30	10022		1054,1090	431,8172	-0,1355	0,0217	0,0276	0,0580	80	✓	✓
31	10023		916,5357	199,6784	1,0760	0,0215	0,0258	0,0508	67	✓	✓
32	10024		892,8786	162,7512	-0,9575	0,0214	0,0259	0,0498	67	✓	✓
33	10025		670,9761	-0,0000	-0,1546	0,0225	0,0268	0,0436	45	✓	✓
34	10200		-171,9874	-184,1518	17,9271	0,0270	0,0289	0,0518	58	✓	✓

Figura 32. Información aportada por el software acerca de cada punto

Una vez analizados los puntos se genera una nube con los puntos considerados aptos, que en este caso en concreto constó de 468 puntos con sus respectivas coordenadas (x, y, z).

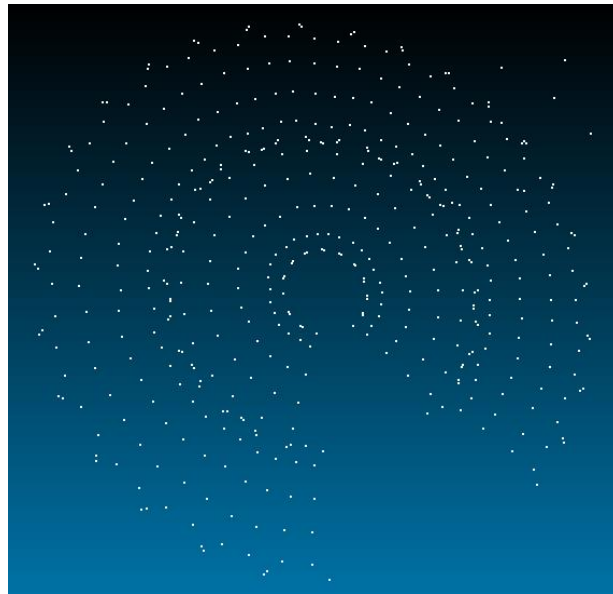


Figura 33. Nube de puntos final del concentrador obtenida por fotogrametría

5.2. Ajuste mediante “best fit” de la nube de puntos

Para poder realizar una simulación teórica de la distribución de flujo en el receptor, es necesario obtener la superficie parabólica de diseño. Debido a que no se tiene información del diseño del concentrador, es necesario generar una superficie a partir de la nube de puntos generada después del ensayo de fotogrametría.

La manera más rápida y simple de hacer esto es introducir directamente las coordenadas (x,y,z) de la nube de puntos obtenidos en el programa de simulación de raytracing. En este caso el programa crea una superficie interpolando entre dichos puntos. La calidad de la superficie vendrá dada por tanto por el tamaño de la red de puntos introducidos.

En la Figura 34 se muestran los resultados de una simulación generada de esta manera. Se puede observar claramente la brusquedad o falta de suavidad del perfil de la distribución de flujo obtenida sobre el plano situado en el plano de apertura del receptor del disco. Este efecto sólo puede reducirse incrementando el número de puntos introducidos en el programa, lo cual hubiera implicado aumentar considerablemente el tiempo de los ensayos de fotogrametría.

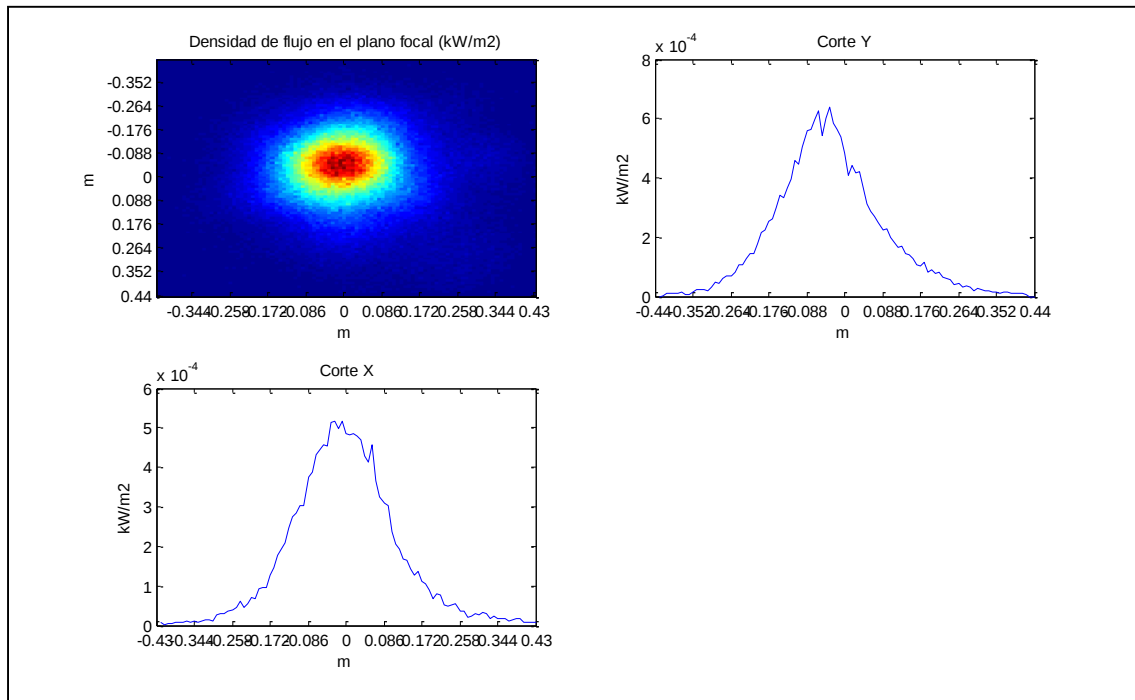


Figura 34. Distribución de flujo para una inclinación del concentrador de 30 grados y error óptico de 3.5 mrad introduciendo directamente la nube de puntos generada en la fotogrametría

Para solventar este problema se aplica a la nube de puntos un método matemático de ajuste de superficies llamado “best fit”. En este método se procede a ajustar cada punto (representado por las coordenadas x e y) de la nube de puntos obtenida mediante fotogrametría, a una ecuación con la forma:

$$z = A^2 \cdot (x + C)^2 + A^2 \cdot (y + D)^2 + B$$

Esta ecuación corresponde con la de un paraboloide de revolución trasladado de su origen.

Para minimizar la influencia de posibles deformaciones inducidas por la posición en elevación del disco, se ha realizado la fotogrametría en 4 posiciones en elevación distintas. El ajuste por “*best-fit*” se ha realizado en cada una de ellas obteniendo resultados similares (Tabla 7).

