



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**"Desarrollo de espejos curvos concentradores para
un helióstato de torre central"**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

I.Mec. Rodolfo Yered Salas Bernal

DIRECTOR: Ricardo Arturo Pérez Enciso

Hermosillo, Sonora

Agosto, 2022

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

UNIVERSIDAD DE SONORA

APROBACION DEL JURADO

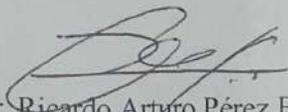
de la tesis presentada por:

Rodolfo Yered Salas Bernal

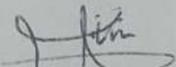
Nombre del Tesista

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

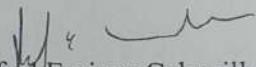
5/sep/22
Fecha


Dr. Ricardo Arturo Pérez Enciso
(Nombre del sinodal)
Presidente

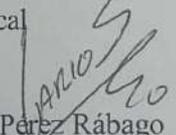
05/09/22
Fecha


Dr. Armando Piña Ortiz
(Nombre del sinodal)
Secretario

5/sep/2022
Fecha


Dr. Rafael Enrique Cabanillas López
(Nombre del sinodal)
Vocal

5/SEP/2022
Fecha


Carlos Alberto Pérez Rábago
(Nombre del sinodal)
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

AUTORIZACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO

5 de Septiembre de 2022.

Por medio de la presente se hace constar que el estudiante **RODOLFO YERED SALAS BERNAL**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

DR. ABRAHAM ROGELIO MARTIN GARCIA

COORDINADOR DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:
INGENIERÍA QUÍMICA

RESUMEN

En el presente trabajo hace mención del diseño y desarrollo de un sistema óptico con espejos esféricos a partir de una superficie plana, para la obtención de este resultado se partió de las investigaciones sobre la energía solar de concentración, así como el análisis de la geometría óptica adecuada a las necesidades del presente estudio.

Se diseñó y desarrollo un prototipo de base para el espejo, esto mediante un soporte cruzado de láminas de acero inoxidable que da un diseño de rejilla con un corte radial de 144m en el filo, la rejilla da un soporte estático a los espejos. Lo que a su vez va unido de forma mecánica con una cruceta, esta le da mayor firmeza en los puntos de unión de las rejillas y no permite su deformación, así como ser la parte que une la rejilla con el marco reacondicionado.

Se desarrolló una metodología teórica-experimental para el análisis de los espejos plano y esférico, mediante la colocación de éstos a la misma distancia del heliostato estudiado, con la cual se obtuvieron los perfiles de distribución de cada uno de ellos y se hizo una comparativa de su radiación concentrada.

En la caracterización óptica del heliostato, se implementó la modelación del sistema óptico en el programa de trazado de rayos Tonatiuh, permitiendo simular y evaluar los parámetros ópticos de los espejos del heliostato, con esto se puede obtener el error óptico global del sistema. Con este análisis se obtuvo los perfiles de distribución normalizados con diferentes errores ópticos; para la simulación del sistema óptico se desarrolló una metodología de alineación de espejos en forma teórica y se obtuvo el flujo radiativo del sistema óptico, con lo cual, se obtuvieron los perfiles de distribución con diferentes rangos de error para hacer la comparativa con el real.

Para conseguir los perfiles de distribución reales, se desarrolló una metodología la cual está basada en la toma de imágenes de la radiación que incide en el blanco ubicado en la zona focal del heliostato, habiendo corregido la perspectiva y procesado la imagen, se sacaron los perfiles de distribución.

Finalmente, se realizó un estudio de diferencias absolutas, mediante una comparativa de punto por punto del perfil real en contra del perfil con error n. A través de este estudio se determinó el error global real en el eje X de 3.4 mrad y 4.9 mrad en Y, obteniendo un área del spot de 3.3m², haciendo una disminución del 70.6% del spot en el blanco en comparación cuando el helióstato tenía los espejos planos.

ABSTRACT

In the present study we talk about the design and development of an optical system with spherical mirrors from flat surfaces, to obtain the result we commence with a solar thermal concentration state of the art analysis, as well as the analysis of the optimal optic geometry for the present investigation.

A prototype for the base of a mirror facet was designed and developed, using a cross stainless steel sheet support which gives a grid design with a 144 m radial cut at the cutting edge and an also a static mounting to the mirrors. This support is attached mechanically with a cross-piece, which gives steadiness to the union points of the grid and avoid its deformation and increases the facet stability.

A theoretical and experimental methodology for the analysis of the flat and spherical mirrors was developed, placing them at the same distance of the studied heliostat, obtaining distribution profiles and concentrated radiation comparative of each.

In the heliostat optical characterization, the ray tracing method open software Tonatiuh was implemented, allowing the simulation and evaluation of the parameters of the heliostat facets, in order to obtain the global optical error of the system. With this analysis was obtained the normalized distribution profiles considering optical errors; for the optical system simulation an alignment theoretical methodology and it was obtained the radiative flux of the optical system, and finally a comparison with the theoretical and experimental distribution profile was made.

To obtain the real distribution profiles, a methodology based on image analysis of impinging radiation at the focal heliostat zone was developed, obtaining the distribution profiles after a perspective correction and image processing.

Finally, a comparison of the absolute difference study was performed, of the experimental and optical profile using an error number, n . With this study a global error on the x-axis

and y-axis of 3.4 mrad and 4.9 mrad was obtained, respectively, having a spot area of 3.3 m², diminishing with respect to the heliostat with flat mirrors of 70.6 %.

DEDICATORIA

Opcional

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	¡
ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
ABSTRACT	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.I
LISTA DE FIGURAS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.II
LISTA DE TABLAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.VII
NOMENCLATURA	XVI
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.	1
1.1 Introducción.....	1
1.1.1 Funcionamiento de la tecnología solar térmica de concentración	3
1.1.2 Tipos de tecnología solar térmica de concentración.....	4
1.2 Justificación.	8
1.3 Objetivo General.	8
1.4 Objetivos Específicos.	8
CAPÍTULO 2.....	9
ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	9

2.1 Helióstato.	9
2.2 Campo de helióstatos.	9
2.3 Componentes de un helióstato.	10
2.4 Tipos de helióstatos	11
2.5 Eficiencia del campo de heliostatos	12
2.6 Canteo de un helióstato	15
2.6.1 Sobre el eje.	16
2.6.2 Fuera de eje.....	16
2.7 Método de trazado de rayos	17
2.7.1 Forma solar.....	19
2.7.2 Errores ópticos de un helióstato.	23
2.7.3 Errores no asociados a la superficie.	27
2.8 Generación de códigos numéricos para la solución de trazado de rayos.	28
2.8.1 Método de Montecarlo.	28
CAPÍTULO 3	32
MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.1 Distribución de los heliostatos en el CEToC.	32
3.2 Descripción del helióstato F0	33
3.2.1. Estructura del helióstato.	33
3.2.2 Transmisiones.....	35
3.3 Metodología para el diseño y construcción de las facetas para el heliostato F0.	37

3.3.2 Descripción de un espejo esférico	38
3.3.3 Diseño del soporte del espejo.	44
3.3.4 Metodología de maquinado de la rejilla.....	45
3.4 Estudio de la distribución de radiación solar concentrada	49
3.4.1 Estudio teórico (Comparativa cualitativa).	49
3.4.2 Estudio teórico (Comparativa cuantitativa).....	51
3.4.3 Estudio experimental.....	56
3.5 Generación de patrones de alineación en forma teórica.	62
3.6 Evaluación del error óptico global del helióstato F0.....	68
CAPÍTULO 4.....	71
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1 Diferencias absolutas para determinar el error global.	74
CAPÍTULO 5.....	82
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
CAPÍTULO 6.....	84
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXO A: REACONDICIONAMIENTO DE LOS MARCOS PARA EL HELIÓSTATO.....	88
Metodología para el reacondicionamiento de los marcos del helióstato.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un sistema de concentración solar y una central eléctrica de concentración solar	3
Figura 2. Canal Parabólico y esquema de funcionamiento de un concentrador de canal parabólico	4
Figura 3 Esquema de funcionamiento de un concentrador Fresnel	5
Figura 4. Disco Parabólico o Disco Stirling	5
Figura 5. Sistema de torre central	6
Figura 6. Esquema de una planta de receptor central	7
Figura 7. Campo de heliostatos circula y campo de heliostatos norte	10
Figura 8. Componentes de un heliostato	11
Figura 9. Perdidas ópticas en un campo de heliostato	14
Figura 10. Distribución de heliostatos en el campo según un radial Stagger layout	14
Figura 11. Heliostato de eje focal con alineación individual de facetas	16
Figura 12. Esquema de canteo sobre eje y canteo fuera de eje	17
Figura 13. Presentación de aberración fuera de eje (astigmatismo) en un blanco.....	17
Figura 14. Seguimiento de la trayectoria de un rayo de luz con el método de trazado de rayos	19
Figura 15. Esquema del ángulo del cono solar	20
Figura 16. Esquema de la relación geométrica de la forma solar Pillbox	21
Figura 17. Distribución angular tipo Pillbox	22
Figura 18. Esquema de una superficie especular	24
Figura 19. Error por rugosidad	25
Figura 20. Esquema de la desviación de la normal por error de ondulación	26

Figura 21. Esquema del cambio de distancia focal por error de curvatura	27
Figura 22. Diagrama del CEToC	33
Figura 23. Heliostato F0 modelo CCADET-CIE DS900	34
Figura 24. Vista explosionada del heliostato F0, se muestran los elementos de soporte y la faceta.....	35
Figura 25. Marco con rotula para el movimiento de canteo	35
Figura 26. Diseño de estructura del heliostato F0 en Solid Works	36
Figura 27. Diseño del mecanismo <i>Perfection Gear modelo</i> SDST15594S (Izquierda), mecanismo actual del helióstato F0 (Derecha)	36
Figura 28. Diseño de actuador lineal Joyce-Dayton (izquierda), actuador lineal y motor del heliostato (derecha)	37
Figura 29. Conjunto de mecanismo y actuador lineal acoplados al Heliostato F0	38
Figura 30. Diagrama de reflexión en una superficie esférica	39
Figura 31. Diagrama de un rayo paraxial reflejado desde una superficie esférica	40
Figura 32. Espejo con aberración esférica	42
Figura 33. Esquema de la región paraxial de un espejo esférico	44
Figura 34. Esquema de lámina inferior	45
Figura 35. Esquema de lámina superior	45
Figura 36. Puntos críticos a evaluar de la rejilla.....	47
Figura 37. Nodo de unión de la lámina inferior con la superior	47
Figura 38. Rejilla soldada en las laterales	48
Figura 39. Rejilla ensamblada terminada	48
Figura 40. Diseño de cruceta en Solid Works	48
Figura 41. Arreglo de cruceta y rejilla	48
Figura 42. Ensamble de faceta en Solid Works	49
Figura 43. Faceta terminada	49
Figura 44. Esquema de los elementos simulados en Tonatiuh	50
Figura 45. Imagen de los spots de radiación solar incidentes sobre el blanco de la torre, uno con superficie plana (izquierdo) y el otro con una superficie de curvatura de 144m (derecho)	51

Figura 46. Esquema del cono solar para sacar el spot incidente en el blanco	52
Figura 47. Esquema del tamaño del spot de un espejo ideal plano.....	53
Figura 48. Independencia de rayos de un espejo plano	55
Figura 49. Independencia de rayos de un espejo esférico	55
Figura 50. Comparativa de los perfiles teóricos de flux en los ejes X y Y ubicados en el centro de cada spot, del espejo plano y del espejo esférico.....	56
Figura 51. Cámara CCD Pike de 8 bits (de 0 a 255 en escala de grises)	57
Figura 52. Set experimental para la toma de imágenes.....	58
Figura 53. Imagen en términos de grises de los Spot esférico (izquierda) y plano (derecha)	59
Figura 54. Diagrama de flujo del procesamiento de la imagen	60
Figura 55. Imagen de los spots en términos de flux que inciden sobre el blanco, de lado izquierdo superior el reflejado por el espejo esférico y en el lado derecho inferior el reflejado por el espejo plano	61
Figura 56. Perfiles experimentales de los espejos esférico y plano	62
Figura 57. Esquema de la alineación de las facetas del heliostato en Tonatiuh	63
Figura 58. Distribución de los espejos del heliostato F0	64
Figura 59. Diagrama para el ángulo de canteo	66
Figura 60. Referencia para la obtención del cateto opuesto	66
Figura 61. Simulación en Tonatiuh del heliostato F0 canteado	69
Figura 62. Estudio de independencia de rayos para el heliostato F0	70
Figura 63. Perfiles X de distribución con errores de 0-5mrad del heliostato F0 simulados en Tonatiuh	71
Figura 64. Perfiles Y de distribución con errores de 0-5mrad del heliostato F0 simulados en Tonatiuh	71
Figura 65. Spot en términos de contorno del primer canteo del heliostato F0	72

Figura 66. Spot en términos de contorno del segundo canteo del helióstato F0	73
Figura 67. Spot en términos de contorno del tercer canteo del helióstato F0	74
Figura 68. Perfiles experimentales de distribución de la radiación solar en el eje X y Y	75
Figura 69. Diferencia de punto por punto entre los perfiles de distribución en el eje X con error de 1-5mrad comparados con el error de 0mrad	76
Figura 70. Diferencia de punto por punto entre los perfiles de distribución en el eje Y con error de 1-5mrad comparados con el error de 0mrad	77
Figura 71. Perfiles de distribución de radiación en X con su correspondiente error óptico simulado (0 a 5mrad) con la región de máxima diferencia absoluta (líneas negras)	77
Figura 72. Perfiles de distribución de radiación en Y con su correspondiente error óptico simulado (0 a 5mrad) con la región de máxima diferencia absoluta (líneas negras)	78
Figura 73. Comparativa cualitativa de los perfiles de distribución de 0 a 5mrad contra el perfil experimental en X	78
Figura 74. Comparativa cualitativa de los perfiles de distribución de 0 a 5mrad contra el perfil experimental en Y	79
Figura 75 Comparativa del perfil real en x contra el perfil simulado en Tonatiuh	80
Figura 76 Comparativa del perfil real en x contra el perfil simulado en Tonatiuh	80
Figura 77. Comparativa del perfil real con el perfil 3.4mrad	83
Figura 78. Comparativa del perfil real con el perfil 4.9 mrad	83
Figura 79. Marco a reacondicionar.....	90
Figura 80. Limpieza de marco (Izquierda) y proceso de limpieza (Derecha).....	91
Figura 81. Toma de medidas de marco	92

Figura 82. Puntos de perforación.....	92
Figura 83. Perforado de las esquinas del marco (Izquierda) , marco terminado pulido y barrenado (Derecha).....	92
Figura 84. Espejos terminados de pegar.....	93
Figura 85. Tornillería utilizada.....	93
Figura 86. Puesta de tornillería.....	94
Figura 87. Tipos de movimientos de la rótula para el canteo.....	95
Figura 88. Spot C3 centrado en el blanco lambertiano para inicio de canteo.....	96
Figura 89. Proceso de canteo de facetas del heliostato F0.....	97
Figura 90. Traslape de los spots en el blanco.....	97
Figura 91. Alineación completa de las 25 facetas concentradoras del heliostato F0.....	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de espejo plano	54
Tabla 2. Parámetros de espejo plano	54
Tabla 3. Coordenadas de los espejos del heliostato F0	65
Tabla 4. Coordenadas y ángulo de canteo por faceta	67
Tabla 5. Parámetros de configuración de la posición de los espejos del helióstato F0...	68
Tabla 6. Parámetros para independencia de rayos del heliostato F0	71
Tabla 7. Resultado de los spots procesados.....	74
Tabla 8. Comparativa de las diferencias absolutas del perfil de distribución real en X y los perfiles de distribución simulados en Tonatiuh	81
Tabla 9. Comparativa de las diferencias absolutas del perfil de distribución real en Y y los perfiles de distribución simulados en Tonatiuh	81

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidades
A	Área	m^2
D	Diámetro	m
DNI	Radiación normal directa	$\frac{w}{m^2}$
f	Distancia focal	m
H	Irradiación	$\frac{wh}{m^2}$
h	Altura	m
I	Irradiancia	$\frac{w}{m^2}$
R	Radio	m
T	Temperatura	$^{\circ}C, ^{\circ}F, K$
α	Absortancia	
γ, β	Ángulos tangentes	$^{\circ}$
θ_z	Cenit	$^{\circ}$
η	Eficiencia	Adimensional
ρ	Reflectancia	Adimensional
σ_R	Desviación por rugosidad	mrad
σ^2	Desviación estándar	Adimensional
τ	Transmitancia	Adimensional





AGRADECIMIENTO

opciona

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

1.1 Introducción

El incremento demográfico implica un impacto negativo sobre el medio ambiente, producto de las actividades humanas en todos los sectores; principalmente el industrial, transporte y residencial, con un 28.9%, 28.8% y 21.9 % respectivamente. En el 2017, a nivel mundial, el suministro de energía primaria provino principalmente del carbón, petróleo y gas natural, con un 26.6%, 32.5% y 22% respectivamente, es decir, el 81.1% del consumo energético mundial proviene de combustibles fósiles.(Beltrán et al., 2018)

La demanda energética mundial aumentará cada año que vaya pasando y el petróleo junto con los combustibles fósiles primarios no son una fuente de energía inagotable, por lo cual algún día tendrán que acabarse, sin dejar a un lado que la emisión de CO₂ aumenta de una forma alarmante, esto debido a la sobre demanda del sector energético.

A pesar de que se tienen todavía combustibles fósiles por varias décadas, estos se deben de reemplazar por energías limpias, debido a que, si continuamos usando los fósiles, los niveles de contaminación ponen en riesgo la vida en el planeta. Por lo que en paralelo se ha optado por una nueva forma de obtención de energía a partir de recursos que están en abundancia en nuestro entorno y que puedan abastecer de manera sustentable las demandas que la humanidad requiere y no deteriore el medio ambiente. Dichas tecnologías son las llamadas energías renovables, estas tecnologías no requieren de la combustión de petróleo, gas o carbón para el proceso de producir energía.

Entre las más comunes se encuentra la energía eólica, energía mareomotriz, energía geotérmica y energía solar, siendo esta última de las de mayor desarrollo en los últimos años.

La energía solar es una de las energías renovables que presenta mayor posibilidad de aplicación en el presente y futuro próximo. La privilegiada ubicación de México permite que el territorio nacional destaque en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual, con índices que van de los 4.4 kWh/m² por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m² por día en el norte del país. México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo.

La Insolación Normal Directa es 50% más alta en otras regiones de México, como por ejemplo en el estado de Sonora, que recibe una insolación mayor a los 6 kWh/m² /día promedio, y resulta que, aunque eso es apenas un kilowatt hora más que el promedio nacional, lo coloca en la lista de los estados con mayor potencial eléctrico.(Sánchez, 2014)

Conociendo la información anterior, se puede conocer cuáles son las zonas geográficas en las que la energía solar puede ser más factible que otras energías (hablando en términos de ER), dentro de la energía solar se encuentran 3 tecnologías principales para el aprovechamiento de la energía solar, los cuales son: energía fotovoltaica, energía solar térmica y energía solar térmica concentrada.

1.1.1 Funcionamiento de la tecnología solar térmica de concentración

El estudio mostrado por (Dr. Christoph Richter & Short, 2009), hace mención que las centrales de energía solar térmica de concentración producen electricidad de manera similar a las centrales convencionales: utilizando vapor para accionar una turbina. La diferencia entre ellas estriba en el origen de la energía, que en lugar de combustibles fósiles utiliza directamente la radiación solar convertida en vapor o gas a alta temperatura. Los sistemas de espejos concentradores utilizados en las plantas son sistemas de enfoque puntual o lineal.

Los sistemas lineales concentran la radiación unas 100 veces y se obtienen unas temperaturas de trabajo de hasta 550°C, mientras que los sistemas puntuales pueden concentrar mucho más de mil veces y lograr unas temperaturas de trabajo de más de 1.000°C.

En la figura 1 se muestran los cuatro elementos principales: un concentrador, un receptor, alguna forma de medio de transporte o almacenamiento, y conversión eléctrica.

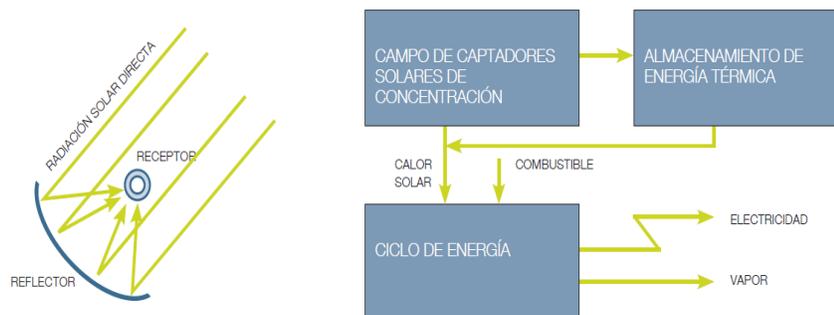


Figura 1. Esquema de un sistema de concentración solar(izquierda) y una central eléctrica de concentración solar. (Dr. Christoph Richter & Short, 2009)

1.1.2 Tipos de tecnología solar térmica de concentración

El sitio especializado en la investigación de concentración solar y química solar (LACYQS, 2015) , dice que existen diversos tipos de tecnologías que concentran la radiación solar y su diseño dependen tanto de los procesos ópticos para la captación de energía como del uso final del calor obtenido. La finalidad es incrementar el flujo de radiación solar, sobre receptores diseñados para absorberla. El calor pasa a un fluido térmico (agua, aire, aceite, sales fundidas) para alcanzar temperaturas entre los 250°C y 2000°C. Las aplicaciones típicas de estas tecnologías son la producción de electricidad con energía solar. Para ello suele acoplarse, en la región focal, un mecanismo basado en ciclos termodinámicos, o algunos procesos de química solar. (LACYQS, 2015) describe brevemente los tipos de tecnologías, las cuales se clasifican en los 4 siguientes grupos:

1.1.2.1 Canal parabólico.

Un colector solar cilíndrico parabólico (CCP) está compuesto por un canal cuyo perfil tiene forma de parábola. Esta geometría permite que la radiación solar que incide paralela al eje focal de la parábola se concentre en el foco de esta. El foco de la parábola se extiende como una línea focal a lo largo de todo el canal, como es mostrado en la figura 2. Sobre esta línea se coloca un tubo receptor que contiene un fluido térmico (generalmente aceite) que se calienta cuando el tubo absorbe la radiación solar. Estos sistemas suelen trabajar por encima de los 100°C.

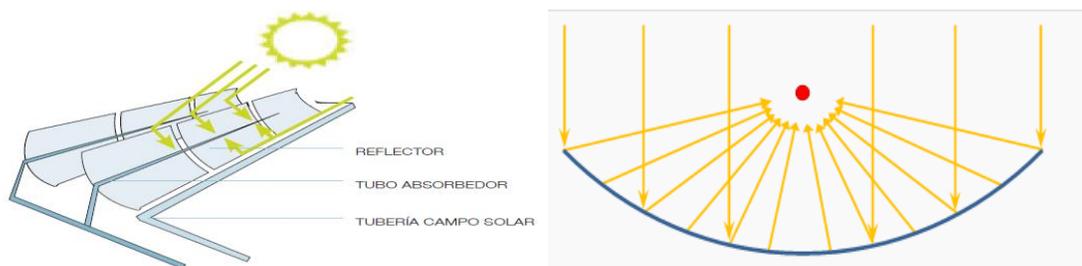


Figura 2. Canal Parabólico (izquierda) (Dr. Christoph Richter & Short, 2009) y esquema de funcionamiento de un concentrador de canal parabólico(derecha)(LACYQS, 2015).

1.1.2.2 Concentradores de Fresnel.

Los concentradores de Fresnel representan una aproximación de un canal parabólico. Este tipo de concentradores pueden considerarse como un particionamiento de un perfil parabólico y los segmentos son colocados en una superficie plana.

La idea es lograr mantener fija la zona focal del concentrador y, a cambio de ello, los delgados segmentos del concentrador redireccionan la radiación solar a la zona focal del sistema como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Esquema de funcionamiento de un concentrador Fresnel.(LACYQS, 2015)

1.1.2.3 Disco parabólico.

Los sistemas de disco parabólico, o mejor conocidos como disco Stirling, deben su nombre a que están diseñados con espejos parabólicos de revolución y un motor de combustión externa Stirling. (véase Figura 4)

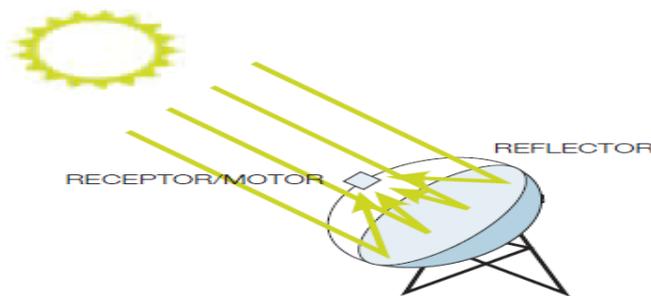


Figura 4. Disco Parabólico o Disco Stirling.(Dr. Christoph Richter & Short, 2009)

1.1.2.4 Sistema de torre central

Los sistemas de torre central conocidos como CRS por sus siglas en inglés (Central Receiver System) están constituidos por cientos o miles de espejos con seguimiento en dos ejes (helióstatos) que reflejan la radiación solar sobre una región focal que se sitúa a una altura suficiente para evitar sombreadamientos entre heliostatos cercanos entre sí (véase Figura 5). Estos sistemas pueden concentrar la luz solar hasta 600 veces y operar a temperaturas entre los 250°C y 1000°C. Desde sus inicios los CRS fueron concebidos para la generación de alta potencia.

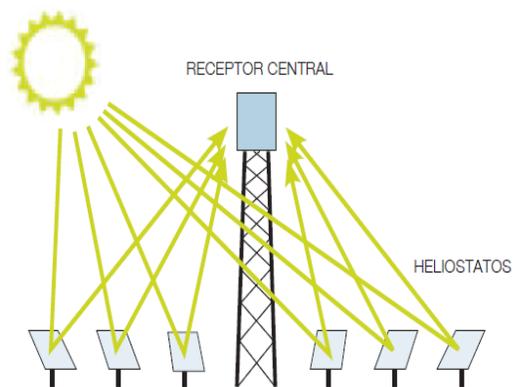


Figura 5. Sistema de torre central. (Dr. Christoph Richter & Short, 2009)

La tecnología de torre central se divide en 5 bloques principales, como se muestra en la figura 6, los cuales son: receptor, campo de heliostatos, tanque de almacenamiento, sistema de transferencia de calor, bloque de potencia y sistema de control.

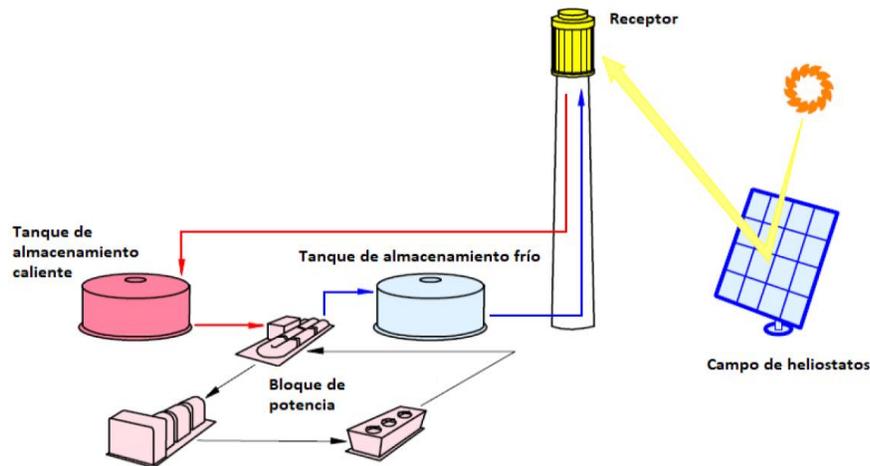


Figura 6. Esquema de una planta de receptor central.(Herrada Fernandez, 2018)

Con el objetivo de impulsar el desarrollo de tecnologías de concentración solar en México, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) aprobó en 2007 el proyecto “Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar”.

Este laboratorio nacional consta de tres instalaciones:

- Planta Solar para el Tratamiento Fococatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR), ubicada en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, en Temixco, Morelos.
- Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER), ubicado en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, en Temixco, Morelos.
- Campo Experimental de Torre Central (CETOC), ubicado en los terrenos de la UNISON, en Hermosillo, Sonora

1.2 Justificación.

Una característica que contienen los helióstatos de torre central con facetas planas es la baja concentración, ya que depende de la cantidad de espejos, por lo que para conseguir altos niveles de radiación se requieren de un mayor número de helióstatos en conjunto. Otra forma de incrementar los niveles de concentración sin aumentar el número de helióstatos sería que cada espejo tenga una curvatura que permitan una concentración solar y de esta manera con la misma área de captación se alcanza mayores niveles de radiación. Para atender esta problemática se pretende sustituir en un helióstato de 25 espejos planos de 1.44 m² cada uno por 25 espejos con superficie curva, esto permitiría alcanzar mayores temperaturas, lo que generará a futuro la posibilidad de hacer trabajos como lo pueden ser química solar.

1.3 Objetivo General.

- Desarrollo de espejos curvos concentradores para un helióstato de torre central

1.4 Objetivos Específicos.

- Diseñar, por medio de la técnica de trazado de rayos, una faceta con superficie curva que permita concentrar la radiación solar sobre el receptor de la torre del campo experimental de torre central.
- Diseñar una metodología para la formación de una superficie curva, a partir de un espejo plano.
- Diseñar una estructura de soporte para el espejo curvo, que tenga la rigidez necesaria para evitar su deformación.
- Diseñar los aditamentos para soportar las facetas en el helióstato.
- Construir las facetas curvas y los aditamentos para soportar las facetas.
- Caracterizar el sistema óptico del helióstato F0.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1 Helióstato.

Según el diccionario de la Real Academia de la Lengua, un helióstato se define como un “Aparato que, mediante un servomecanismo, hace que un espejo siga el movimiento diurno del Sol, recogiendo así la máxima energía para su utilización calorífica.”

Son espejos casi planos (se requiere cierta curvatura para enfocar la imagen del sol) que reflejan y concentran la energía solar en un receptor montado en una torre ubicado a una distancia de 100 a 1000 m. Para mantener la imagen del sol en el receptor solar, los helióstatos deben seguir en todo momento un punto en el cielo que esté a medio camino entre el sol y el receptor. (Mancini, 2000)

2.2 Campo de helióstatos.

Los helióstatos proporcionan el combustible (radiación solar) a la planta de energía de torre central, esto mediante la imagen solar que es reflejada del helióstato en una posición fija, pero con un seguimiento durante transcurso el día.

(Gonzalez, 2014) dice que, según la distribución, puede ser un campo de helióstatos norte, cuando se distribuyen al lado norte de la torre, o puede ser un campo circular cuando se distribuyen de todas direcciones alrededor de la torre, pero con mayor concentración de helióstatos en la parte norte como se muestra en la figura 7.

La elección del tipo de campo solar viene determinada principalmente por el tipo de receptor. Los campos norte se construyen para receptores planos o de cavidad, mientras que los campos circulares se construyen con receptores circulares.

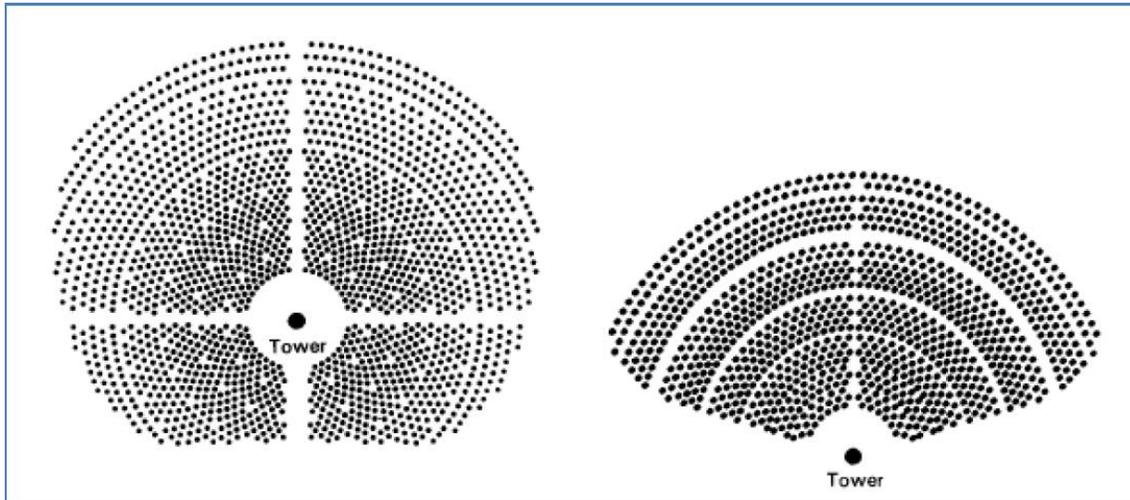


Figura 7. Campo de heliostatos circular (izquierda) y campo de heliostatos norte (derecha)(Herrada Fernandez, 2018)

El campo de heliostatos es uno de los elementos más importantes al momento de evaluar la eficiencia que tiene la planta de torre central, ya que la redirección y la concentración de la radiación solar en el receptor no son perfectos, por lo cual se pierde energía en el transcurso del reflejo del heliostato a el receptor.

2.3 Componentes de un heliostato.

Normalmente los componentes de un heliostato son: superficie reflectante (facetas), estructura, soporte, pedestal, cimentación, mecanismos de accionamientos y sistema de control, en la figura 8 se presenta un esquema de las partes que contiene un heliostato.

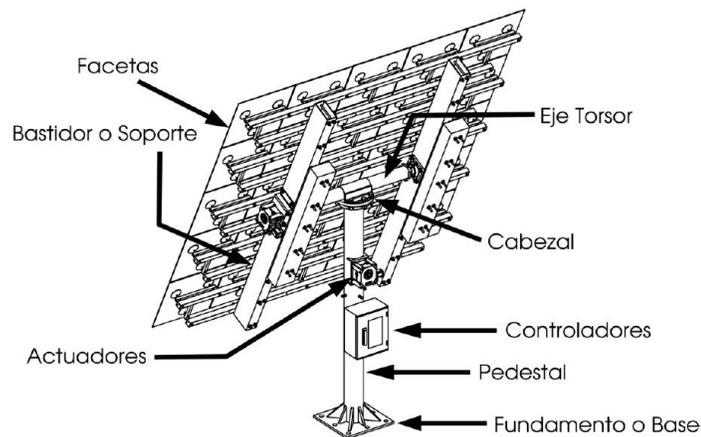


Figura 8. Esquema de los componentes de un heliostato.

2.4 Tipos de heliostatos

Según (Cock Martínez, 2018) existen varios tipos de heliostatos teniendo en consideración su morfología, tamaño y alimentación y control:

- **Tipo T:** Siendo el tipo de heliostato con mayor facilidad de fabricación y menor costo, así como el más empleado a nivel mundial en las plantas solares. Son nombrados heliostatos tipo T ya que su estructura simula una letra T, la cual permite orientar la plataforma que sostiene las facetas en la dirección del movimiento del Sol durante el transcurso del día mediante un sistema de control que tiene implementado.
- **Centralizados:** Tienen un sistema de control central que se encarga de enviar vía cableada, mecánica o inalámbrica, un estímulo a cada actuador de los heliostatos perteneciente a un mismo sistema de concentración termosolar.
- **Autónomos:** Estos poseen su propio sistema de control de seguimiento solar independiente de los demás heliostatos de la plataforma. Consta con un equipamiento de control local que genera una serie de cambios en su operación,

cálculo, seguridad, alimentación, permitiendo que se esté reflejando la radiación solar constantemente en la base receptora.

- **Membrana ajustada:** Estos helióstatos cuentan con un buen factor de concentración solar debido a que cuenta con una excelente calidad óptica y es muy resistente a las altas corrientes de vientos. Su estructura es en forma de carrusel y consta con un anillo rígido con un alto grado de nivelación que permite que su apoyo sea totalmente plano y su desplazamiento sea uniforme. Este tipo de heliostato por su estructura hace que sea más complejo de fabricar en serie a lo que se le añade un alto costo de fabricación.
- **Eje focal:** La simplificación del sistema de control de este helióstato es muy peculiar pero no es muy factible económicamente debido al balanceo estático del helióstato que es mucho más complejo que los otros tipos lo que hace que los costos de fabricación y operación aumenten. Su diseño consiste en dos ejes de rotación, uno de ellos, el principal, que coincide con el receptor u objetivo del sistema y el eje secundario es perpendicular a éste y permite un movimiento de elevación.

2.5 Eficiencia del campo de heliostatos

En un campo de torre central es conocido que la mitad del coste total de la inversión se atribuye al campo de helióstatos y estos representan alrededor del 40% del total de las pérdidas en el mismo (García Portolés, 2013).

Los helióstatos son el fundamental sistema de una planta solar y este se evalúa por su eficiencia óptica. Dentro de algunos factores que afectan a la eficiencia de los helióstatos se encuentra la baja reflectividad del espejo y los errores en las facetas macroscópicos y microscópicos como suelen ser la rugosidad, ondulaciones, fisuras o defectos puntuales, errores de canteo, etc. (Fernandez, 1997)

(Herrada Fernandez, 2018) dice que la eficiencia global del campo esta dado por η_{campo} , esta se debe a varios factores y se expresa como:

$$\eta_{campo} = \eta_{cos} + \eta_{ref} + \eta_{at} + \eta_{int} + \eta_{syb} \quad (2.1)$$

Explica que los términos que aparecen son factores asociados a diferentes tipos de perdidas:

η_{cos} es el factor coseno. Está relacionado con el hecho de que el área efectiva de captación es proporcional al coseno del ángulo que forman la normal de la superficie del espejo y los rayos solares. Por tanto, este depende de la posición del sol y de los heliostatos, que varían tanto a lo largo del día como del año. Es el mecanismo de perdidas más significativo.

η_{ref} representa la reflectividad de los heliostatos. Este asociado al hecho de que los materiales del espejo no tienen una reflectancia perfecta y absorben parte de la radiación que incide sobre ellos.

η_{at} es el factor de atenuación atmosférica. La radiación reflejada por el heliostato interactúa con las partículas que se encuentran en su camino al receptor, lo que haría que parte de la radiación se desvíe o sea absorbida por estas.

η_{int} representa el factor de interceptación. Una porción de la imagen reflejada por el heliostato puede no dar en el receptor y pasar de largo. Esto se debe a varios motivos: errores del sistema seguimiento, tamaño aparente del sol demasiado grande, imperfecciones en la superficie del heliostato, entre otras.

En la imagen 9 se observa algunos de los factores que hace que se tengan perdidas de la radiación en un campo de heliostatos.

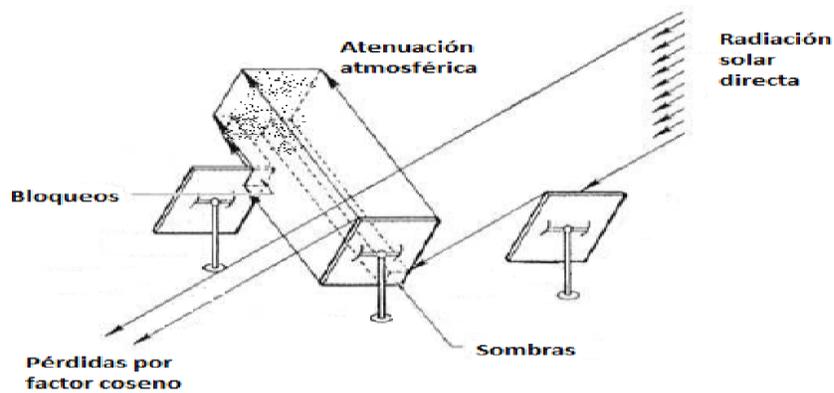


Figura 9: Pérdidas ópticas en un campo de heliostatos. Se muestran todas menos las pérdidas por factor de interceptación. (Herrada Fernandez, 2018)

Con el objetivo de reducir las pérdidas por sombras y bloqueos, los heliostatos suelen agruparse en un radial **stagger layout** en inglés, que consiste en distribuir los heliostatos en la intersección de líneas radiales y anillos concéntricos alrededor de la torre, con una separación angular constante, y dejando puntos vacíos de manera que ningún heliostato tenga ningún vecino en las cuatro intersecciones más próximas, esto se muestra en la figura 10.

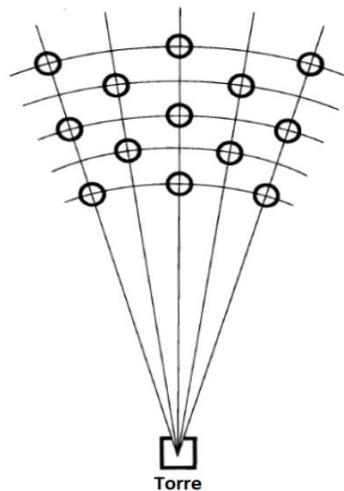


Figura 10. Distribución de heliostatos en el campo según un radial stagger layout. (Herrada Fernandez, 2018)

Desbordamiento. Este tipo de pérdida de eficiencia se puede poner a parte de las anteriormente mencionadas, ya que son varios los factores o errores que hacen que se presente este caso. El desbordamiento consiste en que una parte de la radiación reflejada por el heliostato no alcance a incidir en el receptor, ya que puede sobrepasar el área de absorción y esto provoca una pérdida.

2.6 Canteo de un heliostato.

Como se mencionó anteriormente, hay diferentes tipos de heliostatos, estos pueden ser de una sola faceta o facetas individuales que se encuentran montadas en una estructura en común, por lo cual estas se deben alinear hacia un punto en específico. A esta alineación de facetas se le conoce como canteo.

El objetivo del canteo es reflejar y posicionar la radiación solar de las facetas sobre un área específica, se deben de ordenar de forma geométrica para que se tenga una superposición de la imagen y tenga una forma homogénea, de tal forma que se adopte un sistema óptico único. (véase Figura 11).

Los canteos ideales son aquellos que son sobre eje, esto debido a que la mayoría del año presenta una mejor reflexión a lo largo del año, ya que él canteo fuera de eje solo se presentan en casos particulares (fecha y hora en específico).

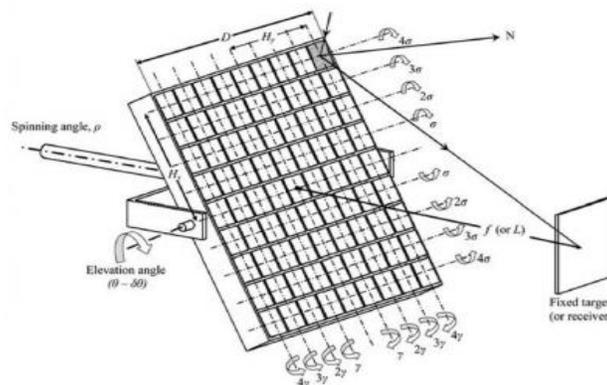


Figura 11. Heliostato de eje focal con alineación individual de facetas. (Pfahl, Andreas 2013)

2.6.1 Sobre el eje.

Esta se presenta cuando la curvatura de la faceta es simétrica y su punto focal ideal estaría a lo largo del eje óptico en el centro del heliostato. Por lo tanto, cuando el sol se alinee a lo largo de este enfoque normal, se producirá un enfoque perfecto. Por otro lado, cuando el sol vaya cambiando paulatinamente de posición, tendrá una aberración axial más o menos significativa. (véase Figura 12)

2.6.2 Fuera de eje.

Esta normalmente se presenta cuando la faceta no es simétrica, lo cual hace que el foco ideal no esté a lo largo del eje óptico en el centro del heliostato. Lo cual es necesario canteo en una hora y día en específico, debido a que en esos días el sol se encuentra centrado en el eje óptico del heliostato, esto producirá un enfoque perfecto, una vez pasado el día y hora fijados para el canteo, se empezará a presentar una aberración fuera de eje más significativa, esto debido a las facetas asimétricas del heliostato.

En este tipo de canteo se presenta algo llamado “región focal”, la cual consiste en que los rayos incidentes en el receptor no están convergiendo en un solo punto (punto focal), sino en un área cerca del foco (véase Figura 12).

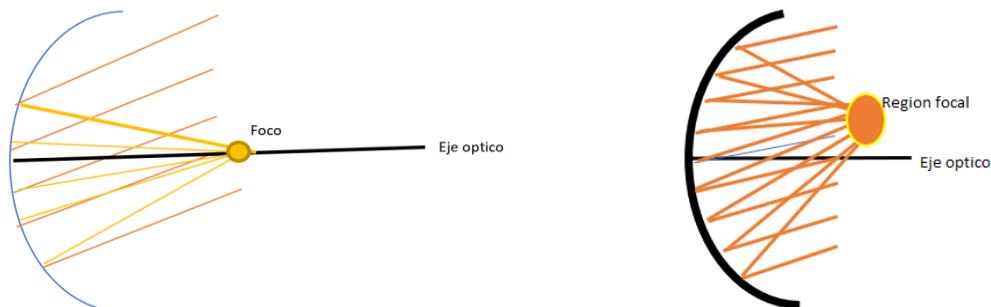


Figura 12. Esquema de canteo sobre eje (izquierda) y canteo fuera de eje (derecha)

Aberración fuera de eje. En la figura 13 se muestra este tipo de aberración, la cual está dada por la radiación reflejada en el blanco, pero fuera del eje óptico, esto hace que el conjunto desenfocado dibuje algo parecido a una “coma”, esta presenta una imagen nítida, solo que no está centrada a lo largo del eje óptico.

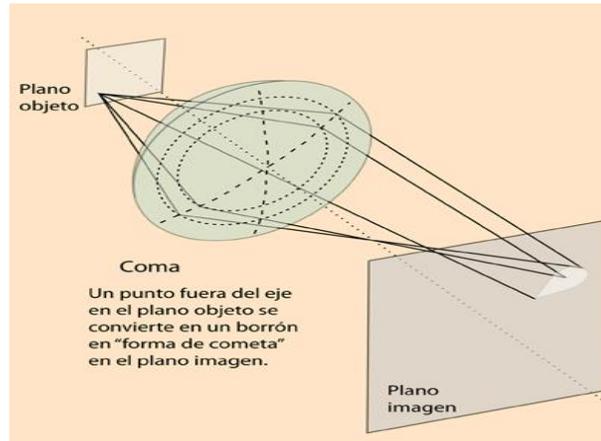


Figura 13. Presentación de aberración fuera de eje (astigmatismo) en un blanco. Coma and Astigmatism. (s. f.).

2.7 Método de trazado de rayos

El método de trazado de rayos consiste en dividir la radiación solar incidente en un número finito de rayos solares y en seguir la trayectoria de cada rayo incidente a través de sucesivas reflexiones hasta impactar sobre una superficie receptora de manera uniforme. (Medina, 2010)

Una de las características más importante a tener en cuenta de los métodos de trazado de rayos es la capacidad de determinar la distribución del flujo de energía en una superficie receptora. Este factor proporciona una idea de cómo se puede dar la transferencia de calor al fluido, mostrando la distribución de la temperatura en el receptor. (Terron Hernandez, 2018)

Para calcular la potencia que recibe esa superficie se debe definir la densidad de flujo luminoso (W/m^2) que irradia la fuente y el área de la superficie con la que interactúa. A cada rayo de luz incidente se le asigna una cantidad de energía que puede ir disminuyendo en cada interacción con las diversas superficies en las que impacta, debido a los índices de reflexión o de transmitancia que se les asigna a las superficies con los que interactúa. (Pérez, 2015)

Como se muestra en la figura 14, se observa la radiación proveniente del sol con una determinada cantidad de flujo radiativo (I_b) y es reflejada por la 1ra superficie, la cual tiene una propiedad de reflexión que se llamará (ρ_1). Los rayos que son reflejados en la superficie 1 inciden en un 2 elemento, este es un material traslucido, el cual tiene una propiedad de transmitancia (τ_2), y permite que los rayos pasen a través e incida en un 3er elemento, este posee el mismo índice de reflexión (ρ_3), el flujo radiativo que es reflejado por el último elemento se define como (I_f) y finalmente la 4ta superficie absorbe el (I_f), esto debido a que tiene un índice de absorptancia (α_4).

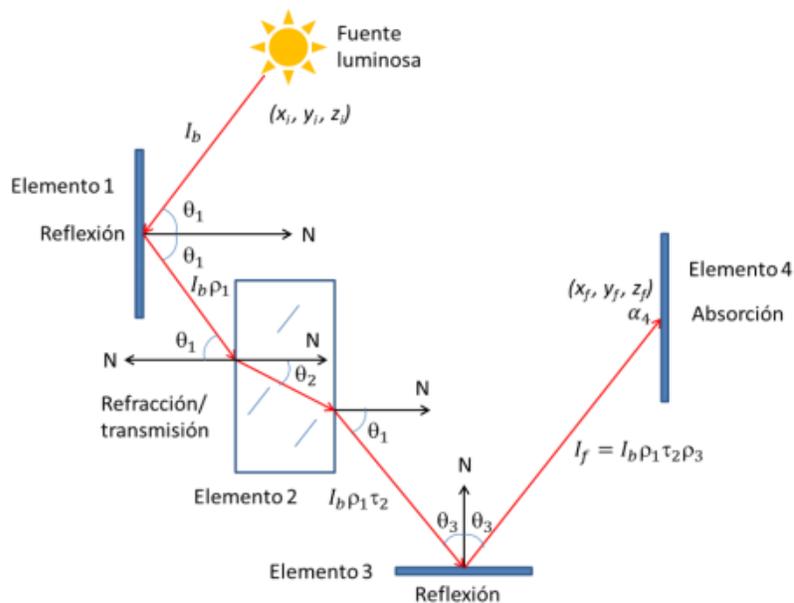


Figura 14. Seguimiento de la trayectoria de un rayo de luz con el método de trazado de rayos. (Pérez, 2015)

A lo largo de la trayectoria del rayo emitido por la fuente solar con coordenadas iniciales (X_i, Y_i, Z_i) fue cambiando la dirección por efectos reflectivos además de la transmitancia del mismo hasta llegar a las coordenadas finales (X_f, Y_f, Z_f) , y su intensidad final (I_f) por los coeficientes de reflexión y de transmitancia de los diferentes elementos. (Pérez, 2015) Quedando definida la intensidad final como:

$$I_f = I_b * \rho_1 * \tau_2 * \rho_3 \quad (2.2)$$

Es importante a la hora de realizar estudios teóricos utilizando métodos de trazado de rayos, definir algunos conceptos básicos de las propiedades de los elementos ópticos del sistema (errores ópticos) y las características de la fuente (sol). Otros aspectos a tener en cuenta es que la energía proveniente de la fuente no es puntal, ni constante, sino distribuida dentro de un ángulo de incidencia de la radiación, la cual debe ser tomada en cuenta para el trazado de rayos. (CAMARILLO, 2018)

2.7.1 Forma solar

Se define como forma solar o también conocida como disco solar a toda la radiación incidente que llega a la superficie terrestre considerando el Sol como una fuente luminosa no puntal. Toda esa energía en forma de rayos luminosos crea una especie cono a partir del vértice de la tierra y ese ángulo (θ) se define a través del radio del sol $(6.95 \times 10^5 \text{ km})$ y la distancia media de este con la tierra $(1.495 \times 10^8 \text{ km})$, como se muestra en la figura 15.

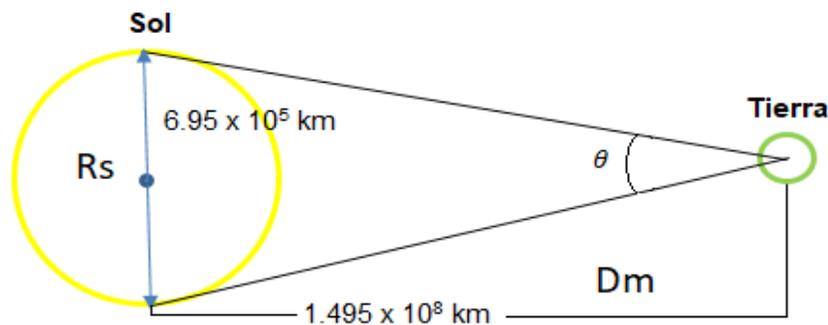


Figura 15. Esquema del ángulo del cono solar.

La expresión matemática para definir el ángulo del cono solar se define como:

$$\theta_{cono} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{R_s}{D_m} \right) = 9.3 \text{ mrad} \quad (2.3)$$

Donde:

R_s : Radio del sol

D_m : Distancia media del sol a la tierra

Las formas solares se representan en 4 perfiles para la aplicación del trazado de rayos: Sol Uniforme, Sol Gaussiano, Sol Bouie y Sol "real"

2.7.1.1 Sol uniforme (Pillbox)

Se le conoce así cuando el observador considera el Sol como una esfera perfecta de intensidad de radiación uniforme y radio angular de $\Delta_s = 4.65 \times 10^{-3} \text{ rad}$ como se muestra en la figura 16, por lo que representa la mitad del cono solar, a esta distribución solar también es conocida como Pillbox.