Tabla 7. Coeficientes de la ecuación de “best fit” para cada una de las inclinaciones estudiadas

Coeficientes	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	RMS (mm) ³	FOCAL=1/(4·A ²) (m)
0 grados	0.0067978	-24.246	-314.89	-716.86	6.916	5.410
30 grados	0.0067876	-25.379	-316.42	-722	6.8532	5.426
60 grados	0.0067773	-26.353	-316.6	-728.96	6.8718	5.443
90 grados	0.0067717	-26.855	-316.43	-740.45	6.9277	5.452

³ RMS, root mean square (media cuadrática):

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

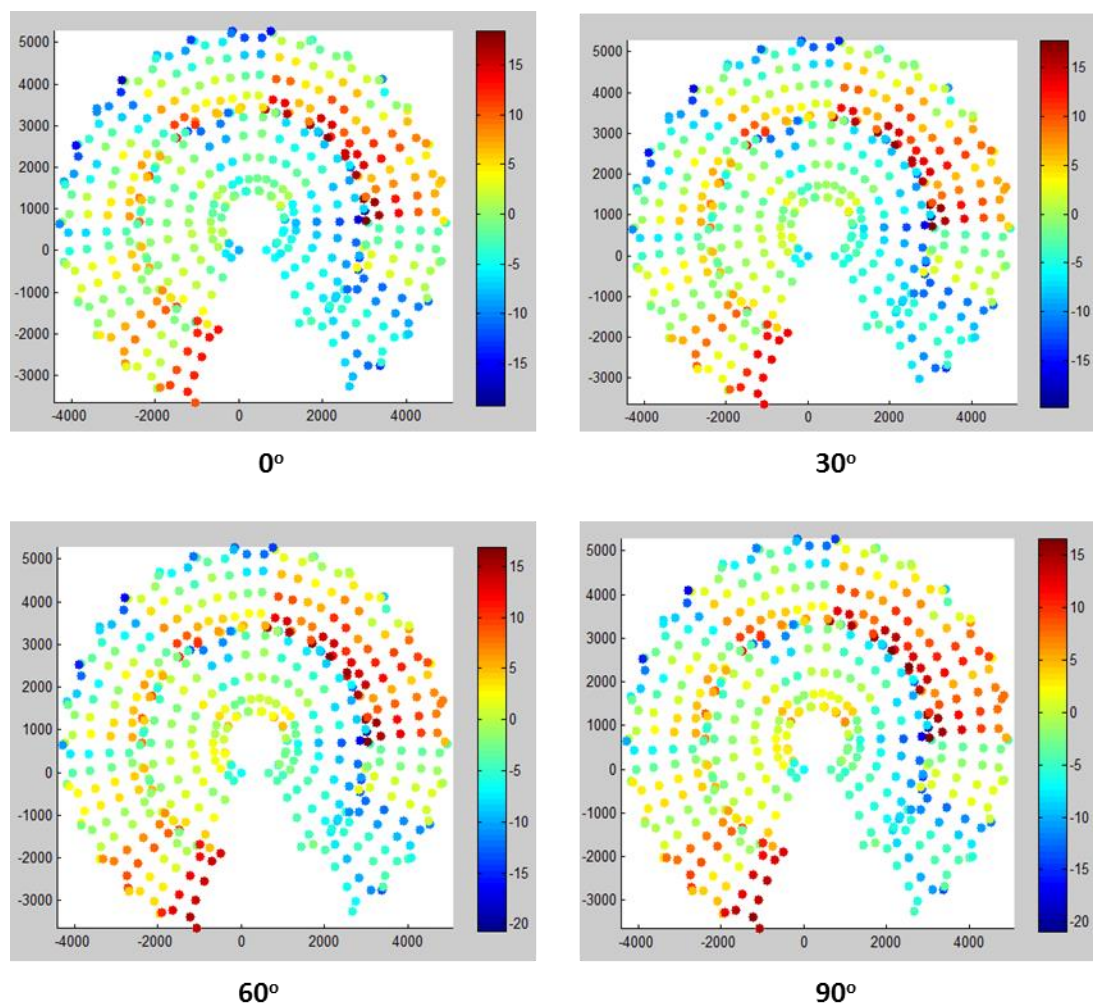


Figura 35. Diferencias en mm entre los valores z obtenidos por fotogrametría y los obtenidos por best fit para 0, 30, 60 y 90 grados respectivamente

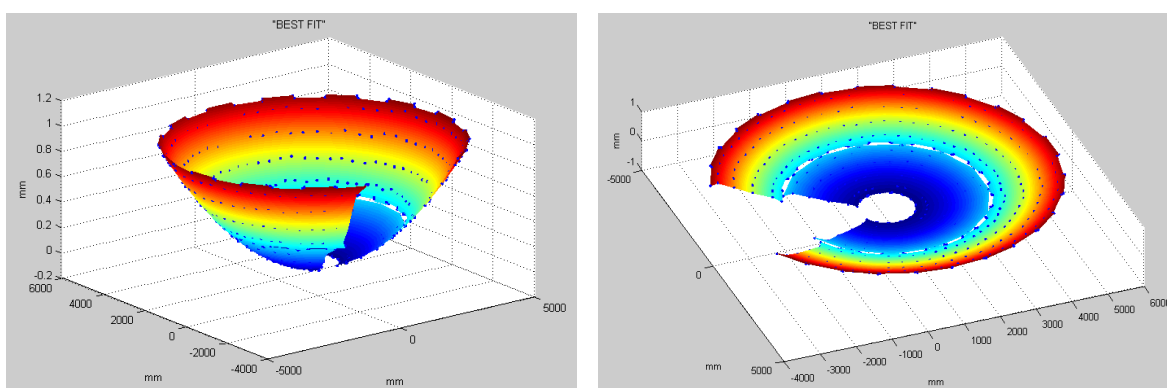


Figura 36. Puntos reales superpuestos sobre la superficie teórica de "best fit" para una inclinación del concentrador de 30 grados

Como se observa en la Figura 36, las desviaciones van desde 0 a ± 20 mm. Los puntos que mejor se ajustan a la nueva superficie son los centrales, mientras que a medida que los puntos se van acercando a los anillos exteriores del concentrador su desviación aumenta, sobre todo en la zona derecha.

Como se muestra en la Tabla 7, en las cuatro inclinaciones las desviaciones son similares, lo que indica que la curva de ajuste coincide en bastantes puntos en los cuatro casos estudiados. De hecho el valor de la media cuadrática está en torno a 6.9 mm en los cuatro casos y la focal toma un valor aproximado de 5.4 m. Por tanto, se puede asumir para su futuro tratamiento con raytracing, que es suficiente una única superficie parabólica independiente de la inclinación del concentrador. Esta afirmación implica que la estructura tiene la rigidez suficiente como para mantener la forma en cualquier ángulo de inclinación dentro de unos márgenes de tolerancia definidos.

5.3. Tarea 3: Simulación con herramienta de trazado de rayos

Una vez definida la superficie teórica del concentrador, esta se introduce en el sistema óptico que simula la geometría y las condiciones del disco de ensayo. Este sistema óptico se ha generado mediante el programa de raytracing “Tonatiuh”.

5.3.1. Tonatiuh

Tonatiuh es un programa de simulación del comportamiento óptico-energético de sistemas solares de concentración basado en el método de Monte Carlo de trazado de rayos. Su desarrollo como programa “open source” se está liderando desde el CENER (Centro Nacional de Energías Renovables) en estrecha colaboración con la Universidad de Texas en Brownsville (UTB) y otros centros e investigadores.