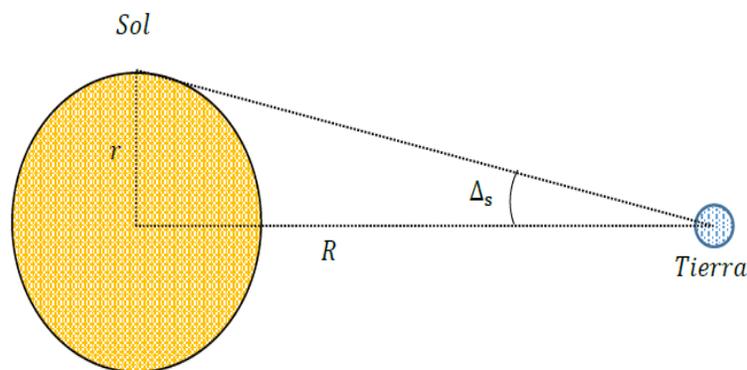


Figura 16. Esquema de la relación geométrica de la forma solar Pillbox

Como se sabe, la radiación solar viaja millones de kilómetros en el espacio hacia la tierra, una vez que la radiación solar entra en la tierra, esta tiene una interacción con partículas en la atmosfera. Suele haber fenómenos tales como absorción y difusión entre la radiación solar y la atmosfera, uno de los fenómenos más común por el efecto de la atmosfera sobre la radiación solar es la desviación angular que sufren la trayectoria de la radiación solar directa de sus direcciones teóricas desde el disco solar. Parte, de la radiación solar directa (DNI) llega al observador bajo una dirección de ángulo más dispersa de los 4,65 mrad , esto se observa en la figura 17.

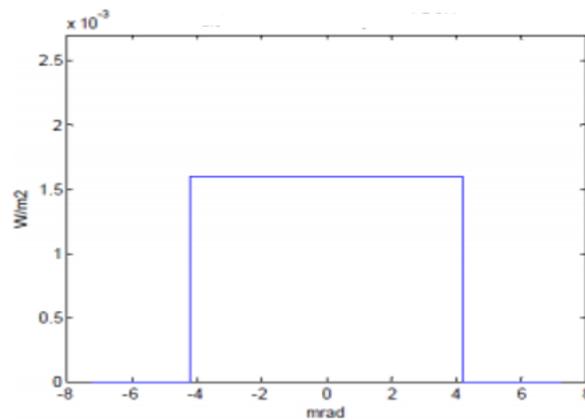


Figura 17. Distribución angular tipo Pillbox

2.7.1.2 Sol Baie

La forma solar Baie se define mediante un algoritmo que no depende de cambios en la ubicación geográfica por lo que la razón circunsolar (definido como la razón entre la energía de la aureola solar y la energía en el disco solar), representa la distribución espacial de la energía en función del disco solar. Este algoritmo no está definido en términos de radiación, la cual considera la energía por unidad de ángulo sólido y por unidad de superficie perpendicular a la dirección en la que se propaga. (Buie et al., 2003)

Esta fórmula se representa matemáticamente por las expresiones:

$$\sigma(\theta) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\cos(0.326\theta)}{\cos(0.308\theta)} & \text{para } 0 < \theta < 4.65 \\ e^{k\theta^\gamma} & \text{para } 4.65 < \theta < 44 \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

Donde:

θ : componente radial de la desviación angular

$$k = 0.9 \ln [13.5 \text{ RCS}] \text{ RCS}^{-3}$$

$$\gamma = 2.2 \ln [0.52 \text{ RCS}] \text{ RCS}^{0.43} - 1$$

Siendo θ la componente radial de la desviación angular medido en mili radianes.

2.7.1.3 Sol real

Consiste en definir al cono solar a partir de una tabla con medidas experimentales de la irradiancia angular solar. En algunos casos es posible tomar una imagen con una cámara CCD del disco solar y obtener la distribución de intensidad a partir de la digitalización de la imagen.

Esta técnica nos aporta una distribución en un plano, cuya integral se normaliza y posteriormente se multiplica por la irradiancia directa que se recibe del Sol. Debe considerarse que esta forma puede variar significativamente según las condiciones atmosféricas de cada región en particular. El efecto de la atmósfera se traduce en lo que se le ha llamado la radiación circunsolar (RCS). Esta radiación tiene su origen en la radiación directa, pero a causa de la presencia de partículas en la atmósfera, una parte de la radiación es dispersada y ahora incide desde regiones alrededor del disco solar a manera de una aureola. La radiación circunsolar (I_{cs}) se mide a través de una magnitud llamada razón circunsolar, y representa la proporción de radiación que incide de manera circunsolar respecto al total de irradiancia directa (I_{sol}). (Pérez, 2015)

La cual puede calcularse mediante la ecuación:

$$RCS = \frac{I_{cs}}{I_{cs} + I_{sol}} \quad (2.5)$$

Se debe de tener en cuenta la magnitud de la razón circunsolar, ya que esta es directamente relacionada en el diseño de los sistemas de concentración solar, si no se toma en cuenta el porcentaje de la radiación directa en forma circunsolar, esto hará que el rendimiento que tiene el sistema pueda llegar a ser sobreestimado, por ende, esto afecta el diseño, debido a que se tomó en cuenta solo un porcentaje de la radiación y se dejó afuera la parte circunsolar.

2.7.1.4 Sol normal (Gaussiano).

Consiste en aproximar al cono solar con una distribución normal, como si se tratara de una distribución aleatoria de tendencia central. La desviación estándar de la distribución que ajusta al radio angular solar y la altura de la distribución se ajusta a que la integral de distribución corresponda con la irradiancia directa incidente en la superficie de la tierra. (Riveros Rosas, 2008)

La ecuación para la distribución de forma normalizada se describe como:

$$G(\rho): \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.6)$$

2.7.2 Errores ópticos de un helióstato.

Una superficie especular o ideal es aquella donde su superficie no presenta errores, se presenta cuando el vector de la radiación solar que incide con la superficie coincide con la línea que proviene del centro del disco solar y la radiación dentro del cono se distribuye de una forma simétrica alrededor de esta línea. En la figura 18 se muestra como el seno del ángulo del cono de incidencia y el reflejado sean iguales, esto se conoce como la ley de reflectancia.

$$\sin \theta \hat{i} = \sin \theta \hat{r} \quad (2.7)$$

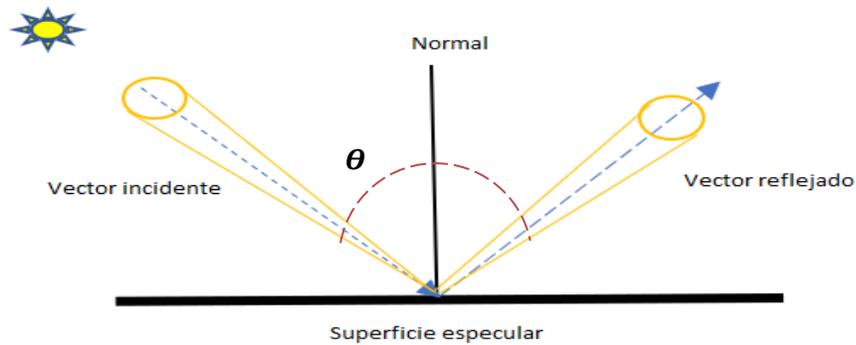


Figura 18. Esquema de una superficie especular

La realidad es que tener una superficie especular es muy poco probable, a menos que tenga una forma y pulimento perfecto; en caso de no ser así, la radiación o parte de esta es desviada, esta problemática se presenta en la superficie de un espejo por los llamados errores ópticos. Teniendo en cuenta lo anterior, hablaremos de los errores ópticos de superficie más comunes que se presentan en una superficie.

2.7.2.1 Error por rugosidad (Falta de especularidad).

Este tipo de error no se asocia a defectos en el maquinado o la puesta sobre la estructura del helióstato, este se presenta más por la estructura cristalina o granular en la superficie de la faceta. Esto conlleva que se tenga una superficie con cierto grado de rugosidad a nivel microscópico, en este caso se seguirá reflejando en el mismo punto, solo que se presentara un ensanchamiento de la distribución de la radiación solar, lo que conlleva a que tienda a ser una distribución Gaussiana. (véase Figura 19).

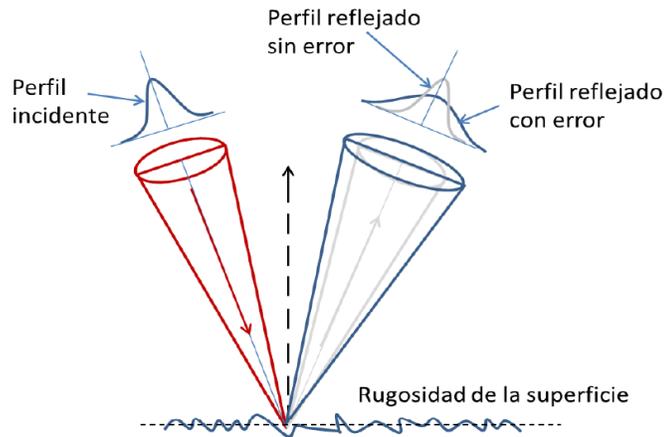


Figura 19. Error por rugosidad. (Pérez, 2015)

2.7.2.2 Error por ondulación.

En la figura 20 se muestra como el error se presenta por patrones de ondas superficiales con amplitudes de milímetros o centímetros y longitudes de onda comparables a las dimensiones de la faceta.

Esto trae como consecuencia que el eje de la normal real presente una desviación significativa, esto representa una pérdida en la radiación reflejada.

El error por ondulación tiene un factor de multiplicación de 2, debido a que el ángulo reflejado real (R_{real}) no tiene la misma coincidencia que debe de tener con el ángulo de incidencia de ($R_{incidente}$), esta desviación se ocasiona debido al ondulado que presenta la superficie.

Lo que significa que hay una desviación de ($2\sigma_1$), basándose en la dirección del reflejo ideal (R_{real}). La desviación de ondulación (σ_1), siempre tendrá el doble de valor en su rayo reflejado, hablando estrictamente en error por ondulación.

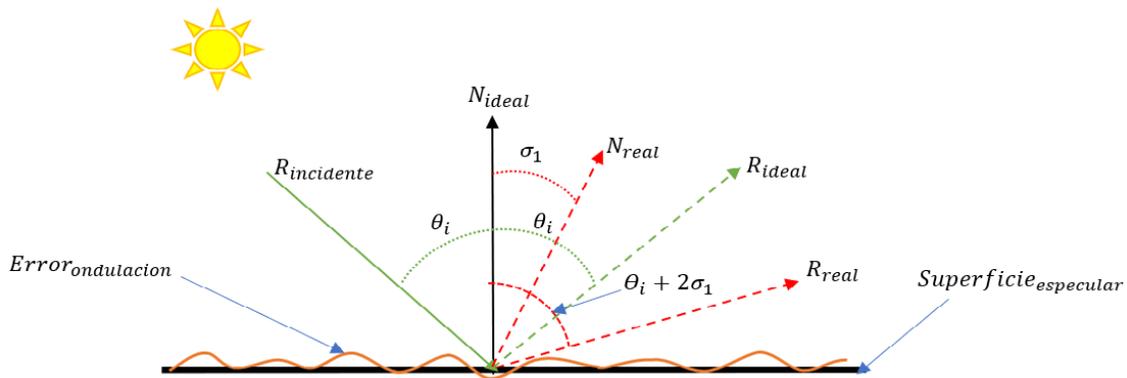


Figura 20. Esquema de la desviación de la normal por error de ondulación.

2.7.2.3 Error en la forma o curvatura.

Este tipo de errores se presenta cuando el espejo tiene una geometría o una curvatura diferente a la que se tenía idealmente, en la figura 21 muestra un esquema de lo dicho anteriormente. Se presentan principalmente por la mala fabricación de la pieza o al momento de montarla sobre la estructura, se le mete una carga externa y esto provoca una deformidad en su curvatura. Estos errores tendrán por consecuencia que la distancia focal que se tenía originalmente ya no sea la misma, así como la desviación del vector normal en el espejo, lo cual también repercute en la desviación de la radiación que se refleja.

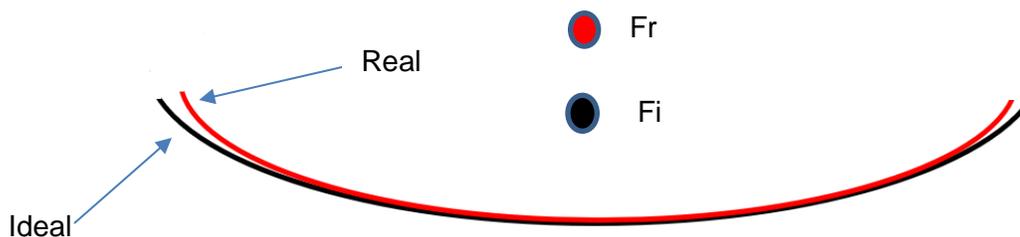


Figura 21. Esquema del cambio de distancia focal por error de curvatura.

Teniendo en cuenta los errores de superficie antes mencionados, la sumatoria de todos conlleva a el error global, esto teniendo en cuenta que sea solo 1 espejo.

$$\sigma_{global}^2 = \sigma_{Rugosidad}^2 + 2\sigma_{Ondulación}^2 \quad (2.8)$$

2.7.3 Errores no asociados a la superficie.

Este tipo de errores se presentan cuando se evalúa el error global de un sistema óptico de varios espejos, estos tipos de errores son independientes a los errores de superficie.

2.7.3.1 Error por seguimiento.

Suelen ser consideraciones en la precisión de los sistemas de seguimiento solar de los concentradores, así como de las estructuras mecánicas que pueden ocasionar errores en la reflexión y de deriva en la proyección de la mancha solar concentrada en la zona focal. (CAMARILLO, 2018)

2.7.3.2 Error por canteo.

En la actualidad el diseño de los helióstatos no permite que las facetas se vayan canteando de forma automática basándonos en el cambio de la posición del sol, debido a una vez que son canteadas se quedan fijas.

El canteo ideal depende de la posición del helióstato, posición del blanco (en la torre central) y la posición del sol, dada esta conformación en la cual el sol está en constante movimiento, se trata de un problema que depende del tiempo. Como se mencionó en el punto 2.6.1, el canteo ideal es sobre eje, ya que a diferencia del fuera de eje, el resto del tiempo la radiación que es reflejada se verá afectada por una distorsión, la imagen se empezará a mover de su eje óptico y se empezará a tener una aberración fuera de eje más notorio con el paso del tiempo.

Por lo cual el error global de un sistema óptico puede ser expresado como:

$$\sigma_{global}^2 = \sigma_{Rugosidad}^2 + 2\sigma_{Ondulación}^2 + \sigma_{Canteo}^2 + \sigma_{Seguimiento}^2 \quad (2.10)$$

2.8 Generación de códigos numéricos para la solución de trazado de rayos.

La modelación de un sistema óptico se torna complejo, ya que se tiene una infinidad de elementos (rayos), por lo cual se debe de considerar una gran cantidad de estos para tener resultados los más cercanos a la realidad. Para resolver el trazado de rayos, se utilizó el método de Montecarlo.

2.8.1 Método de Montecarlo.

El método de Montecarlo es un método numérico que permite resolver problemas físicos o matemáticos con un sistema de simulación de variables aleatorias, ya sea determinístico o estocástico.

Generalmente en estadística los modelos aleatorios se usan para simular fenómenos que poseen algún componente aleatorio. Pero el método de Montecarlo, su objetivo de la investigación es el objeto en sí mismo, un suceso aleatorio o pseudoaleatorio se usa para estudiar el modelo, la simulación de Montecarlo también fue creada para resolver integrales que no se pueden resolver por métodos analíticos, para solucionar estas integrales se usaron números aleatorios.

Posteriormente se utilizó para cualquier esquema que emplee números aleatorios, usando variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidas, el cual es usado para resolver ciertos problemas estocásticos y determinísticos, donde el tiempo no juega un papel importante. (Grijalva, 2009).

Los códigos numéricos más comunes para la modelación de los sistemas ópticos de concentración solar que utilizan el método de Montecarlo son el Sol Trace que fue diseñado por NREL por sus siglas en inglés y sus autores son Tim Wendelin. Allan Lewandowsky y Aron Dobos, mientras que Tonatiuh fue desarrollado por la CENER.

2.8.1.1 Tonatiuh

El Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) junto con la Universidad de Texas en Brownsville, desarrollaron el programa tonatiuh con el objetivo crear un trazador de rayos Montecarlo de código abierto, de vanguardia, preciso y fácil de usar para la simulación óptica de sistemas de concentración solar. Tiene la intención de avanzar en el estado del arte de las herramientas de simulación disponibles para el diseño y análisis de sistemas de concentración solar.

Algunos de los objetivos de diseño más relevantes de tonatiuh:

- Desarrollar una base teórica sólida que facilite la simulación óptica de casi cualquier tipo de sistema de concentración solar.
- Mostrar una arquitectura de software limpio y flexible que permita al usuario adaptar, ampliar, aumentar y modificar sus funcionalidades con facilidad.
- Lograr la independencia del sistema operativo a nivel de código fuente y ejecutarlo en las principales plataformas con ninguna o pequeñas variaciones de su propio código fuente
- Proporcionar a los usuarios una interfaz avanzada y de fácil uso gráfico.

(*Tonatiuh*. (s. f.)) utiliza el algoritmo computacional de Monte Carlo de trazado de rayos. Cada rayo es trazado por el sistema mientras interacciona con las superficies del sistema y las distintas interacciones ópticas como reflectividad, distribución de errores y absorptividad, además de las ambientales como la radiación proveniente del disco solar, forma y posición solar.

A continuación, se presentan revisiones de literatura referente al tema de estudio.

(Arancibia-Bulnes et al., 2017) presenta las diferentes técnicas de caracterización óptica de los concentradores solares, así como breves descripciones del funcionamiento y la metodología de cada una de ellas, los puntos fuertes que se presente en cada técnica y

sus deficiencias, así como una clasificación de las técnicas utilizadas para la caracterización de la superficie del concentrador solar y el tipo de error que esta técnica arroja.

(Bonanos et al., 2019) utiliza 2 métodos para caracterizar la superficie de un heliostato, esto mediante fotogrametría y escaneo laser, con lo cual traza una serie de puntos en toda la superficie del heliostato reconstruyendo su superficie para caracterizar la forma real de la superficie del helióstato. Mediante el programa de trazado de rayos Tonatiuh se compararon las superficies hechas con las 2 metodologías contra la forma parabólica ideal del heliostato.

(Cisneros-Cárdenas et al., 2020) a través de la metodología teórica-experimental, se logró el objetivo principal, el cual era la caracterización óptica del sistema para determinar el error óptico global, la parte teórica se hizo mediante el código numérico de trazado de rayos Montecarlo, el programa usado para las simulaciones fue Tonatiuh, mientras la parte experimental se usó el análisis de imagen, con el fin sacar los perfiles de distribución y hacer una comparativa con los perfiles con diferentes errores ópticos, para posteriormente tener el error global en cada uno de los ejes, el sistema de concentración de su estudio fue un disco parabólico.

(Riveros-Rosas et al., 2011) llevó a cabo un estudio teórico para comprender como afecta el tamaño de los espejos y de sus errores ópticos en los sistemas de concentración de múltiples facetas con una concentración de foco puntual, con el fin de comprender que la concentración pico, así como la distancia focal del sistema dependen en gran parte del tamaño que se le proporcione a los espejos y de los errores que estos presenten.

Este estudio da una pauta para que los desarrolladores de sistemas de concentración tengan una mayor comprensión de las restricciones del diseño a fabricar y el comportamiento óptico que se obtendrá al final.

(Riveros-Rosas et al., 2010), describe el diseño de un nuevo horno solar de alto flujo, realizando simulaciones con trazado de rayos para determinar las distribuciones de flujo

radiativo en la zona focal del sistema, el diseño considera un concentrador formado por 409 espejos hexagonales de vidrio pulido de primera superficie. Los espejos están sujetos a un marco de curvatura esférica. Los resultados del trazado de rayos indican que hay muy diferencia en el rendimiento óptico entre un marco parabólico y uno esférico, pero este último puede ser más fácil de fabricar.

(Iriarte-Cornejo et al., 2018), realizó un estudio para determinar el número óptimo de puntos de muestra para la caracterización de la superficie de un heliostato. Teniendo en cuenta el efecto del número de puntos de muestreo obtenidos a partir de la técnica de reflexión de franjas sobre la reproducción precisa de las distribuciones de flujo del heliostato. Con lo cual se llegó a la conclusión que, dependiendo del nivel de error de la superficie, el número de puntos requeridos para alcanzar la convergencia en los perfiles de distribución de flujo son variables. Para el caso de ese estudio en particular se concluyó que con 48 puntos fueron suficientes para alcanzar la convergencia del 1 %. Esto equivale a un punto por cada 2,5 cm de longitud del lado de la faceta.

(Bonanos et al., 2020), presenta un enfoque estadístico para medir el promedio de la reflectancia de un campo de heliostatos o un heliostato. mediante un muestreo de solo un subconjunto de facetas, encontrando que con solo 3 de ellas son suficientes para obtener una estimación de la reflectancia media del grupo. Estos números de muestra se mantienen para un error del 2,5% con una confianza del 95%. Esto fue realizado tanto para un heliostato como para un Fresnel.

(Arqueros et al., 2003), desarrolló un procedimiento para la caracterización óptica de sistemas de concentración, el cual se basa en grabar por la noche la luz de una estrella reflejada por el espejo. Las imágenes del espejo tomadas desde su región focal permiten la reconstrucción del mapa de las pendientes. La aplicación de esta técnica para la caracterización in situ de heliostatos es particularmente simple. El análisis del mapa de pendientes ha permitido determinar las propiedades relevantes del heliostato, como errores de compensación, precisión de inclinación y posibles defectos estructurales. Se hizo este estudio en un heliostato de la plataforma solar de Almería, arrojando un error estimado de 1mrad.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Distribución de los heliostatos en el CEToC.

En la figura 22 se muestra un diagrama del Campo Experimental de Torre Central (CEToC), cual está compuesto actualmente por 22 heliostatos de diferentes modelos:

8 de 36 m² con 25 facetas de 1.2 m X 1.2 m (color amarillo)

1 de 31.68 m² con 22 facetas de 1.2 m X 1.2 m (color verde)

13 de 37.44 m² con 32 facetas de 1.3 m X 0.9 m (color gris)

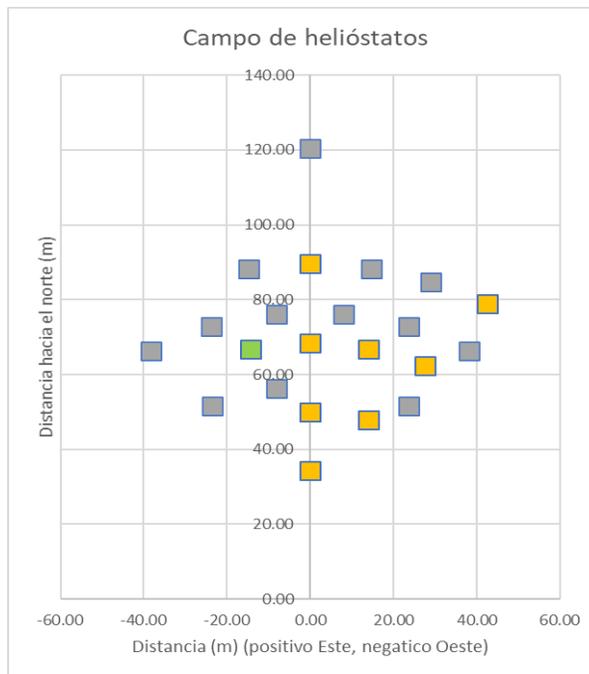


Figura 22. Diagrama del CEToC

3.2 Descripción del heliostato F0

Se determinó que el heliostato que se tomaría del CEToC para la modificación de los espejos, es el heliostato F0 modelo CCADET-CIE DS900, este tiene un área de 36 m² compuesto por 25 facetas planas de 1.2 m x 1.2 m (véase Figura 23).



Figura 23. Heliostato F0 modelo CCADET-CIE DS900

3.2.1. Estructura del heliostato.

En la figura 24 muestra los espejos que actualmente tienen los heliostatos modelo CCADET-CIE DS900, estos son de 5 mm de espesor y están soportados sobre un marco cuadrado de 78 cm por lado, con perfil tubular cuadrado (PTR) de 1.5 pulgadas, los marcos tienen 4 rótulas que tienen 2 barrenos cada una, esto con la finalidad de permitir el paso a los tornillos de 7/16" (véase Figura 25), que le permiten ajustar la inclinación respecto al plano de la estructura de soporte y con eso hacer el canteo requerido para reflejar la radiación solar sobre el blanco.

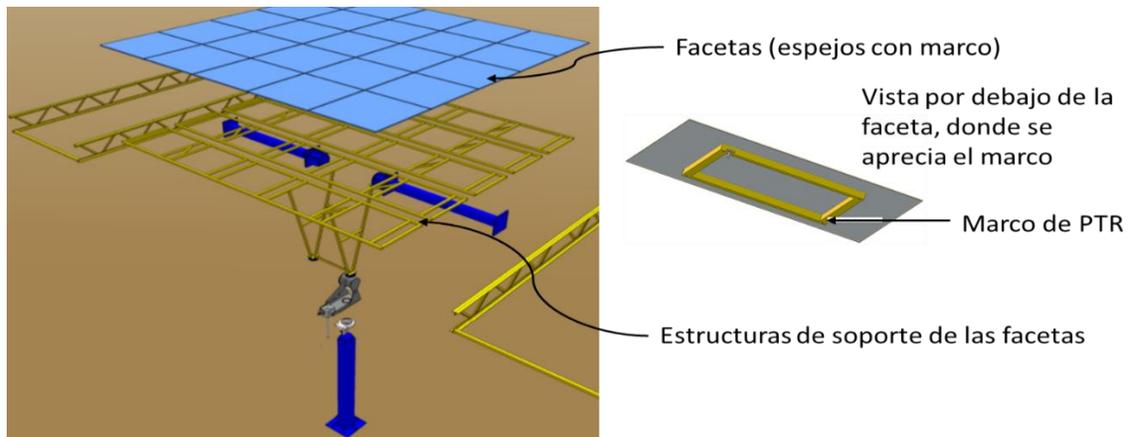


Figura 24. Vista explosionada del heliostato F0, se muestran los elementos de soporte y la faceta.

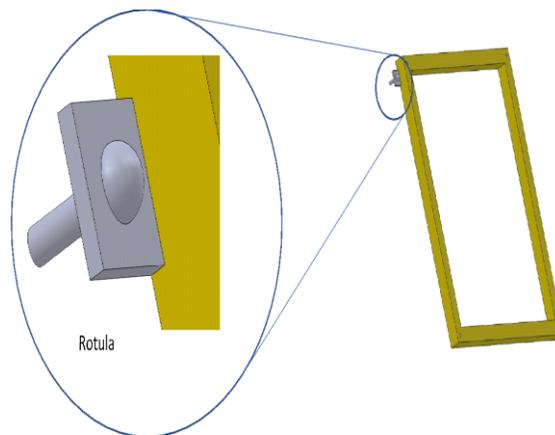


Figura 25. Marco con rotula para el movimiento de canteo

El conjunto de las 25 facetas y sus marcos se encuentran montadas en una estructura de soporte que se conecta con los bastidores del heliostato, esta estructura es la encargada de dar el espacio entre los marcos, los marcos van ensamblados en 5 filas horizontales de 5 espacios cada uno, dentro de cada fila hay 20 bases en las cuales va ensamblada la rótula de cada esquina de los marcos (véase Figura 26), esto con el fin de darle el espacio adecuado al marco y no tener un problema de traslape, ya que esto puede provocar que la faceta se fisure, el margen que se tiene de una faceta con otra es respectivamente 1 cm.