Los parámetros principales de entrada en Tonatiuh son la geometría del concentrador y del target (“blanco lambertiano”). Además de estos parámetros, también es necesario definir la forma solar o “sunshape”, irradiancia directa normal (DNI), número de rayos, reflectividad del concentrador y el error óptico del concentrador, entre otros.

Uno de estos parámetros, el error óptico, es la variable que tiene una mayor influencia en la determinación de la calidad óptica del concentrador. El error óptico, como ya se ha mencionado en apartados anteriores, engloba los errores debido a la desviación de la normal de la superficie (error de pendiente), el efecto de la no especularidad del concentrador, el error de seguimiento y el referido a la forma solar (“sunshape”).

A la hora de introducirlos en Tonatiuh, el error de pendiente y especularidad han sido englobados en uno mismo (llamado por defecto “sigma slope”), mientras que el error de seguimiento (tracking error) no se ha tenido en cuenta, ya que para su medición era necesario modificar la lógica de control

del concentrador, a la cual no se tenía acceso. Por tanto, en este caso en concreto, el error óptico responde a la fórmula:

$$\sigma_{optico} = \sqrt{(2 \cdot \sigma_{slope})^2 + (\sigma_{sunshape})^2}$$

Según la bibliografía consultada un valor típico para el error óptico (incluida la forma solar) de un concentrador de disco parabólico se encuentra en torno a los 7 mrad [20].

5.3.2. Descripción del procedimiento

Con Tonatiuh se pretende simular la superficie del concentrador, cuyos puntos han sido obtenidos mediante fotogrametría y ajustados a una superficie parabólica, con el fin de analizar la distribución de flujo sobre un target situado en el plano de apertura del receptor del mismo.

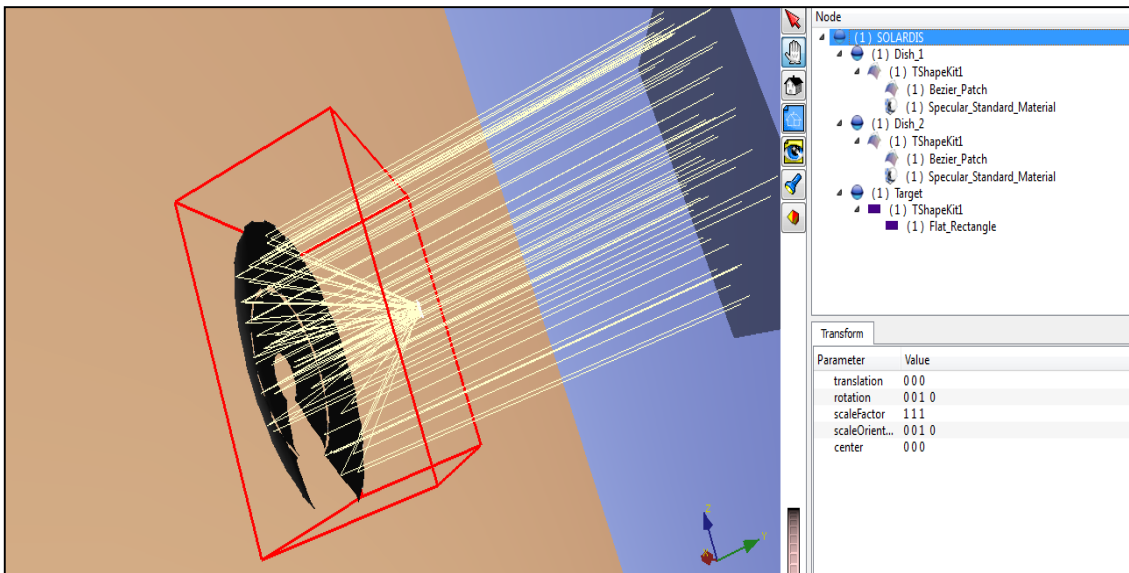


Figura 37. Interfaz de Tonatiuh con la representación del sistema óptico de un disco parabólico. Las líneas de color amarillo representan los rayos solares que nacen del Sol (plano de color gris), se reflejan en la superficie del disco (superficie negra) y terminan concentrándose en el receptor (superficie blanca)

Para poder realizar una simulación con Tonatiuh es necesario definir un sistema óptico, compuesto básicamente por 3 elementos: concentrador, Sol y receptor. En este caso, el concentrador se crea a partir de la superficie generada por ajuste, descrita en el apartado anterior. El Sol se introduce como una función de Buie⁴ con un ratio de radiación circumsolar (CSR) del 5% y el receptor será simulado

⁴ Se estima un valor de CSR del 5%. La CSR se define como la relación entre la irradiancia circumsolar y la suma de la irradiancia procedente del disco solar más la irradiancia circumsolar. Es el resultado de la dispersión de la luz solar directa a través de pequeños ángulos debido a los aerosoles atmosféricos (por ejemplo, polvo, gotitas de agua o cristales de hielo en las nubes) [24].

En Tonatiuh, 3,89 mrad es el valor para el cual la función de densidad de probabilidad tiene un máximo. El valor de este máximo varía con la CSR pero el valor de theta, para el que se obtiene el máximo, permanece fijo.

como un plano situado en la posición a la que está el área de apertura de receptor real del disco. En la Figura 37 se muestra una representación gráfica del sistema óptico descrito.

Los parámetros principales introducidos para realizar la simulación con Tonatiuh se definen a continuación:

Tabla 8. Inputs en Tonatiuh

SOL	
Sunshape	Buie, CRS 5%
DNI	0.001 W/m ² ⁵
Acimut solar	0 grados
Elevación solar	90 grados
Número de rayos	1000000
CONCENTRADOR	
Focal	5.426 m
Diámetro exterior	9.2 m
Diámetro interior	1.6 m
Ángulo	36°
Reflectividad	0.90 ⁶
RECEPTOR	
Dimensiones target	0.88 x 0.86 m

En Tonatiuh el concentrador se representa de forma que su normal siempre sea perpendicular al plano definido por el Sol, tal y como se representa en la Figura 38.

⁵ Se estima este valor de radiación lunar, según la referencia [23].

⁶ Este valor de reflectividad ha sido estimado tomándose de referencia el valor límite de diseño, al no conocerse el valor real en el momento de los ensayos.

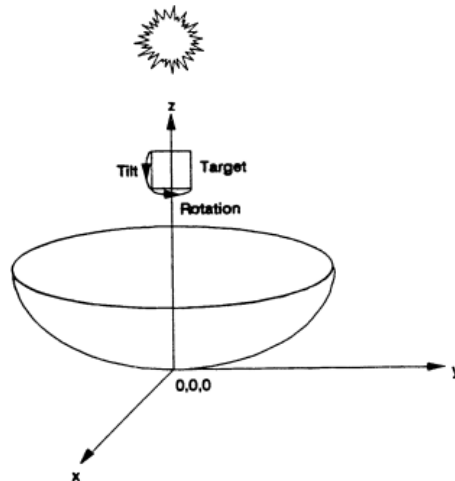


Figura 38. Definición de la posición del concentrador respecto al Sol en Tonatiuh

5.3.3. Resultados obtenidos de la simulación

La simulación se lleva a cabo con la superficie ideal cuya focal coincide con la de la superficie parabólica obtenida al realizar “*best fit*” a los puntos x e y obtenidos por fotogrametría. Se elige una elevación del concentrador de 30° . Como se ha visto anteriormente, la estructura es lo suficientemente rígida como para poder extrapolar los resultados obtenidos al resto de elevaciones que puede adoptar el concentrador.

La representación del sistema óptico y los resultados obtenidos se representan en las Figura 39 y Figura 40, respectivamente. Se puede comprobar como la distribución de densidad de flujo obtenida tiene una forma gaussiana, por lo que los resultados obtenidos corresponden con lo esperado.

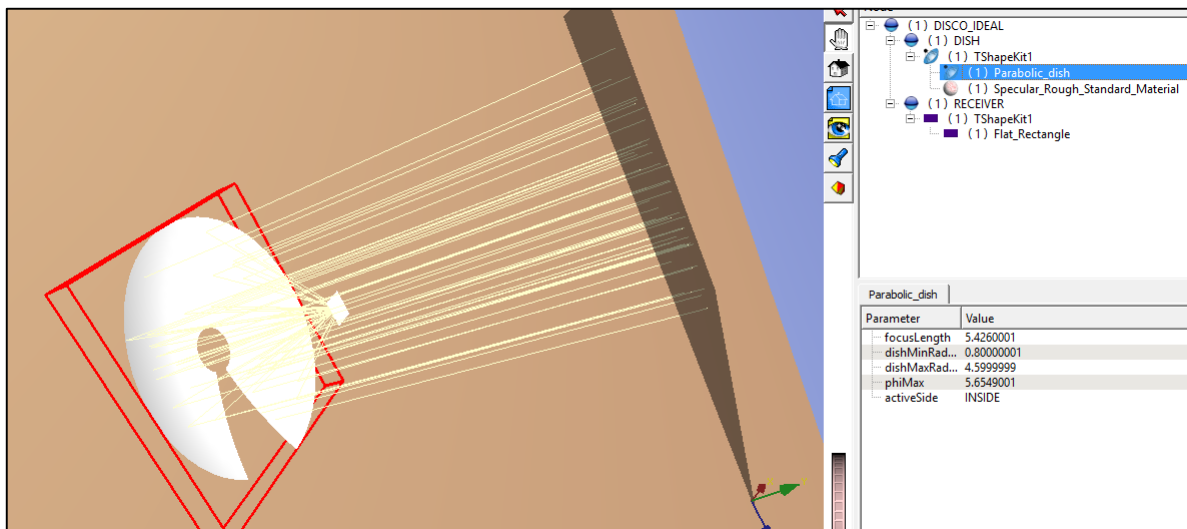


Figura 39. Interfaz de Tonatiuh con la representación del proceso de raytracing con superficie ideal

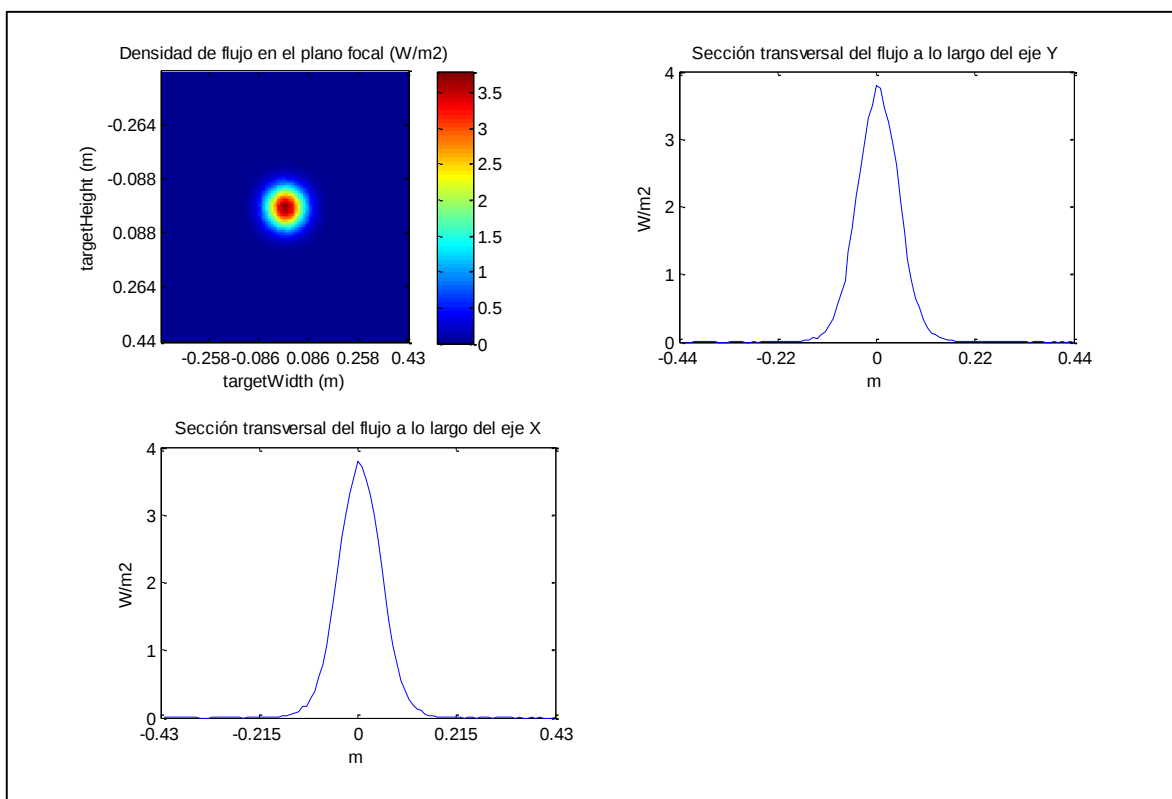
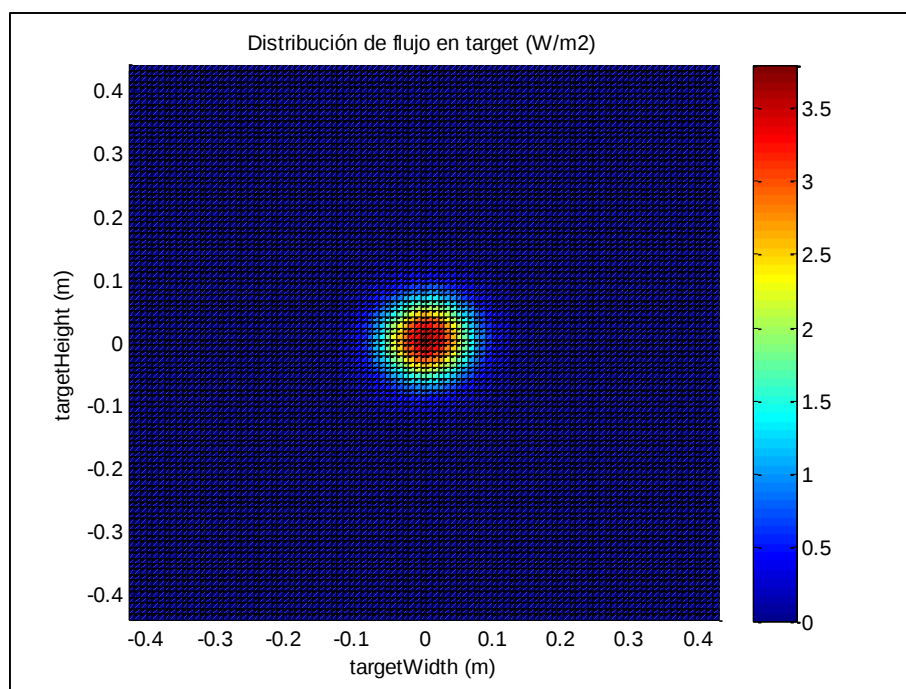