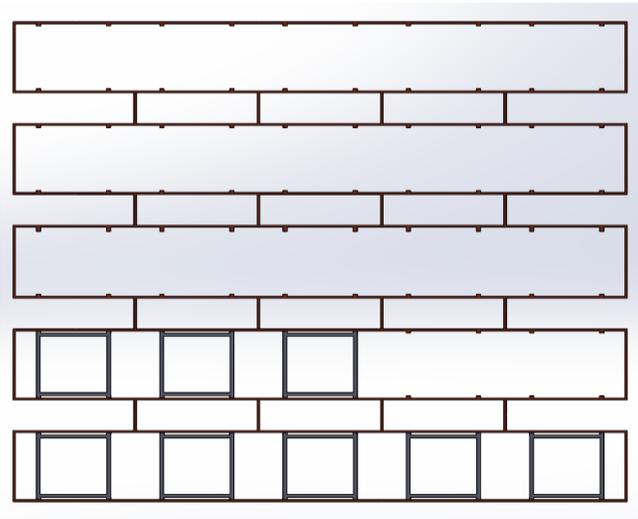


Figura 26. Diseño de estructura del heliostato F0 en Solid Works

3.2.2 Transmisiones

Para tener el movimiento en azimut (este-oeste), se utiliza un mecanismo llamado **Perfection Gear modelo SDST15594S**, está compuesto por tornillos sin fin y una corona a la salida, como se muestra en la figura 27, esta presenta un comportamiento lineal entre los giros del motor y la corona.

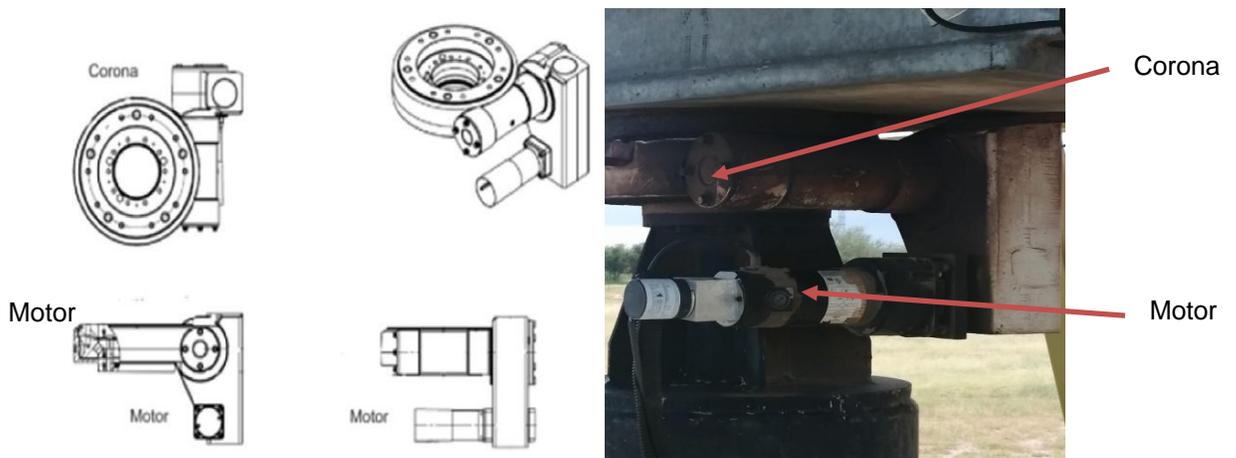


Figura 27. Diseño del mecanismo *Perfection Gear modelo SDST15594S* (Izquierda), mecanismo actual del helióstato F0 (Derecha).

3.2.3 Actuador lineal

Para el movimiento de elevación, el heliostato dispone de un actuador lineal marca **Joyce – Dayton** (vease Figura 28). Por el funcionamiento de este mecanismo, presenta un comportamiento no lineal en el movimiento entre las vueltas del motor y el giro de elevación del heliostato.

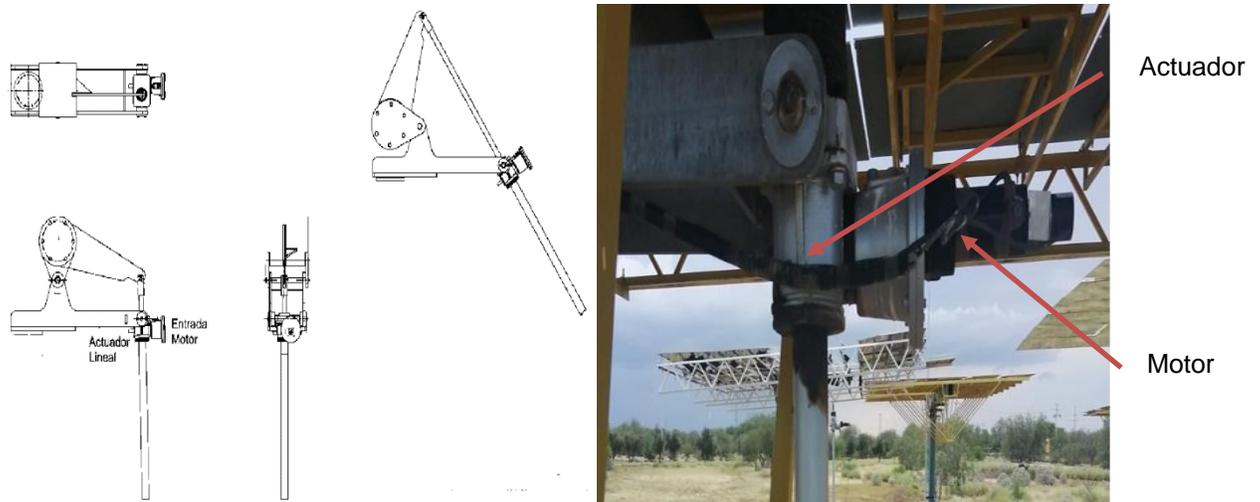


Figura 28 Diseño de actuador lineal Joyce-Dayton (izquierda), actuador lineal y motor del heliostato(derecha)

El movimiento de este actuador lineal no se ve afectado con el mecanismo de movimiento azimutal, ya que es independiente del otro y cada uno de ellos tiene su propio motor para dar movimiento de forma separada al mismo tiempo, este mecanismo va acoplado en la parte superior de la corona como se muestra en la figura 29.

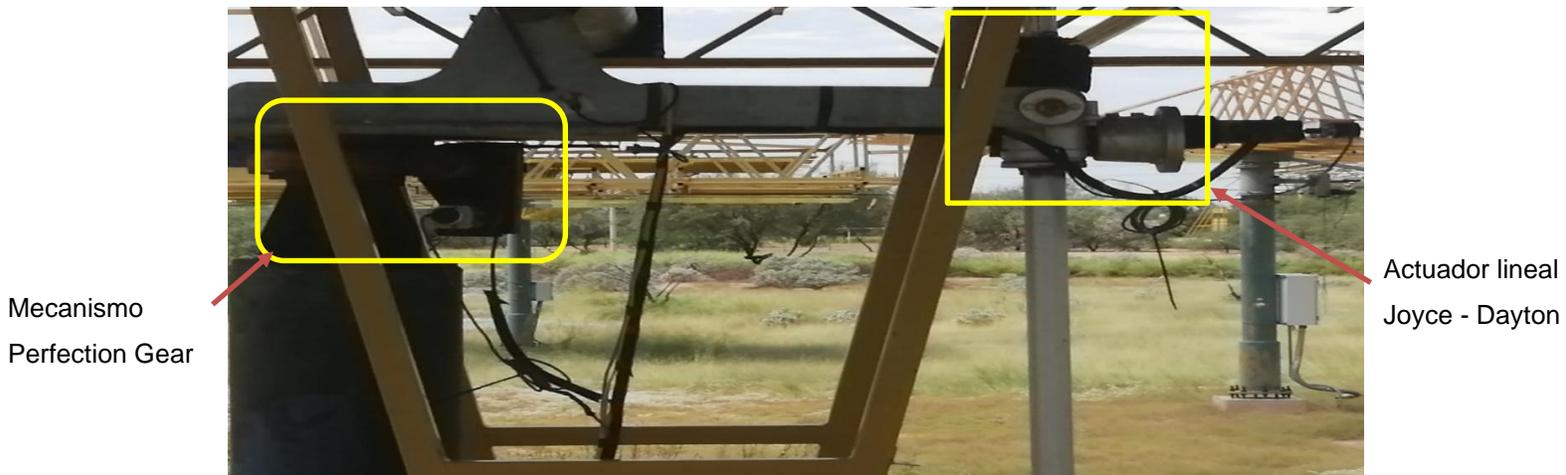


Figura 29. Conjunto de mecanismo y actuador lineal acoplados al Heliostato F0

3.3 Metodología para el diseño y construcción de las facetas para el heliostato F0.

3.3.1 Óptica geométrica del espejo concentrador

La óptica geométrica del espejo ideal es aquella que permita a los rayos paralelos al eje óptico se reflejen en un solo punto, el foco. Para tener una óptica de concentración se necesita examinar la geometría que más se adecue a las necesidades que presente el heliostato, dentro de los sistemas ópticos de concentración, existen diferentes formas de superficies como lo son, esféricas, elipsoidales, parabólicas, etc.

Debido a que la manufactura de un espejo parabólico e elipsoidal son demasiado complejos, así como su pulimento, esto conlleva a ser espejos demasiado costosos, por lo cual el espejo concentrador más viable es el esférico.

3.3.2 Descripción de un espejo esférico

En la figura 30 describe un espejo esférico como aquel que tiene un centro C el cual su radio es r , donde del punto O se toma como el casco o la superficie del espejo, siendo del punto O a C como el eje óptico del espejo y tendrá una región que se comporta como un foco, el cual es donde convergen los rayos del punto A y B .

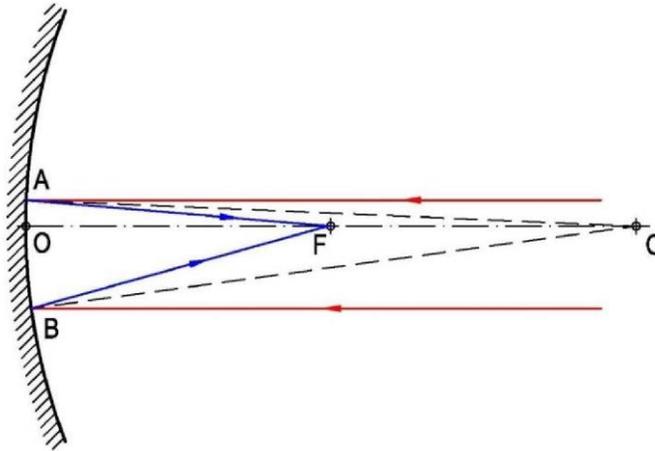


Figura 30. Diagrama de reflexión en una superficie esférica.

3.3.2.1 Rayos paraxiales,

Como si el punto P es una fuente de ondas esféricas (tales como las solares), donde el punto p' es el rayo incidente en un punto, también conocido como imagen o foco.

El rayo PA , cuya normal es AC , vendrá reflejado según Ap' pues se verifica la igualdad de los ángulos de incidencia y reflexión.

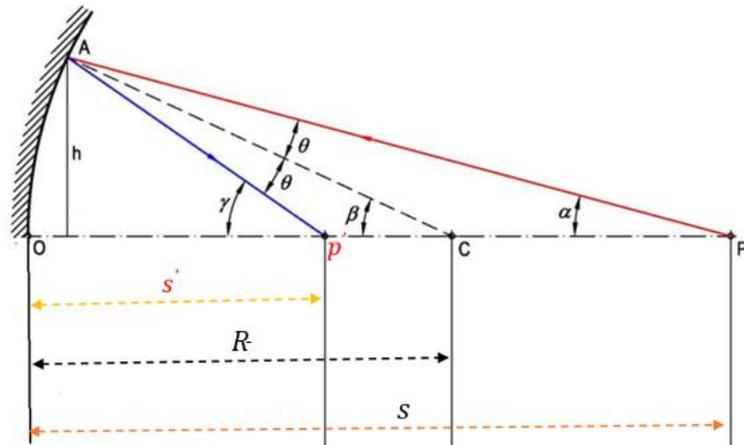


Figura 31. Diagrama de un rayo paraxial reflejado desde una superficie esférica

Para corroborar que en verdad los ángulos de incidencia y reflexión son el mismo, se hace el análisis de la figura 31:

$$\beta_{\text{incidente}} = \alpha + \theta, \quad \beta_{\text{reflejado}} = \gamma - \theta \quad (3.1)$$

El ángulo β es el ángulo de la normal con respecto a el eje óptico, teniendo en cuenta esto, se hace la simplificación

$$\frac{\beta = \alpha + \theta}{\beta = \gamma - \theta} \quad \Longrightarrow \quad 2\beta = \alpha + \gamma \quad (3.2)$$

(RUIZ, 2017) comenta que los rayos son paralelos o casi paralelos y sus ángulos son demasiados pequeños en base al eje óptico, casi aproximándose el valor de cada ángulo con el de su tangente, los rayos reflejados en esta parte de la superficie del espejo se le conocen como rayos paraxiales.

Teniendo en cuenta lo mencionado, se puede hacer la consideración que:

$$\alpha \approx \tan \alpha \approx \frac{h}{s} \quad \beta \approx \tan \beta \approx \frac{h}{R} \quad \text{y} \quad \gamma \approx \tan \gamma \approx \frac{h}{s'} \quad (3.3)$$

Sustituimos los valores de la formula (3.3) en la formula (3.2):

$$2 \frac{h}{R} = \frac{h}{s} + \frac{h}{s'} \quad (3.4)$$

Debido a que la h no cambia, se toma como una constante:

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad \Longrightarrow \quad \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R} \quad (3.5)$$

Donde:

R: Es el radio de curvatura del espejo

s: Es la distancia del punto P con respecto al origen 0, situado sobre el eje óptico.

s': Es la distancia de la imagen con respecto al origen

La fórmula anterior desarrollada es conocida como ecuación fundamental de espejo esférico o la fórmula de Descartes de reflexión en una superficie esférica. En el caso de que la distancia s con respecto al origen de la superficie esférica tienda a ∞ , se descarta $1/s$, por lo cual queda como:

$$\frac{1}{s'} = \frac{2}{R} \quad (3.6)$$

Teniendo en cuenta el desarrollo anterior y que todo rayo paralelo o casi paralelo con referencia al eje óptico de la superficie, incidirá tras su reflexión en el punto p cuál se le denomina foco, la distancia que hay del foco de la superficie con respecto al origen, se le conoce como distancia focal, la cual resulta del despeje de la fórmula (3.6).

$$S' = \frac{R}{2} \quad (3.7)$$

3.3.2.2 Aberración esférica

El apartado anterior se dedujo pensando que los rayos se reflejaban de forma paralela o casi paralela haciendo que sus ángulos α y β fueran demasiado pequeños, haciendo que se aproximaran al valor de su tangente.

Sin embargo, si los rayos incidentes forman ángulos demasiado abiertos y estos no tienden a ser paralelos, los rayos reflejados no se aproximarían a un solo punto, sino a un indeterminado valor de ellos, a esta situación se le conoce como aberración esférica.

Se puede observar en la figura 32, como los rayos reflejados inciden en la zona más próxima sobre el eje óptico, pero a medida que el rayo incidente se va alejando de esta zona, este empieza a generar un ángulo más amplio y el rayo no incide en el foco, lo cual hace que la fórmula (3.7) no sea válida y se genere una imagen amplia.

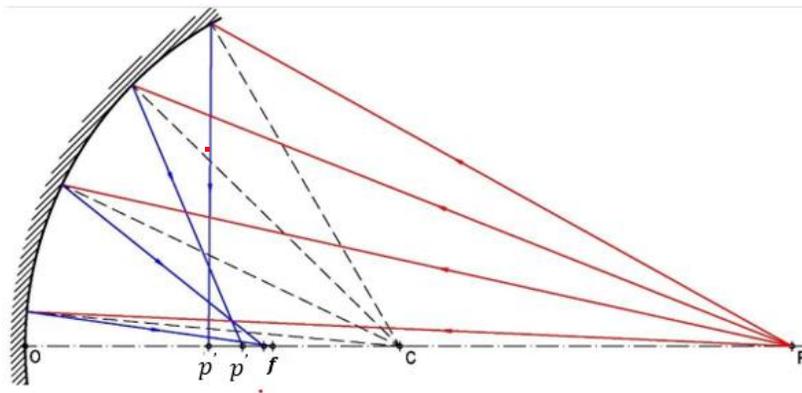


Figura 32. Espejo con aberración esférica

3.3.2.3 Región paraxial.

(Riveros Rosas, 2008), hace mención que, para las superficies esféricas se hace una aproximación de su distancia focal, esto cuando cuya distancia no sea mayor al radio $x \ll R$, a partir de la ecuación de la circunferencia del círculo:

$$X^2 + (Y - R)^2 = R^2 \quad (3.8)$$

Despejamos la ecuación:

$$Y = R \pm (R^2 - X^2)^{\frac{1}{2}} = R \pm R \left(1 - \frac{X^2}{R^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

El binomio de la ecuación anterior se desarrolla con el teorema de Newton para potencias negativas o fraccionarias:

$$(a - b)^{\frac{1}{2}} = a^n + na^{n-1}(-b) + \frac{n(n-1)}{2!} a^{n-2}(-b)^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} a^{n-3}(-b)^3 + \dots \quad (3.10)$$

Cuando el número elevado n potencia es negativo o fraccionario, este tiende a infinito, por lo cual solo se obtienen los primeros 4 términos para usos prácticos.

Donde:

$$a = 1, b = \frac{X^2}{R^2}, n = \frac{1}{2}$$

Por lo cual desarrollamos el binomio:

$$\left(1 - \frac{X^2}{R^2}\right)^{\frac{1}{2}} = 1^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} 1^{\frac{1}{2}-1} \left(-\frac{X^2}{R^2}\right) + \frac{\left(\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}-1\right)\right)}{2!} 1^{\frac{1}{2}-2} \left(-\frac{X^2}{R^2}\right)^2 + \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}-1\right)\left(\frac{1}{2}-2\right)}{3!} 1^{\frac{1}{2}-3} \left(-\frac{X^2}{R^2}\right)^3 + \dots$$

$$\left(1 - \frac{X^2}{R^2}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2} \frac{X^2}{R^2} - \frac{1}{8} \frac{X^4}{R^4} - \frac{1}{16} \frac{X^6}{R^6} + \dots \quad (3.11)$$

Se sustituye el resultado del binomio en la ecuación 3.9:

$$Y = R \pm R \left(1 - \frac{1}{2} \frac{X^2}{R^2} - \frac{1}{8} \frac{X^4}{R^4} - \frac{1}{16} \frac{X^6}{R^6} + \dots\right) = \left(\frac{X^2}{2R} + \frac{X^4}{8R^3} + \frac{X^6}{16R^5} + \dots\right) \quad (3.12)$$

Haciendo la suposición que el radio en comparación del segmento tomado de la circunferencia es demasiado grande $x \ll R$, se puede aproximar el primer término del binomio de la ecuación (3.12) como la solución.

$$y = \frac{x^2}{2R} \qquad \text{Desviación } \Delta y = \frac{x^4}{8R^3} + \frac{x^6}{16R^5} + \dots \qquad (3.13)$$

Haciendo la comparación de las ecuaciones de la parábola y del segmento $x \ll R$.

$$\text{Figura}_{esferica} \quad Y = \frac{X^2}{2R} \qquad \text{Figura}_{parabolica} \quad Y = \frac{X^2}{4f}$$

Se hace una aproximación de los focos debido a su similitud:

$$\frac{X^2}{4f} \simeq \frac{X^2}{2R} \dots\dots\dots f \simeq \frac{R}{2} \qquad (3.14)$$

La región donde $x \ll R$ y la distancia focal de la parábola son similares, se le conoce como región o zona paraxial, por lo cual todos los rayos incidentes que estén en esta zona tendrán un foco y distancia focal similar a una parábola, pero siendo una esfera, esto se logra observar en la figura 33.

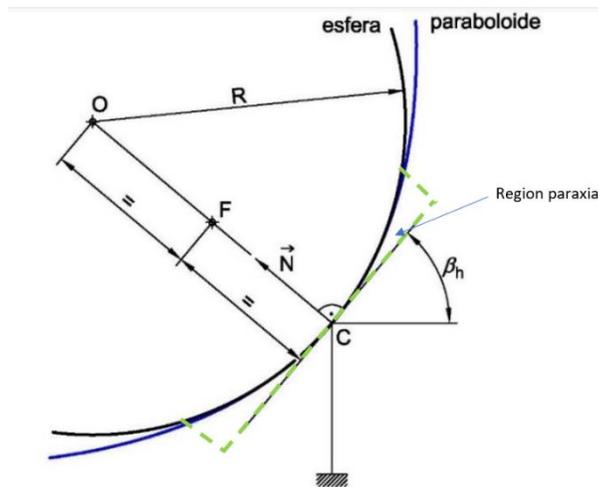


Figura 33. Esquema de la región paraxial de un espejo esférico

En el caso del heliostato F0, ya se tenía la distancia focal con respecto al blanco, solo se necesitaba el dato del radio de curvatura necesario para que el foco quedara en el blanco, para esto solo se despejó el radio con respecto al foco de la fórmula (3.14), esto teniendo en cuenta que se trabajará con la región paraxial:

$$f \simeq \frac{R}{2} \quad \blacktriangledown, \quad R \simeq 2f \simeq 2(72m) \quad (3.15)$$

f = Distancia focal

R = Radio de curvatura de la superficie

El radio de curvatura que tendrá los espejos esféricos en la zona paraxial es de aproximadamente de 144m de radio.

3.3.3 Diseño del soporte del espejo.

Una vez obtenido la geometría que tendrá el espejo, se necesita diseñar el soporte donde se colocará, el diseño propuesto para darle la curvatura a los espejos de 3 mm consiste en una rejilla compuesta por 6 láminas calibre 14, de 1.2 m de largo y 10 cm de alto.

Estas se dividen en dos grupos; 3 láminas superiores y 3 láminas inferiores, las superiores son aquellas en las que el corte de profundidad es en la parte inferior de la lámina, mientras que las inferiores lo tienen en la parte superior (véase Figura 34 y 35).

Los dos grupos de láminas tienen su corte radial de 144m en la parte superior, la profundidad de corte es de 5 cm y su ancho de corte es de 2mm, esto es debido al ancho del calibre de la lámina.

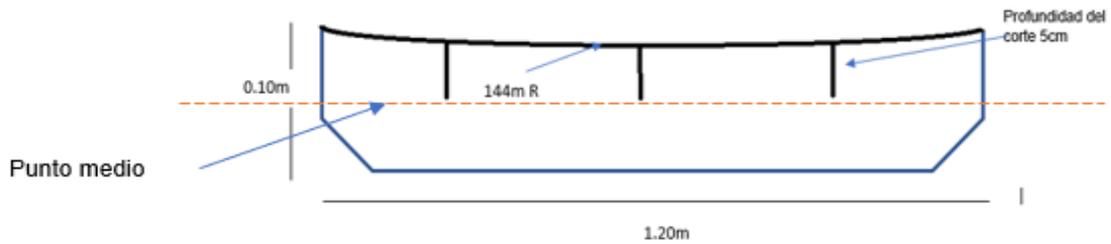


Figura 34. Esquema de lámina inferior

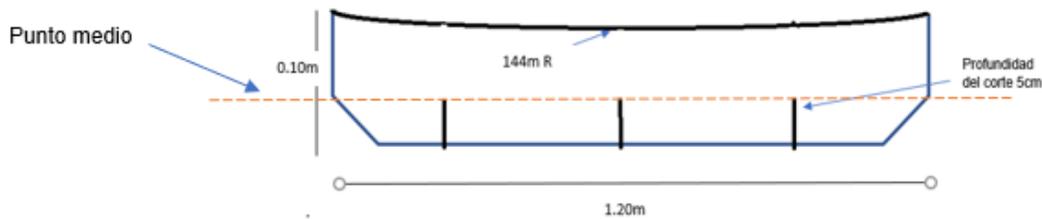


Figura 35. Esquema de lámina superior

3.3.4 Metodología de maquinado de la rejilla.

Con base en el diseño presentado, se fabricó el soporte para el espejo. El material que se utilizó para la rejilla fue lámina galvanizada calibre 14, el corte de las láminas se hizo con corte plasma de una máquina que opera por Control Numérico Computarizado (CNC), la tolerancia de este tipo de corte es de 0.75 mm, lo cual lo hace una tolerancia demasiado grande teniendo en cuenta que la parte media del filo de la rejilla tiene un desbaste aproximadamente de 1.25mm, en el caso que fuera plasma de alto flujo (con el cual no se contaba) el rango de tolerancia hubiera sido de 0.25mm.

Una vez que las láminas se cortaron, estas fueron ensambladas para dar una presentación previa y ver si se tenía algún error en el maquinado, los puntos a revisión fueron la profundidad de corte, los nodos de unión y la curvatura en la parte superior de

la rejilla, en la figura 36 se puede observar la rejilla presentada sin la soldadura y los puntos críticos a inspeccionar.

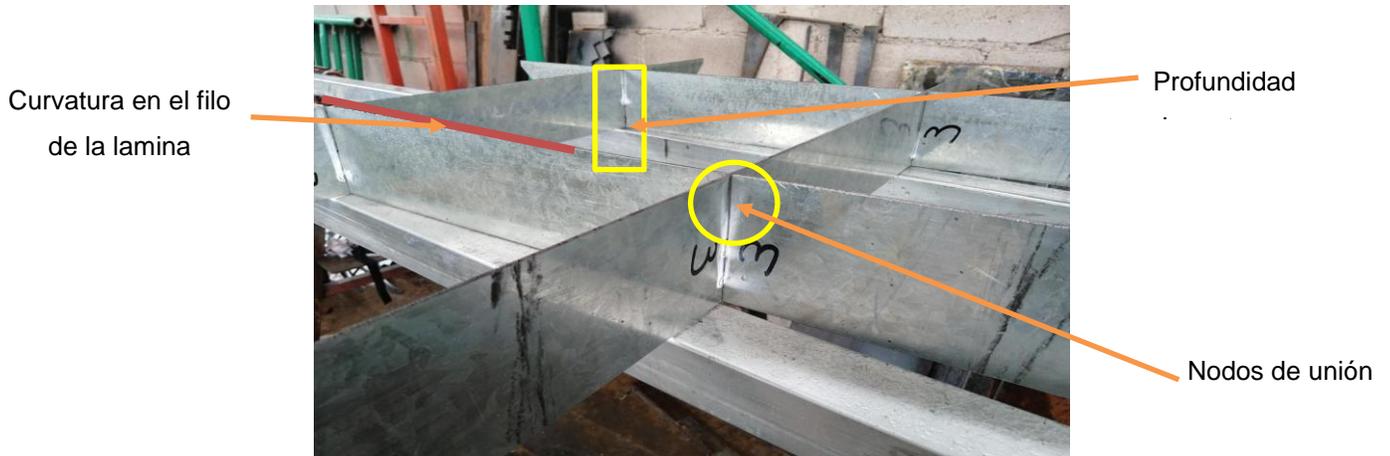


Figura 36. Puntos críticos para evaluar de la rejilla

En un acercamiento más detallado del nodo de unión, en la figura 37 se aprecia que la rejilla superior e inferior se encuentran al mismo nivel, esto con el fin de que el espejo no presente error de ondulación y halla un desvío en su normal, se pasó por un proceso de calidad para que todas la laminas tengan su radio de curvatura, en caso dado que no se cumpliera con el radio requerido, estas se mandarían a corregir.

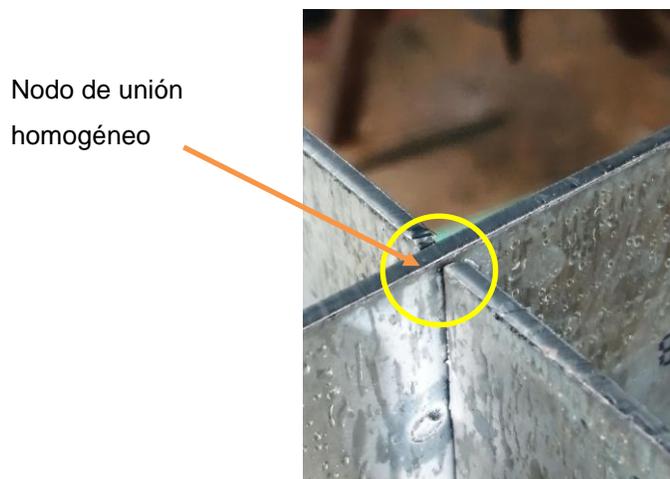


Figura 37. Nodo de unión de la lámina inferior con la superior

Una vez revisados los puntos anteriores, se sueldan las líneas laterales de los nodos de unión (véase Figura 38), se procuró que fueran solo unos puntos de soldadura, debido a lo delgado de la lámina, en la figura 39 se muestra una de las rejillas ya terminada y evaluada en términos de calidad.

Puntos de soldadura



Figura 38. Rejilla soldada en las laterales



Figura 39. Rejilla ensamblada terminada

Para darle una mayor rigidez a la rejilla, se diseñó un perfil tubular en forma de cruzeta de 1"x 2"x 40.06" calibre 1/16" (véase Figura 40), esto con el fin de darle el refuerzo a los nodos de unión de las diagonales de las rejillas y el centroide, otra función primordial es ser la pieza que una la rejilla con el marco que va a ir acoplado en el heliostato (véase Figura 41).

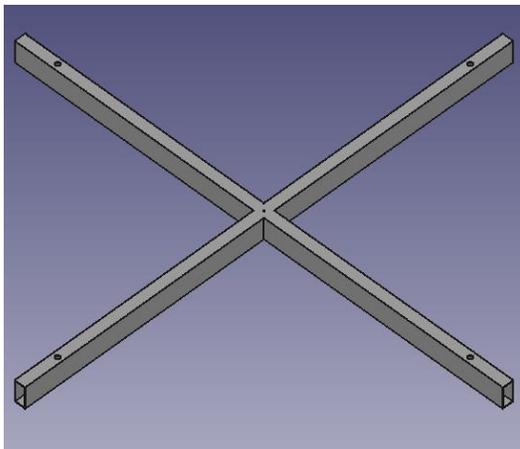
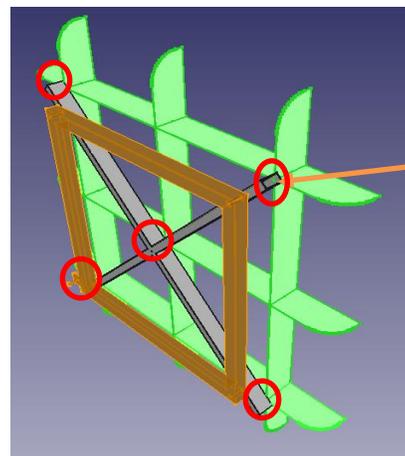


Figura 40. Diseño de cruzeta en Solid Works



Refuerzos en nodos de unión

Figura 41. Arreglo de cruzeta y rejilla

Una vez que se tiene la cruceta, esta es soldada con la rejilla en los nodos antes mencionados, para ensamblarlo con el marco reacondicionado (Anexo A), para el final unir la rejilla con el espejo de 3 mm de espesor, esto se hace mediante un pegamento en frío de poliuretano, se colocó una carga distribuida encima del espejo para que se obtuviera una adherencia uniforme del espejo. En la figura 42 se tiene el ensamble completo de la faceta en Solid Works, mientras en la figura 43 se tiene la faceta ya manufacturada y ensamblada completamente, pasando por los procesos de calidad ya mencionados.

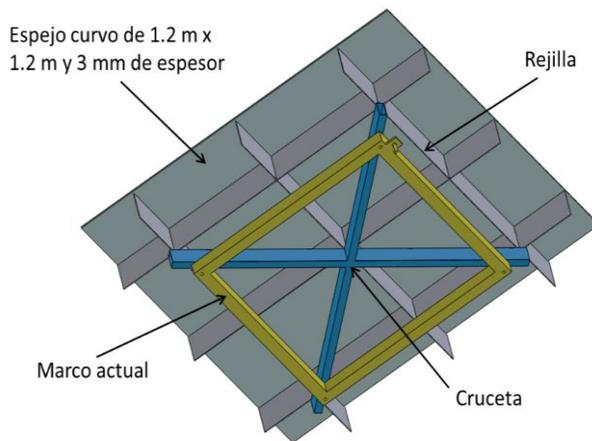


Figura 42. Ensamble de faceta en Solid Works



Figura 43. Faceta terminada

3.4 Estudio de la distribución de radiación solar concentrada

Para evaluar el incremento en la intensidad de la radiación solar concentrada que tendría un heliostato con facetas esféricas en comparación con facetas planas; se presentan resultados teóricos y experimentales de la comparativa de dos espejos, uno plano y otro esférico, ubicadas a una distancia focal de 72 metros del receptor.

3.4.1 Estudio teórico (Comparativa cualitativa).

El estudio teórico se hizo por medio del software tonatiuh que utiliza la técnica de trazado de rayos por el método Montecarlo. En la figura 44 se presenta un esquema de los elementos con los que se hizo la simulación en tonatiuh.

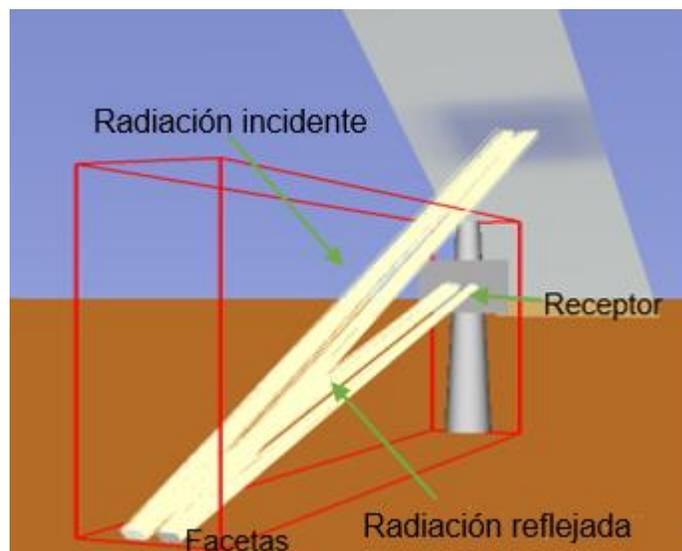


Figura 44. Esquema de los elementos simulados en tonatiuh.

Para las coordenadas de ubicación se tomó las coordenadas del heliostato F0 y como punto de origen el centro del blanco, ya que el centro del blanco se encuentra en las coordenadas (0,0,0), mientras que la coordenada del heliostato es (0,-22,-68).

A los dos espejos se le asignó una dimensión de $1.44m^2$, a uno de los espejos se le definió una superficie esférica con un radio de 144 m, mientras al otro una superficie plana.

Dentro de los parámetros de superficie, en el caso de los dos espejos se configuraron como si fueran superficies especulares ideales (que no presentan errores ópticos), así como una reflectividad de 1, una forma solar Pillbox, un DNI de $1000 W/m^2$.

El resultado de la simulación muestra que con el espejo de superficie esférica se logra incrementar aproximadamente casi al triple la radiación solar que se obtiene con un espejo plano.

En la figura 45 se presenta una imagen de la distribución solar que se recibe sobre el blanco proveniente de los dos espejos ubicados a 72 metros, un espejo con superficie esférica de 144 m de radio y el otro con superficie plana.

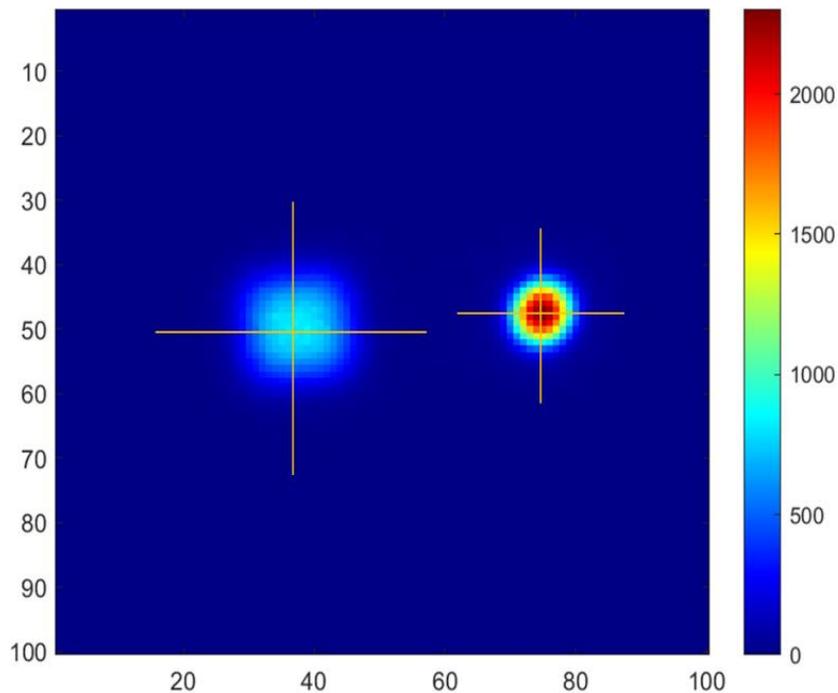


Figura 45. Imagen de los spots de radiación solar incidentes sobre el blanco de la torre, uno con superficie plana (izquierdo) y el otro con una superficie de curvatura de 144m (derecho)

3.4.2 Estudio teórico (Comparativa cuantitativa).

A diferencia de la comparativa cualitativa, donde los parámetros eran los mismos para los dos espejos, en el caso de la comparativa cuantitativa no, por lo cual en este caso se deben de simular por separado los espejos y sacar los parámetros faltantes.

Teniendo la distancia focal y el ángulo del cono solar, se saca el tamaño del spot que incidirá en el blanco de cada uno de los espejos, esto mediante trigonometría.

El cono solar tiene una geometría de triángulo isósceles donde $D = 2Co$ y $\alpha = 2\beta$. Para sacar el área del spot, se puede descomponer en 2 y sacar su diámetro a través de la geometría del triángulo rectángulo (véase Figura 46).

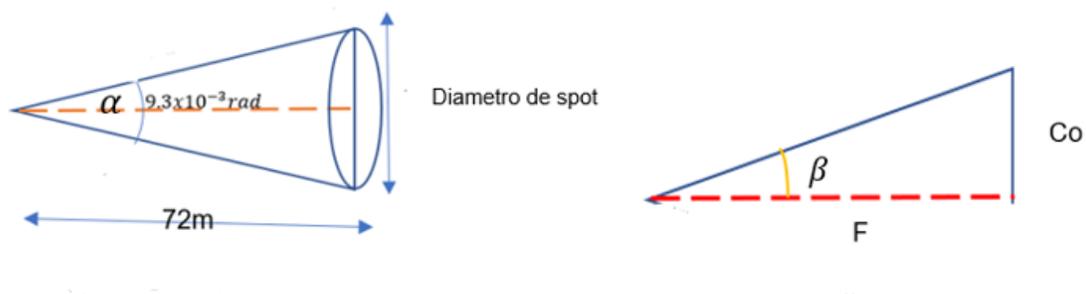


Figura 46. Esquema del cono solar para sacar el spot incidente en el blanco

$$\tan \alpha = \frac{Co}{F} \rightarrow Co = \tan \alpha F \quad (3.16)$$

$$Co = (4.65 \times 10^{-3} \text{ rad})(72 \text{ m}) = (0.00465 \text{ rad})(72 \text{ m}) = 0.3368$$

$$D = 2Co = 2(0.3368) = 0.6696 \quad (3.17)$$

Basándonos en el cálculo anterior, se espera que el diámetro del spot en el blanco con un espejo esférico ideal sea de 0.6696m, para el caso de los espejos planos el valor anterior se le suman los 1.22m, tomando en cuenta que en los bordes del espejo se refleje el cono solar hacia el blanco, esto hace que la mitad del cono quede dentro del spot del espejo y la otra mitad por fuera de ella, esto debido a la apertura del cono por la distancia, en la figura 47 muestra el tamaño del spot con un espejo plano ideal, cuál tiene un tamaño de 1.89m.

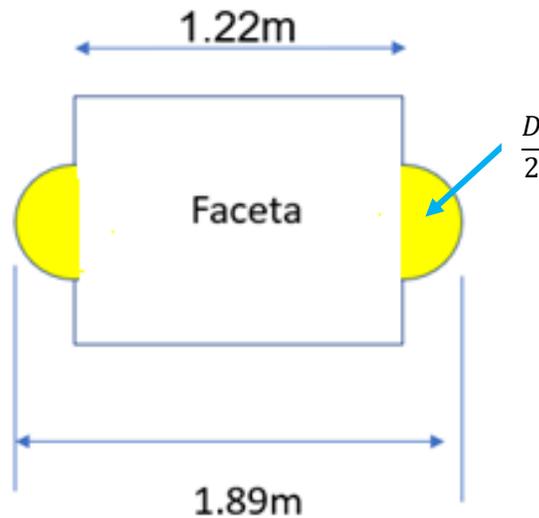


Figura 47. Esquema del tamaño del spot de un espejo ideal plano

Teniendo en cuenta las medidas de los spots, se propuso que cada blanco se le diera un margen del 10% más de apertura, esto para que no se presente un desbordamiento en la simulación, por lo cual el área del blanco para el espejo esférico es de $0.75m^2$ y $2.08 m^2$ el plano.

3.4.2.1 Independencia de rayos.

Este estudio se hace con el fin de tener la cantidad ideal de rayos que requiere cada simulación, mediante una serie de simulaciones aumentando el número de rayos en cada una de ellas, obteniendo la diferencia porcentual de la simulación actual con su inmediato anterior.

Los resultados de las diferencias se grafican para analizar su tendencia, teniendo como el número de rayos ideal cuando la diferencia actual con respecto al anterior inmediato sea menor a 1%, en las tablas 1 y 2 se tienen los parámetros requeridos para la independencia de rayos de cada uno de los espejos.

Parámetros de espejo esférico		Parámetros de espejo plano	
Área del blanco	0.73m ²	Área del blanco	4.41m ²
Mallado	51 x 51	Mallado	51 x 51
DNI	1000 W/m ²	DNI	1000 W/m ²
Perfil solar	Pillbox	Perfil solar	Pillbox
Reflectividad	1	Reflectividad	1
Área del espejo	1.44m ²	Área del espejo	1.44m ²
Superficie del espejo	Esférico (144m de radio)	Superficie del espejo	Plano
Criterio de independencia	Menor a 1% de diferencia	Criterio de independencia	Menor a 1% de diferencia
Cantidad de elementos	1	Cantidad de elementos	1
Distancia focal	72m	Distancia focal	72m

Tabla 1.

Tabla 2.

Parámetros de espejo esférico

Parámetros de espejo plano.

Dicho lo anterior, en el espejo plano se observa que la diferencia de la simulación de 9 millones con respecto a 8 millones es de 0.97% (véase Figura 48), mientras para el espejo esférico la diferencia de 18 millones con respecto 17 millones es de 0.99% (véase Figura 49), por lo cual podemos decir que el número ideal de rayos para el espejo plano es de 8 millones y el espejo esférico es de 17 millones.

Debido a que las simulaciones no necesitaban una demanda computacional alta, así como un tiempo prolongado en cada una de ellas, no se limitó hasta el número ideal de rayos, por lo cual se siguieron haciendo más simulaciones para ver la tendencia que tendría con más millones de rayos.

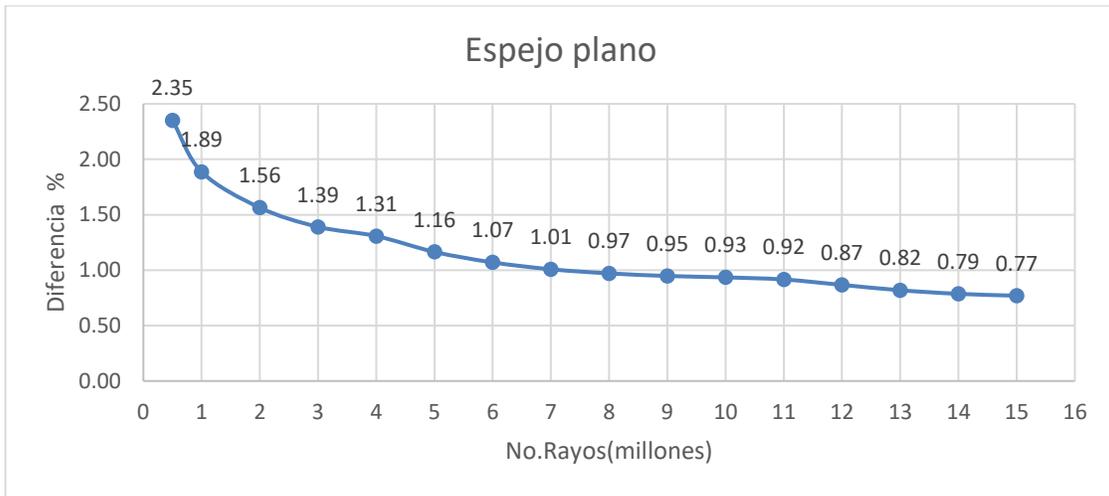


Figura 48. Independencia de rayos de un espejo plano.

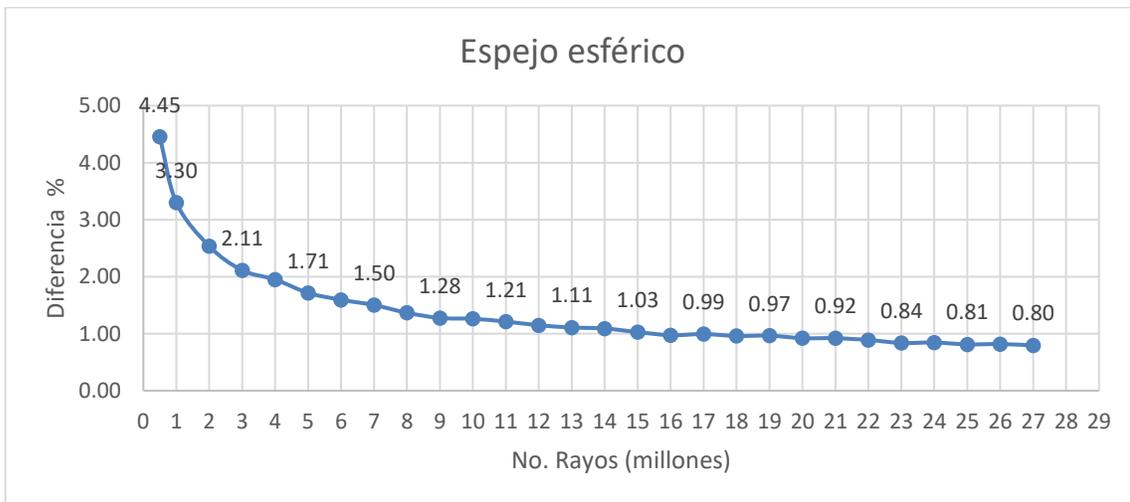


Figura 49. Independencia de rayos de un espejo esférico.

Para hacer la comparativa entre el spot de radiación solar formado por el espejo plano y el espejo esférico en forma cuantitativa, se extraen los perfiles de flux en el eje horizontal y vertical que cruzan por el centro de cada spot y se saca el tamaño del píxel, este se saca dividiendo el tamaño del blanco con el número del mallado, el tamaño de píxel del blanco para el espejo esférico es 0.014 y para el plano es de 0.040.

Teniendo en cuenta el tamaño de píxel, se puede sacar la relación del flux basándose en el diámetro de los spots, en la figura 50 se presentan los perfiles de distribución de la radiación solar incidente en el blanco, se puede apreciar de forma ya cuantitativa, el flux tanto del eje X y Y del espejo esférico tienen un flux de 4:1 en comparación del espejo plano, así como 62 % menos diámetro.

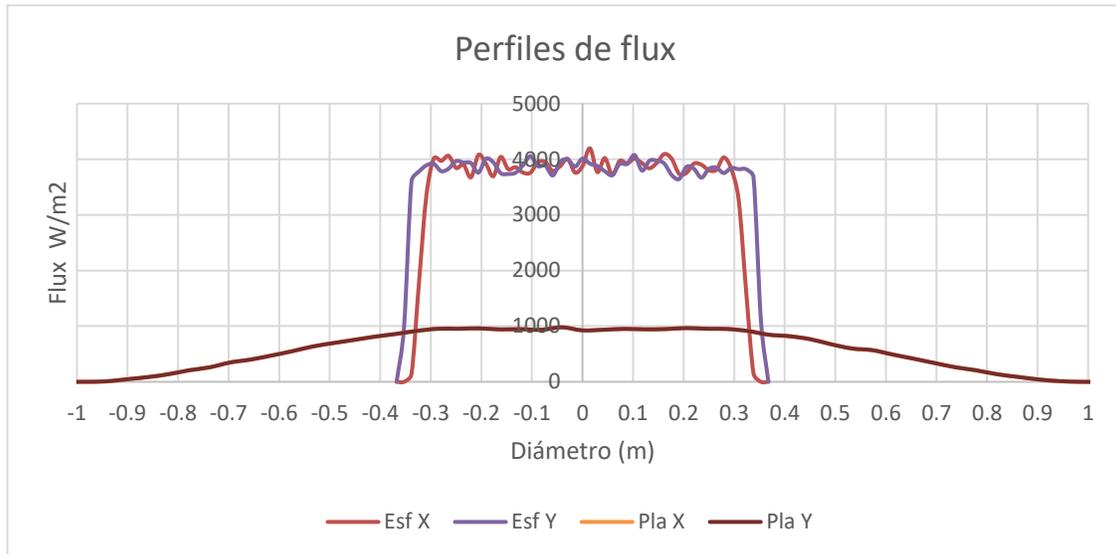


Figura 50. Comparativa de los perfiles teóricos de flux en los ejes X y Y ubicados en el centro de cada spot, del espejo plano y del espejo esférico.

3.4.3 Estudio experimental.

Para conocer la distribución de la radiación solar reflejada por el espejo plano y el espejo esférico, se desarrolló una metodología, la cual está basada en la toma de imágenes de la radiación que incidirán en el blanco ubicado en la zona focal.

- **Cámara CCD**

La obtención de las imágenes se hace mediante una cámara digital CCD por sus siglas en inglés (Charge Couple Device)

Para que la imagen de la distribución de la radiación solar concentrada que es tomada por la cámara CCD debe de ser tomada en una superficie plana y completamente difusa.

En la figura 51 se muestra la cámara utilizada para la toma de imágenes, esta es una CCD monocromática Pike de 8 bits (de 0 a 255 en escala de grises), teniendo como el 0 como negro y 255 como blanco.

La capacidad de resolución en la imagen es determinada por el número de celdas fotoeléctricas del CCD, el cual es expresado en pixeles. Mayor número de pixeles, mayor nitidez en relación con el tamaño.

La cámara CCD a diferencia de la CMOS tiene una respuesta uniforme (lineal), ya que se espera que todos los pixeles estén expuestos al mismo nivel de captación y que estos no presenten cambios apreciables en la señal obtenida, dando la respuesta lineal requerida que va desde el nivel más bajo de la escala de grises hasta su máximo en forma progresiva.



Figura 51. Cámara CCD Pike de 8 bits (de 0 a 255 en escala de grises).

- **Superficie Lambertiana (Blanco)**

Una superficie lambertiana está diseñada con la finalidad de tener una apreciación definida de la imagen que proyecta el reflejo del sistema óptico que se esté evaluando, esto se debe a que los rayos que inciden en el son reflejados de manera uniforme hacia todas las direcciones, cuál lo hace una superficie difusa.

Para el caso del estudio experimental, se cuenta con una superficie lambertiana de 8x7m donde incidirá la radiación concentrada del espejo esférico y plano.

Teniendo en cuenta la aplicación de la cámara en el estudio experimental, se hizo la siguiente metodología:

3.4.3.1 Preparación del set experimental.

En la figura 52 muestra cómo se ubicaron los espejos a una distancia de 72 m del blanco de la torre, alineándolos en dirección norte, se orientaron los espejos de tal forma que reflejaran la radiación solar sobre el blanco, pero sin superponerse los reflejos. El día de la alineación fue el 13 de enero del 2021 a las 12:52pm, teniendo en ese momento un DNI de $929 \frac{W}{m^2}$.



Figura 52. Set experimental para la toma de imágenes.

3.4.3.2 Toma de imagen

Por medio de una cámara CCD se tomaron imágenes de los spots cuando los espejos reflejaron la radiación solar sobre el blanco (véase Figura 53), se utilizó una cámara de 8 bits (de 0 a 255 en escala de grises), por lo cual se debe de ajustar la imagen a ese rango de píxel al momento de la toma de imagen, ya que pierde información cuando sobrepasa los 255 píxeles.



Figura 53. Imagen en términos de grises de los Spot esférico (izquierda) y plano (derecha)

3.4.3.3 Corrección de perspectiva

Debido a que la cámara no se encuentra posicionada en la normal del blanco, se requiere de una corrección de perspectiva para hacer ser procesada.