Figura 40. Distribución de flujo para un concentrador ideal de focal 5.426 m, error de pendiente 3.5 mrad y una inclinación de 30 grados

Las simulación anterior se ha realizado para un error de pendiente de 3.5 mrad. Este error es arbitrario (pero dentro del rango establecido para este parámetro), ya que inicialmente no se conoce la calidad óptica del concentrador. En el apartado 5.5 del documento se realiza una comparación de los resultados experimentales (obtenidos mediante caracterización lunar) y teóricos (mediante raytracing) y se determinará de forma aproximada la calidad óptica del concentrador, esto es, el error óptico del concentrador.

5.4. Tarea 4: Medición de la distribución de flujo lunar

La similitud en el ángulo subtendido de la Luna y el Sol permite utilizar esta técnica, cuya principal ventaja es evitar colocar un sistema de refrigeración en la diana o target. Los ensayos lunares se llevaron a cabo en la noche de luna llena correspondiente al día 23 de Julio de 2013. Se tomaron diferentes imágenes del flujo concentrado en una diana plana situada en la apertura de la cavidad (a la distancia focal del concentrador) con una cámara Canon EOS 500D.

Durante la toma de las imágenes fue necesario el uso de un filtro de densidad neutra. Con este filtro se consigue disminuir la luz que llega al sensor de la cámara. De esta forma se consigue no saturar la imagen obteniendo una distribución completa. En la Figura 41 se aprecia la diferencia entre dos imágenes solares, una sin filtro ND y cuya distribución está saturada, y otra con un filtro ND cuya distribución no está saturada. No saturar los sensores de la cámara permite obtener la distribución completa de la imagen, sin embargo tiene el inconveniente de perder la referenciación geométrica ya que los detalles de estructura y elementos de referenciación, quedan oscurecidos por completo.

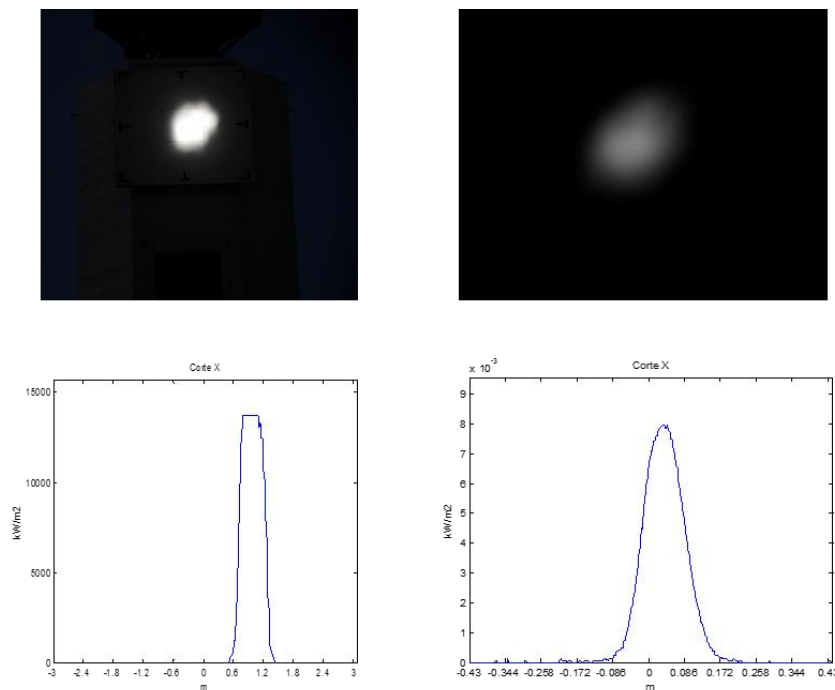


Figura 41. Izquierda) Imagen solar saturada sin filtro ND; Derecha) Imagen solar con filtro ND donde se aprecia la distribución sin saturar

Estas imágenes se guardaron en formato JPEG para su posterior procesamiento con un script realizado en Matlab. Este script obtiene la distribución de flujo sobre el blanco utilizado. Para ello se trabaja con la matriz de intensidad en escala de grises de la imagen; los valores de esta matriz son calibrados con el valor de la radiación directa existente y la imagen del Sol (para escalar la magnitud de cada pixel teniendo en cuenta el ángulo subtendido del Sol).

La diana fabricada para el ensayo consistía en una plancha de madera de contrachapado de dimensiones 0.86 x 0.88 m, coincidentes con las dimensiones de la caja que alberga al receptor-motor.



Figura 42. Imagen tomada durante el ensayo de medición de flujo lunar

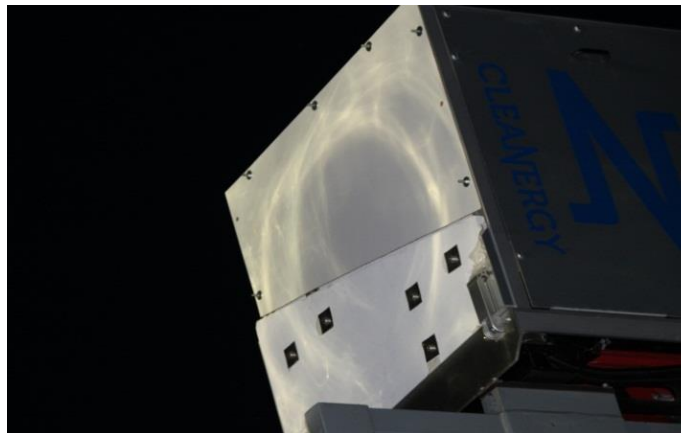


Figura 43. Diana o blanco lambertiano utilizado para el ensayo. La imagen proyectada en la diana corresponde al reflejo de uno de los focos de alumbrado de la instalación

Los resultados obtenidos tras el procesamiento de las imágenes obtenidas en la caracterización se pueden apreciar en la Figura 44. Se debe tener en cuenta que el valor de densidad de flujo es arbitrario, ya que no se ha medido la radiación directa lunar, sin embargo puede comprobarse que la forma de la distribución se aproxima nuevamente a una distribución gaussiana.

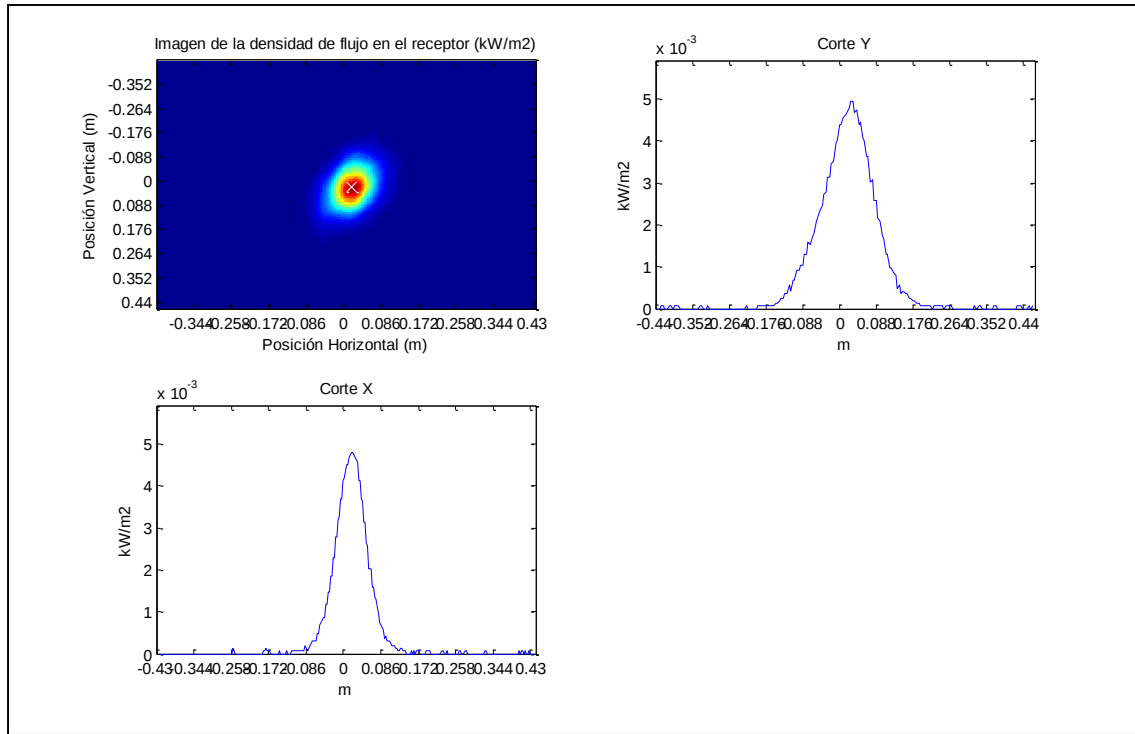


Figura 44. Distribución de flujo en el plano de apertura obtenida mediante caracterización lunar

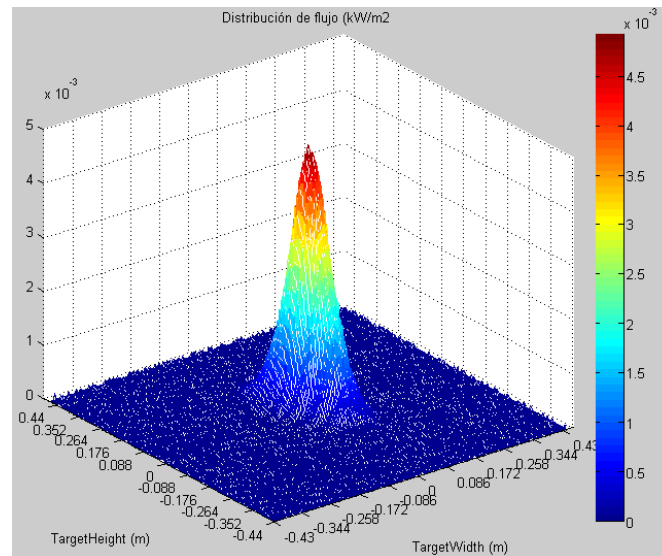


Figura 45. Distribución de flujo en 3D en el plano de apertura obtenida mediante caracterización lunar

5.5. Tarea 5: Comparación de las distribuciones de flujo obtenidas

El objetivo de este apartado es comparar las distribuciones de flujo obtenidas de manera teórica, mediante raytracing, y con medidas reales a través de la caracterización con flujo lunar. Obteniendo a partir de dicha comparación, una estimación de la calidad óptica del concentrador DS1.

En la distribución teórica simulada en el apartado 7, se había seleccionado un valor de error de pendiente de 3.5 mrad de manera arbitraria. Obviamente, la distribución simulada hubiera variado de haber seleccionado otro valor como error de pendiente. Esto se puede apreciar en la Figura 46, donde se muestra el resultado de la distribución de flujo generada por Tonatiuh, para un corte realizado en el centroide de la misma, utilizando diferentes valores de error de pendiente del concentrador. De entre todas estas distribuciones, es ahora necesario establecer cual se ajusta más a la distribución real medida durante el apunte lunar.

En la Figura 47 se superponen ambas distribuciones de flujo, teórica y real, y se estudia para qué error de pendiente ambas gráficas coinciden. Como el valor de DNI es un valor estimado, no real (no se posee una medición de radiación lunar), para poder comparar ambas distribuciones, real y teórica, se ha trabajado con distribuciones normalizadas y se ha utilizado un factor de escala que permitirá ajustar el flujo pico de ambas curvas y de esta forma poder realizar una comparación. En [21] se demuestra cómo es necesario realizar este tipo de correcciones para llevar a cabo la comparación de distribuciones.

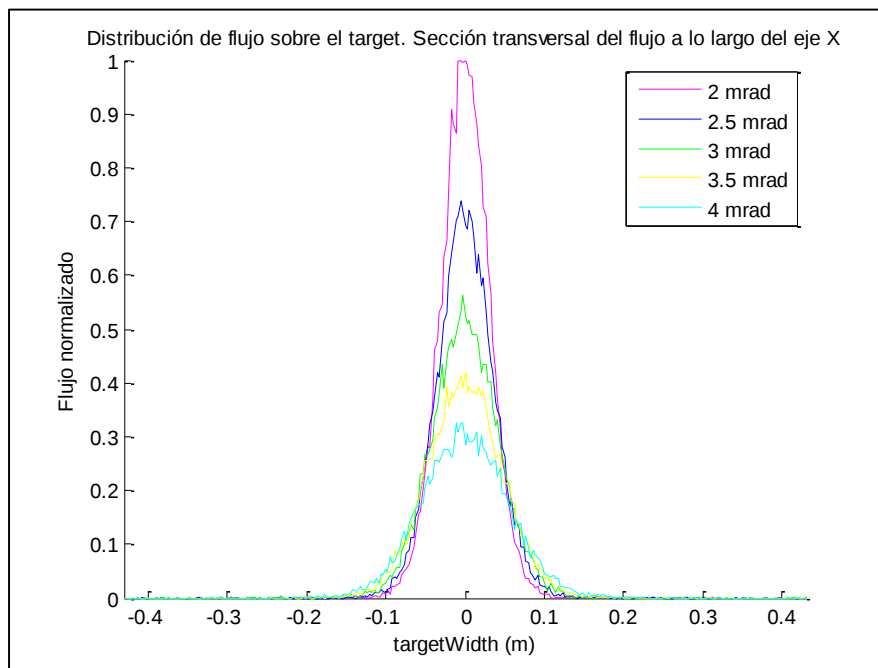


Figura 46. Variación de la distribución de flujo obtenida mediante raytracing para diferentes errores ópticos