A través del software Matlab exportamos las imágenes que serán corregidas, están tienen un tamaño de 1800 x 1920 pixeles, en el caso de la corrección de perspectiva, se hace a través de 3 pasos principales:

1. Selección de la sección a corregir.

El programa te permite corregir una parte o la totalidad de la imagen, esto dándole 4 puntos de coordenada de la imagen, para hacer un producto punto y corregir la perspectiva de lo que se encuentra adentro de lo seleccionado.

2. Escalamiento.

Una vez que se tiene la corrección de perspectiva del segmento que se encuentra dentro de los 4 puntos, se le da un nuevo de tamaño de píxel, en el caso de las imágenes se les dio un tamaño de píxel de 800 x 700, ya que solo se corrigió la perspectiva del blanco, el cual cuenta con un perímetro de 8m x 7m, dando así un tamaño de píxel de 1 cm.

3. Recorte.

Se hace el recorte según a lo contenido dentro de los 4 puntos, descartando lo demás de la imagen, con esto se da por terminado la corrección de la imagen para ser procesada posteriormente.

3.4.3.4 Procesamiento de imagen.

Una vez que ya se tiene la imagen corregida de los spots en el blanco, se tienen que procesar para pasar la imagen de términos de píxeles a términos de flux, en la figura 54 se muestra un diagrama de flujo para hacer el procesamiento.

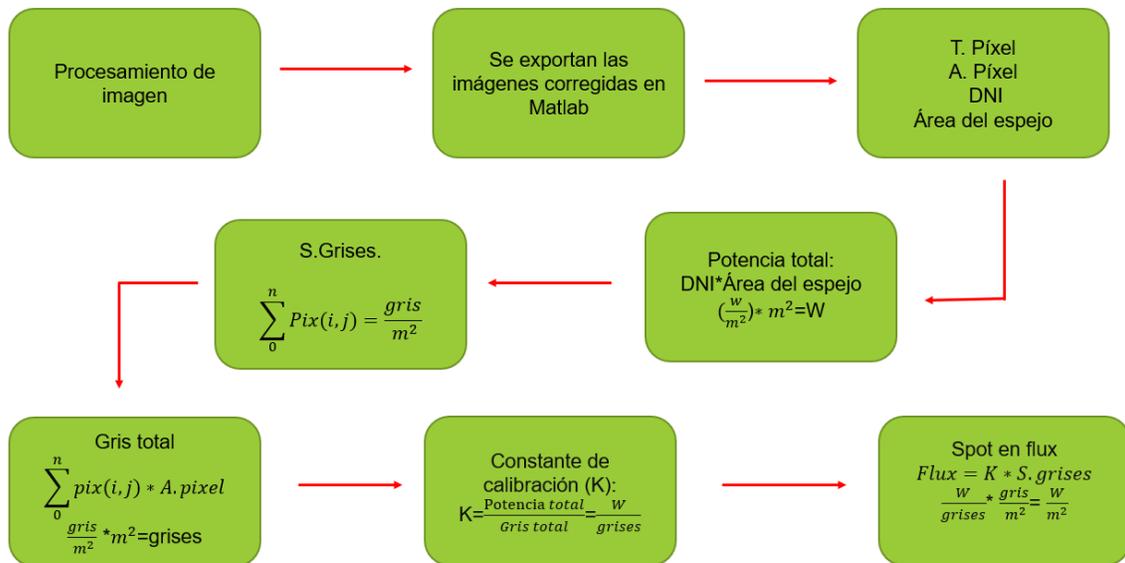


Figura 54. Diagrama de flujo del procesamiento de la imagen.

En caso de que se requiera la imagen en términos de soles, el spot en flux se divide entre 1000, 1 sol equivale a $1000 \frac{W}{m^2}$.

En la figura 55 se muestra la imagen de los spots tomada con la cámara CCD ya con la corrección de perspectiva y su procesamiento para tener la imagen en términos de flux.

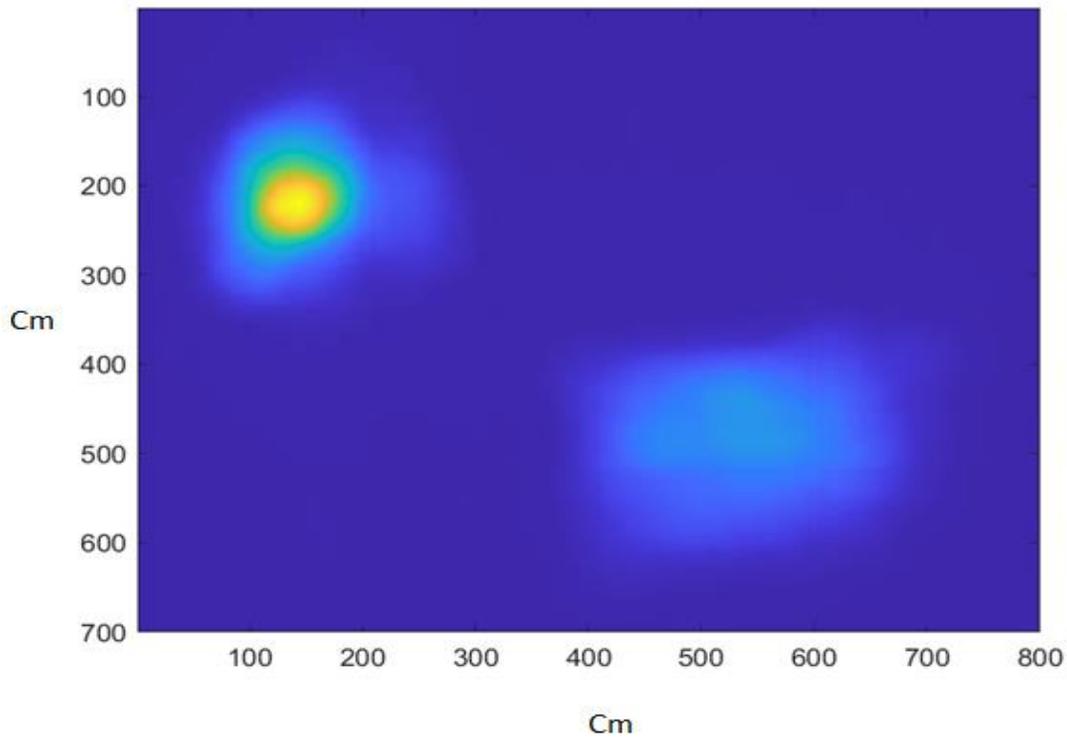


Figura 55. Imagen de los spots en términos de flux que inciden sobre el blanco, de lado izquierdo superior el reflejado por el espejo esférico y en el lado derecho inferior el reflejado por el espejo plano.

3.4.3.5. Obtención de los perfiles de radiación concentrada

Se obtuvieron los perfiles horizontales y verticales de intensidad luminosa al centro de cada spot.

Se puede observar en la figura 56 como el spot del espejo esférico experimental sigue teniendo un mayor nivel de radiación y un menor diámetro en comparación del espejo plano, por lo cual se corrobora que la geometría del espejo esférico tiene una mayor concentración

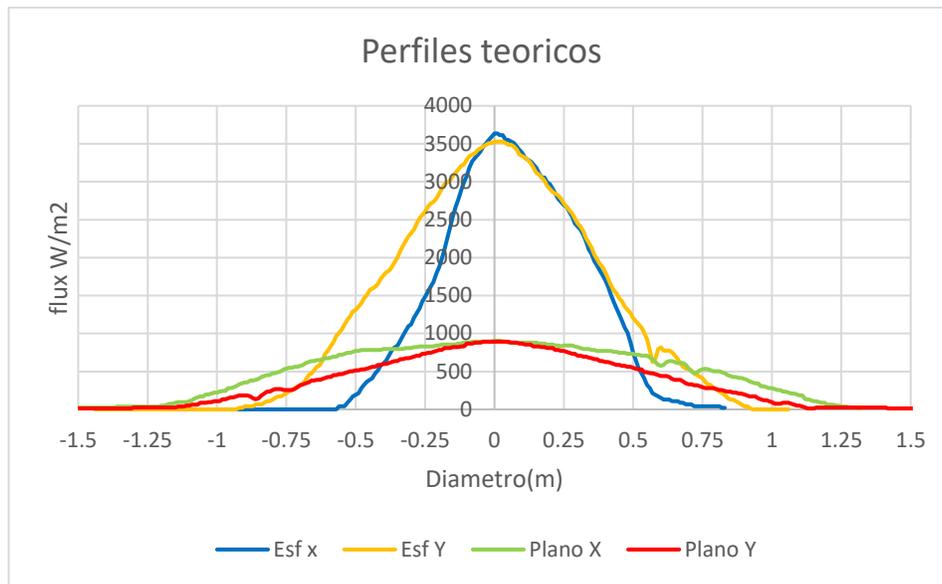


Figura 56. Perfiles experimentales de los espejos esférico y plano.

Una vez hecho el anterior estudio, se mandaron a construir las 24 facetas restantes para ser colocadas en el heliostato. Se hizo el canteo del sistema óptico del heliostato F0, la metodología de canteo se encuentra en el Anexo B.

3.5 Generación de patrones de alineación en forma teórica.

Se desarrolló una metodología para la generación de los patrones para el canteo del heliostato en forma teórica con el software tonatiuh, con la finalidad de obtener una estimación del flujo radiativo entregado al blanco.

Los espejos fueron modificados en una forma esférica con un área de 1.44m^2 y un radio de curvatura de 144m, dando una aproximación a una parábola con una distancia focal efectiva a la mitad del radio de curvatura de la superficie del espejo, esto mediante la zona paraxial que tienen similitud la geometría de un espejo esférico y uno parabólico, esto con la finalidad de no tener los errores por aberración que se pudiera presentar en el espejo esférico.

Cabe señalar que esta metodología es para dar una aproximación de la alineación ideal que se debe de tener del spot en la zona focal, ya que se considera que los 25 espejos se encuentran ubicados en la misma distancia sobre el heliostato, debido a que poseen pequeñas variaciones de cm en las distancias focales por grupos de 5 filas A,B,C,D y E(véase Figura 57), por lo cual se toma que todos los espejos se encuentran exactamente a la misma distancia.

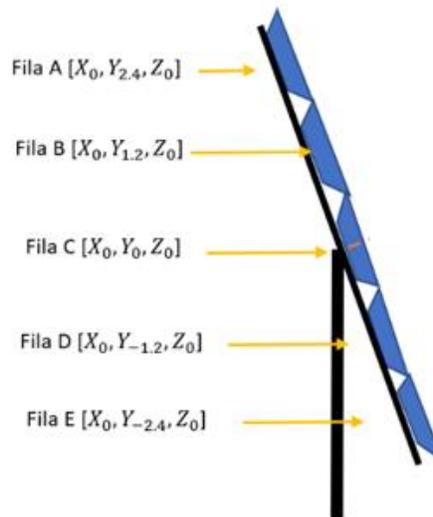


Figura 57. Esquema de la alineación de las facetas del heliostato en tonatiuh

Para configurar la distribución de los espejos, el punto de referencia para darle coordenadas a cada espejo parte del centroide del heliostato, este es el espejo C3, con coordenadas X_0, Y_0, Z_0 (véase Figura 58).

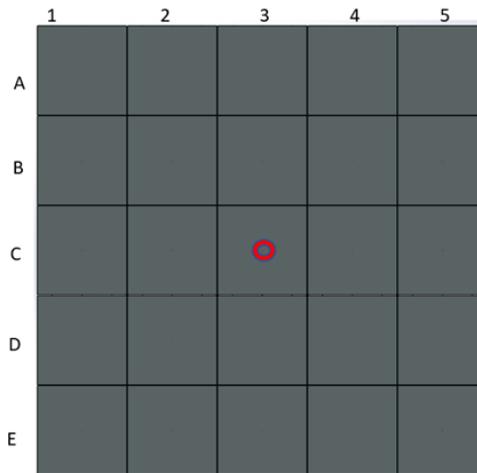


Figura 58. Distribución de los espejos del heliostato F0

Partiendo de lo anterior, se obtienen las coordenadas de todos los espejos, como se muestra en la tabla 3.

Espejo	TRASLACION		
	lb_x	lb_z	lb_y
A-1	2.4	0	-2.4
A-2	1.2	0	-2.4
A-3	0	0	-2.4
A-4	-1.2	0	-2.4
A-5	-2.4	0	-2.4
B-1	2.4	0	-1.2
B-2	1.2	0	-1.2
B-3	0	0	-1.2
B-4	-1.2	0	-1.2
B-5	-2.4	0	-1.2
C-1	2.4	0	0
C-2	1.2	0	0
C-3	0	0	0
C-4	-1.2	0	0
C-5	-2.4	0	0
D-1	2.4	0	1.2
D-2	1.2	0	1.2
D-3	0	0	1.2
D-4	-1.2	0	1.2
D-5	-2.4	0	1.2
E-1	2.4	0	2.4
E-2	1.2	0	2.4
E-3	0	0	2.4
E-4	-1.2	0	2.4
E-5	-2.4	0	2.4

Tabla3.

Coordenadas de los espejos del heliostato F0

Como se conoce la distancia del helióstato con respecto al blanco, así como las coordenadas del centroide con respecto al centroide de cada espejo, se saca el ángulo de canteo a través de la tangente.

Teniendo en cuenta que la distancia focal es el cateto adyacente, el cual es de 72m (véase Figura 59) y que el cateto opuesto es la distancia del centroide del heliostato con respecto al centroide del espejo a cantear (véase Figura 60).

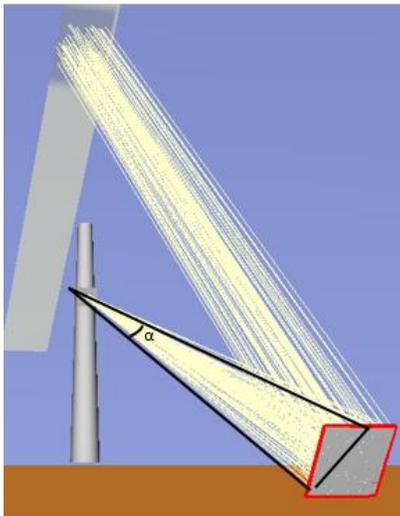


Figura 59. Diagrama para el ángulo de canteo

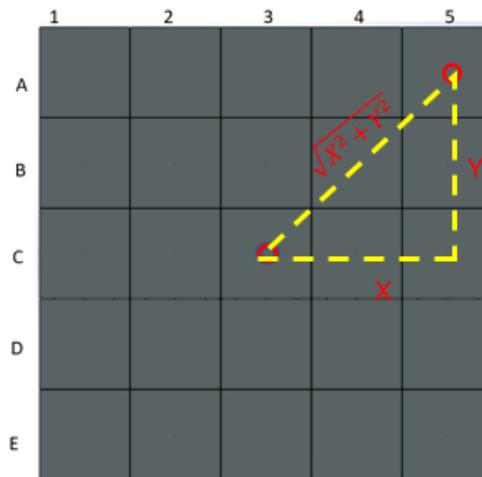


Figura 60. Obtención del cateto opuesto

Se implementa la siguiente fórmula para sacar su tangente y despejar para su ángulo de inclinación:

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{72} & \alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{(X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}}{72} \right) & \text{Angulo de canteo} &= \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Una vez obtenidos los resultados del despeje de la formula (3.18), se tienen los ángulos de canteo de cada una de las facetas, como lo muestra la tabla 4.

FACETA	COORDENADAS			$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{(X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}}{Z} \right)$	$\text{Angulo de canteo} = \frac{\alpha}{2}$
A1	-2.4	2.4	0	0.0471	0.0236
A2	-2.4	1.2	0	0.0373	0.0186
A3	-2.4	0	0	0.0333	0.0167
A4	-2.4	-1.2	0	0.0373	0.0186
A5	-2.4	-2.4	0	0.0471	0.0236
B1	-1.2	2.4	0	0.0373	0.0186
B2	-1.2	1.2	0	0.0236	0.0118
B3	-1.2	0	0	0.0167	0.0083
B4	-1.2	-1.2	0	0.0236	0.0118
B5	-1.2	-2.4	0	0.0373	0.0186
C1	0	2.4	0	0.0333	0.0167
C2	0	1.2	0	0.0167	0.0083
C3	0	0	0	0.0000	0.0000
C4	0	-1.2	0	0.0167	0.0083
C5	0	-2.4	0	0.0333	0.0167
D1	1.2	2.4	0	0.0373	0.0186
D2	1.2	1.2	0	0.0236	0.0118
D3	1.2	0	0	0.0167	0.0083
D4	1.2	-1.2	0	0.0236	0.0118
D5	1.2	-2.4	0	0.0373	0.0186
E1	2.4	2.4	0	0.0471	0.0236
E2	2.4	1.2	0	0.0373	0.0186
E3	2.4	0	0	0.0333	0.0167
E4	2.4	-1.2	0	0.0373	0.0186
E5	2.4	-2.4	0	0.0471	0.0236

Tabla 4.

Coordenadas y ángulo de canteo por faceta

Para las coordenadas de rotación, se configura con las coordenadas de traslación, la diferencia es que el programa las transforma en ángulos de inclinación que tendrá en cada eje del espejo, ya sea de forma negativa o positiva, esto depende de donde se encuentre el blanco con respecto al heliostato.

Por lo cual sé teniendo toda la información requerida para modelar el sistema óptico ya con los ajustes de canteo para cada una de sus facetas, en la tabla 5 se presenta una tabla general de las coordenadas de traslación, rotación y su grado de inclinación.

Espejo	TRASLACIÓN			ROTACIÓN			
	lb_x	lb_z	lb_y	lb_x	lb_z	lb_y	θ
A-1	2.4	0	-2.4	-0.7071	0	0.7071	0.0235
A-2	1.2	0	-2.4	-0.8944	0	0.4472	0.0186
A-3	0	0	-2.4	-1.0000	0	0.0000	0.0166
A-4	-1.2	0	-2.4	-0.8944	0	-0.4472	0.0186
A-5	-2.4	0	-2.4	-0.7071	0	0.7071	0.0235
B-1	2.4	0	-1.2	-0.4472	0	0.8944	0.0186
B-2	1.2	0	-1.2	-0.7071	0	0.7071	0.0117
B-3	0	0	-1.2	-1.0000	0	0.0000	0.0083
B-4	-1.2	0	-1.2	-0.7071	0	-0.7071	0.0117
B-5	-2.4	0	-1.2	-0.4472	0	-0.8944	0.0186
C-1	2.4	0	0	0.0000	0	1.0000	0.0166
C-2	1.2	0	0	0.0000	0	1.0000	0.0083
C-3	0	0	0	0.0000	0	1.0000	0.0000
C-4	-1.2	0	0	0.0000	0	-1.0000	0.0083
C-5	-2.4	0	0	0.0000	0	-1.0000	0.0167
D-1	2.4	0	1.2	0.4472	0	0.8944	0.0186
D-2	1.2	0	1.2	0.7071	0	0.7071	0.0117
D-3	0	0	1.2	1.0000	0	0.0000	0.0083
D-4	-1.2	0	1.2	0.7071	0	-0.7071	0.0117
D-5	-2.4	0	1.2	0.4472	0	-0.8944	0.0186
E-1	2.4	0	2.4	0.7071	0	0.7071	0.0235
E-2	1.2	0	2.4	0.8944	0	0.4472	0.0186
E-3	0	0	2.4	1.0000	0	0.0000	0.0166
E-4	-1.2	0	2.4	0.8944	0	-0.4472	0.0186
E-5	-2.4	0	2.4	0.7071	0	-0.7071	0.0235

Tabla 5.

Parámetros de configuración de la posición de los espejos del heliostato F0

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se dispuso a incorporar dentro del nodo principal un nodo llamado “Heliostato F0”, el cual contiene 5 subnodos llamados “filas” y dentro de estos se encuentran las variables “espejos”, donde se configura la óptica, como lo viene siendo reflectividad, índice de refracción y transmitancia de cada elemento.

El resultado de la configuración de los patrones de alineación de cada uno de los nodos de las variables “espejos”, así como el nodo de receptor llamado “lambertiano” en tonatiuh da como resultado la figura 61.

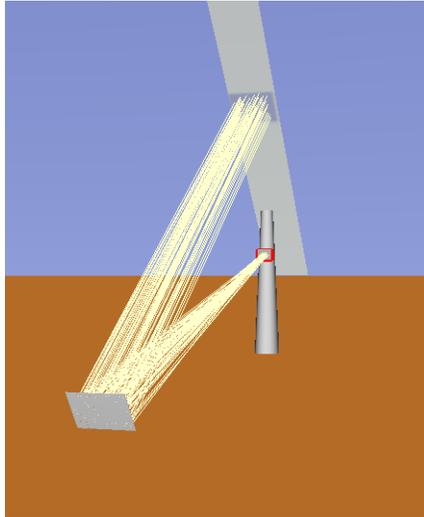


Figura 61. Simulación en Tonatiuh del heliostato F0 canteado

3.6 Evaluación del error óptico global del heliostato F0

Una vez obtenida la simulación del sistema óptico en tonatiuh, se dispuso a realizar la independencia de rayos del heliostato F0, para después hacer la evaluación del error óptico. Debido a que en la evaluación del error óptico se hace una serie de simulaciones de 0 a 5 mrad aumentando gradualmente el error en cada una de ellas, esto provoca el ensanchamiento del spot, por lo cual se necesitaría calcular el tamaño del spot para tener el tamaño del blanco de cada simulación, este es requerido para la independencia de rayos, por lo que en este caso se hace la independencia de rayos con el caso máximo de error (5mrad) esto con el fin de tener una independencia general, así se podría abarcar todos los errores anteriores.

En la tabla 6 se encuentran los parámetros requeridos para la independencia de rayos del heliostato F0.

Parámetros	
Área del blanco	4m ²
Mallado	51x51
DNI	1000 W/m ²
Perfil solar	Pillbox
Reflectividad	1
Error óptico	0
Área del espejo	1.44m
Superficie del espejo	Esférico (144m de radio)
Criterio de independencia	Menor a 1% de diferencia
Cantidad de elementos	25

Tabla 6.

Parámetros para independencia de rayos del heliostato F0

Teniendo en cuenta lo anterior, se identificó que, a partir de los 7 millones de rayos, la diferencia de la simulación de 8 millones de rayos con respecto 7 millones tiene una diferencia de 0.97%, esto es mostrado en la gráfica de la figura 62.

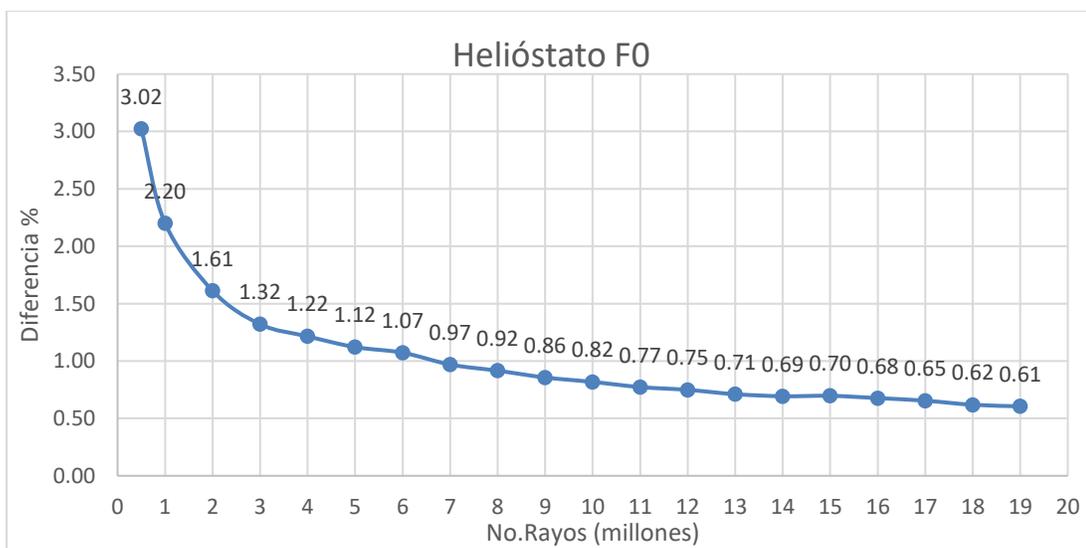


Figura 62. Estudio de independencia de rayos para el heliostato F0

En las figuras 63 y 64 se muestran los perfiles de distribución en el eje X y Y normalizados de las simulaciones del helióstato F0 con el incremento de los errores ópticos que van de 0 a 5 mili radianes definidos sobre el blanco.

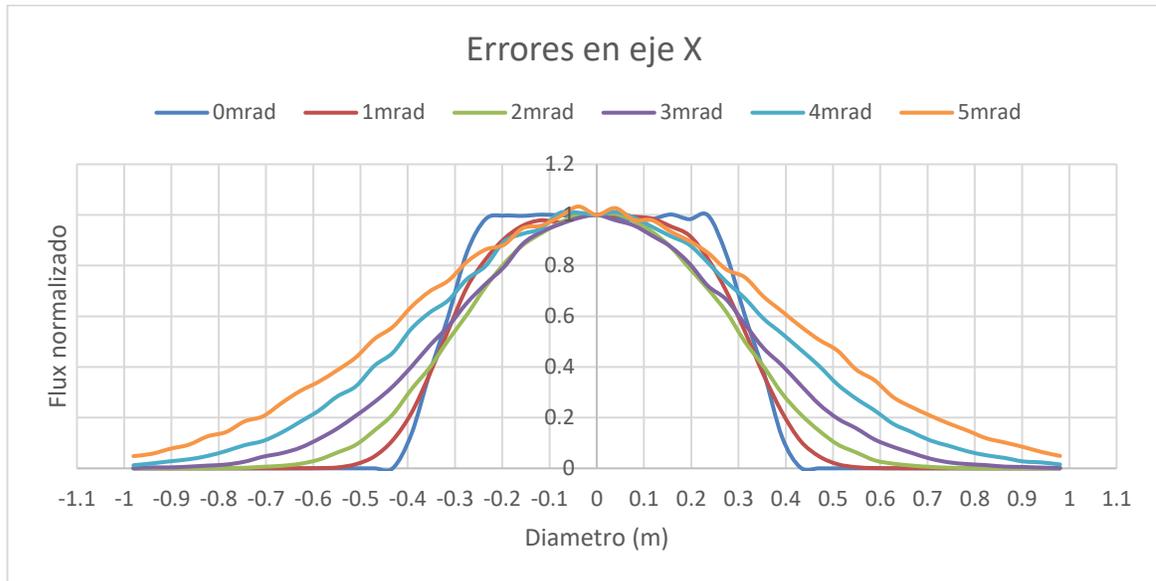


Figura 63. Perfiles X de distribución con errores de 0-5mrad del helióstato F0 simulados en tonatiuh.

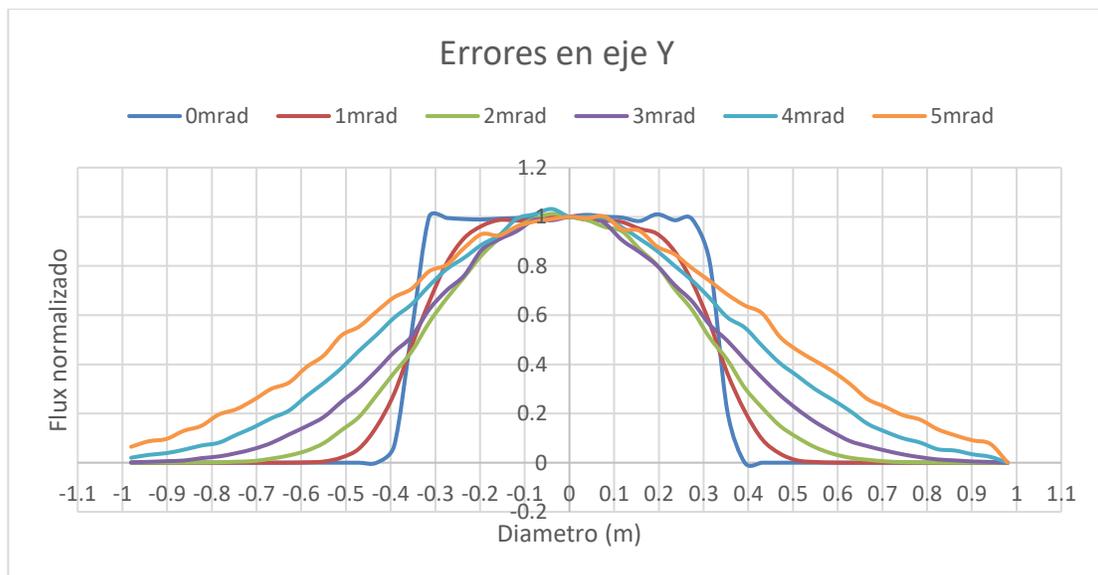


Figura 64. Perfiles Y de distribución con errores de 0-5mrad del helióstato F0 simulados en tonatiuh.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se hace mención en el anexo B, se hicieron en total 3 canteos, en los cuales se les hizo toma de imagen a cada uno de ellos.

De la figura 65-67, se presentan los spots resultantes de cada canteo, estos se encuentran en términos de contornos para hacer la comparativa del área resultante de cada uno de ellos.

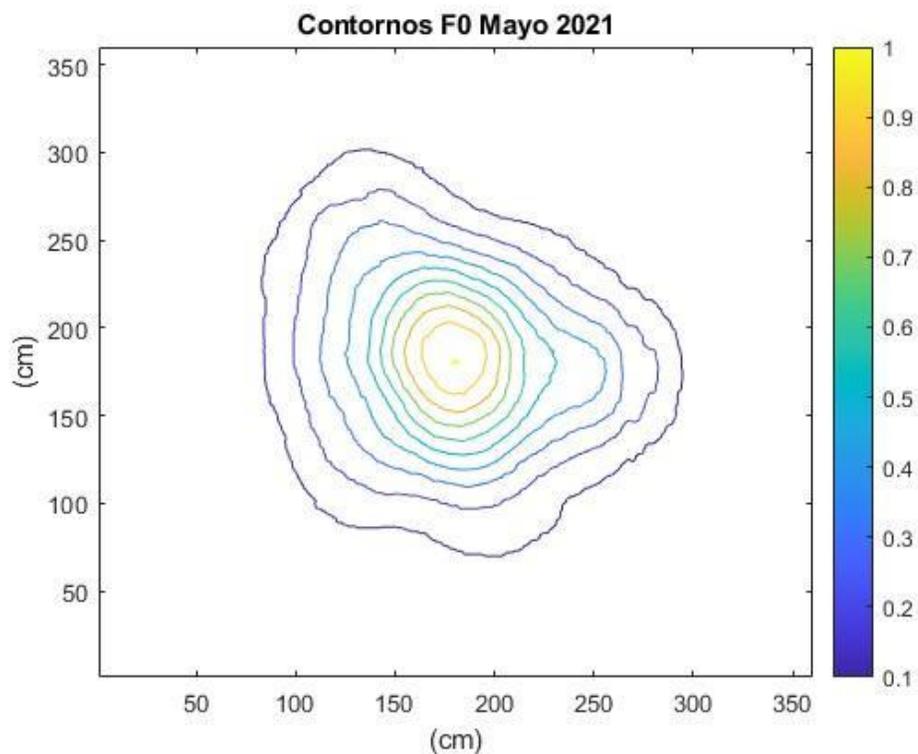


Figura 65. Spot en términos de contorno del primer canteo del heliostato F0

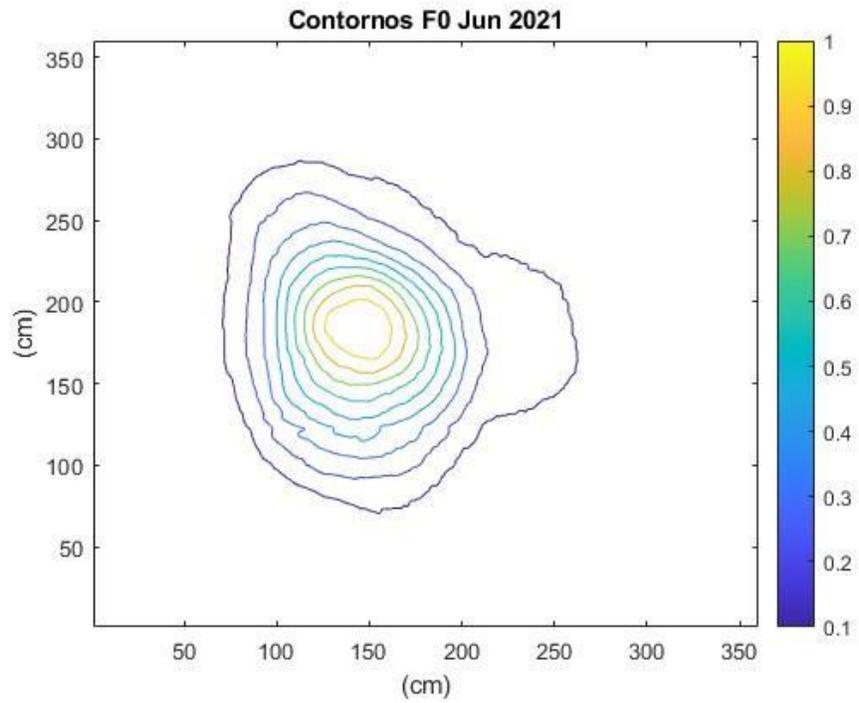


Figura 66. Spot en términos de contorno del segundo canteo del helióstato F0

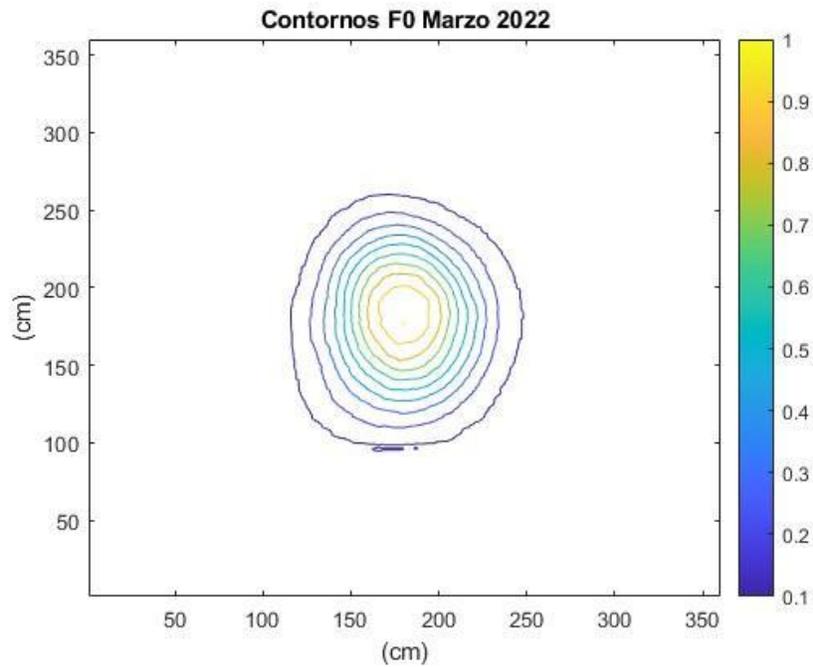


Figura 67. Spot en términos de contorno del tercer canteo del helióstato F0

En la tabla 7 se presenta una tabla resumen de los conteos que se hicieron a lo largo de la investigación.

Fecha	Hora	DNI	Área de spot	C. Pico	C. Promedio
25-may-21	12:43 p. m.	$921 \frac{W}{m^2}$	$9.33m^2$	20 soles	3.85 soles
15-jun-21	12:35 p. m.	$935 \frac{W}{m^2}$	$6.79 m^2$	33 soles	5.30 soles
16-abril-22	12:33 p. m.	$952 \frac{W}{m^2}$	$3.31m^2$	48 soles	10.87 soles

Tabla 7

Resultados de los spots procesados

Como se observa en la figura 65, la imagen del spot tomado del 16 de abril tiene un área más reducida y una mayor concentración que los spots de las imágenes 66 y 67, por lo cual se toma de referencia para sacar los perfiles de distribución de radiación normalizada y posteriormente sacar el error global.

En la figura 68 se obtienen los perfiles normalizados X y Y experimentales.

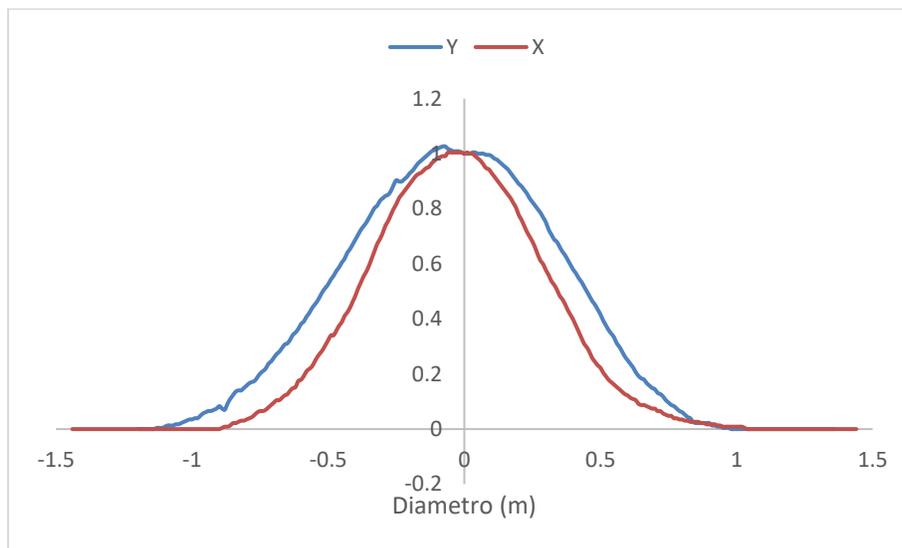


Figura 68. Perfiles experimentales de distribución de la radiación solar en el eje X y Y

4.1 Diferencias absolutas para determinar el error global.

Para la determinación del error global del sistema óptico, se requiere hacer un análisis a los perfiles de distribución con los errores ópticos simulados, por lo cual se utilizó la *metodología del análisis de las máximas diferencias absolutas*.

(Pérez, 2015) menciona que el desarrollo de esta metodología consiste en la obtención de las máximas diferencias absolutas en la intensidad de la radiación solar que hay en los perfiles con los errores simulados contra el que no tiene error (0 mrad), esto mediante el análisis de punto a punto de cada una de ellas, para la obtención de dichos puntos y calcular su diferencia se utiliza la siguiente fórmula:

$$Da_{(n-0)}(r) = |In_r - I0_r|$$

Donde:

n: El error en miliradianes (1-5mrad)

$Da_{(n-0)}$: Diferencia absoluta en la posición r

In_r : Intensidad normalizada del flujo de radiación que correspondiente a la posición r con un error asignado

$I0_r$: Intensidad normalizada del flujo de radiación correspondiente a la posición r con un error de 0

En la figura 81 y 82 se presentan las comparativas de los perfiles de cada uno de los puntos (r) de su distribución resultante de las diferencias absolutas, se observa en la gráfica que entre más se aumenta el error y se compara con el de 0 mrad, este tiende a tener una distribución más amplia, los intervalos que se encuentran las líneas en color negro son donde se presentan las máximas diferencias.

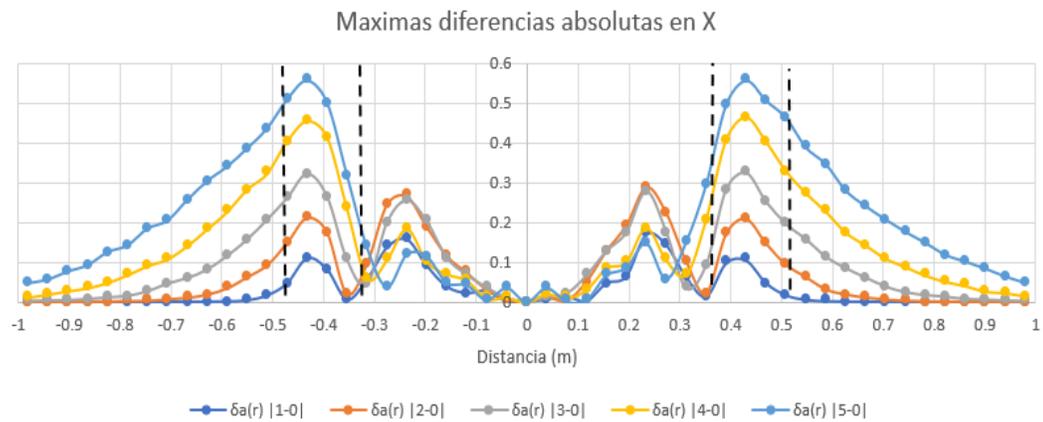


Figura 69. Diferencia de punto por punto entre los perfiles de distribución en el eje X con error de 1-5mrad comparados con el error de 0mrad

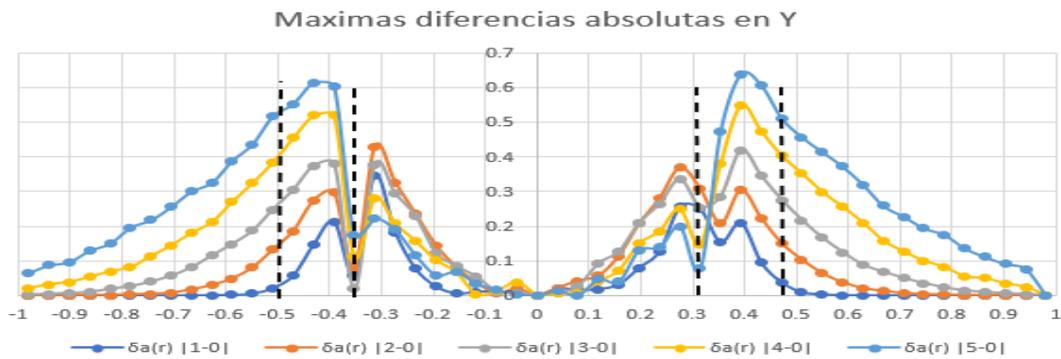


Figura 70. Diferencia de punto por punto entre los perfiles de distribución en el eje Y con error de 1-5mrad comparados con el error de 0 mrad

En las figuras 83 y 84 se presenta la comparativa de las distribuciones de radiación con su correspondiente error óptico simulado. Las líneas en color negro corresponden al intervalo $(-0.35, -0.50)$ $(0.35, 0.50)$ en el eje X y en el intervalo $(-0.35, -0.50)$ $(0.31, 0.50)$ del eje Y, donde se encuentran las máximas diferencias absolutas de acuerdo con la comparativa de los perfiles de los errores ópticos de 1 a 5 mrad contra el perfil 0 mrad.

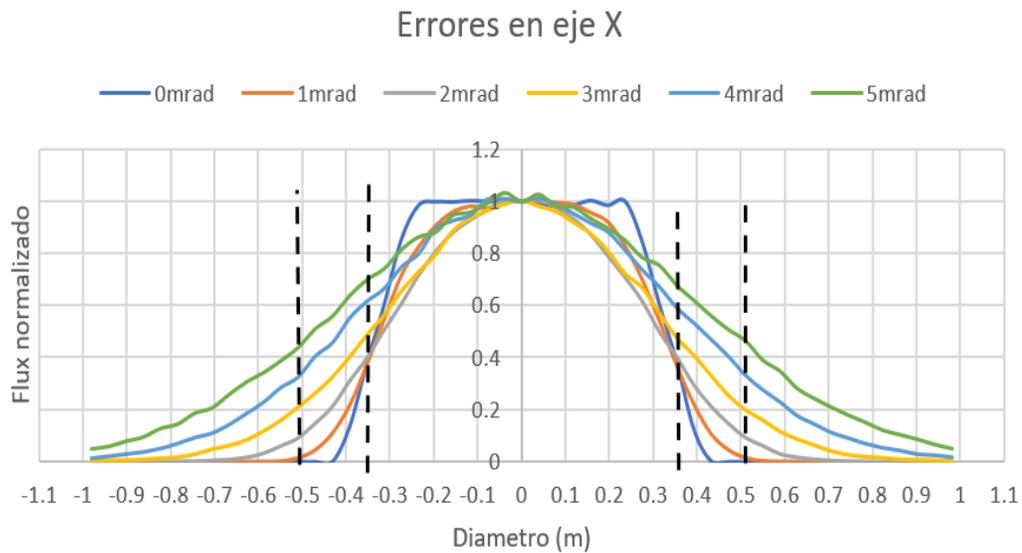


Figura 71. Perfiles de distribución de radiación en X con su correspondiente error óptico simulado (0 a 5mrad) con la región de máxima diferencia absoluta (líneas negras).

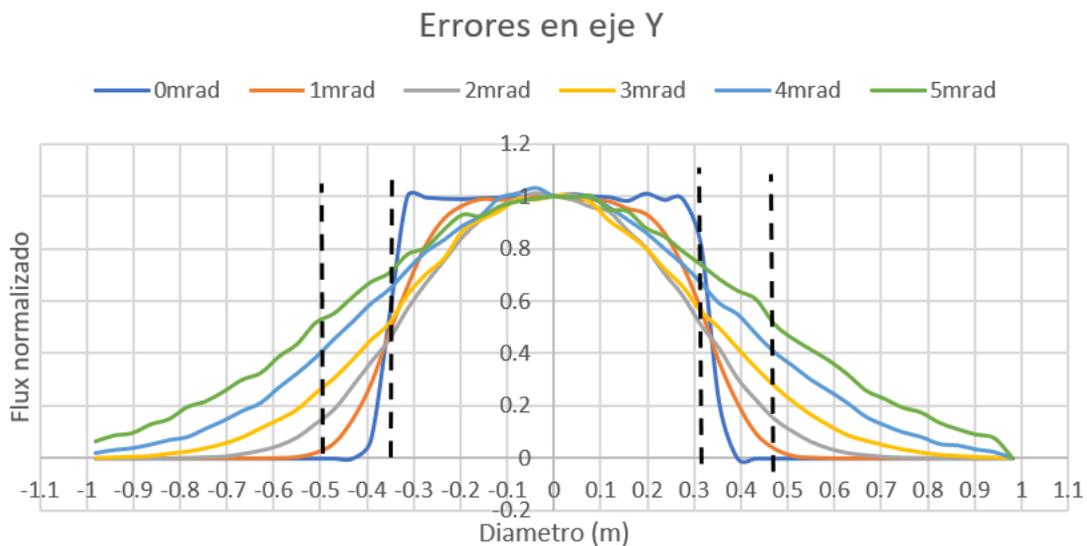


Figura 72. Perfiles de distribución de radiación en Y con su correspondiente error óptico simulado (0 a 5mrad) con la región de máxima diferencia absoluta (líneas negras).

En las figuras 85 y 86 se muestran la comparativas de los perfiles experimentales de forma cualitativa en contra de los perfiles simulados con diferentes errores ópticos en

tonatiuh anteriormente descritos, esto solo es una aproximación visual del error óptico global del sistema óptico en sus ejes.

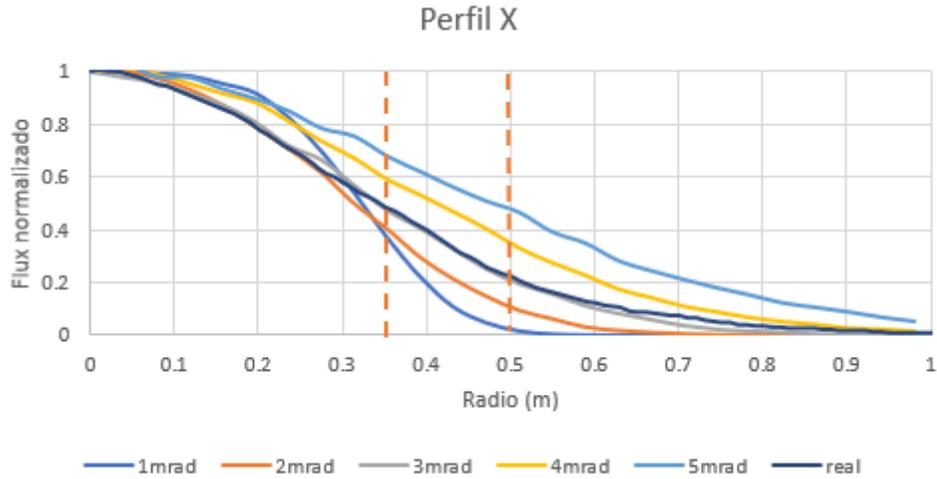


Figura 73. Comparativa cualitativa de los perfiles de distribución de 0 a 5mrad contra el perfil experimental en X

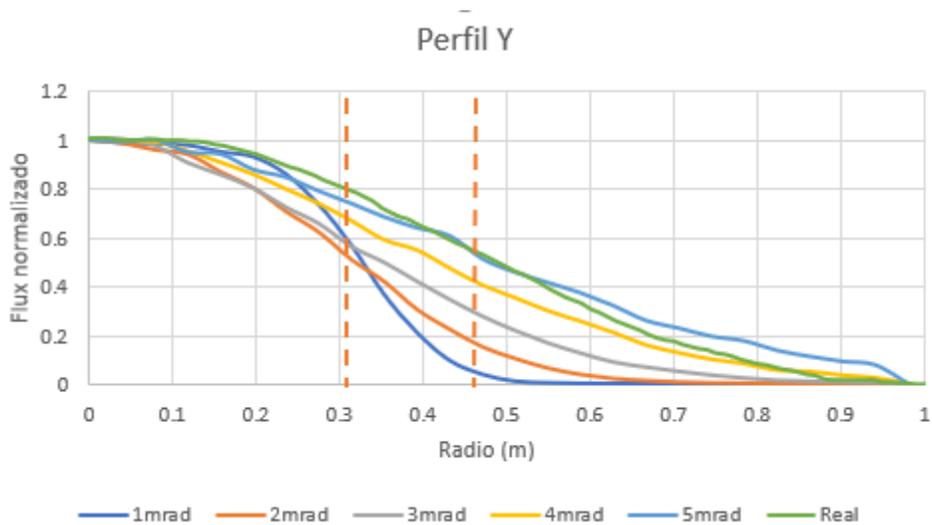


Figura 74. Comparativa cualitativa de los perfiles de distribución de 0 a 5mrad contra el perfil experimental en Y

En el segmento donde se encuentran las diferencias máximas de los perfiles de distribución X y Y (líneas naranjas), se observa que la distribución de radiación real en

X está cerca del perfil de distribución con un error de 3 mrad y el perfil real Y se encuentra de 4 a 5 mrad

Para sacar los errores en los 2 ejes de forma cuantitativa, se hace un estudio de diferencias absolutas, en el caso del eje X, se toma en el segmento de los perfiles de distribución con un error de 2.8 a 3.4 y para el eje Y de 4.1 a 4.9.

Las nuevas simulaciones tendrán un aumento de 0.2 mrad, esto para hacer un barrido más fino en los errores para encontrar el error real de cada perfil.

Se hace las diferencias absolutas del real contra las simulaciones realizadas para los dos ejes, con los datos obtenidos se hace una tabla comparativa de las diferencias, se grafican y se obtiene el máximo valor de todos los perfiles de distribución de las diferencias, en la gráfica de las diferencias del perfil X, el valor máximo se encuentra en el punto 0.40, mientras en Y se encuentra en el punto 0.31. (véase Figura 87 y 88)

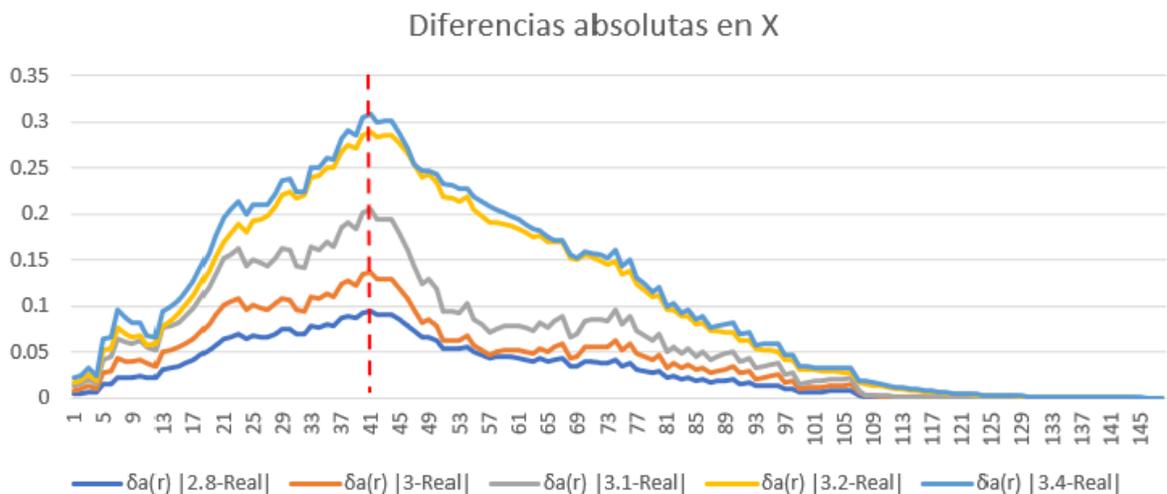


Figura 75. Comparativa del perfil real en x contra el perfil simulado en tonatiuh

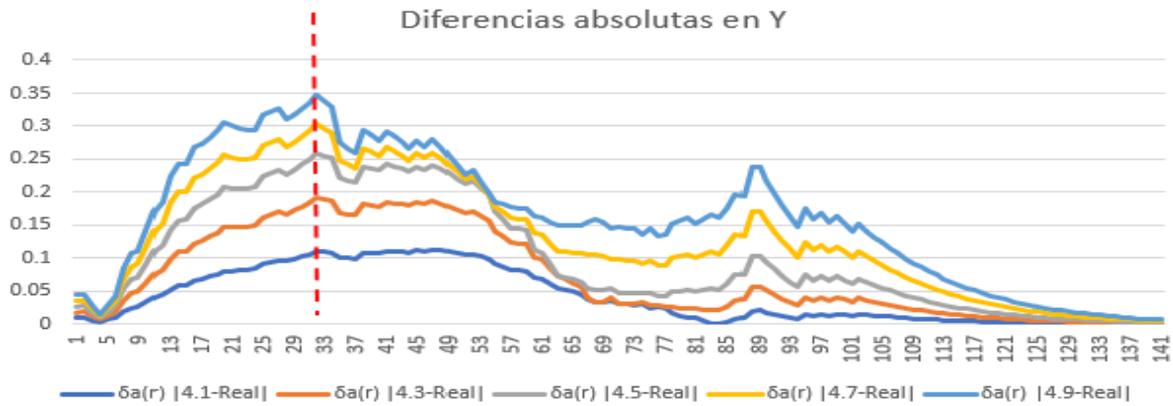


Figura 76. Comparativa del perfil real en x contra el perfil simulado en Tonatiuh

Se inicia con el análisis cuantitativo de los perfiles, esto mediante la obtención de datos de un segmento de cada uno de los perfiles de la distribución de las comparativas absolutas, partiendo del punto máximo de las distribuciones, se toman datos de la parte superior e inferior y se saca la desviación estándar, así como el promedio de cada una de ellas para acotarlo con el perfil real.

Perfil X		
$\delta a(r)$ Simulado-Real	Promedio	Desviación estándar
2.8-Real	0.091	0.0027
3-Real	0.040	0.0026
3.1-Real	0.065	0.0027
3.2-Real	0.088	0.0031
3.4-Real	0.016	0.0025

Tabla 8.

Comparativa de las diferencias absolutas del perfil de distribución real en X y los perfiles de distribución simulados en tonatiuh

Perfil Y		
$\delta a(r)$ Simulado-Real	Promedio	Desviación Estandar
4.1-Real	0.107	0.0032
4.3-Real	0.079	0.0019
4.5-Real	0.066	0.0029
4.7-Real	0.042	0.0023
<u> Real-4.9 </u>	0.031	0.0029

Tabla 9.

Comparativa de las diferencias absolutas del perfil de distribución real en Y y los perfiles de distribución simulados en tonatiuh

En las tablas 7 y 8 se muestran los resultados finales de las comparativas de los perfiles X y Y contra los perfiles simulados en tonatiuh en el intervalo de posición del perfil X (-0.38,-0.42) (0.38,0.42) y en Y (-0.29,-0.33) (0.29,0.33).

El análisis determinó que los perfiles de distribución simulados que presentan menores promedios en comparación con los perfiles experimentales son el perfil con un error de 3.4 mrad en X y 4.9 mrad en Y, por lo cual son los considerados los errores globales en cada uno de sus ejes.

En las figuras 89 y 90 se puede observar el perfil de distribución tanto del eje X y Y, contra su respectivo perfil de distribución, con el error que se empata con ellos.

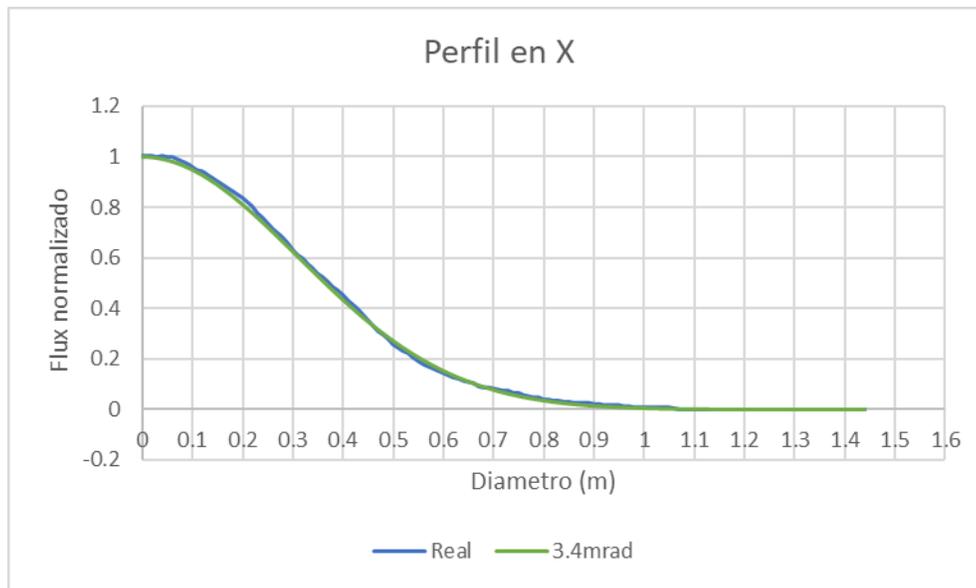


Figura 77. Comparativa del perfil experimental con el perfil 3.4mrad

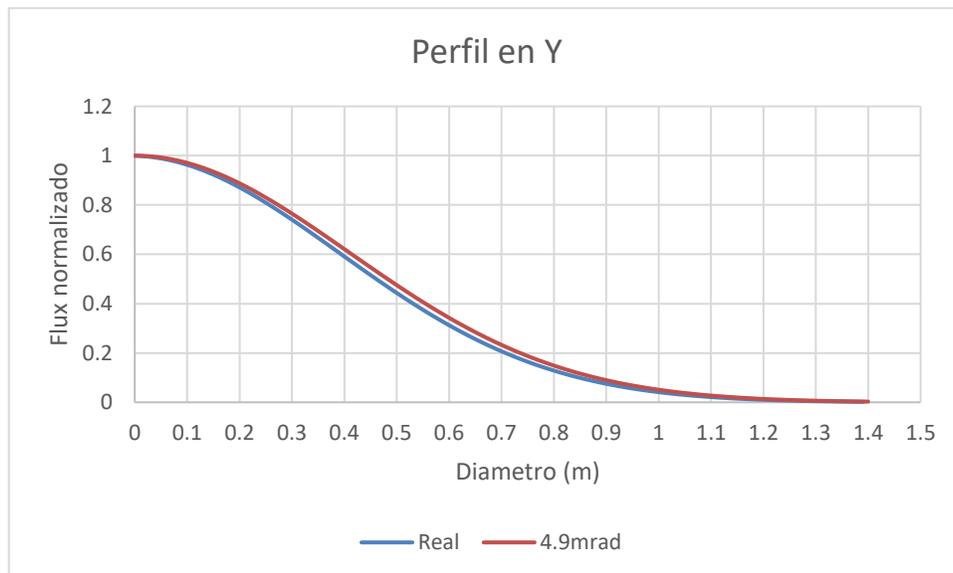


Figura 78. Comparativa del perfil experimental con el perfil 4.9 mrad

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el siguiente capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones como resultado del proyecto “Desarrollo de espejos curvos concentradores para un heliostato de torre central”. En las conclusiones se plasman los resultados más importantes, mientras que en las recomendaciones se plantean sugerencias que harían que el trabajo mencionado tenga una mayor calidad.

Conclusiones.

- Se desarrolló y construyó un soporte prototipo para dar la forma esférica para cada uno de los espejos del heliostato F0.

A través de un arreglo de una rejilla compuesta por 6 láminas calibre 14 de 1.2m de largo y 10cm de alto con un corte radial de 144 m, se deformó un espejo de 3 mm de grosor, el cual tomo la curvatura de la rejilla, esto mediante la colocación de una carga distribuida, para adoptar la forma y curvatura requerida.

- Se determinó el error óptico global del sistema de los perfiles, obteniendo en el eje X un error global de 3.4 mrad y un error global de 4.9 mrad en el eje Y.
- Se obtuvo una concentración pico de 48.3 soles y una concentración promedio de 10.71 soles.
- Se logró alcanzar un área equivalente de 3.3 m², haciendo una reducción del área del spot en un 70.6 % con respecto a el spot del heliostato con espejos planos.

Recomendaciones.

- Para futuros trabajos en los que se requiera láminas para el proceso de la deformación de los espejos, se recomienda poner atención en el maquinado, debido a que en este trabajo se presentaron diferencias en el corte radial de algunas de ellas.
- Se pueden atribuir deformaciones en la lámina debido a el proceso de soldado, por lo que se recomienda cambiar el método de fijación, por ejemplo, pegado en frío.
- Hacer pruebas de elementos finitos de las nuevas facetas, esto para ver la deformación que se pueda presentar con los nuevos elementos que se acoplaron en él.
- Se recomienda hacer un canteo en el solsticio de invierno, para hacer una comparativa con el spot del solsticio de verano.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

- Arancibia-Bulnes, C. A., Peña-Cruz, M. I., Mutuberría, A., Díaz-Urbe, R., & Sánchez-González, M. (2017). A survey of methods for the evaluation of reflective solar concentrator optics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(October 2015), 673–684. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.048>
- Arqueros, F., Jiménez, A., & Valverde, A. (2003). A novel procedure for the optical characterization of solar concentrators. *Solar Energy*, 75(2), 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.008>
- Beltrán, L. R., Alexandri, R. R., Herrera, J. R., & Ojeda, O. G. (2018). Balance Nacional de Energía. In *Secretaría de Energía, Subsecretaría de Planeación y Transición Energética*.
- Bonanos, A. M., Faka, M., Abate, D., Hermon, S., & Blanco, M. J. (2019). Heliostat surface shape characterization for accurate flux prediction. *Renewable Energy*, 142, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.051>
- Bonanos, A. M., Montenon, A. C., & Blanco, M. J. (2020). Estimation of mean field reflectance in CST applications. *Solar Energy*, 208(July), 1031–1038. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.073>
- Buie, D., Monger, A. G., & Dey, C. J. (2003). Sunshape distributions for terrestrial solar simulations. *Solar Energy*, 74(2), 113–122. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00125-7)

- CAMARILLO, H. I. G. (2018). *Desarrollo de un Concentrador Anidólico tipo Horno Solar para la Caracterización de Celdas Fotovoltaicas con Concentración Solar*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.
- Cisneros-Cárdenas, N. A., Cabanillas-López, R. E., Calleja-Valdez, R. A., Pérez-Enciso, R. A., Pérez-Rábago, C. A., & Gutiérrez-García, R. (2020). Image and Ray Tracing Analysis of a Parabolic Dish Collector to Achieve High Flux on a Solar Volumetric Reactor. *MRS Advances*, 2545–2553. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.144>
- Cock Martínez, F. (2018). *Diseño mecánico de un helióstato modular*. Centro de investigaciones en optica A.C.
- Dr. Christoph Richter, S. T. y, & Short, R. (2009). Energía Solar Térmica de Concentración. In *Greenpeace, SolarPeace, ESTELA*. http://www.aperca.org/temp/pdf/concentracion_2009.pdf
- Fernandez, M. M. (1997). *Influencia de la superficie en la calidad óptica del vidrio*.
- García Portolés, J. (2013). *UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Trabajo Fin de Master Análisis de las pérdidas térmicas en un receptor de cavidad , en instalación solar de torre central (Analysis of thermal losses of a cavity receiver , in a solar central tower facility) Autor : Jordi García*. UNIVERSIDAD DE CANTABIRA.
- Gonzalez, A. (2014). *Optimización de la altura de torre en campos de heliostatos circulares* _____.
Carlos 3 de madrid.
- Grijalva, Y. E. (2009). Introducción al método de simulación de Monte Carlo. In *Métodos cuantitativos para los negocios* (pp. 232–249). <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r94434.PDF>
- Herrada Fernandez, H. B. (2018). *adaptacion del codigo DELSOL a sistemas de 64 bits. Diseño y simulacion de una planta de torre central* [Universidad de almeria]. <https://zaguan.unizar.es/record/10321/files/TAZ-TFM-2013-144.pdf>

- Iriarte-Cornejo, C., Arancibia-Bulnes, C. A., Hinojosa, J. F., & Peña-Cruz, M. I. (2018). Effect of spatial resolution of heliostat surface characterization on its concentrated heat flux distribution. *Solar Energy*, 174(September), 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.020>
- LACYQS. (2015). *Concentracion Solar*. Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentracion Solar Y Quimica Solar. <http://www.concentracionsolar.org.mx/>
- Mancini, T. R. (2000). *Catalog of Solar Heliostats* (Issue Iii). [http://www.fika.org/jb/resources/Heliostat Catalog.pdf](http://www.fika.org/jb/resources/Heliostat%20Catalog.pdf)
- Medina, R. E. (2010). Analisis del flujo energético 3d en colectores concentradores solares de diversas geometrías. In *Universidad de Chile*.
- Pérez, R. A. (2015). Caracterización Óptica Y Térmica Del Horno Solar Del Ier. In *Tesis de Doctorado, UNAM*.
- Riveros-Rosas, D., Herrera-Vázquez, J., Pérez-Rábago, C. A., Arancibia-Bulnes, C. A., Vázquez-Montiel, S., Sánchez-González, M., Granados-Agustín, F., Jaramillo, O. A., & Estrada, C. A. (2010). Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico. *Solar Energy*, 84(5), 792–800. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.002>
- Riveros-Rosas, D., Sánchez-González, M., Arancibia-Bulnes, C. A., & Estrada, C. A. (2011). Influence of the size of facets on point focus solar concentrators. *Renewable Energy*, 36(3), 966–970. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.038>
- Riveros Rosas, D. (2008). *DISEÑO ÓPTICO DEL HORNO SOLAR DE ALTO FLUJO DEL CIE-UNAM*. universidad autonoma de mexico.
- RUIZ, G. O. (2017). *TRANSFORMACIONES HOMOGRAFICAS APLICADAS A LA SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL SUBSISTEMA ÓPTICO EN CENTRALES TERMOSOLARES DE TORRE*.

Sánchez, V. (2014). *Sonora podría abastecer de energía a todo México con tecnología fotovoltaica.* Agencia Informativa CONACYT.

<https://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/energia/329-reportaje-con-la-radiacion-solar-que-recibe-el-1-de-sonora-se-podria-generar-energia-suficiente-para-todo-el-pais%0Ahttp://cienciamx.com/index.php/tecnologia/energia/329-reportaje-con-la-radiacion>

Terron Hernandez, M. (2018). *ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE UN RECEPTOR DE CALOR CON ALETAS ACOPLADO A UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO.* centro de investigacion científica de yucatan.

ANEXO A: REACONDICIONAMIENTO DE LOS MARCOS PARA EL HELIÓSTATO.

Los marcos para los espejos esféricos serán los mismos que se tenían en los heliostatos de $36m^2$ de facetas planas, esto debido a que las nuevas facetas se montarán al heliostato F0, los marcos están hechos a la medida por lo cual no es necesario tener que construir otros, los marcos que se tomaron son los que no están en uso, estos serán reacondicionados, acoplados a las rejillas y su cruceta para después ser montados.

Metodología para el reacondicionamiento de los marcos del heliostato.

1) Selección de los marcos

Se seleccionaron los marcos que estuvieran en mejores condiciones (véase Figura 79), debido a que había marcos que no pueden ser reutilizados por el faltante de sus rótulas en las esquinas.



Figura 79. Marco para reacondicionar

2) Limpieza de los marcos.

Se hizo la limpieza de los marcos, quitándole los vidrios rotos así como el pegamento, para esto se utilizó un reilete con una cabeza de cerdas de fierro para pulir la superficie después de quitar todos los residuos de pegamento (véase Figura 80).



Figura 80. Limpieza de marco (Izquierda) y proceso de limpieza (Derecha)

3) Toma de medidas del marco con la cruceta.

Una vez habilitado el marco, este se montó sobre la cruceta que se mandó a fabricar con la rejilla, esto con la finalidad de alinear el marco con la cruceta y rejilla para tomar las medidas de los barrenos que tiene la cruceta y hacer las perforaciones en el marco de forma exacta (véase Figura 81), el orificio que se le tiene que hacer al marco es en el centroide de cada una de sus esquinas, para esto se le dio un margen 1.5cm en cada uno de los lados de las orillas del marco (véase Figura 82).

Todos los marcos fueron a la medida de su respectiva cruceta, ya que las crucetas presentaban pequeñas variaciones en la posición de su perforación, por lo cual se tenían que ajustar para que quedaran centradas con el marco que le correspondía.



Figura 81. Toma de medidas de marco

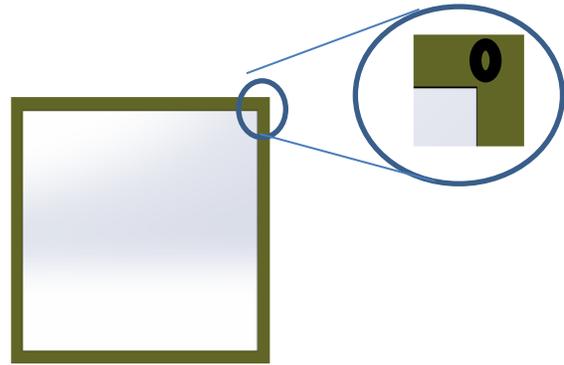


Figura 82. Puntos de perforación

4) Perforación de marcos

Una vez localizados los cuatro puntos de cada marco se hacen las perforaciones, para esto se necesitó un taladro de banco y una broca de 5/16" (véase Figura 83).

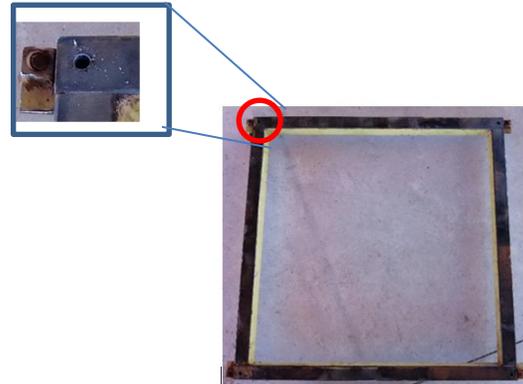


Figura 83. Perforado de las esquinas del marco (Izquierda) , marco terminado pulido y barrenado (Derecha)

5) Ensamble.

El espejo que tendrá cada faceta cuenta con un área de 1.44m^2 y 3mm de grosor, este espejo es de uso comercial.

Para pegar el espejo se utilizó un sellador elástico de poliuretano con la finalidad que no se despegara por las condiciones ambientales, una vez pegado con la rejilla se le colocó un contrapeso en su superficie, con la finalidad que tomara la curvatura de las rejillas y pegara de forma homogénea (véase Figura 84).



Figura 84. Espejos terminados de pegar

Para el ensamble de las rejillas con el marco, se necesitaron 4 tornillos de $\frac{1}{4}$ "x15cm, 4 mariposas y 4 arandelas para cada una de las facetas de las 25 que requiere el heliostato (véase Figura 85). Toda la tornillería para el ensamble mecánico es de acero inoxidable



Figura 85. Tornillería utilizada

Se colocó la rejilla sobre el marco, se tomó de la cruceta para no deformar el espejo, la cruceta se puso de forma diagonal del marco para que el centroide de cada barreno (marco-cruceta) quedaran alineadas para que fueran ensambladas, esto mediante la tornillería ya descrita (véase Figura 86).



Figura 86. Puesta de tornillería

ANEXO B: CANTEO DEL HELIOSTATO F0

La normal que corresponde a la faceta central (C3), es la que se toma como referencia para la superposición de las demás facetas restantes del helióstato, esto se debe a que cada faceta tiene una ligera rotación con respecto a la faceta central, las facetas que se encuentran en las orillas siguen el patrón de reflexión de la central, esto para tener una mayor semejanza a una superficie cóncava, la cual tiene su punto focal a 72 m de distancia.

El 18 de mayo del 2021 a partir de las 11 am se inició con el canteo, se comenzó poniendo la faceta central en un ángulo de 0° con respecto a la horizontal del helióstato, la normal de la faceta C3 es la que se tomó como punto de referencia.

Cada marco tiene 4 rótulas que le permiten ajustar la inclinación respecto al plano de la estructura de soporte, esto se hace mediante el juego de ajustes en los puntos de las rótulas, los 2 juegos de ajuste son en vertical y horizontal respectivamente. (véase Figura 87)

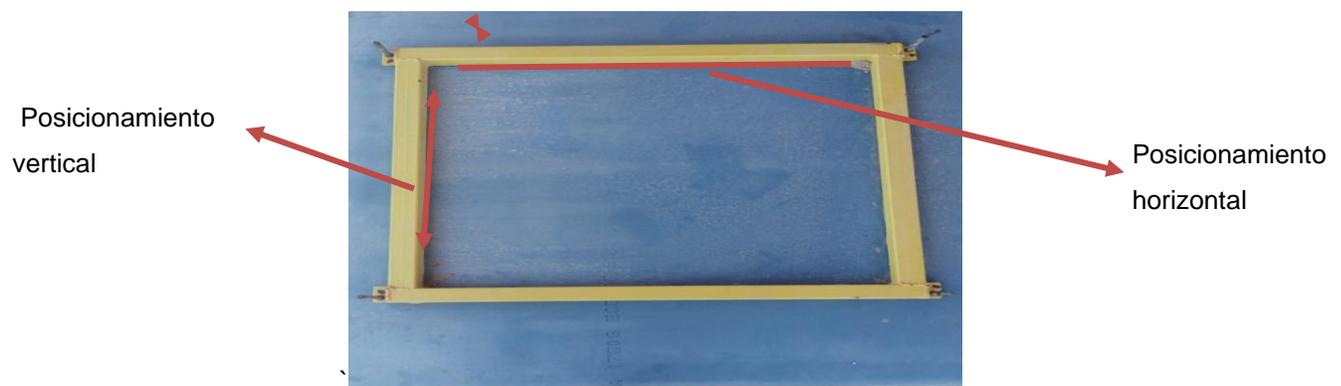


Figura 87. Tipos de movimientos de la rótula para el canteo

Se apuntó el heliostato hacia la región central del blanco para ver los spots de las facetas y reconocer cual del conjunto era el spot correspondiente a la faceta central que es la referencia para canteo (véase Figura 88).



Figura 88. Spot C3 centrado en el blanco lambertiano para inicio de canteo.

Una vez que se tiene localizado y centrado el spot de referencia en el blanco, se puede empezar con el canteo de las facetas restantes. El canteo consiste en posicionar la faceta en un ángulo deseado tal que permita superponer la imagen de esta sobre la de referencia.

Para la realización del canteo se debe de ajustar 2 rotulas y dejar sueltas las otras 2, esto para que tenga juego y se pueda mover la faceta a la dirección deseada, en caso de direccionar la faceta hacia la derecha o izquierda, se toman en cuenta las rotulas de posicionamiento vertical, en caso dado que la faceta se tenga que dirigir hacia la derecha, se ajustan las rotulas verticales de lado izquierdo y se aflojan las de lado derecho para hacer el movimiento, en caso que se requiera en dirección de elevación, se ajustan las rotulas superiores y las inferiores se dejan sueltas para hacer el movimiento de elevación (véase Figura 89).

Se debe tomar en cuenta que el heliostato está en seguimiento automático de la posición del sol, por lo que la estructura se encuentra en un ángulo de elevación lo que puede provocar que al momento de aflojar las 4 tuercas la faceta se pueda recaer, es por ello, que se deben de dejar dos rotulas fijas y las otras dos sueltas.



Figura 89. Proceso de canteo de facetas del heliostato F0.

El proceso de canteo debe ser realizado por lo menos por dos personas, una que sea la encargada de monitorear la dirección del apuntamiento del spot y la segunda persona encargada de estar haciendo el movimiento de las rotulas para mover a la dirección indicada el spot de la faceta que se está canteando en ese momento.

El canteo de las facetas se hace de forma individual direccionando estas al punto de referencia en el blanco e ir traslapando cada una de ellas con la de referencia, como se puede observar en la figura 90.



Figura 90. Traslape de los spots en el blanco.

Finalmente se obtiene una alineación preliminar de las 25 facetas concentradoras del heliostato y la proyección de un solo spot sobre el blanco de la torre como se muestra en la figura 91. Cabe de destacar que la alineación de las facetas se hizo en 4 días, todas las facetas se alinearon cerca del mediodía solar (12:30pm), alineando por día 6 facetas en promedio, en un lapso de una hora a hora y media por día, esto con la finalidad que no hubiera variantes en el canteo, el 25 de mayo del 2021 se hizo un reajuste para tomar la imagen de la radiación solar del sistema óptico del heliostato, la toma de la imagen fue a las 12:43 pm, habiendo un DNI de $921 \frac{W}{m^2}$.

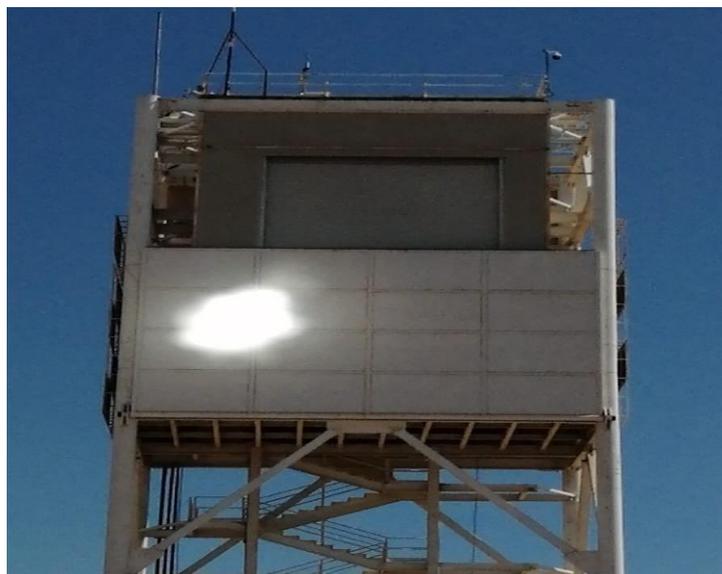


Figura 91. Alineación completa de las 25 facetas concentradoras del heliostato F0

Se hizo una nueva metodología de canteo, debido a que el primer canteo dio un área del spot demasiado grande, por lo cual se mejoró la metodología anterior.

El segundo canteo se realizó cerca del mediodía solar con un tiempo determinado, pero en lugar de tener todos los spots en el blanco, se taparon las filas B, C, D y E, dejando solo una fila por cantear, teniendo solo 5 spots en el blanco, se facilitó el traslape de cada uno de ellos en el centroide del blanco, las facetas que no se cantearon fueron tapadas con lonas para que el reflejo de cada una de ellas no estuviera en el blanco, esto se hizo sucesivamente con las demás filas.

La toma de imagen de este canteo fue el día 15 de junio del 2021 a las 12:35 pm, habiendo un DNI en ese momento de $935 \frac{W}{m^2}$.

En el mes de abril del 2022 se hizo un tercer canteo siguiendo la segunda metodología, afinando con más detalle.

La toma de imagen de este fue el 16 de abril del 2022 a las 12:33 pm, con un DNI de $952 \frac{W}{m^2}$