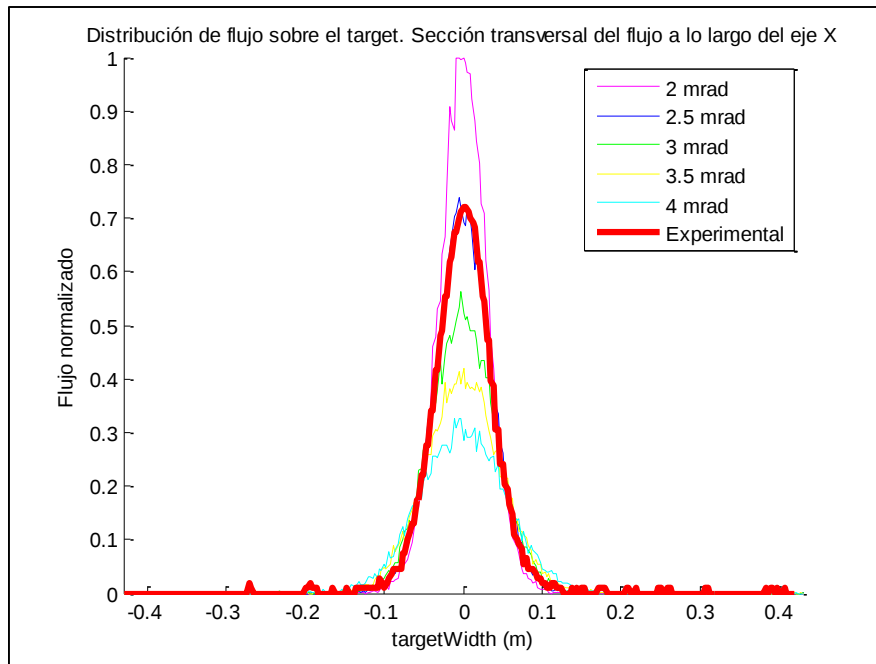


Figura 47. Ajuste curva experimental y teórica

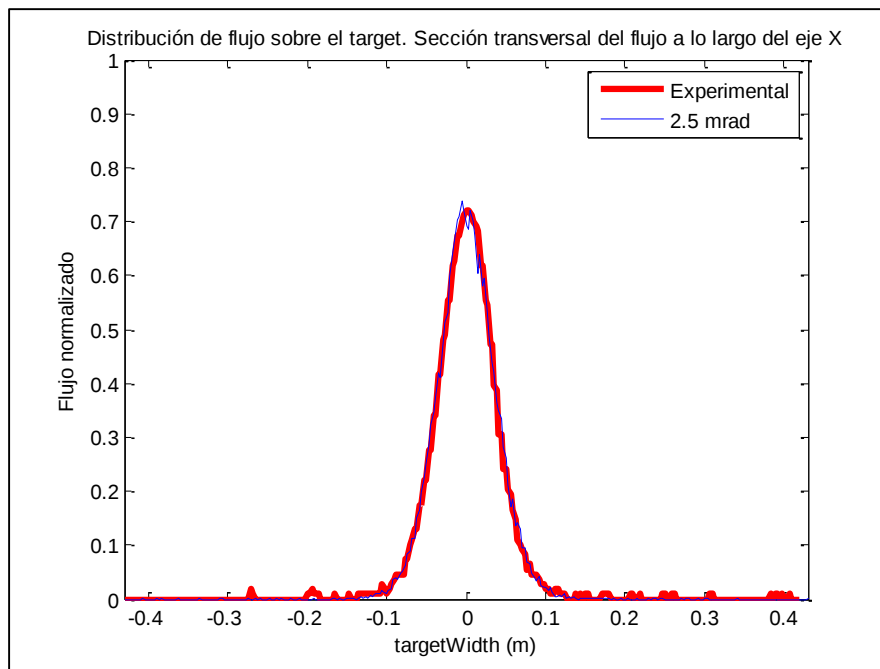


Figura 48. Superposición curvas experimental y teórica que mejor se ajustan

La Figura 48 muestra la superposición de la distribución de flujo teórico simulado con Tonatiuh y la distribución de flujo experimental obtenida mediante caracterización lunar. Ambas distribuciones son las obtenidas para el plano de apertura del receptor del disco. Los pequeños picos situados en las áreas planas de la curva son debidos al ruido del sensor CCD de la cámara utilizada.

La distribución de flujo teórica coincide con la real para un error de pendiente de la superficie del concentrador de 2.5 mrad y un factor de escala del 72%. Teniendo en cuenta el error asociado a la forma solar (3.89 mrad), el error óptico global toma un valor aproximado de 6.33 mrad.

Este valor de error óptico global, 6.33 mrad, se corresponde con un 92.9% de factor de interceptación, que equivale a un 7.1% de “*spillage*”, siendo este el tanto por ciento de flujo radiante que no entra en la cavidad del receptor y se queda en los bordes de la apertura (la apertura de la cavidad se considera con un radio de 0.095 m).

En la Figura 49 se puede observar el flujo desbordado en la apertura de la cavidad (situada a la distancia focal) para el concentrador estudiado.

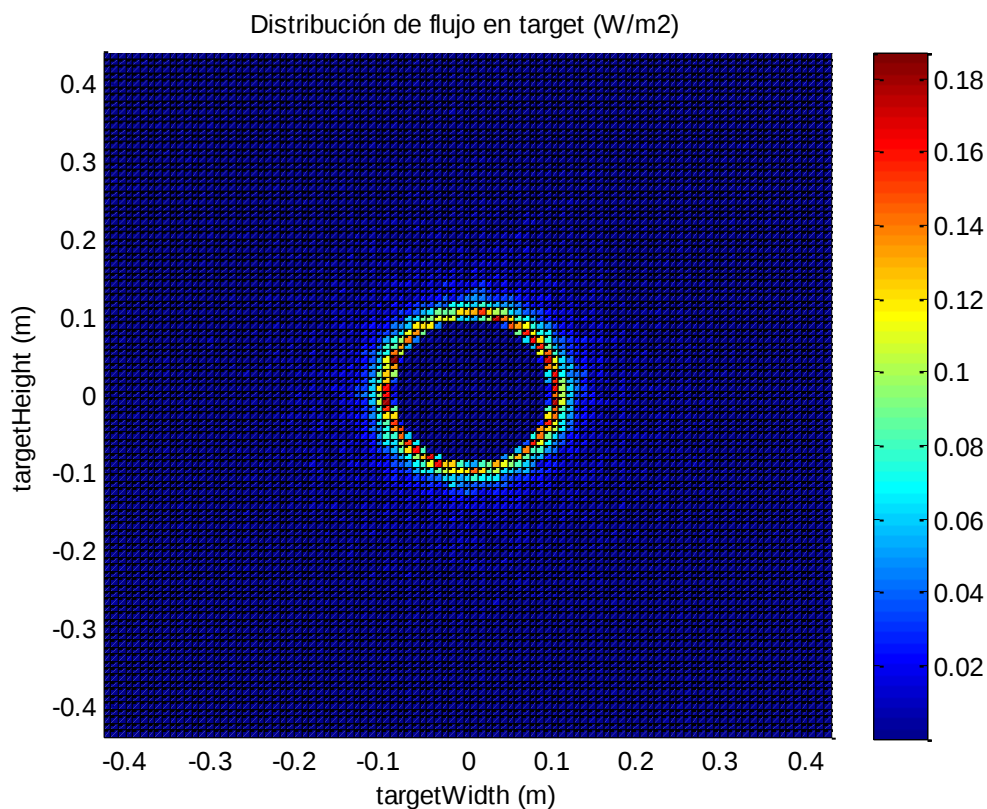


Figura 49. Spillage

6. CONCLUSIONES

El objeto de este documento es la caracterización de las principales características ópticas del denominado DS1. Para ello se han realizado las simulaciones pertinentes con Tonatiuh para conocer la distribución de flujo teórica de diseño y por otro lado se ha realizado un ensayo de caracterización lunar sobre el concentrador ya construido para conocer la distribución de flujo real.

La distribución teórica es una especificación de diseño. Debido a que no se tenía información suficiente del diseño del concentrador, se ha medido mediante fotogrametría la superficie de este. Con esta técnica se obtiene una nube de puntos que representa la superficie del concentrador de manera discretizada. Esta nube de puntos se ha ajustado a una superficie teórica y se ha simulado, mediante Tonatiuh, la distribución teórica de diseño.

Los ensayos de fotogrametría han mostrado que los resultados de ajuste garantizaban una rigidez suficiente de la estructura como para mantener la forma del concentrador en cualquier ángulo de inclinación (los coeficientes de las ecuaciones de ajuste son prácticamente similares en los cuatro casos estudiados -0, 30, 60 y 90 grados-, coincidiendo también la focal).

La medición de la distribución de flujo lunar en el concentrador muestra una curva de distribución gaussiana. Esta distribución, medida sobre el plano del área de apertura del receptor del disco DS1 se analizó y se comparó con el flujo predicho teóricamente mediante simulación con trazado de rayos en Tonatiuh, para dar un valor de calidad óptica del concentrador.

Las simulaciones pertinentes y su comparación con la distribución de flujo experimental dieron como resultado que el concentrador se ajusta al que produciría una superficie parabólica de focal 5.426 m con un error de pendiente y especularidad de 2.5 mrad. En este valor están tenidos en cuenta los errores en la toma de medidas, como pueden ser la baja reflectividad de los espejos y no uniformidad de la suciedad (el concentrador no había sido limpiado) y los errores introducidos en la toma de las imágenes. A pesar de todos estos factores, el valor obtenido es coherente con la bibliografía existente [20], por lo que se puede concluir que el disco DS1 tiene una calidad óptica acorde con el mercado y el estado del arte actual en este tipo de tecnologías.

7. REFERENCIAS

- [1] J. Zapata, K. Lovegrove y J. Pye, «Steam receiver models for solar dish concentrators: two models compared.,» de *SolarPACES*, Perpignan, France, 2010.
- [2] R. Dunn, K. Lovegrove y G. Burgess, «Ammonia receiver design for a 500 m² dish.,» de *SolarPaces*, Perpignan, France., 2010.
- [3] S. Taggart, «CSP: Dish Projects inch forward.,» *Renewable Energy Focus.*, 2008.
- [4] A. Gavilán, «Desarrollo de programa de simulación para el cálculo de distribución de flujo radiante sobre receptor y fenómeno de desbordamiento a partir de una caracterización óptico-geométrica en un sistema de concentración solar disco-Stirling.,» Universidad de Sevilla., Sevilla, Spain, 2007.
- [5] R. Blázquez, «Estudio de la distribución de flujo y factor de desbordamiento de un sistema de disco parabólico,» Proyecto fin de carrera. Universidad de Sevilla., Sevilla, 2011.
- [6] W. Stine y R. Diver, «A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology.,» *Sandia National Laboratories Technical Library*, pp. SAND93-7026 UC-236, 1994.
- [7] W. B. H. R. W. Stine, «Solar energy fundamentals and design: With computer applications.,» EE.UU., 1985.
- [8] Wendelin y Grossman, «Comparison of Three Methods for Optical Characterization of Point-Focus Concentrators,» 1995.
- [9] M. Shortis, G. Johnston, K. Pottler y E. Lupfert, «Photogrammetric analysis of solar collectors,» 2008.
- [10] S. Jones, D. Neal, J. Gruetzner, R. Houser y R. Edgar, «VSHOT: a tool for characterizing large, imprecise reflectors,» *Sandia National Laboratories*, 1996.
- [11] F. J. A. V. A. Arqueros, «A novel procedure for the optical characterization of solar concentrators,» *Solar Energy*, 2003.
- [12] S. H. P. Ulmer, «Slope Measurements of Parabolic Dish Concentrators Using Color Codified Targets,» de *13th SolarPACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*, Sevilla, España, 2006.

- [13] T. M. H. N. ,. C. N. T. H. N. &. M. M. HisaDa, «Concentration of the Solar Radiation in a Solar Furnace.,» *Solar Energy*, pp. Vol. 1(4), 14-18., 1957.
- [14] J. T. Holmes, «Heliostat Operation at the Central Receiver Test Facility,» *Journal of Solar Energy Engineering*, pp. Vol. 104, 133-138., 1982.
- [15] K. &. W. R. Thomas, «Assessing Solar Flux Distribution in the Focal Region of a Paraboloidal Dish by Moonshots.,» pp. Department of Engineering Physics, the ANU, Australia. , 1981.
- [16] P. B. G. &. L. K. Siangsukone, «Full Moon Flux Mapping the 400m2 “Big Dish” at the Australian National University.,» *Solar, Life, the Universe and Renewables 3 of, 6.*, 2004.
- [17] K. L. E. J. G. H. a. S. M. R. Pottler, «Photogrammetry: A powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components,» *Journal of Solar Energy Engineering*, pp. 127(1): 94-101., 2005.
- [18] G. S. M. K. A. a. G. J. Burgess, «Photogrammetry for dish concentrator construction”.,» *School of Engineering, Australian National University, Canberra (Australia)*..
- [19] G. Johnston, «On the Analisis of Surface Error Distributions on Concentrated Solar Collectors,» *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, pp. 117, 294-296., 1995.
- [20] «Power from the Sun,» Septiembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.powerfromthesun.net/book.html> Acceso: Agosto 2013..
- [21] P. B. G. L. K. Siangsukone, «Full Moon Flux Mapping the 400m2 “Big Dish” at the Australian National University,» *Centre for Sustainable Energy Systems. The Australian National University. Canberra (Australia)*..
- [22] CLEANERGY, Service and Operator’s Manual for CLEANERGY Solar Stirling V161, 2009.
- [23] L. Gallouët, pp. Ann. d’ Ap., Vol. 27(423), 40, 1964.
- [24] S. Wilbert, «Circumsolar Radiation and Beam Irradiance Measurements for Focusing Collectors,» 2012.

Trabajo realizado con la colaboración de:

