



**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL  
DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN HORNO SOLAR  
CENTRADO EN EL EJE CON CAPACIDAD TÉRMICA DE  
1KW**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA**

**PRESENTA:**

**ING. PABLO SOSA FLORES**

**HERMOSILLO, SONORA**

**ENERO 2015**

# Universidad de Sonora

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:

**Pablo Sosa Flores**

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

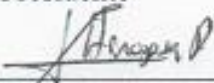
17/FEB/2015

Fecha

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Rafael Enrique Cabanillas López  
Presidente

17/FEB/2015

Fecha

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jesús Fernando Hinojosa Palafox  
Secretario

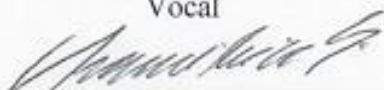
17/FEB/2015

Fecha

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Víctor Hugo Benítez Baltazar  
Vocal

17/FEB/2015

Fecha

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes  
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

---

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

## AUTORIZACION DEL EXAMEN DE GRADO

Febrero 17 de 2015.

Por la presente se hace constar que el estudiante: **PABLO SOSA FLORES**, 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. JESUS FERNANDO HINOJOSA PALAFOX**  
**COORDINADOR**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

## RESUMEN

En este trabajo se presentan las etapas de diseño de un horno solar de alta concentración con capacidad de 1kW térmico, para el cual han sido analizadas diversas opciones en cuanto a arreglos de los componentes ópticos; así como también de distintos mecanismos y sistemas de movimiento para apuntamiento solar en la operación del horno. Para esto han sido empleadas distintas herramientas y técnicas de diseño como son las simulaciones ópticas mediante trazado rayos y modelado asistido por computadora de elementos mecánicos. En base a simulaciones, se evaluaron las características de desempeño general del horno para diversos días del año y con distintos tipos de concentradores. Se presentan también las características de los mecanismos de movimiento para el helióstato del horno, los cuales son únicos en su tipo para esta aplicación. Es presentada la metodología y los resultados de pruebas de caracterización del horno para determinar sus principales propiedades, como son la eficiencia óptica, nivel de concentración, potencia del sistema y cuantificación de la desviación (deriva) que presenta el horno en conjunto.

## **ABSTRACT**

This work presents the stages of design of a solar furnace with a high concentration factor and a peak power capacity of 1kW. For this purpose, there had been analyzed several options of different optical component arrangements, and different mechanical and movement systems for a heliostat so the solar furnace can have the capability to operate in a continuous manner. Design tools and techniques such as optical simulation through ray tracing and computer aided design software had been used to have a better approach of the performance goals purposed for this furnace; for this, simulations had been made to evaluate its performance characteristics in different dates of the year, and also with the use of different types of solar concentrators. The main characteristics of the mechanical systems used to move the furnace's heliostat are presented, which is a unique design for this type of application. Finally, the methodology for, and the results of characterization tests are shown, which describe the furnace in terms of optical efficiency, system power, concentration factor and quantification of the deviation (drift) of the complete system.

Dedicado a la mujer de mi vida, mi esposa.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT.....	v
TABLA DE CONTENIDO .....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS .....	xvi
AGRADECIMIENTOS .....	xvii
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo.....	7
1.1.1 Objetivos particulares .....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Justificación.....	21
CAPÍTULO 3.....	26
3. TEORÍA DE LOS HORNOS SOLARES.....	26
3.1 Conceptos generales.....	26
3.1.1 Helióstato.....	30
3.1.2 Errores en los helióstatos.....	33
3.1.3 Concentrador .....	37
3.1.4 Arreglo óptico.....	42
3.1.5 Ubicación geográfica.....	43
3.1.6 Tipo de concentrador.....	43



3.1.7 Potencia máxima .....	44
3.1.8 Nivel de concentración .....	44
3.2 Metodología general.....	45
3.3 Metodología para el diseño .....	46
3.3.1 Diseño de los componentes .....	47
3.3.2 Secuencia de diseño.....	48
3.3.3 Diseño óptico del concentrador .....	50
3.3.3.1 Etapas de diseño del concentrador.....	56
3.3.3.1.1 Parte 1.....	56
3.3.3.1.2 Parte 2.....	59
3.3.4 Diseño óptico del helióstato .....	79
3.3.5 Diseño especial para pruebas: Receptor .....	89
3.3.6 Diseño del concentrador: facetas .....	93
3.3.7 Diseño del concentrador: estructura .....	95
3.3.8 Diseño del helióstato: mecanismos .....	96
3.3.9 Diseño del helióstato: estructura .....	107
3.3.10 Diseño del helióstato: control.....	111
3.3.11 Determinación de la distancia entre helióstato y concentrador .....	112
3.4 Metodología para la caracterización.....	116
3.5 Caracterización del horno solar.....	116
3.5.1 Precisión de seguimiento del helióstato y del sistema.....	117
3.5.2 Prueba de seguimiento solar .....	118
3.5.3 Prueba de apuntamiento en blanco lambertiano sobre torre central.....	120
3.5.4 Prueba de apuntamiento a un blanco frente al helióstato .....	123
3.5.6 Prueba de deriva de la mancha solar concentrada .....	125
3.5.7 Estimación de potencia del horno solar.....	126
3.5.8 Cálculo de eficiencia óptica del horno solar.....	134
3.5.9 Nivel máximo de concentración .....	135
3.5.10 Curva de temperatura presente en un receptor .....	136

CAPÍTULO 4.....	138
4. RESULTADOS .....	138
4.1 Lente fresnel.....	138
4.2 Prueba de seguimiento solar.....	143
4.3 Prueba de apuntamiento sobre torre central .....	145
4.4 Prueba de apuntamiento a un blanco frente al heliostato .....	149
4.5 Prueba de deriva de la mancha solar concentrada.....	150
4.6 Estimación de potencia del horno solar .....	151
4.7 Cálculo de eficiencia óptica del horno solar .....	156
4.8 Nivel máximo de concentración.....	157
4.9 Curva de temperatura presente en un receptor .....	158
CAPÍTULO 5.....	161
5. CONCLUSIONES .....	161
5.1 Trabajo a futuro.....	164
BIBLIOGRAFÍA .....	165

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 a) Planta fotovoltaica en Alemania, propiedad de juwiGroup/First Solar, genera 59MW. b) Planta de torre central instalada en España, propiedad de Sener/Torresol, genera 19.9MW c) Planta de colectores tipo canal parabólico, instalada en Hawaïi, propiedad de Sopogy/Keahole, genera 2MW. ....	1
Figura 1.2 Reactor solar Heliotrón. Instalado en PROMES en Francia. ....	3
Figura 1.3 El área de apertura el concentrador $A_c$ , es mayor que el área del receptor $A_r$ .....	4
Figura 1. 4 Helióstato.....	5
Figura 1.5 Concentrador solar, con motor Stirling montado en su foco.....	6
Figura 2.1 Colector solar sin concentración para calentamiento de agua.....	9
Figura 2.2 A la derecha en la imagen se observa una persiana que regula la cantidad de radiación que se envía al concentrador. ....	12
Figura 2.3 Horno solar ubicado en Odeillo, Francia.....	14
Figura 2.4 Horno solar ubicado en el Instituto Paul Scherrer, Suiza. ....	15
Figura 2.5 Horno solar ubicado en los Laboratorios Nacionales Sandia, Estados Unidos. ....	15
Figura 2.6 Horno solar ubicado en la Plataforma Solar de Almería, España. ....	16
Figura 2. 7 Horno solar del Instituto de Energías Renovables, México. ....	17
Figura 2.8 Horno solar del Instituto DLR, Alemania. ....	18
Figura 2.9 Concentrador hiperbólico del horno solar en el Instituto Weizmann, Israel.....	18
Figura 2.10 Mapa del modelo mundial de irradiación global solar anual[25].....	23
Figura 2.11 Mapa del modelo de RDN disponible en el país [26]. ....	24

Figura 3.1 Esquema del arreglo de elementos ópticos que conforman un horno solar.....	27
Figura 3.2 Movimiento de un helióstato en 2 ejes .....	31
Figura 3. 3 Arreglo óptico del concentrador del horno solar instalado en Temixco, Morelos. ....	41
Figura 3.4 Esquema de la metodología seguida para el diseño, construcción y caracterización del horno solar. ....	46
Figura 3.5 Perfil parabólico con eje vertical con sus dimensiones características .....	52
Figura 3.6 Perfil circular con eje vertical con rayos incidiendo en distintos puntos del concentrador .....	54
Figura 3.7 Distancia máxima desde el foco hasta el concentrador .....	62
Figura 3.8 Cono de luz formado después de incidir la luz solar en un concentrador.....	63
Figura 3.9 Interfaz gráfica de trabajo del software Soltrace.....	65
Figura 3.10 Esquema del arreglo óptico con concentrador parabólico para simulaciones en trazado de rayos. ....	66
Figura 3.11 Arreglo óptico para simulación de trazo de rayos en concentrador parabólico.....	67
Figura 3.12 El valor del radio $r$ equivalente para un concentrador de apertura circular. ....	68
Figura 3.13 Niveles de concentración a distintas distancias focales en un concentrador parabólico.....	69
Figura 3.14 Niveles de concentración a distintas distancias focales en un concentrador esférico. ....	71
Figura 3.15 Arreglo de facetas circulares en apertura cuadrada. Las zonas amarillas representan el área desperdiciada. ....	74
Figura 3.16 Arreglo de facetas hexagonales. Los colores representan la distancia focal individual de cada faceta.....	75
Figura 3.17 Comparación entre los resultados con facetas esféricas y parabólicas. ....	77

Figura 3.18 Espacios no aprovechados dentro del área del concentrador. En a) se tiene un receptor ubicado a 70cm del concentrador. En b) se tiene un receptor ubicado a 110cm del concentrador. ....	78
Figura 3.19 Trayectoria de arco del sol sobre un plano perpendicular al horizonte. ....	80
Figura 3.20 Ángulos solares sobre un punto geográfico. ....	80
Figura 3.21 Proyecciones del helióstato sobre la apertura cuadrada del concentrador.....	82
Figura 3.22 Efecto del factor coseno en la proyección de una luz reflejada. ....	82
Figura 3.23 Proyecciones de la mancha solar obtenidas por un helióstato de 1m <sup>2</sup> . ....	85
Figura 3.24 Proyecciones de la mancha solar con espejo cuadrado de 1.6m. El 21 de junio de 2013.....	86
Figura 3.25 Comparativa entre espejos cuadrados con lados de 1.5m y 1.6m .....	88
Figura 3.26 Mancha solar resultante del arreglo óptico del horno en Soltrace. ....	91
Figura 3.27 Potencia recibida sobre un receptor circular con distintos diámetros. ....	92
Figura 3.28 Faceta con geometría cuadrada y curvatura esférica. Fabricada en placa de aluminio de 0.75 pulgadas de espesor. ....	94
Figura 3.29 Estructura de soporte para las facetas que conforman el concentrador, cada una con su orientación. ....	96
Figura 3.30 Fuerzas y momentos sobre un helióstato y su base en los 3 ejes cartesianos. ....	98
Figura 3.31 Valores del coeficientes de carga de viento $c$ a distintos ángulos de incidencia del viento en el eje acimutal.[38] .....	100
Figura 3.32 Sistema mecánico de movimiento de elevación. ....	104
Figura 3.33 Mecanismo donde se observa el sistema de fricción entre rodillo y tambor. ....	107
Figura 3.34 Fuerzas aplicadas sobre las esquinas del marco estructural. ....	108
Figura 3.35 Modelo del marco del espejo sujeto a fuerzas en las esquinas, mostrando la magnitud de los esfuerzos presentes. ....	109

Figura 3.36 Escala de colores del factor de seguridad del marco, bajo la aplicación de fuerza en las esquinas. ....	110
Figura 3.37 Modelo tridimensional propuesto (izquierda). Prototipo fabricado (derecha). ....	111
Figura 3.38 Esquema para estimar la distancia mínima sin sombreamiento. ....	114
Figura 3.39 Helióstato sin sombras al medio día (izquierda). Helióstato sombreado a las 10:30 (derecha). ....	115
Figura 3.40 Imagen de círculo solar en su forma original (izquierda). Tratamiento de la imagen con función de umbral de color (derecha). ....	119
Figura 3.41 Blanco lambertiano posicionado en la torre central. ....	121
Figura 3.42 Imágenes de la proyección del helióstato sobre el blanco lambertiano en la torre central del campo (izquierda). Tratamiento de la misma imagen con función de umbral de color (derecha). ....	123
Figura 3.43 Superficie del helióstato parcialmente cubierta para generar una proyección de menor área. ....	124
Figura 3.44 Imágenes de la proyección frontal del helióstato sobre una superficie (izquierda). Tratamiento de la misma imagen con función de umbral de color (derecha). ....	125
Figura 3.45 Imagen de la mancha solar concentrada del horno (izquierda). Tratamiento de la misma imagen con función de umbral de color (derecha). ....	126
Figura 3.46 Placa plana utilizada como receptor, con capacidad de movimiento en dos ejes. ....	127
Figura 3.47 Imagen maestra original con objetos de dimensiones conocidas (izquierda). La misma imagen con corrección por perspectiva (derecha). ....	129
Figura 3.48 Horno solar en operación, generando una mancha de radiación concentrada sobre la placa de aluminio. ....	130
Figura 3.49 Posicionamiento del sensor Gardon en el punto del receptor donde existe un máximo de flujo de calor. ....	131

Figura 3.50 Alrededor del punto referencia (zona más blanca) se registraron los datos de flujo de calor en 12 ubicaciones diferentes marcadas con una cruz. ....	132
Figura 3.51 Procesamiento de una de las imágenes donde se muestra la toma original (izquierda), la imagen con corrección por perspectiva (centro) y la imagen oscurecida con fondo sustraído para eliminación de ruido ambiental (izquierda). ....	133
Figura 3.52 Diagrama de flujo para determinar el factor de concentración medido por el sensor Gardon. ....	136
Figura 3.53 Corte transversal del receptor de cavidad utilizado en la prueba (izquierda) y vista del arreglo de instalación del sensor de temperatura .....	137
Figura 4.1 Lente fresnel comparada con una lente normal. ....	139
Figura 4.2 En la imagen de la izquierda y de la derecha se muestra una lente fresnel con un bajo número y un alto número de segmentos de curvatura, respectivamente. ....	140
Figura 4.3 Lente fresnel utilizada como elemento concentrador primario en el horno solar. ....	141
Figura 4.4 Desviación del seguimiento para el día 28 de noviembre de 2013. ....	143
Figura 4.5 Desviación del seguimiento para el día 10 de diciembre de 2013. ....	144
Figura 4.6 Desviación del seguimiento para el día 16 de diciembre de 2013. ....	144
Figura 4.7 Desviación de la proyección del helióstato sobre el blanco lambertiano para el día 16 de enero. ....	145
Figura 4.8 Desviación de la proyección del helióstato sobre el blanco lambertiano para el día 16 de enero. ....	146
Figura 4.9 Líneas imaginarias utilizadas para determinar el valor de la desviación angular del helióstato en pruebas de deriva. ....	147
Figura 4.10 Desviaciones netas de la proyección frontal del helióstato durante el periodo de tiempo de operación del horno solar. ....	149
Figura 4.11 Posición del centroide de la mancha solar concentrada durante las horas de operación del horno, incidiendo sobre una placa plana en la zona focal del concentrador. ....	150

Figura 4.12 Valores medios de intensidad de gris correspondientes a la señal (mV) del sensor Gardon.....	152
Figura 4.13 Curva ajustada a los valores obtenidos de intensidad de gris y potencia por pixel.....	153
Figura 4.14 Comparación entre la imagen que ha sido editada para eliminar las irregularidades por presencia de objetos en la cara de la placa. ....	154
Figura 4.15 Histograma donde se muestra la cantidad de pixeles (eje vertical) clasificados según su potencia equivalente (eje horizontal) según la calibración obtenida anteriormente.....	155
Figura 4.16 Curva de temperatura registrada en la primera prueba al interior del receptor de cavidad. ....	158
Figura 4.17 Curva de temperatura registrada en la segunda prueba al interior del receptor de cavidad. ....	159
Figura 4.18 Curva de temperatura registrada en la tercera prueba al interior del receptor de cavidad. ....	159
Figura 4.19 Receptor de pruebas mostrado antes, durante y después de ser sometido a la radiación concentrada del horno solar. ....	160



## LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 3.1 Valores del vector unitario normal de la superficie del heliostato .....	84
Tabla 3.2 Valores de potencia y nivel de concentración máximos obtenidos en Soltrace.....	90
Tabla 4.1 Valores medios obtenidos del tono de gris en 12 puntos de 12 imágenes distintas y el valor de la lectura del Gardon correspondiente a cada punto.....	151
Tabla 4.2 Potencias estimadas en 5 imágenes aleatorias, mediante el método .....	155
Tabla 4.3 Valores de irradiancia instantánea registrada en los instantes en que se capturaron las imágenes. ....	156
Tabla 4.4 Valores de potencia real útil para cada instante de captura. ....	156
Tabla 4.5 Estimaciones de la eficiencia óptica del horno solar. ....	157

## AGRADECIMIENTOS

Por su constante apoyo en el desarrollo de este trabajo, agradezco al M. C. Rodolfo Peón Anaya; al M. C. Cuitláhuac Iriarte Cornejo por darle vida al cuerpo abstracto que era el helióstato del horno solar y toda la asesoría en la ejecución de las pruebas.

Agradezco al Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS), por haber aportado los recursos necesarios para la realización de esta tesis, mediante el proyecto LN-123767 de CONACYT.

Agradezco al Dr. Camilo A. Arancibia Bulnes por su muy valiosa asesoría sobre los temas relacionados a la óptica de concentradores solares y metodología de pruebas. Al Dr. J. Fernando Hinojosa Palafox por su asesoría en cuanto al contenido y estructuración de este escrito. Y al Dr. Rafael E. Cabanillas López por aportar las ideas que dirigieron este trabajo de tesis.

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de la investigación a nivel global, ya sea en la academia o en la iniciativa privada, es cada vez más notable el interés por el tema del recurso energético proveniente del sol. Son muchas las áreas de conocimiento sobre las cuales es posible trabajar en base a la energía solar, debido a que es de suma importancia obtener sistemas optimizados para su captación, transformación y almacenamiento.

En lo que se refiere a captación solar, han sido ampliamente estudiados los sistemas que aprovechan directamente la radiación, los que la redirigen a una zona de interés y los que la concentran para su utilización. Para cada uno de estos tipos de sistemas, el desarrollo obtenido en años recientes ha ido creciendo en gran manera. Gracias a lo cual, hoy en día existen varios complejos industriales que son capaces de producir energía eléctrica a partir de la radiación solar concentrada o no concentrada de una manera económicamente viable (figura 1.1).

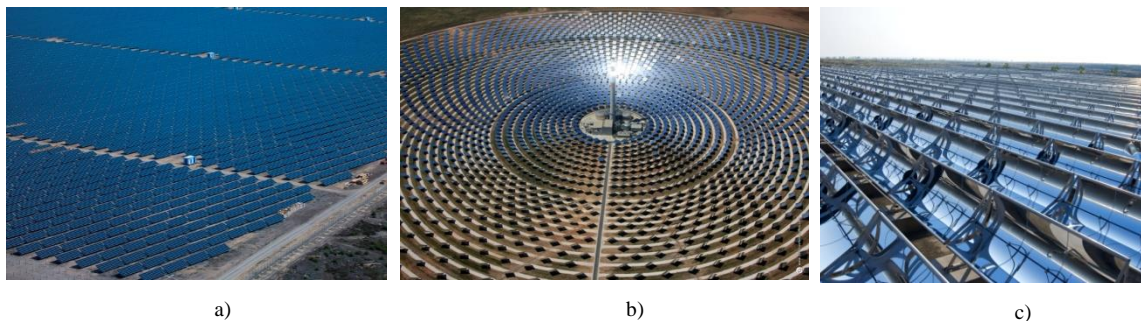


Figura 1.1 a) Planta fotovoltaica en Alemania, propiedad de juwiGroup/First Solar, genera 59MW. b) Planta de torre central instalada en España, propiedad de Sener/Torresol, genera 19.9MW c) Planta de colectores tipo canal parabólico, instalada en Hawaii, propiedad de Sopogy/Keahole, genera 2MW.

De igual manera es común encontrar estudios sobre temas básicos para aprovechamiento solar, como son las trayectorias solares, donde han sido desarrollados varios modelos de seguimiento, los cuales difieren entre sí solamente por las variables que intervienen en dicho modelo, haciendo algunos más precisos que otros[1],[2]; también es cada vez más común que se profundice sobre los temas de óptica y desarrollo de nuevos materiales que se adapten a los diversos requerimientos de reflectividad, resistencia a intemperie, etc.

Como es de notarse, en los sistemas de captación solar, entre más sea la energía que se desee obtener de la irradiación solar, mayor deberán ser las áreas de incidencia, por lo tanto mayores y más robustos los materiales y estructuras con las que se trabaja. Debido a esto, es de gran interés el perfeccionamiento de los modelos de ingeniería estructural y aerodinámica con los que es posible obtener dichas áreas de captación.

La otra gran rama de investigación a parte de la captación de radiación, es la que se refiere al aprovechamiento de esta energía concentrada o no concentrada. En este ámbito existen también una infinidad de aplicaciones que van desde el aprovechamiento directo de la energía radiativa para calentar materiales o sustancias a bajas temperaturas hasta el uso del flujo radiativo concentrado para fundición de metales, disociación molecular, etc. (figura 1.2).

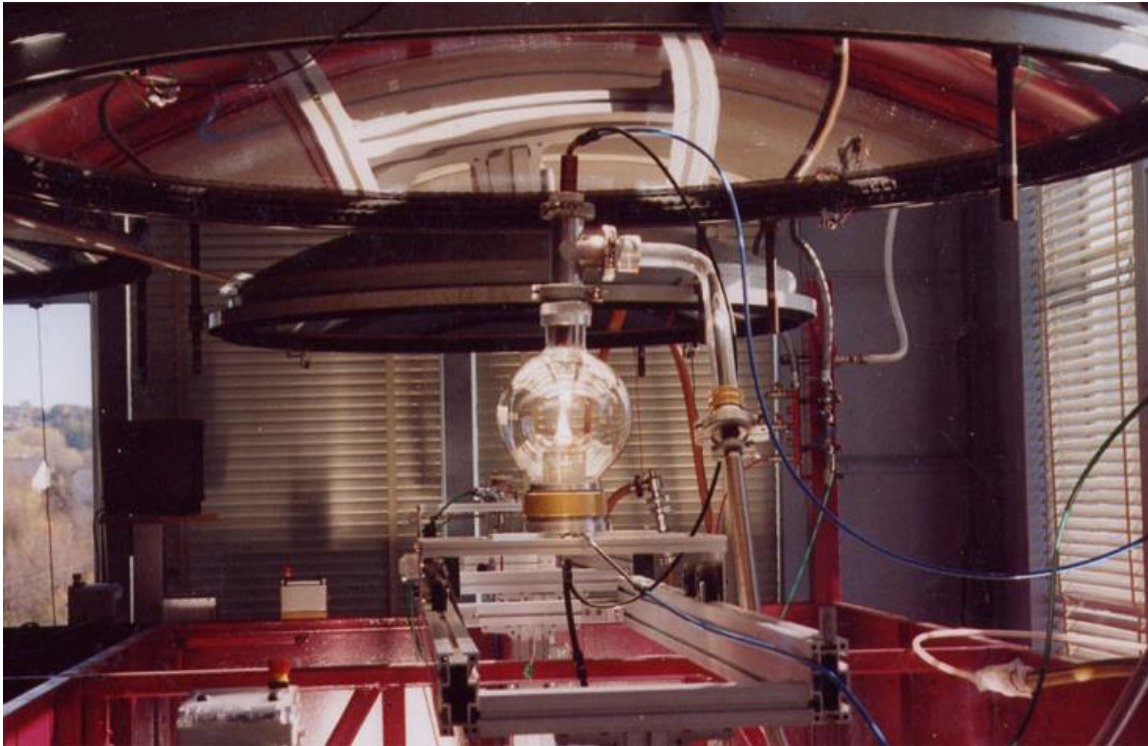


Figura 1.2 Reactor solar Heliotrón. Instalado en PROMES en Francia.

Es precisamente en esta última aplicación de la energía solar, sobre la cual este trabajo de tesis lleva a cabo su desarrollo, trabajando con los temas de captación, concentración y utilización de la energía solar concentrada para un horno solar.

Como se ha mencionado anteriormente, los campos de investigación con energía solar son de gran interés a nivel global, por lo mismo podemos encontrar diversas instalaciones donde se estudian tanto las aplicaciones de la energía solar altamente concentrada como los sistemas con los cuales es posible obtenerla, es decir con un horno solar. Dicho esto, es posible analizar lo que es un horno solar y cuáles son sus aplicaciones.

La gran mayoría de las tecnologías para aprovechamiento de la energía solar térmica, trabajan con la concentración. Concentrar la energía significa que, cuando tenemos que en un área reflectiva con dimensión unitaria incide radiación, si el área proyectada por la reflexión es igual a la inicial (un área unitaria), tenemos que no existe concentración propiamente dicha, o bien, nuestro factor de concentración será igual a 1. De modo distinto sucede cuando tenemos que el área proyectada por la reflexión es de menor magnitud que el área inicial; en este caso, tendríamos que nuestra concentración sería mayor a la unidad, de manera que este factor de concentración crecerá mientras menor sea el área proyectada con respecto al área inicial (figura 1.3).

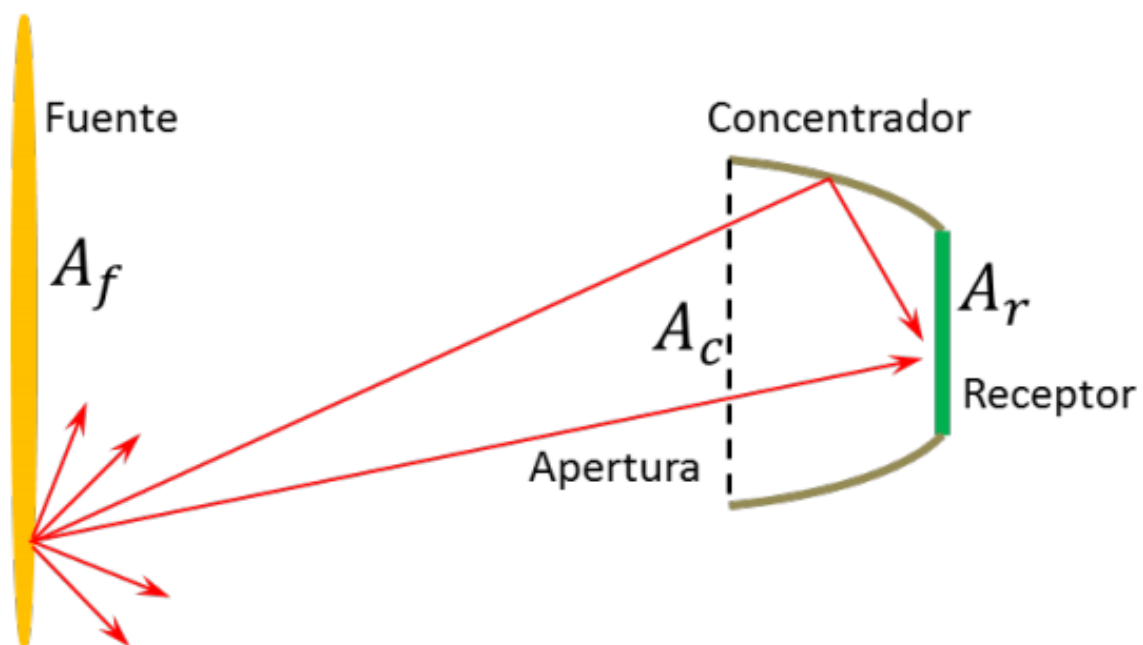


Figura 1.3 El área de apertura el concentrador  $A_c$ , es mayor que el área del receptor  $A_r$ .

Utilizando este principio, podemos describir los elementos del horno solar con el que se trabajará en esta tesis, en el cual, la radiación solar es recibida en un superficie reflectora plana y dirigida hacia una segunda superficie que, aparte de ser reflectora, es concentradora, es decir, que la radiación que recibe, es redirigida hacia un área mucho más pequeña, para elevar así el factor de concentración solar, logrando un alto flujo de

energía en un área relativamente pequeña. Donde se encuentra un receptor, que puede ser de forma plana o de cavidad, dependiendo de la aplicación definida para dicho horno.

La primer superficie reflectora debe ser plana, y debe ser capaz de efectuar movimiento sobre dos ejes, el de elevación y el de rotación acimutal. Dichos movimientos tienen la finalidad de darle a esta superficie reflectora, la capacidad de realizar seguimiento del sol a lo largo del día. Este primer elemento es conocido como helióstato. Y su trabajo es el de dirigir, hacia el concentrador, los rayos de luz solar de manera sostenida a lo largo de un periodo de tiempo (figura 1.4).



Figura 1. 4 Helióstato

Como segundo elemento del horno solar, está el concentrador. El cual consiste también en una superficie reflectora, pero su geometría no es plana, por lo tanto permite dirigir los rayos del sol, los cuales llegan de forma paralela entre sí desde el heliostato, y son concentrados hacia una zona (área) de menor magnitud que la del mismo concentrador, es decir, su zona focal o foco. Dentro de las opciones geométricas que puede poseer una superficie para lograr que esta concentre la radiación, existe una gran variedad. Dependiendo de los requerimientos de cada diseño de horno solar, se decide cuál es la geometría óptima para ese horno en específico (figura 1.5).



Figura 1.5 Concentrador solar, con motor Stirling montado en su foco.



Finalmente, en la zona focal del concentrador, son instalados los instrumentos necesarios para analizar las características de desempeño del horno en su totalidad. Buscando obtener la potencia y concentración máxima, las curvas de variación de potencia y concentración con respecto a distintas posiciones del sol y la eficiencia del sistema.

En la mayoría de los casos a nivel mundial, cuando hablamos de hornos solares de alto flujo, nos encontramos con sistemas de gran tamaño, donde los elementos de concentración deben ser alojados dentro de edificios, así como también deben contar con uno o más helióstatos para lograr altos niveles de potencia. Lo que lógicamente, convierte a estos sistemas en algo de alto costo tanto en instalación como en operación.

Para este trabajo de tesis, se ha optado por elaborar un horno solar de alto flujo, pero a magnitudes de baja escala, buscando con esto facilitar los trabajos de experimentación con concentración solar y química solar, mediante la reducción de costos de componentes y materiales de trabajo.

## **1.1 Objetivo**

Establecer una metodología para el diseño y caracterización de un horno de concentración solar centrado en el eje, con una etapa de concentración y cuya potencia máxima de trabajo sea de 1kW.

### **1.1.1 Objetivos particulares**

- Estudiar mediante trazado de rayos, el sistema óptico que conformará el horno.
- Simular el comportamiento óptico del sistema para diferentes días del año.
- Construir y caracterizar un heliostato de aplicación especial para el horno.
- Adaptar el sistema de control de helióstatos utilizado en el CPH, para operar con el horno.
- Diseñar y construir un concentrador solar.

- Construir un receptor para instalarse en el área de focal del horno solar para caracterizar el sistema en términos de:
  - Eficiencia óptica del sistema
  - Precisión del seguimiento en el sistema
  - Nivel máximo de concentración
  - Generación de una curva de calentamiento de un receptor determinado
  - Potencia del horno solar

## CAPÍTULO 2

### 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Cuando utilizamos la energía solar térmica para diversas aplicaciones, como se ha mencionado, los métodos de aprovechamiento se dividen en dos grandes grupos: con concentración y sin concentración de la luz (figura 2.1).



Figura 2.1 Colector solar sin concentración para calentamiento de agua.

Para este trabajo, las aplicaciones sin concentración de luz no serán de relevancia; pero es de nuestro interés conocer el estado actual de avance en el campo de tecnología de aprovechamiento solar con concentración, específicamente la que se refiere a los hornos de alta concentración.

La razón por la cual es de gran utilidad el concentrar la radiación proveniente del sol, es que podemos dirigir una alta cantidad de energía hacia una zona o región de nuestro interés y poder así utilizar esta energía para obtener altas temperaturas, útil en una numerosa cantidad de aplicaciones.

Generalmente, la energía solar ha sido siempre vista como la alternativa para suplir la demanda de energía que actualmente es cubierta por los combustibles fósiles, para la generación de electricidad. Sin embargo, la energía solar nos da la ventaja de que podemos utilizarla también para otros fines, principalmente los que requieren una alta cantidad de energía en forma de calor.

Utilizando una combinación de estos dos principios, el de un heliostato y el de una lente, podemos obtener lo que es conocido como un horno solar. De entre los cuales existen algunas variantes que serán revisadas más adelante.

Un horno solar es básicamente un dispositivo que utiliza la radiación solar como principal o única fuente de calor, y aprovechar esta energía calorífica para elevar la temperatura de un recinto u objeto. Existen los de alto flujo radiativo por concentración y los que no concentran la radiación, pero estos últimos están limitados para aplicaciones de relativamente baja temperatura, ya sea para cocción de alimentos, calentamiento de agua o procesos químicos de baja temperatura.

Los hornos que funcionan con alto flujo radiativo pueden variar un poco en su arreglo óptico, pero generalmente el principio de funcionamiento se mantiene igual entre todos.

Debido a que en todos los hornos solares, lo que más nos interesa, o bien, la parte donde se encuentra la aplicación final del horno es en la zona focal (sin importar cuántas etapas de concentración o redirección de rayos de luz se presenten), que es una zona donde

preferimos que todo se mantenga fijo, sin mayores perturbaciones de ningún tipo, por lo que la gran mayoría de diseños de hornos solares mantienen la parte de recepción de radiación concentrada, fija en algún lugar, normalmente dentro de un edificio o recinto de gran tamaño.

Para lograr que la zona focal se mantenga fija, es necesario que las superficies reflectivas concentradoras se mantengan fijas también. Por lo tanto, como la fuente de calor que es el sol, presenta durante el día un movimiento uniforme a lo largo de su trayectoria, se debe utilizar una superficie reflectiva móvil que se encargará de dirigir en todo momento, la radiación solar hacia una misma región.

Un horno solar por lo tanto, tiene como principales componentes, un heliostato y un concentrador. Existen en la actualidad varios diseños de hornos solares, de entre los cuales varían la cantidad de energía que entregan y la calidad, esto es, capacidad en potencia máxima y el nivel de concentración de la radiación. Dependiendo de las características de cada horno, es o no necesario utilizar más de un heliostato y/o más de un concentrador. Y es común también utilizar como elemento regulador de la cantidad de calor incidente sobre el concentrador, un atenuador; el cual es básicamente una persiana que, dependiendo de su posición impide que la totalidad o solamente una parte de la radiación llegue hacia el concentrador (figura 2.2).



Figura 2.2 A la derecha en la imagen se observa una persiana que regula la cantidad de radiación que se envía al concentrador.

El trabajo con la concentración solar es relativamente joven en el campo científico, fue apenas en la década de los 50 cuando se publicó una serie de patentes sobre varios sistemas para aplicaciones de energía solar concentrada. Primeramente se trabajó en lo que desde entonces se llamó heliostato; dispositivo que tiene la finalidad de dirigir a una dirección fija un haz de luz, en particular, proveniente del sol. Logrando esto mediante el uso de actuadores hidráulicos, que permitían mover una superficie reflectiva plana en dos ejes [3].

Posteriormente a esto, se patentó un arreglo de espejos compuestos de gran área para obtener concentración solar. Los cuales consistían en una serie de espejos

parabólicos de varios cientos de metros cuadrados instalados en un marco metálico fijo, los cuales serían planos en un inicio, pero con un sistema de ajuste mecánico, estos podrían tomar la forma cóncava de un paraboloide para concentrar cada uno los rayos del sol [4].

Fue también en esta época cuando se publicó la patente de un dispositivo que funcionaría como horno solar de cavidad, la cual opera girando y recibiendo a su vez la luz concentrada. Este horno se presentaba como un sistema aislado, para producir material de forma segura y continua [5].

Es lógico pensar que las actividades de campo, habían iniciado con anterioridad a estas publicaciones de patentes. Fue en 1946, en Bellevue-Meudon, cuando Trombe aplicó la luz de sol concentrada para calentar materiales hasta los 3300°C. Después en 1949, gracias al apoyo de grupos militares y científicos, esta corriente de investigaciones tuvo un lugar para establecer lo que sería la primera plataforma para investigaciones con energía solar concentrada en Mont-Louis, Francia, donde, así como sus patentes lo describen, fue instalado un horno solar de alta densidad de radiación. Conformado por un helióstato de 144m<sup>2</sup>, un concentrador parabólico de más de 9 metros de diámetro y un horno como receptor, estas instalaciones tenían una capacidad de 50kW. Seguido a esto, después de casi 20 años, Trombe y su equipo pudieron construir lo que es hasta ahora el horno solar más grande del mundo, en Odeillo, Francia. Con 63 helióstatos y un concentrador de más de 11,000 espejos, este horno tiene la capacidad de 1,000kW [6].

A nivel mundial es posible encontrar diversos hornos solares de alto flujo radiativo. Uno de los más importantes debido a sus antecedentes y capacidad energética, es el mencionado en el párrafo anterior. Con una potencia térmica de 1MW es en la actualidad el horno solar más potente del mundo (figura 2.3). Este horno utiliza 63 helióstatos que envían la radiación solar hacia un edificio cuyo muro tiene una superficie

reflectiva con curvatura cóncava, logrando este redirigir los rayos de luz hacia un receptor ubicado de frente al muro concentrador.[7]



Figura 2.3 Horno solar ubicado en Odeillo, Francia.

Seguido a este, a una menor escala se encuentra en Suiza, con una potencia de 40kW, se encuentra el horno del Instituto Paul Scherrer (figura 2.4)[8]. Así como también podemos mencionar el horno ubicado en los Laboratorios Nacionales Sandia en Estados Unidos de América, el cual entrega una potencia máxima de 16kW (figura 2.5)[9]. Y en la Plataforma Solar de Almería se cuenta con un horno solar de 68kW (figura 2.6)[10].





Figura 2.4 Horno solar ubicado en el Instituto Paul Scherrer, Suiza.



Figura 2.5 Horno solar ubicado en los Laboratorios Nacionales Sandia, Estados Unidos.



Figura 2.6 Horno solar ubicado en la Plataforma Solar de Almería, España.

Es importante también mencionar para este trabajo en especial, el horno de alto flujo radiativo de reciente creación que forma parte del Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Instalado en el Instituto de Energías Renovables en Temixco, Morelos. El cual es único en Latinoamérica y es capaz de desarrollar una potencia máxima de 30kW y alcanzar niveles de concentración de hasta 18,000 soles (figura 2.7)[11].



Figura 2. 7 Horno solar del Instituto de Energías Renovables, México.

Los hornos anteriormente mencionados se constituyen básicamente de los mismos componentes, presentando variaciones como el tamaño y número de helióstatos que captan y dirigen la radiación; y en el tamaño, tipo, forma y número de concentradores. Los mencionados anteriormente en principio cuentan sólo con una etapa de concentración y un receptor central, pero el horno del Instituto DLR en Alemania posee un sistema con receptor fuera de eje (figura 2.8)[12], ubicándose este dentro de un edificio adjunto al edificio que aloja al concentrador. Otra variación que encontramos en el acomodo de los componentes ópticos, se puede apreciar en el horno ubicado en el Instituto Weizmann, en Israel. En el cual se tiene un campo de 64 helióstatos, los cuales apuntan a una primera etapa de concentración con curvatura hiperbólica, montada sobre una torre. Este concentrador envía la radiación hacia un segundo concentrador ubicado en la parte baja de la torre, pudiendo este horno entregar 0.5MW y una concentración de 4000 soles (figura 2.9)[13].



Figura 2.8 Horno solar del Instituto DLR, Alemania.



Figura 2.9 Concentrador hiperbólico del horno solar en el Instituto Weizmann, Israel.

Los concentradores en los hornos solares son el elemento de mayor importancia, ya que es en esta etapa del sistema óptico donde los detalles constructivos y de diseño se hacen más notorios en el resultado final en cuanto al desempeño. Ya que, aun teniendo un horno solar con un alto nivel de captación solar, pero con una mala calidad en la óptica del concentrador, los niveles de concentración de la radiación serán pobres, y no se tendrá un alto flujo de energía en un área pequeña, perjudicando el objetivo principal del horno, el cual es aumentar el máximo posible la densidad de radiación en un área (pequeña) de interés para tener capacidad de obtener altas temperaturas.

Actualmente existen diversas líneas de investigación que trabajan con hornos solares; las principales aplicaciones de estos se llevan a cabo en tratamientos térmicos superficiales de materiales expuestos a altos flujos de calor, generación de energía térmica para procesos industriales, síntesis de combustibles solares mediante ciclos termoquímicos, tratamientos de purificación de desechos contaminados, etc. [14].

Los hornos solares son dispositivos que están siendo utilizados para experimentación, como un medio que permite aplicar elevadas cantidades de energía calorífica sobre los materiales, pero a la vez que está trabajando con energía renovable, que es la solar.

Como se ha mencionado anteriormente, los principios de operación de un horno y sus elementos, son muy similares entre un diseño y otro, por lo que en la metodología de diseño y de caracterización, se puede esperar que también presenten similitudes.

En 1957 se publica un artículo que hace referencia a los problemas de diseño presentes en un horno solar, lo que da pie a las siguientes publicaciones relacionadas al desarrollo de esta tecnología[15].

En 1958 fue publicado un escrito relativo a las consideraciones que se debían tomar en cuenta en lo que respecta al diseño de hornos solares, en base a dimensionamiento y errores ópticos resultantes de diferentes combinaciones [16].

En ese año también, se realizó un primer acercamiento al establecimiento de un procedimiento para caracterizar los resultados de experimentos en diferentes materiales, así como también algunos de los aspectos de un horno solar de alto flujo radiativo [17].

Ya en 1964 se comienzan a describir las etapas de diseño de un horno en conjunto, lo cual va estableciendo algunos parámetros que ayudan a definir los sistemas ópticos de concentración en futuros trabajos[18].

Años después de registrar su patente del horno solar en Odeillo, Trombe publica un artículo con los aspectos técnicos de diseño y desempeño del horno de 1MW [19].

Es en el año de 1991 cuando se publica de manera general, la caracterización de un horno solar operativo [20]. Este trabajo de caracterización se realiza sobre un horno con dos etapas de concentración y es un sistema óptico fuera de eje.

En 1996, en el instituto DLR en Alemania, fue publicada la forma en que se caracterizó el horno solar que opera en dicha institución [21], donde se muestra un método para cuantificar, tanto la potencia como el factor de concentración del sistema, utilizando un método indirecto de comparación. De igual manera, en esta publicación se mencionan algunos de los parámetros aplicados para tomar decisiones en cuanto al arreglo óptico del horno.

Posteriormente en 1997, es en este mismo horno donde se llevan a cabo pruebas para analizar la distribución espectral de la radiación concentrada[22], los resultados de esta prueba tienen gran importancia para el estudio de reacciones fotoquímicas.

En 1999 se publica un artículo donde se detallan los aspectos de diseño ingenieril y de los aspectos de desempeño de un nuevo horno solar instalado en el Instituto Paul Scherrer[23].

Lo que se tiene como planteamiento para el presente trabajo es elaborar un horno solar mediante el desarrollo de una metodología por establecer; el cual es un elemento de experimentación de gran importancia para cualquier centro o institución de investigación

en energía solar. Ya que actualmente una línea de que está tomando gran importancia en cuanto a desarrollo tecnológico, es la química solar; con esta será posible desarrollar nuevos métodos para sintetizar materiales a altas temperaturas, así como también abrirá paso a la generación de combustibles generados de manera sustentable, utilizando la radiación solar concentrada.

Poniendo especial atención en las cantidades de potencia máxima de los hornos que operan a nivel mundial, podemos observar que debido a la cantidad de energía solar con la que trabajan, las magnitudes de superficies de captación deben ser del orden de varias decenas de metros cuadrados, considerando que del sol se recibe 1kW de energía por cada metro cuadrado[24].

En este trabajo de tesis, se toma en cuenta lo realizado anteriormente por otros investigadores e ingenieros en cuanto al desarrollo de sistemas solares de alta concentración, para que en base a lo ya obtenido, se pueda establecer una metodología de diseño y caracterización de estos sistemas, en base a parámetros básicos de funcionamiento de un horno solar. Mejorando en la medida de lo posible, cualquiera de los aspectos técnicos que hayan sido considerados con anterioridad como campos potenciales de mejoramiento u optimización. Como pueden ser los elementos de control automático del heliostato del horno, los materiales de las superficies reflectivas que conforman el concentrador, los procesos de fabricación de piezas de alta precisión, o bien, en la constitución de un horno solar que represente una mejor relación entre el costo – beneficio como elemento de experimentación en el campo de la energía solar.

## **2.1 Justificación**

Por lo anteriormente mencionado, en este trabajo de tesis se buscará cubrir un nicho de oportunidad que va acorde con la tendencia mundial del uso de elementos de captación solar de baja magnitud, lo cual presenta una serie de ventajas frente a los sistemas de gran tamaño.

Actualmente en la Universidad de Sonora, se encuentra en operación la Plataforma Solar de Hermosillo, en la cual se ubica el Campo de Pruebas de Helióstatos, que forma parte del denominado Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS); proyecto conformado en colaboración por diversas instituciones académicas y de investigación de México, entre ellas la UNAM, que cuenta con un horno solar de alto flujo radiativo en el Instituto de Energías Renovables (IER); por lo que gracias a este trabajo en conjunto es posible compartir aspectos importantes de la experiencia que ellos han obtenido con la construcción y operación de su horno.

Es en el Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH) donde operará el horno solar construido en este trabajo, ya que de esta manera será posible aprovechar tanto las instalaciones existentes con las que se cuenta, dedicadas a la investigación de sistemas de captación solar; como de la experiencia del personal especializado que ahí labora.

La cantidad de energía solar disponible en la región donde se encuentra el CPH, fue el principal factor para decidir la ubicación de este, ya que en el noroeste de México se cuenta con los niveles más altos de irradiación global anual en todo el mundo. Esto se puede observar en la figura 2.10.



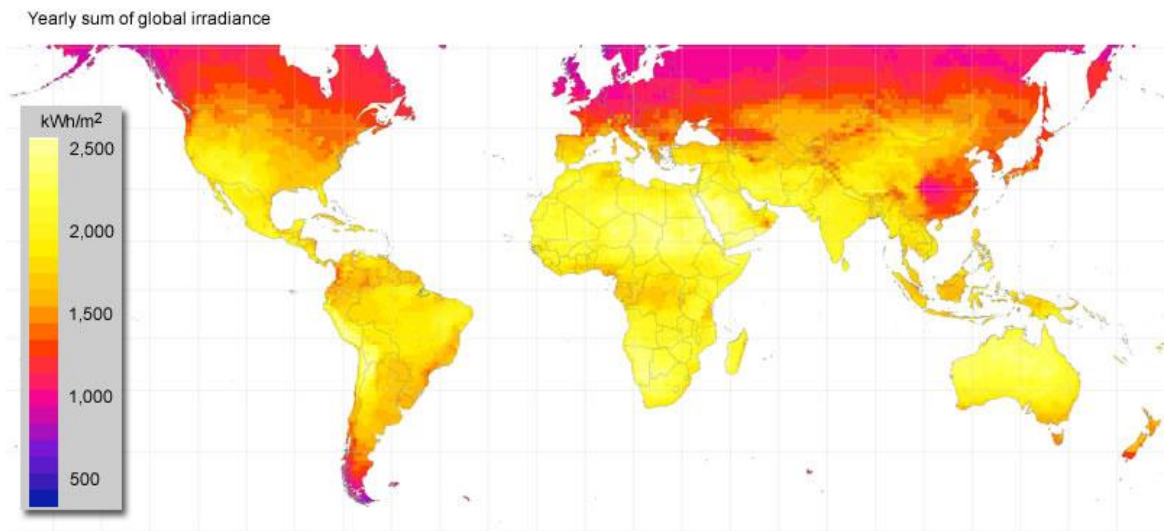


Figura 2.10 Mapa del modelo mundial de irradiación global solar anual[25].

Este tipo de irradiación es la suma de la difusa y la directa; en lo que se refiere la primera, está el resultado de la radiación ambiental dispersa, que finalmente incide en un punto; y la segunda a la radiación proveniente del sol que no es desviada en su trayectoria e incide directamente sobre un punto.

Para los sistemas de energía solar concentrada, el tipo de radiación que es realmente aprovechable es la radiación directa normal (RDN), la cual es la misma radiación directa mencionada anteriormente, pero recibida en dirección paralela a la normal de alguna superficie de captación. En la figura 2.11 se muestra el mapa de RDN para México.

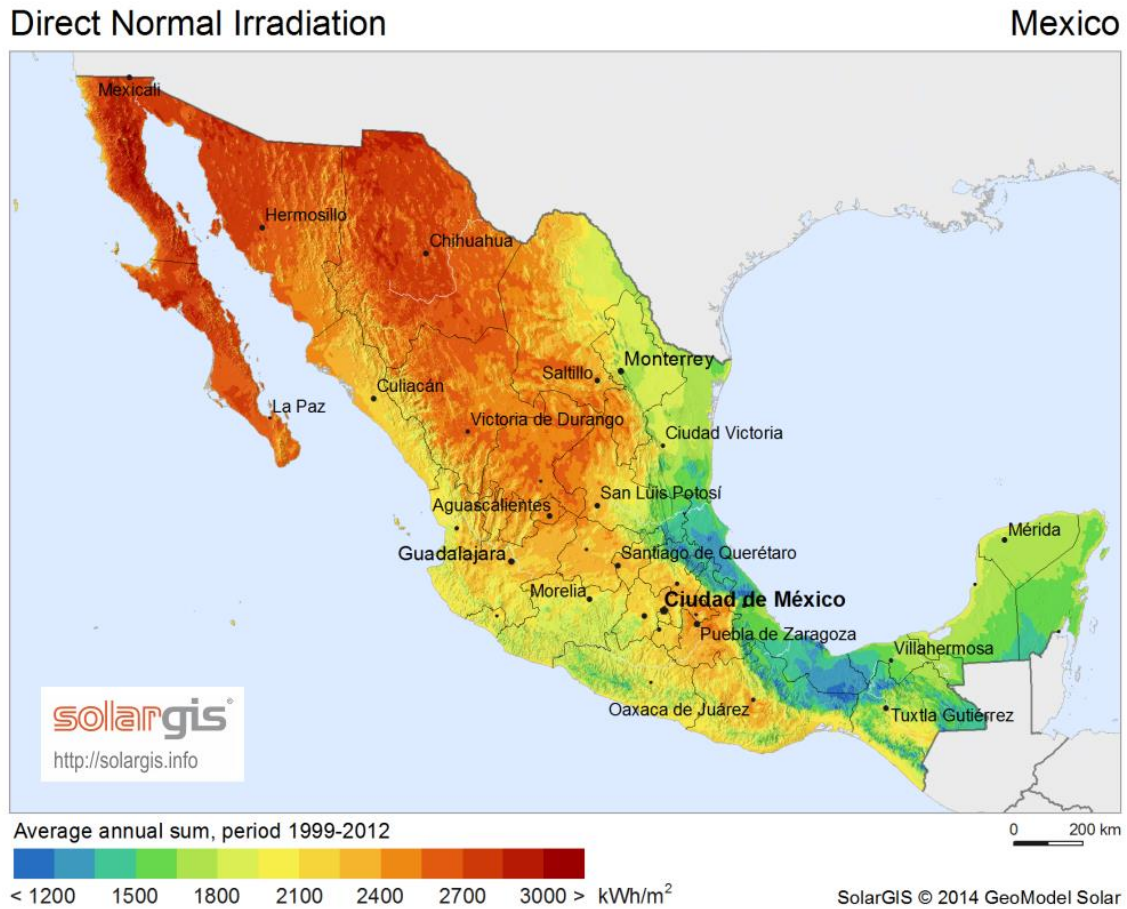


Figura 2.11 Mapa del modelo de RDN disponible en el país [26].

Es de gran interés para este trabajo, lograr la operación de un horno solar de baja potencia, pero de gran calidad óptica, ya que de esta manera, los métodos de caracterización y operatividad de los hornos de alto flujo radiativo, podrán ser aplicados en un sistema más versátil en cuanto a instalación, fabricación y operación.

En el horno solar de este trabajo, será entonces posible realizar pruebas de química solar, como los efectuados en las demás instalaciones de este tipo alrededor del mundo, como son estudios en materiales sometidos a altos niveles de radiación y/o reacciones químicas a alta temperatura.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, los hornos actualmente son construidos para operar con concentración o sin concentración de la radiación solar. La diferencia entre estos dos tipos de hornos es la temperatura con la que se requiere trabajar; ya que cuando no se utiliza la concentración, las temperaturas de operación son normalmente menores de 100°C, a diferencia de los hornos con altos niveles de concentración, donde a la fecha existen registros de haberse logrado superar los 3400°C[27].

Es por esto que las aplicaciones para ambos tipos de hornos son en extremo distintas. Así como lo es su nivel de complejidad en cuanto a diseño y a construcción.

En este trabajo de tesis, se trabajará con un horno solar de alta concentración, es decir, de alto flujo radiativo. Por lo que es de gran importancia aprovechar y comparar los avances académicos y tecnológicos que a la fecha se han logrado en lo relativo a los hornos de alto flujo.

## CAPÍTULO 3

### 3. TEORÍA DE LOS HORNOS SOLARES

#### 3.1 Conceptos generales

En términos generales, un horno solar está compuesto por tres elementos:

- Helióstato
- Concentrador
- Receptor

La forma en que son comúnmente construidos, es posicionando al concentrador y receptor en un recinto fijo, y ubicando al helióstato en un punto fuera de ese recinto, recibiendo la radiación solar y redirigiéndola hacia el concentrador. De esta manera, los elementos que de cierta forma son los más delicados en cuanto a materiales y estructuras, se protegen del ambiente. Un arreglo óptico general de un horno como se menciona, se muestra en la figura 3.1, donde es posible observar los tres elementos.

El concepto de funcionamiento de un horno solar se basa en redireccionar, cuantas veces sea necesario, la radiación solar hasta lograr altos niveles de flujo energético en un área muy reducida. Es decir que, mediante el empleo de componentes de reflexión óptica, el área transversal al flujo de los rayos del sol, va disminuyendo progresivamente; de manera que una determinada cantidad de radiación, que inicialmente fue recibida en un área de gran magnitud, fluirá en un torrente de energía altamente denso. Dándole al horno la capacidad de aprovechar, de forma casi puntual, la energía solar que inicialmente incide sobre la atmósfera de manera “dispersa”.

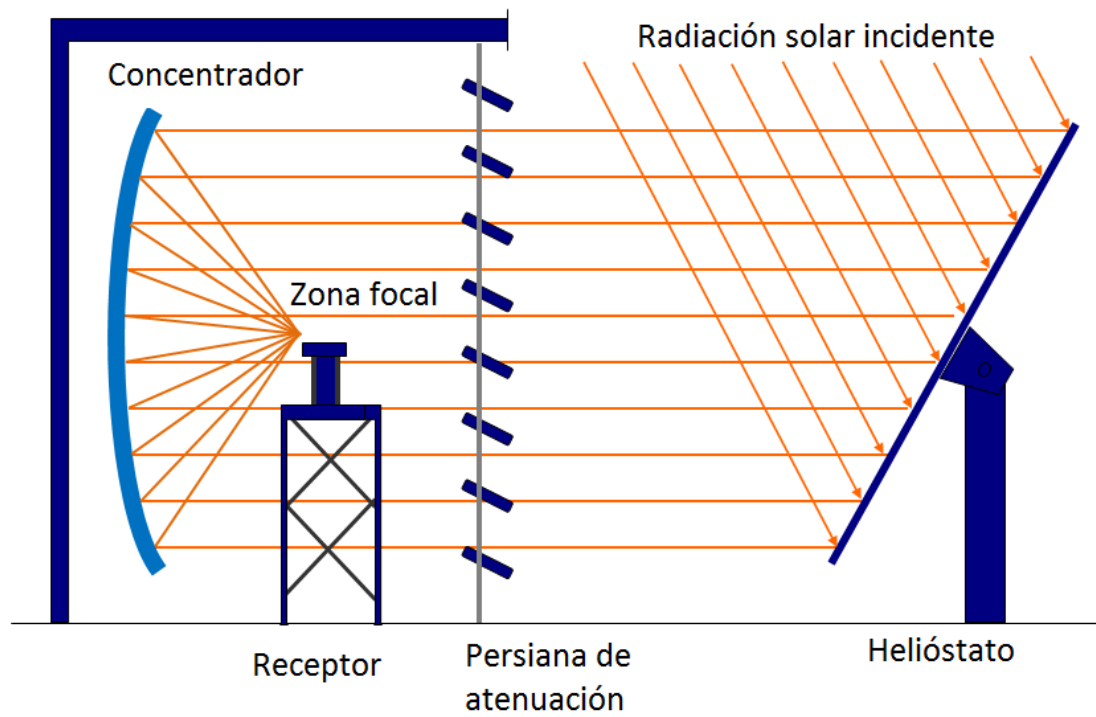


Figura 3.1 Esquema del arreglo de elementos ópticos que conforman un horno solar

La relación que define el nivel de concentración en un sistema óptico se da por el cociente del área de captación y el área de apertura (ecuación 3.1).

$$C = \frac{A_c}{A_r} \quad (3.1)$$

En un sistema de aprovechamiento solar, un mayor factor de concentración se traduce en la obtención de mayor temperatura de trabajo. Ya que una lo que se busca es redirigir la potencia que se recibe en el área de captación  $A_c$ , hacia un área de recepción o aprovechamiento  $A_r$ , la cual al ser de menor magnitud, tendrá una densidad energética mayor.

Para fines de diseño, la potencia proveniente del sol que se recibe de manera perpendicular a la superficie terrestre, denominada irradiancia  $G$ , se establece con una magnitud de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . Por lo tanto, si se desea que un horno solar entregue una determinada cantidad de potencia en el receptor, se debe obtener esta del valor de irradiancia  $G$  determinada.

$$P = GA_c \quad (3.2)$$

Entonces, para obtener la densidad de flujo radiativo en un receptor, se debe relacionar el área del receptor  $A_r$  con la potencia obtenida en  $A_c$ .

$$q = \frac{P}{A_c} \quad (3.3)$$

Así, sustituyendo la potencia de la ecuación 3.2 en la ecuación 3.3, tenemos que

$$q = CG \quad (3.4)$$

Debido a que se debe redireccionar la luz del sol en distintas direcciones, haciéndola incidir sobre una o varias superficies reflectivas para lograr concentrarla, la estimación de la ecuación 3.4 se ve afectada por las características de dichas superficies reflectivas. Influye principalmente la reflectancia  $\rho$ , propiedad que se refiere a la cantidad de radiación que un material es capaz de reflejar sin absorberla como calor (absortancia  $\alpha$ ), o bien, dejarla pasar a través de sí mismo (transmitancia  $\tau$ ). Otra característica de un sistema óptico de concentración que afecta en la cantidad de calor que llega a un receptor es el factor de desbordamiento  $\gamma$ , que se refiere a la cantidad de radiación que no incide en el receptor, debido a errores ópticos en las superficies reflectivas. Por lo tanto, estos factores se deben considerar para obtener una estimación más acertada del flujo de calor que incidirá en un receptor determinado (ecuación 3.5).

$$q = \rho\gamma CG \quad (3.5)$$

La necesidad de incrementar el factor de concentración, como se dijo anteriormente, está relacionada con la necesidad de obtener altas temperaturas. Esto se debe a que, para aprovechar la energía solar térmica, esta se debe transformar por distintos medios en una energía útil mediante el uso de máquinas térmicas, donde el ciclo de Carnot dicta la eficiencia máxima posible en base a las temperaturas de trabajo; siendo mayor la eficiencia cuanto mayor sea la temperatura de entrada al ciclo termodinámico.

En el caso de un horno solar, normalmente la energía se aprovecha directamente en una absorción de la radiación en un receptor o en un reactor. Por lo que para este caso, las altas temperaturas, sirven para fines distintos a los de otros sistemas solares térmicos, por lo que no se requiere una conversión de la energía en máquinas térmicas.

Una de las características más importantes con las que debe contar un horno solar, es que debe operar de manera continua, durante un determinado periodo de tiempo, ya que de otra manera su efectividad estaría limitada a un instante en el que la posición del sol coincidiera con el acomodo de los componentes ópticos. Esta capacidad de funcionamiento continuo, le da a un horno un grado de complejidad más elevado, ya que

no sólo funcionará con la reflexión óptica, sino que además debe contar con sistemas mecánicos, eléctricos y de control automático para lograr coordinar su posición (o la de ciertos componentes) con la ubicación del Sol.

Una forma muy simple de horno solar podría ser ejemplificada con una lupa sostenida por una persona, apuntando la zona focal en un punto fijo. El movimiento del Sol es muy lento como para que quien sostiene la lupa pueda notar que debe girar su mano para no modificar la ubicación donde se está concentrando la luz solar. Este ejemplo sería como un horno con un concentrador móvil, con una sola etapa óptica, en la cual el elemento que sigue al Sol, hace también la función de concentrar la luz solar.

En las instalaciones de hornos solares, realmente los concentradores se mantienen fijos, ya que se podría decir que son elementos muy delicados, de gran tamaño y cuyo correcto funcionamiento depende en gran manera de su integridad estructural. Y la forma en que se consigue una recepción continua de la energía solar, es con el empleo de uno o más helióstatos, cuyo espejo plano móvil envía hacia un concentrador, la radiación en una sola dirección, es decir, las líneas de flujo de la luz son paralelas entre sí, y por lo tanto no existe la concentración hasta este punto.

### **3.1.1 Helióstato**

El significado etimológico de helióstato, proviene de la combinación de palabras griegas, *heliostato*, haciendo la primera palabra referencia al dios griego del Sol, y la segunda hace mención sobre algo que se encuentra fijo. Entonces, un helióstato se puede entender como un dispositivo cuya función es la de mantener inmóvil la luz solar sobre un lugar en el espacio.

Como es bien sabido, el sol recorre un trayecto por el cielo, cuyo comportamiento es posible predecir mediante ecuaciones de aproximación; y utilizando los sistemas adecuados, un helióstato es capaz de realizar dos tipos de movimientos para coordinar su



posición con respecto al sol y así lograr su objetivo, que es el de proyectar la luz en una misma zona a lo largo de todo el trayecto del Sol por el cielo durante el día. Dichos movimientos son de tipo rotativo, cuyos ejes son denominados, eje de elevación y eje acimutal.

El eje acimutal es la línea recta cuyo origen está en un punto determinado en la superficie terrestre y a su vez pasa por el centro geométrico de la Tierra. Esta línea representa el eje sobre el cual un helióstato gira para seguir el trayecto que el Sol realiza en un plano horizontal (figura 3.2).

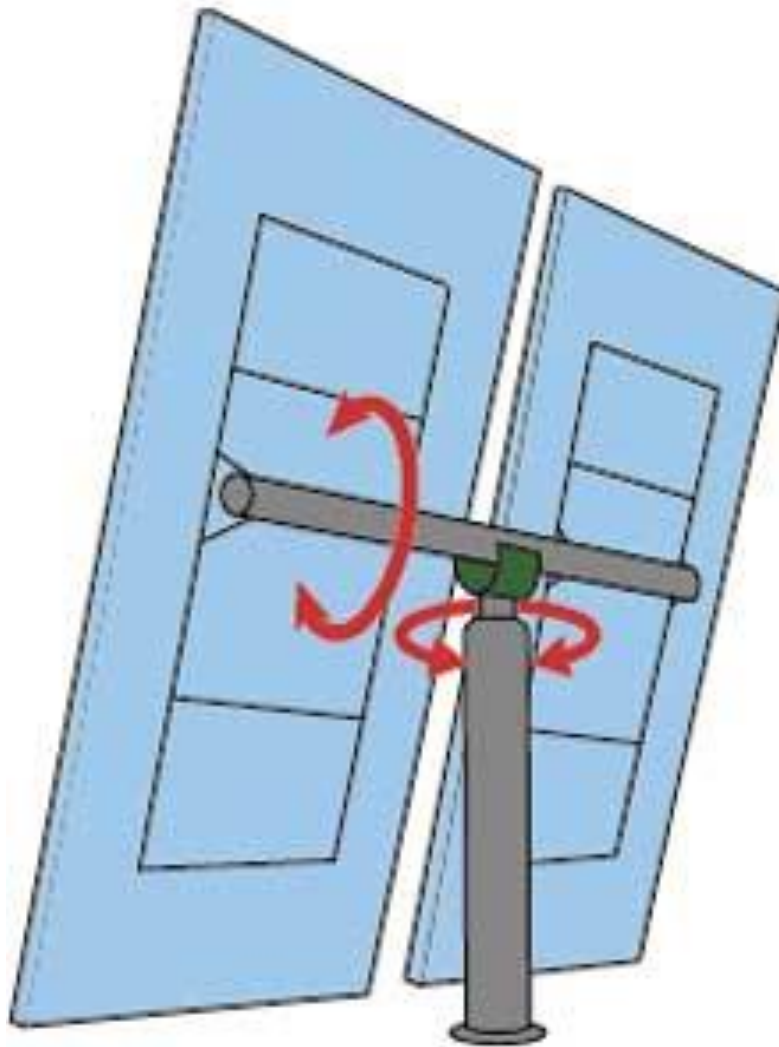


Figura 3.2 Movimiento de un helióstato en 2 ejes

El eje de elevación es una línea perpendicular al eje acimutal. Pero con la particularidad de que el eje de elevación presenta una variación continua en su dirección durante el día, debido al cambio de posición del Sol sobre el plano horizontal.

El seguimiento solar está definido como el conjunto de movimientos que realiza un dispositivo, para mantener la línea normal de una superficie (en este caso de un receptor solar) apuntando de forma directa al centro del círculo solar, a lo largo del día. Un helióstato se podría ver como una variante de un seguidor solar. Con la diferencia de que por su objetivo de trabajo, el simple hecho de seguir al Sol no satisface la función de fijar la proyección de luz en una región fija.

Para poder mantener fija la mancha solar en un mismo punto, un helióstato debe controlar su posición con respecto al Sol, para así colocar la normal de su superficie receptora en los ángulos necesarios con respecto a los ejes de elevación y acimut. Para este posicionamiento continuo que debe poseer un helióstato, entran en juego, su ubicación geográfica, como son latitud, altitud y elevación, de sus ejes de giro de los mecanismos, así como también del objetivo a donde se desea proyectar la mancha solar; y por supuesto, el día del año en el cual se está realizando dicho posicionamiento. Con estos datos, el sistema de control puede calcular la posición necesaria para la inclinación en ambos ejes de giro del helióstato, activando continuamente los mecanismos de movimiento.

Existe una gran variedad de opciones en cuanto a sistemas de movimiento que pueden cumplir de manera satisfactoria la función de mover un helióstato. En un principio, la opción más utilizada consistía en acoplar un tren de engranajes para reducción de velocidad y aumento del torque de salida. Por sus características, los engranes más utilizados en los helióstatos han sido del tipo tornillo sinfín y corona, ya que es posible obtener una gran amplificación de torque en un espacio muy reducido; así como también, este juego de engranes brinda un freno al movimiento cuando la fuerza de entrada se invierte, es decir, cuando el eje de salida intenta accionar los mecanismos de

seguimiento, la geometría de los engranes no permite que el movimiento sea transmitido hacia el motor.

Es posible también utilizar trenes de engranes de otro tipo, pero para lograr la misma reducción de velocidad de giro, el volumen ocupado por estos trenes sería muy grande en comparación con el del de tornillo sinfín y corona. Por lo que ha sido común encontrar también sistemas combinados, donde parte del movimiento se realiza con un tren de engranajes y otra con actuadores lineales de tornillo, cables de acero o cadenas. Los sistemas oleo-hidráulicos han sido utilizados pero en menor escala, presentando estos buenos resultados en cuanto al uso eficiente de espacio y buena precisión.

Básicamente cualquier mecanismo que logre girar de manera controlada la estructura de un heliostato, puede considerarse como útil para la tarea. Y no existen criterios generales para descartar algún tipo de arreglo mecánico.

### **3.1.2 Errores en los heliostatos**

Cuando se está buscando proyectar la mancha solar en un punto, es necesario considerar que en los heliostatos se presentarán errores, tanto de control, mecánicos y estructurales. Para lograr obtener el mejor resultado en cuanto a precisión de apuntamiento, todos estos errores deben de ser cuantificados por separado. Ya que una combinación de ellos puede llevar a resultados poco predecibles, donde la ponderación de estos es difícil o prácticamente imposible de obtener de un error final resultante (diagrama 3.1).

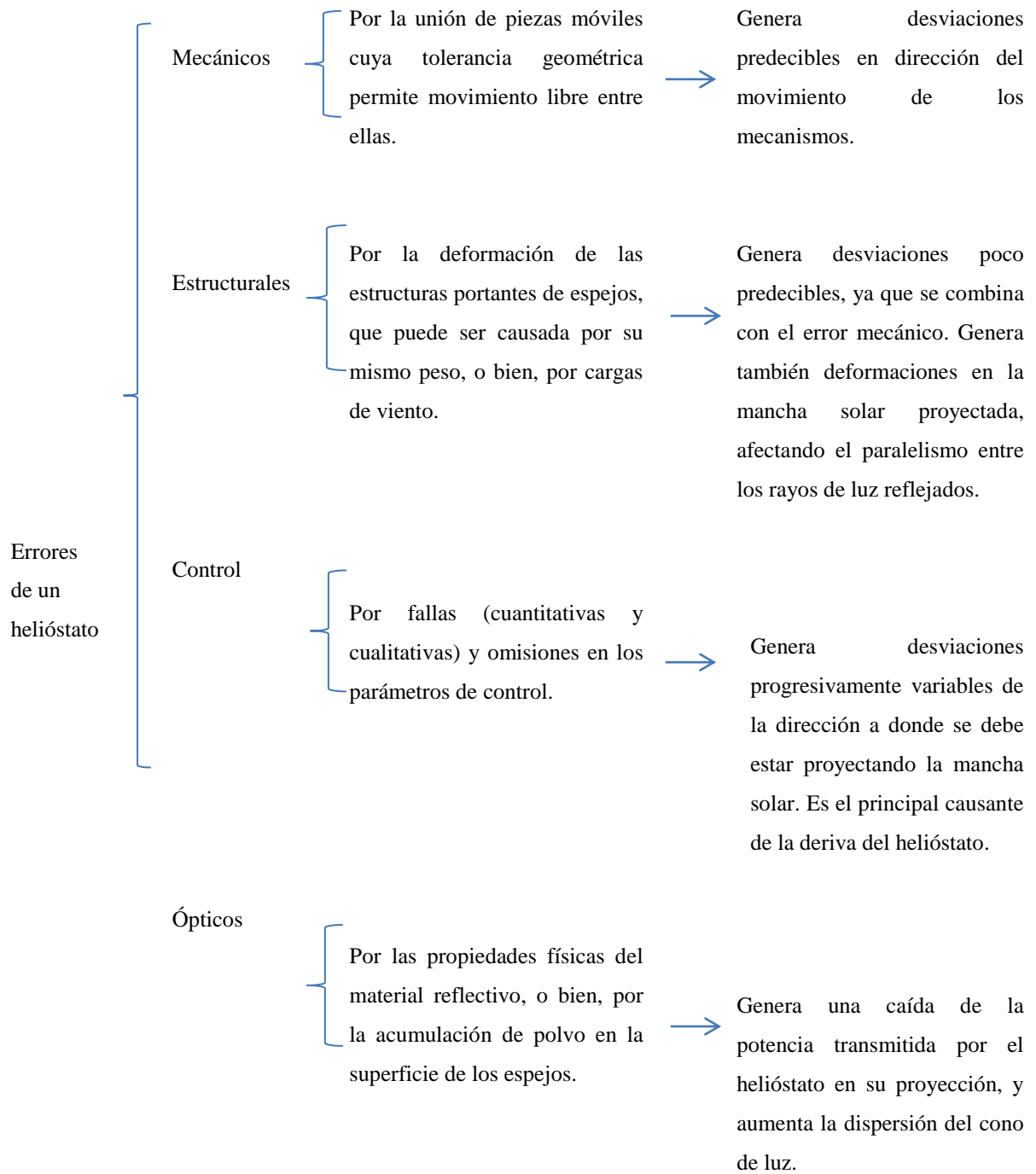


Diagrama 3.1 Esquema de los tipos de errores presentes en un heliostato.

El error mecánico proviene principalmente de las tolerancias geométricas entre las piezas que se encuentran en contacto y conforman los sistemas de movimiento de un helióstato. Estas tolerancias o imprecisiones provienen del proceso de fabricación de las diversas piezas móviles, lo cual es una característica que puede ser disminuida, hasta lograr espacios muy pequeños entre las piezas. El resultado de tener tolerancias muy pequeñas es que tendremos mecanismos más rígidos y con mejor precisión en el movimiento; pero el lograr esto tiene su costo en fabricación, y debe ser evaluado hasta dónde es conveniente llegar cuando se busca tener componentes de alta precisión.

El tener piezas cuya tolerancia de contacto sea más grande, puede ser también una situación deseada, ya que el ensamblar piezas con dimensiones muy cercanas entre sí, deberá ser un trabajo más delicado, lo que implica mayores costos por tiempo y labores de ensamble, y no siempre se requerirá esta característica para ciertas partes de los mecanismos.

Cuando se tiene un conjunto de partes mecánicas ensambladas, existirá entre ellas un espacio para hacer contacto, esta dimensión de espacio entre piezas se llama juego, el cual produce desplazamientos muchas veces indeseable en los mecanismos. Este movimiento relativo entre piezas es el factor causante del error mecánico en un helióstato y varía dependiendo del mecanismo en cuestión que se encuentre moviendo la estructura.

El error por estructura presente en un helióstato tiene su origen en la deformación de los componentes que conforman la armadura que une los mecanismos de movimiento con la o las superficies reflectivas que posee el helióstato. Esta deformación se da por dos razones principales, una es por la fuerza gravitacional deformando las partes por su propio peso, y la otra se da por fuerzas externas provenientes de corrientes de viento que fluyen de tal manera que ejercen una presión sobre la superficie receptora. La deformación por el peso de las piezas varía con respecto a la posición del helióstato. La deformación por fuerzas del viento debe ser tratada como una variable de diseño no sólo

de la estructura, sino también del mecanismo de movimiento. Ambas deformaciones pueden ser reducidas hasta un punto que sea económicamente viable para el dispositivo.

Se tiene también el error de control, ya que como se había mencionado anteriormente, la forma en que funcionan los algoritmos de control para posicionamiento de un heliostato, es mediante ecuaciones de aproximación; las cuales son un modelo matemático que predice la posición del Sol para determinados instantes del día y fechas. Estas ecuaciones deben ser, por fines de economía, lo más simple posibles, ya que requieren recursos de cómputo para procesamiento, y el trabajar con modelos muy complejos, nos entregarán alta precisión, pero necesitarán hardware más potente para tener la capacidad de procesar muchos datos en lapsos cortos de tiempo, lo que se traduce en altos costos en los sistemas de control.

Un algoritmo de control que contenga una mayor cantidad de parámetros, tendrá en general un mejor resultado de salida, pero aun así, existen variables que son difíciles de detectar, como podría ser una mala instalación (desviación de la perpendicularidad) de la base del heliostato, un incorrecto dimensionamiento en alguna de las partes del mecanismo, o bien, un erróneo levantamiento de las ubicaciones geográficas ya sean del heliostato o del objetivo de apuntamiento.

Es por estos tres tipos de errores por los que puede existir imprecisión en la tarea de un heliostato, y como se puede observar, el reducir las magnitudes de estos tiene su costo. En una aplicación como sería una termoeléctrica solar de torre central, los requerimientos de precisión de apuntamiento no serían los mismos que en un horno solar, ya que en la primera, el desviar la proyección de la mancha solar a un metro del objetivo, podría no ser tan relevante en términos de eficiencia, caso contrario sucedería en un horno solar, donde esa misma desviación de un metro puede significar una caída de bastante significativa en la cifra de potencia entregada por el horno.

Al contener los heliostatos espejos para reflexión de la luz, existen también en estos los errores ópticos, cuyo efecto se traducirá no en una desviación de la proyección, sino más bien, en la calidad de esta. Debido a esto tenemos que, aunque un heliostato tenga

buenas cifras en cuestión de precisión de movimiento, pero que tenga alto grado en errores ópticos, efectivamente será capaz de enviar la proyección de luz solar a un punto fijo y mantenerla ahí sin mayor problema, pero la cantidad de energía radiativa que se proyectará en dicho punto, será mucho menor en comparación que la que recibe el helióstato, así como también, la dirección de los rayos de luz se desviará y dispersará lo suficiente como para alterar en gran manera una proyección esperada de un espejo plano.

Estas dos situaciones se deben a los efectos ópticos anteriormente mencionados. En este punto estamos hablando de tres características distintas. Dos de ellas son en sí errores ópticos y la otra se refiere a la eficiencia con la que los materiales del espejo reflejan la radiación que incide sobre su superficie.

Cuando un material es capaz de reflejar, o bien, redirigir el 100% de la energía radiativa que incide sobre su superficie, se dice que dicho material tiene una reflectancia o eficiencia reflectiva máxima, es decir, emite el total de lo que recibe. Como es bien sabido, los casos con eficiencias de 100% son nulos en la naturaleza, por lo que lo lógico es esperar un factor de eficiencia óptica o reflectancia menor que 1. Por lo tanto, cuando se realizan los cálculos para dimensionamiento de componentes, un helióstato que se desee que envíe una determinada cantidad de energía hacia un objetivo, deberá tener las dimensiones aumentadas para contrarrestar el efecto de la reducción de energía de salida en relación con la de entrada.

### **3.1.3 Concentrador**

Como ha sido anteriormente mencionado, una de las características más importantes de un horno solar, es el nivel máximo de concentración que desarrolla. A mayor concentración de la radiación, se tendrá mayor densidad de flujo de energía por área, lo que finalmente se traduce en mayor temperatura en la zona focal. Por lo tanto, como general podemos relacionar que cuando un horno solar posee la capacidad de trabajar

con un alto grado de concentración, mayor posibilidad tendrá de ser utilizado para efectuar trabajos que requieren de muy altas temperaturas.

Un concentrador puede tener cualquier forma geométrica, siempre y cuando cumpla con la función de reducir el área de flujo de la radiación. Ya sea un espejo plano deformado o un arreglo de espejos con forma esférica, pueden cumplir con la función de concentrar, de tal manera que sea proyectada una mancha solar con menor área que la del espejo o espejos iniciales.

Por razones prácticas, la geometría de un concentrador preferentemente tendrá una forma basada en curvas conocidas, que puedan ser modeladas matemáticamente sin mayor complicación; ya que esto permitirá predecir el comportamiento de los rayos que incidan sobre este. Por tal motivo, es común que sean preferidos los concentradores parabólicos o esféricos, ya que en estos se puede conocer con certeza la ubicación exacta del foco y así manipular sobre los requerimientos de un proyecto, las dimensiones, ubicación y posición de los componentes de un concentrador.

Los concentradores padecen de los mismos problemas que los helióstatos en lo que se refiere a la parte óptica. Ya que en ellos también se cuenta con una superficie reflectiva que es propensa a presentar errores micro y macroscópicos, así como también una caída de potencia transmitida por el factor de reflectancia en el material reflectivo. Es por estas razones por lo que los concentradores son normalmente instalados dentro de un recinto y no poseen ningún tipo de movimiento.

Instalando un concentrador en una estructura que no presenta movimiento, hace posible crear elementos altamente rígidos, con el objetivo de mantener la geometría de soporte de un concentrador lo más similar posible al modelo de diseño. Logrando con esto reducir en gran medida los errores macroscópicos de la superficie, llamados errores de pendiente. De igual manera, si el concentrador es instalado dentro de un recinto es posible disminuir dramáticamente las pérdidas de potencia por la caída de reflectancia que se presentaría en la superficie si esta se encontrara a la intemperie. Ya que los



factores climáticos afectan de manera muy notable las características de muchos materiales reflectivos utilizados en los espejos.

A nivel mundial es posible encontrar materiales reflectivos que son de alta eficiencia óptica, cuya calidad en la reflexión de imágenes es altamente nítida. Pero de igual manera como se debe buscar un equilibrio entre el costo y el beneficio, la aplicación dictará si es o no viable utilizar materiales especiales para conseguir un determinado objetivo.

En el caso de un horno solar, tanto en su heliostato como en su concentrador, es posible “amortiguar” las pérdidas por reflexión, aplicando factores de sobredimensionamiento; así como también, la calidad óptica de la concentración puede verse más afectada por efectos macroscópicos que por microscópicos, pudiendo concluir con esto que un horno solar puede operar de manera satisfactoria sin el uso de espejos de materiales y manufactura avanzada con patentes de alto costo, siendo así posible el utilizar espejos del tipo comercial, cuyo costo representa tan sólo una fracción de los que son fabricados para aplicaciones especializadas.

La manera más sencilla de lograr concentración solar, es mediante la utilización de varios espejos planos, posicionando estos su recta normal dirigida de manera todas se intercepten en un punto, el cual será el área focal. El inconveniente que presenta este método, es que el factor de concentración está limitado al tamaño de los espejos, teniendo esto como consecuencia que, mientras más se desee aumentar el nivel de concentración, más se deberá reducir el área de los espejos planos.

Los hornos solares que actualmente se encuentran operando son de potencias relativamente altas y, sabiendo que en el ámbito de energía solar, trabajar con potencias grandes significa trabajar también con superficies grandes, los concentradores de estos hornos se conforman no de una superficie reflectiva única, sino más bien, están compuestos de varias superficies que son acomodadas de tal manera que se hacen coincidir sus focos en lo más cercano posible unos de otros, para lograr con esto

aumentar el factor de concentración. Esto es debido a las dificultades que implicaría la fabricación de una gran superficie reflectiva con una curvatura predeterminada.

Por ejemplo, en el horno solar de la Plataforma Solar de Almería en España, el concentrador está conformado de 89 facetas rectangulares con una curvatura esférica, variando en estas el radio de curvatura de su superficie de acuerdo a su posición con respecto al área focal. Este conjunto de facetas completan un área de recepción de más de 98m<sup>2</sup>.

De igual manera, el horno solar que opera en el Instituto de Energías Renovables en Temixco, México, cuenta con un concentrador similar al mencionado anteriormente. La diferencia es que las facetas de este horno tienen una forma hexagonal, sumando estas 409. Los niveles de concentración desarrollados por este arreglo de espejos, supera los 18 mil. En la figura 3.3 se muestra en arreglo de facetas instaladas en el concentrador de este horno, indicando para cada radio de curvatura esférica de las facetas, un color distinto.

Idealmente se requeriría que cada faceta tuviera una distancia focal distinta, pero en este diseño se demostró que en variaciones de hasta 12.5cm en la distancia focal, la caída en el factor de concentración representaba sólo un 3% [28].

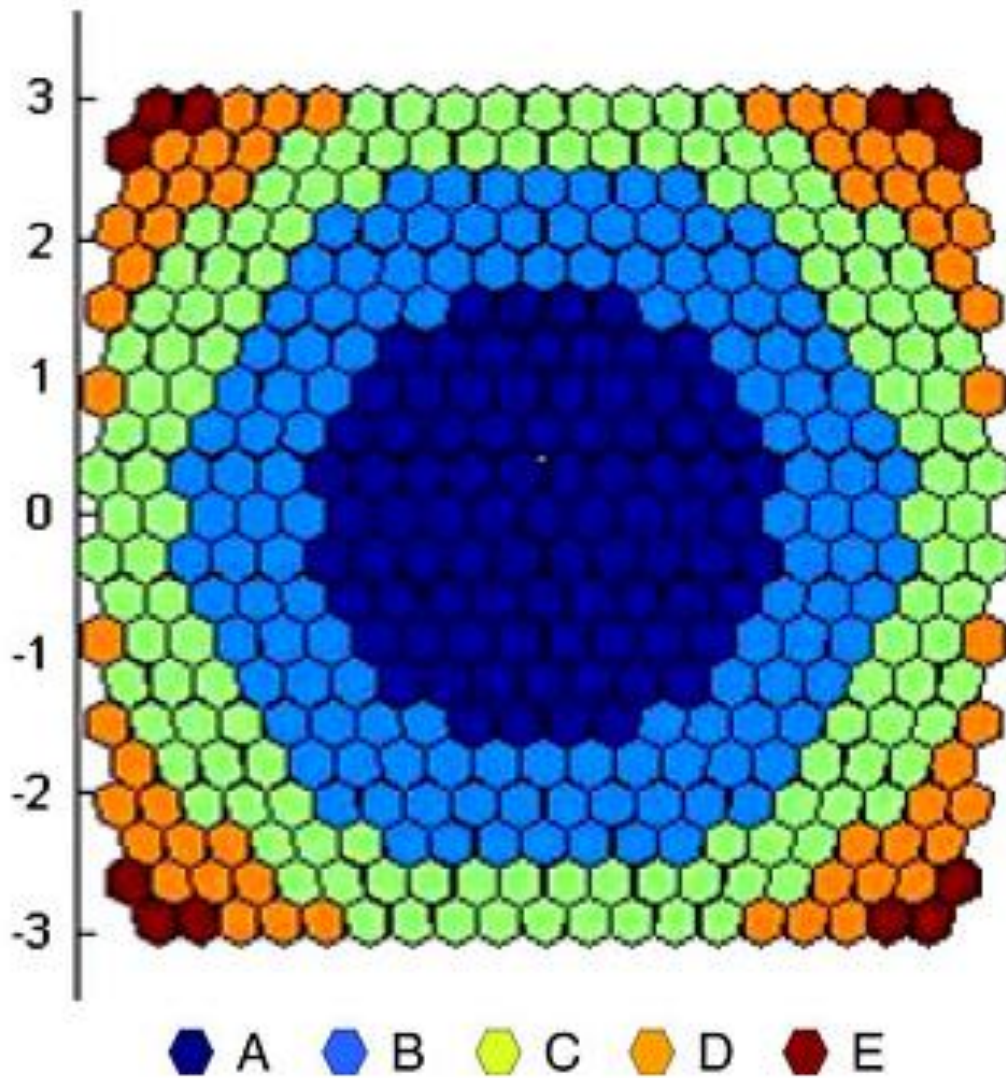


Figura 3. 3 Arreglo óptico del concentrador del horno solar instalado en Temixco, Morelos.

Como se observa en varias instalaciones de hornos solares en el mundo, los arreglos ópticos son del tipo *fuera de eje*, esto tiene la ventaja de que el área focal donde se llevan a cabo los trabajos de experimentación, no interfiere con la radiación que se envía hacia el concentrador. En el caso del horno del IER, el arreglo es del tipo *centrado en el eje*, el cual presenta la ventaja de tener menor aberración óptica, pero sacrificando a su vez cierta cantidad de energía por sombreamiento al concentrador.

La etapa de concentración en un horno solar puede no estar limitada a una sola, es decir que podemos encontrar hornos donde una vez generado un elevado flujo radiativo en una zona focal, esta energía se hace pasar de nuevo por otro elemento óptico, para así multiplicar el factor de concentración, como es un concentrador parabólico compuesto. Este tipo de concentradores (utilizados después de un arreglo óptico parabólico o esférico), son llamados de no imagen; ya que reciben la radiación en varias direcciones, diferentes a la de su eje, con un ángulo de aceptación muy amplio, por lo que trabajan con reflexión macroscópicamente difusa. Por razones geométricas, estos concentradores tienen límites de concentración muy bajos comparados con los de un concentrador de forma parabólica simple, ya que su construcción se vuelve inviable arriba de cierto grado de concentración.

#### **3.1.4 Arreglo óptico**

En los párrafos anteriores se han revisado los principales componentes de un horno solar, los cuales le dan a este la capacidad de lograr elevadas temperaturas gracias al alto nivel de flujo radiativo en la zona focal de un concentrador. Pero es importante también conocer los parámetros que afectan el arreglo óptico de estos componentes.

Las características más relevantes para elaborar un diseño preliminar de un horno, es decir, su arreglo óptico, son:

- Ubicación geográfica
- Tipo de concentrador
- Potencia máxima de trabajo
- Nivel de concentración

### **3.1.5 Ubicación geográfica**

Es relevante la ubicación del horno, ya que varios de los parámetros de diseño son obtenidos del medio ambiente predominante en la zona donde este operará. Es importante conocer los máximos, mínimos y medias en cuanto a velocidades de viento y radiación directa. Estos dos parámetros servirán para dimensionar los componentes de las etapas ópticas en función de las cargas máximas generadas por los vientos sobre los helióstatos y de la radiación útil para captación en el horno solar.

Es importante también considerar los ángulos solares máximos y mínimos que se presentan en el lugar de operación, ya que estos dictan la distancia mínima entre los helióstatos y el concentrador; así como también permiten conocer las proyecciones solares generadas por los helióstatos cuando estos redirigen la radiación hacia un objetivo en particular, como lo es en este caso, la apertura de un concentrador.

### **3.1.6 Tipo de concentrador**

Al ser el concentrador el elemento de mayor importancia en un horno solar, gran parte del tiempo y recursos financieros y humanos invertidos, son utilizados en él. El tipo de concentrador a utilizar no influye grandemente en las magnitudes o dimensionamiento de otros componentes, pero su geometría marcará límites de diseño para la

infraestructura que rodea el horno. Afecta de manera más directa el tipo de receptor que será posible utilizar. Por lo tanto, el tipo de concentrador se decide en base a las pruebas para las cuales se diseña un horno.

La geometría y construcción del concentrador son decisiones que básicamente son tomadas en función del recurso financiero disponible, existiendo muy poca o nula ventaja operacional entre un tipo de concentrador y otro.

### **3.1.7 Potencia máxima**

Uno de los principales parámetros de diseño es la potencia máxima entregada por el horno, y esta se liga a la radiación directa promedio disponible en la locación de operación, para determinar las dimensiones de los elementos ópticos.

En el diseño, el establecer la potencia de un horno, hace posible dimensionar el o los helióstatos que operarán para este. Ya que tendremos que, en base a la irradiancia promedio de lugar, se podrá conocer el área de captación mínima donde se recibirá la energía que posteriormente se hará llegar al concentrador. En caso de que la potencia de diseño sea tan grande como para requerir una gran área de captación, se hace necesario revisar la viabilidad de instalar varios helióstatos, en vez de uno sólo de gran dimensión.

### **3.1.8 Nivel de concentración**

Dentro del diseño de un horno solar, el nivel de concentración no dicta en sí algún parámetro dimensional. Más bien funciona como base para decidir la manera en que será viable construir el concentrador, incluyendo los materiales y el tipo de estructura de soporte.

Como se ha mencionado anteriormente, la rigidez de una estructura que soporta a un concentrador debe ser lo suficientemente alta como para no desviar la geometría de curvatura del diseño de la de fabricación. Y a su vez, los materiales que participan en la reflexión de la radiación, deben ser bien caracterizados para así tener un mejor acercamiento entre los niveles de concentración planeados y los obtenidos.

### **3.2 Metodología general**

La primera etapa de actividades estará enfocada al diseño del sistema óptico, ya que es en esta parte del trabajo, en la cual se determinan las dimensiones de los componentes del horno para lograr obtener los niveles de potencia y concentración que inicialmente se plantean. Se usó un software especial para diseño óptico donde se desarrollaron simulaciones para optimizar el diseño. Es en esta etapa de diseño, donde los métodos de trazado de rayos, son imprescindibles para obtener resultados satisfactorios.

Para el dimensionamiento de las partes, requerimos establecernos en la parte final del horno, es decir, en la zona focal del concentrador, ya que es ahí donde se recibirán los 1000W de potencia térmica deseada. De esta manera lo que debemos considerar serán los parámetros como errores ópticos, eficiencia óptica, errores de seguimiento y tiempo de operación del horno. Con esto, será posible establecer los demás datos necesarios para determinar la geometría, primeramente del concentrador, y posteriormente del heliostato.

Posterior a esto, el diseño de cada uno de los componentes como dispositivos operacionales se lleva a cabo, tomando ahora como principales factores los presentes en la ubicación del horno solar, que afectan de manera estructural y mecánica a las partes involucradas en el diseño.

Finalmente, al contar con un sistema funcional, se procede a la caracterización de este, en base al método y pruebas establecidas en este trabajo.

La metodología general de este trabajo se plantea de la siguiente manera:

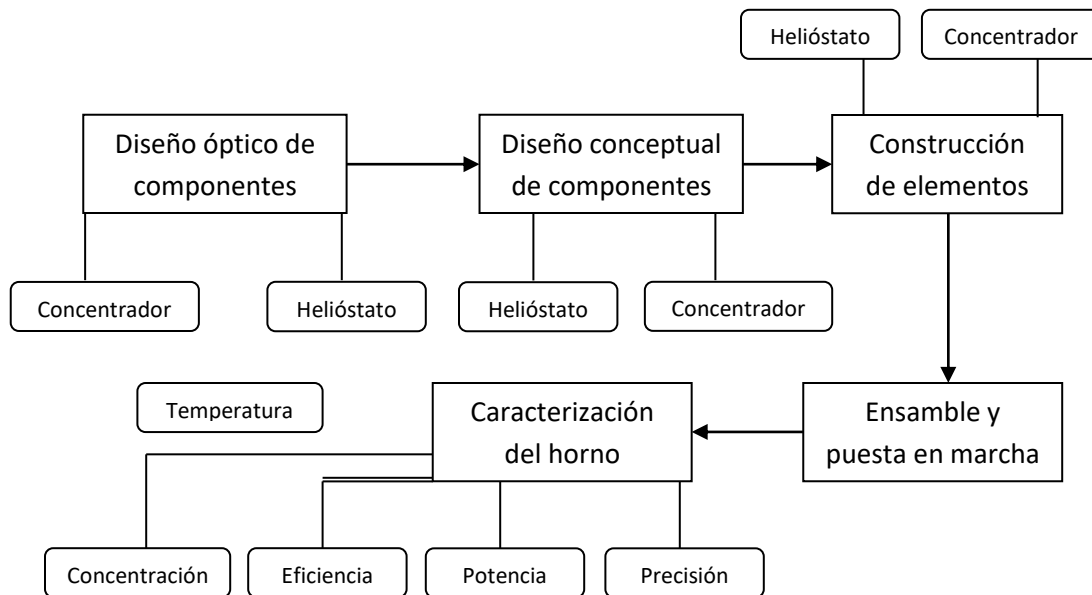


Figura 3.4 Esquema de la metodología seguida para el diseño, construcción y caracterización del horno solar.

### 3.3 Metodología para el diseño

En este capítulo se tratará con los temas relacionados a las etapas del método de diseño de cada uno de los componentes ópticos y estructurales del horno, así como también de la secuencia que se debe seguir para dimensionar correctamente el horno como un arreglo óptico para una determinada potencia de operación.

Es posible separar el diseño del horno en dos campos, uno de ellos es el óptico y el otro se refiere al mecánico, estructural y de control.



Los aspectos referentes al diseño óptico de los componentes del horno se enlistan de la siguiente manera:

- Concentrador
  - Dimensionamiento
  - Tipo de curvatura
- Helióstato
  - Dimensionamiento
- Receptor
  - Dimensionamiento

De manera semejante, los aspectos referentes al diseño mecánico, estructural y de control del horno, se enlista como sigue:

- Concentrador
  - Superficie reflectiva
  - Estructura de soporte
- Helióstato
  - Mecanismos e movimiento
  - Estructura
  - Sistema de control

### **3.3.1 Diseño de los componentes**

Un horno solar, como anteriormente se ha dicho, trabaja redireccionando la radiación solar captada por un área determinada, para posteriormente hacerla converger sobre un área de recepción significativamente más pequeña. Al tratarse de superficies que trabajan en la captación de la energía solar, los parámetros de diseño más relevantes para cada componente de un horno, son los relacionados con las dimensiones de las partes, las cuales se definen en base a la potencia máxima de trabajo del horno solar.

Existen otros factores que harán variar en cierta proporción el dimensionamiento inicial que se le pudiera dar a un horno, los cuales se refieren básicamente a los distintos tipos de errores presentes en la óptica de las superficies reflectivas; así como también, en las características de trabajo que se desean obtener del horno a diseñarse, como son los tiempos de operación y precisión de seguimiento solar.

Es imposible para el caso de un horno solar, trabajar en el diseño de componentes de una manera independiente uno de otro, ya que un horno opera de cierta manera, en forma secuencial, esto es, que la radiación solar sigue una secuencia guiada por la trayectoria que le impone cada etapa de reflexión óptica. Por lo tanto, el dimensionamiento del concentrador, debe determinarse en base a las características ópticas de las superficies reflectivas posteriores a la etapa de concentración y a la potencia que se desee concentrar; a su vez, el dimensionamiento del helióstato debe determinarse en base al tamaño y forma del concentrador.

### **3.3.2 Secuencia de diseño**

Los elementos principales en la construcción de un horno solar, son los concentradores (dependiendo si el horno es de una o varias etapas de concentración) y la o las superficies reflectivas con seguimiento, llamadas helióstatos. Para el caso de este trabajo, el diseño se basó en un horno solar con una etapa de concentración y un solo helióstato.

Dentro de la metodología de diseño del horno se siguió una secuencia para el dimensionamiento de las partes, la cual será explicada en esta sección; tomando como base la trayectoria que seguiría la luz, desde una primera superficie de captación hasta incidir finalmente en un receptor, se procedió a utilizar las características físicas estimadas de cada componente donde incidiría la luz para generar una secuencia de diseño.

El primer parámetro a tomar en cuenta es la potencia que se desea obtener del horno solar a diseñar, es decir, qué cantidad de energía estará incidiendo sobre un receptor determinado en la zona focal del concentrador durante el tiempo de operación del horno, por lo tanto, es necesario determinar cuál es la potencia que se estará obteniendo del sol en la ubicación donde operará este horno. Con este dato será posible iniciar el dimensionamiento del concentrador.

La cantidad de radiación solar que se requiere captar para operar el horno, es directamente proporcional a la potencia de trabajo de este. Pero la magnitud que será inicialmente captada, debido a factores de eficiencia óptica, deberá ser mayor a la de la potencia nominal del horno. Esto es, si deseamos obtener 1kW de potencia en la zona focal, deberemos dimensionar nuestra superficie concentradora, que es la que le antecede al receptor final, de tal manera que el concentrador reciba un excedente de radiación para compensar las pérdidas por errores ópticos y deficiencias de los materiales para reflejar la luz.

Por lo tanto, en base a lo que se quiere recibir de energía en el receptor final, el primer componente a diseñar en esta secuencia es el concentrador. El cual deberá ser dimensionado en base, tanto a sus características ópticas, como a las características ópticas del helióstato.

El helióstato es el componente que le antecede al concentrador en cuanto a la trayectoria de “impactos” de la luz que recibe el horno. Por lo tanto, las características físicas que afectan a la reflexión de la luz, influyen en el dimensionamiento, no sólo del helióstato, sino también del concentrador.

Posterior al dimensionamiento del concentrador, se determinó cuál sería el tiempo de operación continua del horno. Ya que este parámetro de tiempo, es directamente proporcional al tamaño que deberá tener el helióstato, relación que será analizada más adelante.

En resumen, para poder completar la secuencia de diseño es necesario:

- Determinar la potencia del horno
- Cuantificar y/o estimar los errores y eficiencia óptica de la superficie concentradora
- Cuantificar y/o estimar los errores y eficiencia óptica de la superficie del helióstato

### **3.3.3 Diseño óptico del concentrador**

Como se ha mencionado en la secuencia que se siguió para efectuar el diseño completo del horno, el concentrador es el primer componente. Para el cual, se partió de un concentrador idealizado como perfecto, tanto en geometría como en características reflectivas.

El objetivo de considerar un concentrador perfecto es conocer el área de apertura de la cual se partiría para el diseño. La magnitud del área apertura del concentrador, como se mencionó anteriormente, está relacionada con el factor de concentración, siendo este el cociente entre el área inicial (apertura) entre el área final (mancha solar) por la cual fluyen los rayos solares.

Para el horno solar de este trabajo, el cual funciona solamente con una etapa de concentración, se tienen dos opciones en cuanto a elección del tipo de concentrador; un concentrador esférico o un concentrador parabólico, los cuales son curvas en revolución. A su vez, para cada uno de estos se tiene la opción de utilizarse una sola superficie con la curvatura correspondiente, o bien, segmentar el concentrador en varias superficies con curvatura ya sea esférica o parabólica.

Estos dos tipos de concentradores tienen límites semejantes de concentración máxima, pero su uso se define básicamente por el tipo de aplicación o requerimientos de cada horno. En el caso de este horno, el requerimiento más relevante que puede influir en el

concentrador, es la característica presentar una baja inversión en relación con la potencia de operación. Para lo cual se han analizado los resultados con ambos tipos de concentradores y poder así seleccionar el que más convenga para los fines de este horno solar.

Primeramente se analizarán las características de un concentrador esférico. Como su nombre lo dice, la curvatura de la superficie de este tipo de concentradores está determinada en coordenadas cartesianas por la ecuación de una esfera con centro en  $(A, B, C)$  y con radio  $r$

$$(x - A)^2 + (y - B)^2 + (z - C)^2 = r^2 \quad (3.6)$$

Para simplificar esta ecuación, el centro de la esfera se ubica en el origen de las coordenadas  $(0, 0, 0)$  resultando esto en

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad (3.7)$$

La región de concentración resultante en un concentrador formado en base a la ecuación anterior, se ubica a lo largo de una línea paralela a la dirección de los rayos, con origen en la superficie y termina en  $r/2$ , siendo  $r$  el radio de la esfera que conforma el concentrador. En este concentrador, parte de los rayos pueden impactar la superficie reflectiva más de una vez antes de incidir en el receptor, sobre todo si el ángulo de borde es cercano a  $90^\circ$ [29]. Este ángulo es el formado por las líneas del eje de simetría del concentrador y la línea que une el foco con la orilla o final de la superficie del concentrador. Los rayos cercanos al eje del concentrador esférico inciden en una mancha solar de alta concentración después de un solo impacto, siendo estos rayos los que contribuyen para un mayor factor de concentración. Por otro lado, los rayos más alejados del eje del concentrador tienden a impactar varias veces la superficie reflectiva, incidiendo finalmente en una zona lineal alrededor del eje, entre la superficie esférica y la mitad de su radio  $r/2$ .[30].

El ángulo de borde se relaciona con la distancia focal, el diámetro del concentrador y de punto donde termina el concentrador. Para poder determinarlo, es necesario despejar su valor de la ecuación geométrica de la parábola donde aparece.

$$r = \frac{2f \operatorname{sen} \psi_b}{1 + \operatorname{cos} \psi_b} \quad (3.8)$$

Donde  $r$  es el radio del concentrador parabólico,  $f$  es la distancia focal y  $\psi_b$  es el ángulo de borde. La relación de estos valores se puede visualizar en la figura 3.5, donde se muestra el contorno bidimensional de una curva parabólica.

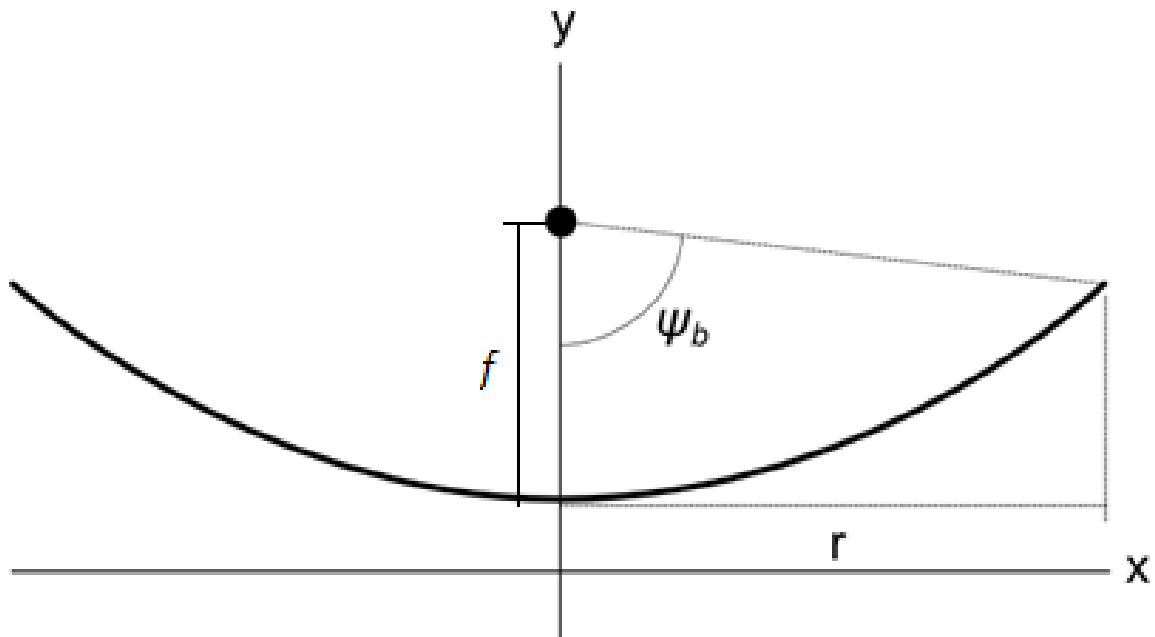


Figura 3.5 Perfil parabólico con eje vertical con sus dimensiones características

En el caso de un concentrador esférico, para evitar que el mismo cuerpo del concentrador bloquee la radiación que incide en la superficie de concentración, el punto final de la curva bidimensional, deberá tener la misma ubicación vertical (u horizontal en caso de tener el concentrador un eje horizontal) que el centro de la esfera. Esto es, que el ángulo formado por el vértice, el centro y el punto final del concentrador sea como máximo de  $90^\circ$ . Obteniendo así un ángulo de borde máximo de  $116.6^\circ$  para un concentrador esférico. Por otro lado, como se ha comentado, en un concentrador esférico, los rayos que se encuentran alejados del eje del concentrador, tienden a concentrarse en una línea a lo largo de su eje y no una zona puntual, por lo que se debe determinar cuál es el máximo ángulo de borde con el que se puede trabajar en un concentrador esférico sin perder la concentración en un punto focal.

Esta relación se puede determinar analizando los rayos que inciden de manera independiente en el concentrador. En la figura 3.6 se muestra cómo se direccionan los rayos hacia un punto focal. Se tiene la condición de que desde el centro hasta cualquier punto de la circunferencia, la distancia es la misma, así como también se deduce que el radio del círculo es normal a la tangente de este en cualquier punto. Esta última condición es aplicada a la segunda ley de la reflexión, que nos dice que el ángulo de incidencia de un rayo es igual al ángulo de reflexión. Con lo cual se tendrá que cuando un rayo impacte la circunferencia, el ángulo sobre la tangente del círculo, será igual al ángulo de rayo reflejado. Esto se muestra en la figura 3.6.

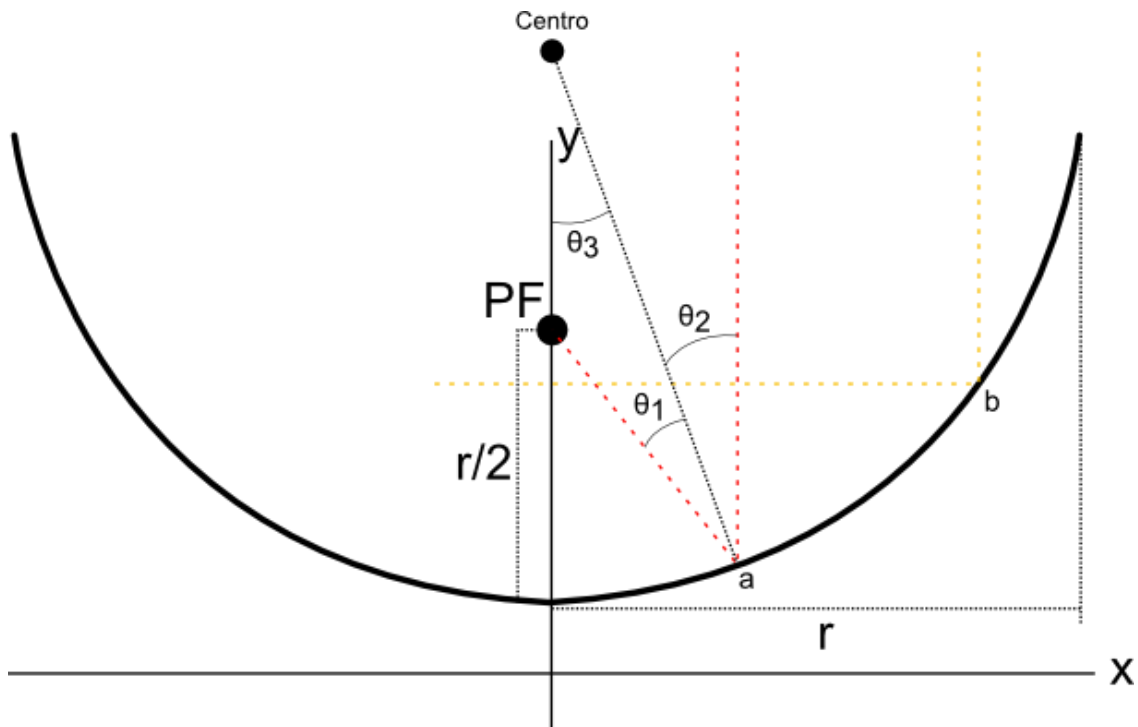


Figura 3.6 Perfil circular con eje vertical con rayos incidiendo en distintos puntos del concentrador

Analizando la figura 3.6, se puede observar que como  $\theta_1 = \theta_2$  son iguales por la segunda ley de la reflexión; y como el eje del concentrador es paralelo a los rayos incidentes, entonces  $\theta_3$  debe ser igual a  $\theta_1$ . Sin embargo, esta condición nunca se cumple, sino que tan sólo se aproxima. Ya que de tener que  $\theta_1 = \theta_3$ , significaría la formación de un triángulo isósceles formado por el punto  $a$ , el centro del círculo y el punto focal  $PF$ . Lo cual nos dice que  $PF-a$  es igual a  $r/2$ . Condición que es imposible obtener, ya que  $PF-a$  vale  $r/2$  solamente en el origen del concentrador, y mientras se desplace  $a$  sobre la circunferencia, la distancia  $PF-a$  va aumentando. Por lo cual se puede concluir que, para un concentrador esférico, a mayor ángulo de borde, se obtendrá una menor concentración, debido al efecto que se ilustra en la figura 3.6 cuando un rayo impacta en el punto  $b$ . Normalmente para fines prácticos, el ángulo de borde de un concentrador esférico se mantendrá siempre debajo de  $30^\circ$ [31].



En el caso de un concentrador esférico, para un horno solar donde se busca trabajar con altas temperaturas, la geometría que es apta para utilizarse está limitada a una apertura que trabaje sólo con los rayos que inciden cerca del eje del concentrador esférico, para así lograr obtener un factor de concentración suficientemente elevado. Esto significa que se debe utilizar un ángulo de borde relativamente pequeño.

Por lo tanto, como principal limitante para utilizar un concentrador esférico en este horno, se tiene que, el ángulo de borde debe ajustarse a los límites prácticos conocidos, esto significa que la distancia focal (la mitad del radio de la esfera) debe ser considerablemente mayor, comparada con la apertura del concentrador.

Pasando ahora a analizar la geometría de un concentrador parabólico, se puede comentar lo siguiente. De una manera semejante que la esfera, en coordenadas cartesianas la parábola con eje vertical, con vértice en  $(H, K)$  y con una distancia focal  $p$ , se representa con la ecuación

$$(x - H)^2 = 4p(y - K) \quad (3.9)$$

Por lo tanto, si ubicamos la parábola con su vértice en el origen  $(0, 0)$ , su ecuación se reduce a

$$x^2 = 4py \quad (3.10)$$

Es importante mencionar que, a diferencia de la ecuación de la esfera comentada anteriormente, esta ecuación de la parábola es para determinar la curvatura o perfil del concentrador, es decir, es de 2 dimensiones. Por lo tanto, para completar la geometría tridimensional, es necesario rotar la curva resultante, alrededor de su eje de simetría, en este caso, el eje paralelo a los rayos de incidencia.

La zona de concentración resultante en este tipo de geometría, se ubica en un punto en su zona focal, es decir, todos los rayos impactan solamente una vez en la parábola y

posteriormente son direccionados al foco de esta. Al ser la zona focal un área de menores dimensiones que la de un concentrador esférico, es lógico deducir que el factor de concentración resultante será mayor en la parábola.

Como se tiene que todos los rayos incidentes sobre la parábola impactan sólo una vez la superficie, se puede trabajar con un ángulo de borde mucho mayor, dando esto una gran flexibilidad en cuanto a la distancia focal, por lo que el foco puede quedar ubicado dentro o fuera del cuerpo del concentrador.

El hecho de tener un ángulo de borde de gran magnitud, permite que los rayos concentrados impacten al receptor desde un “abanico” de gran apertura angular. Pero a su vez, el hecho de utilizar un ángulo de borde de gran magnitud, se traduce en un mayor nivel de complejidad en la construcción.

Para el análisis de operación del horno solar de este trabajo, tenemos que este opera en la Plataforma Solar de Hermosillo, ubicada en el Km 21 de la Carretera Hermosillo-Bahía de Kino. Para esta región se puede considerar que la radiación directa normal promedio es de  $1\text{kW/m}^2$ . Por lo tanto, sea un concentrador del tipo esférico o parabólico, en términos generales, si se desean concentrar  $1,000\text{W}$  en el horno, y se considera que como promedio de radiación directa en la zona donde está operando el horno, se reciben  $1000\text{W/m}^2$ , tendríamos que, para ambos el área de apertura, o bien, de recepción de rayos solares, debe de ser de  $1\text{m}^2$ . Partiendo de esta situación, se comienzan a hacer los dimensionamientos en base a estimaciones de las características ópticas de cada etapa de reflexión.

### **3.3.3.1 Etapas de diseño del concentrador**

#### **3.3.3.1.1 Parte 1.**

En este horno solar se desea concentrar la cantidad de radiación equivalente a  $1000\text{W}$  en un receptor en la zona focal de un concentrador, por lo tanto, como se ha mencionado, si

tenemos un concentrador perfecto (sin errores ópticos y un factor unitario de eficiencia reflectiva), requeriríamos uno que tuviera una apertura de  $1\text{m}^2$ . Sin embargo, al ser el concentrador una superficie reflectiva no ideal, esta no tiene la capacidad de redirigir en su totalidad, la cantidad de radiación que sobre ella incide. Como se vio en los conceptos generales, las características de la superficie del concentrador, tiene una máxima capacidad para transmitir esa energía radiativa, en otras palabras, tiene una determinada eficiencia óptica o factor de reflectancia.

El factor de reflectancia  $\rho_c$  que se ha estimado para el concentrador es de 94%; ( $\rho_c = .094$ )[32][33] basando esta magnitud en los datos que ofrecen distintos fabricantes de películas reflectivas que pudieron haberse utilizado para la fabricación del concentrador. Por lo tanto, si se considera que existirá un 6% de pérdidas de energía, será necesario dimensionar el concentrador con un área que posea un excedente de la misma magnitud con base en este porcentaje, para así captar una cantidad mayor de energía.

Seguido a esto, es necesario considerar también la eficiencia óptica del espejo del helióstato, ya que este es el que envía la radiación hacia el concentrador, y en su redireccionamiento de rayos de luz existen también las pérdidas de energía radiativa por el factor de reflectancia del espejo del helióstato. De igual manera como con el concentrador, en el helióstato se buscó un valor del factor de reflectancia de la superficie del espejo que sería instalado en el helióstato. Obteniéndose mediante un sondeo general, un valor medio de 80% de eficiencia óptica para la mayoría de los espejos comerciales con película de aluminio. [34][35]

Por lo tanto, si se tiene que, por el factor de reflectancia del espejo del helióstato, se pierde un 20% de energía al momento de ser enviada la radiación al concentrador, será necesario entonces dimensionar el concentrador con un excedente adicional al 6% que se aplicó cuando se analizó el dimensionamiento del concentrador por separado. Entonces se tendrá que el factor combinado de reflectancia en el sistema óptico será el resultado del producto de ambos factores, el del espejo del helióstato y el de la superficie del concentrador, el cual resulta en un 75.2%.

$$\rho_t = (\rho_h)(\rho_c) \quad (3.11)$$

Por lo tanto, utilizando la eficiencia óptica combinada, se tendrá que dimensionar el concentrador de tal manera que se compensen las pérdidas por reflexión en cada etapa, y así poder dirigir 1kW de potencia nominal a la zona focal. Con esto se tiene que el área de apertura del concentrador, debe ser mayor a 1m<sup>2</sup> en un relación al 24.8% de pérdidas. Entonces, basándonos en la ecuación de eficiencia, se tiene entonces que el área final del concentrador se obtiene de la siguiente manera

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} = \frac{(\text{Irradiancia de salida})(\text{Área})}{(\text{Irradiancia de entrada})(\text{Área})} \quad (3.12)$$

Como se trata de la misma área (por ejemplo el área de apertura del concentrador), la relación de eficiencia óptica, se reduce al cociente de la potencia radiante de salida entre la potencia radiante de entrada. Resultando en esta relación

$$\text{Potencia de entrada} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\eta} \quad (3.13)$$

Como se tiene que la potencia de salida deseada es de 1000W y la eficiencia óptica con la que se trabajará es de magnitud de 0.752

$$\text{Potencia de entrada} = 1329.78W$$

Por lo tanto, si se recibe como irradiancia promedio 1kW/m<sup>2</sup>, se requieren 1.329m<sup>2</sup> de recepción para dicha radiación. Por lo cual, por motivos de practicidad de diseño, se aplica esta área una geometría cuadrada para la apertura y se tiene que los lados del cuadrado de la apertura miden:

$$\text{Lado} = \sqrt{\text{Área de apertura}} \quad (3.14)$$

$$\text{Lado} = 1.153\text{m}$$

Considerando un factor de seguridad para el diseño, el dimensionamiento del área del concentrador, se eleva y se redondea la magnitud al decimal superior inmediato. Como resultado se obtiene un concentrador cuadrado con lados de 1.2m, por lo tanto un área final de apertura de 1.44m<sup>2</sup>.

### **3.3.3.1.2 Parte 2.**

Una vez que se tienen las dimensiones del concentrador, se procede a elegir el tipo de concentrador, siendo posible utilizar una curvatura parabólica o una esférica.

Se puede optar por utilizar un arreglo donde el receptor se encuentre sobre el eje del concentrador, recibiendo así la radiación de manera simétrica en su cara de recepción, o bien, es posible utilizar un arreglo donde el receptor no se encuentre sobre el eje del concentrador, esto es, un sistema fuera de eje, donde la recepción de la radiación incide de una manera no simétrica sobre la cara del receptor. Un sistema óptico fuera de eje tiene un receptor sobre cuya superficie inciden rayos de manera menos uniforme alrededor de su vector normal, siendo uno de los factores limitantes principales la viabilidad de construcción de dicho concentrador, ya que esto perjudica en magnitud al factor de concentración.

Las características de un concentrador solar parabólico, son las que hacen más propicio su uso para su aplicación en este horno solar, dadas sus características de habilitar un amplio rango angular de recepción de rayos concentrados, así como también, el poder utilizar un arreglo con una distancia focal de poca magnitud. Ya que el concentrador esférico tiene como principal limitante el factor de relación entre la distancia focal y la

apertura del concentrador, donde la primera deberá ser suficientemente grande en comparación con la segunda, con el fin de obtener un ángulo de borde pequeño y así lograr elevar la concentración de forma efectiva.

Idealmente, en un concentrador se desea que los rayos que ya impactaron el concentrador, viajen una distancia muy corta antes de incidir en el receptor; ya que entre más alejado esté el foco desde el concentrador, los rayos tenderán a dispersar su energía en un área mayor y por lo tanto caerá progresivamente la concentración con respecto a la distancia recorrida por ese rayo. Por lo cual, se deberá considerar inicialmente la menor distancia posible hasta el receptor.

Antes de continuar con el análisis de las características de los posibles tipos de concentradores a utilizar, es importante mencionar otro parámetro del diseño que se relaciona con el arreglo óptico. Este es el de la ubicación del receptor. De este se ha mencionado que se requiere tenga la capacidad de inclinar su posición, más es necesario aún determinar su ubicación.

La ubicación del receptor depende en gran manera del tipo de concentrador a utilizar, pero no puede determinarse sin realizar un trabajo iterativo del cual se extraiga la información necesaria para determinar la ubicación óptima en relación al concentrador. De forma paralela a la ubicación, se determina también el ángulo de borde que mejor trabaje para esta aplicación

Como el horno solar es un instrumento pensado para ser operado por personas, las dimensiones del receptor y posición con respecto al piso y otros objetos, deben permitir a los operadores maniobrar de una manera cómoda y segura alrededor del receptor. Dicho esto, se delimita la ubicación del receptor a una altura del piso mínima de 50cm y máxima de 150cm y a una distancia mínima al concentrador 40cm, ya que el receptor operará finalmente como una mesa de trabajos experimentales.

La distancia focal máxima se determina en base a las pérdidas de concentración que tienen origen en los errores ópticos, ya que estos generarán una mayor dispersión de la

radiación al hacerse mayor la distancia focal. Por lo tanto, para determinar la distancia focal óptima, mediante simulaciones con trazado de rayos se hizo variar la distancia focal de un concentrador parabólico, que resulte en una máxima concentración con un máximo de accesibilidad al receptor. Y a su vez, el ángulo de borde, se revisa para cada distancia focal, extrayendo de este la magnitud del ángulo de incidencia de rayos sobre el receptor.

Es posible obtener la distancia que recorre un rayo antes de impactar el receptor. Utilizando la ecuación que relaciona la distancia focal y el ángulo de borde.

$$p = \frac{2f}{1 + \cos\psi} \quad (3.15)$$

Donde  $p$  representa la distancia desde el punto focal hasta la superficie del concentrador, como se indica en la figura 3.7.

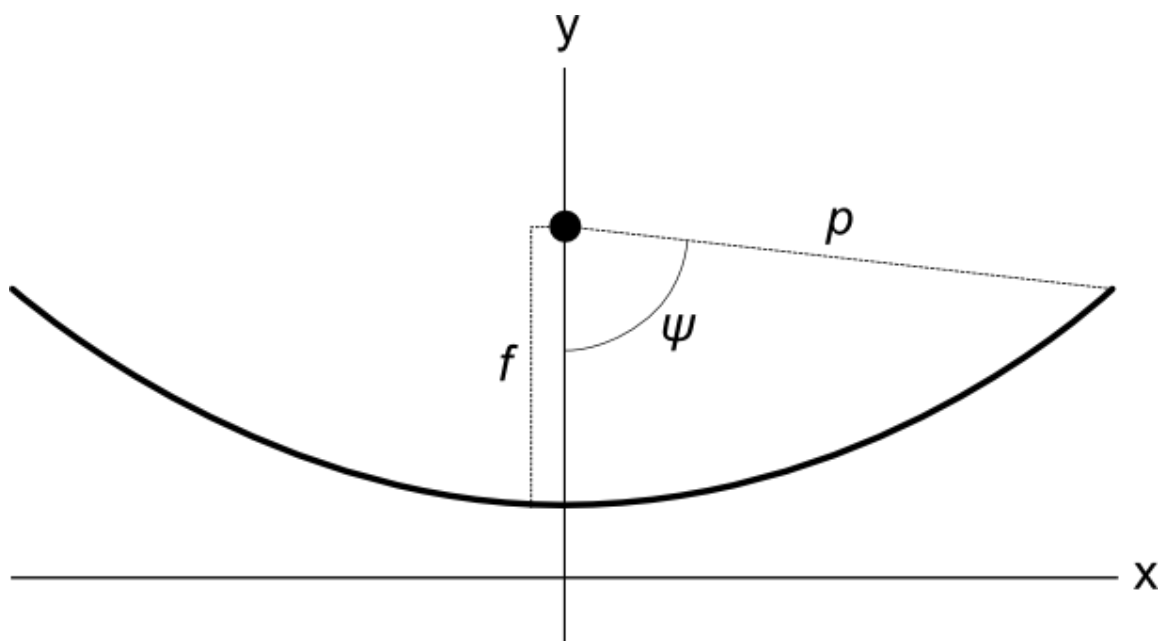


Figura 3.7 Distancia máxima desde el foco hasta el concentrador



Es importante mencionar que en un concentrador solar, la distancia que recorre un rayo de luz después de haber impactado en el concentrador, tiene influencia en el factor final de concentración. Esto se debe a que los rayos de luz, una vez que son reflejados, su proyección no se hace en forma de línea recta, si no que más bien se asemeja a un cono, como se muestra en la figura 3.8.

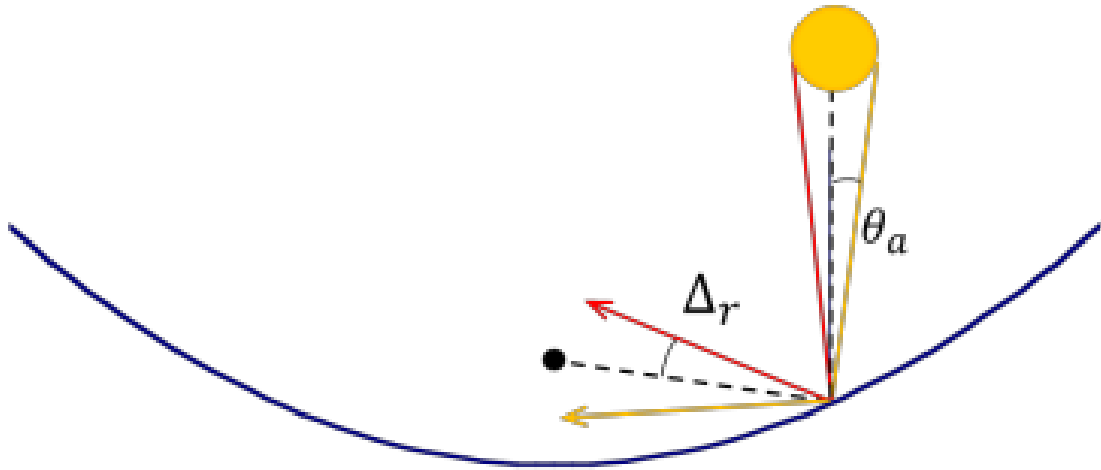


Figura 3.8 Cono de luz formado después de incidir la luz solar en un concentrador.

Es posible observar que el tamaño del rayo reflejado aumentará con respecto de la distancia que recorre hasta impactar en un receptor; por lo tanto, su área proyectada será mayor, haciendo decrecer el factor de concentración final. En un concentrador real, este efecto se acentúa aún más con las imperfecciones presentes en la superficie de reflexión. Es por esto que siempre se buscará reducir la distancia del rayo reflejado a un máximo posible.

En esta etapa es necesario realizar una serie de simulaciones con trazo de rayos para analizar el resultado de algunos de los parámetros de diseño del concentrador. Así como también para establecer las magnitudes de las que se determinarían como idealizadas, para posteriormente basarse en ellas para la toma de decisiones en el diseño final.

Se utilizó el software Soltrace desarrollado por NREL[36] para el trazado de rayos. En el cual fueron ubicados 2 componentes ópticos: un concentrador reflectivo parabólico y un receptor plano (figura 3.9).

The screenshot displays the Soltrace software interface. On the left is a navigation tree with categories like Sun Shape, Optical Properties, System Stages, Trace Options, Results, Intersections, Flux Maps, Ray Data, Scripting, and Help. The 'System Stages' category is expanded, showing a hierarchy of stages: hel, concs (selected), and rec. The main workspace is divided into three panels: Stage Properties, Global Coordinates, and Element Editing.

**Stage Properties:**

- Name: concs
- virtual stage
- Multiple hits per ray
- Trace through

**Global Coordinates:**

- Origin: X: 0.000000, Y: 0.000000, Z: 0.000000
- Aim point: X: 0.000000, Y: 0.000000, Z: 1.000000
- Z rotation: 0.000000 deg
- Clipboard actions: Copy, Paste

**Element Editing:** Insert..., Z Rotation..., Append..., Aperture..., Delete..., Surface..., Delete all, Optics...

The main table displays the following data:

En.	X-Coord.	Y-Coord.	Z-Coord.	X-AimPt.	Y-AimPt.	Z-AimPt.	Z-Rot.	Aperture	
1	0.16	0.25	0.10122	0.0794022	0.484237	1.07005	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
2	0.47	0.25	0.21739	0.22575	0.491651	1.15651	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
3	0.16	0.56	0	0.0814428	0.636102	0.994001	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
4	0.47	0.56	0.10293	0.233141	0.638113	1.07133	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
5	0.16	0.87	0	0.0814428	0.793898	0.994001	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
6	0.47	0.87	0.10293	0.233141	0.791887	1.07133	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
7	0.16	1.18	0.10122	0.0794022	0.945763	1.07005	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
8	0.47	1.18	0.21739	0.22575	0.938349	1.15651	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
9	-0.16	0.25	0.10122	-0.0794022	0.484237	1.07005	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
10	-0.47	0.25	0.21739	-0.22575	0.491651	1.15651	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
11	-0.16	0.56	0	-0.0814428	0.636102	0.994001	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
12	-0.47	0.56	0.10293	-0.233141	0.638113	1.07133	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
13	-0.16	0.87	0	-0.0814428	0.793898	0.994001	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
14	-0.47	0.87	0.10293	-0.233141	0.791887	1.07133	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
15	-0.16	1.18	0.10122	-0.0794022	0.945763	1.07005	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0
16	-0.47	1.18	0.21739	-0.22575	0.938349	1.15651	0	r-0.3,0.3,0,0,0,0,0	s-0.48803,0

Figura 3.9 Interfaz gráfica de trabajo del software Soltrace.

Para las simulaciones realizadas, se definieron los errores de pendiente y de superficie con valores aproximados en base a la información disponible para distintas superficies reflectivas comerciales. El receptor se posiciona sobre el eje del concentrador y su normal orientada de forma paralela al mismo eje. La magnitud del ángulo de borde para la construcción de la parábola, varía para cada distancia focal, esta última se variará en el rango de 45cm a 120cm con pasos incrementales de 10cm. El esquema del arreglo óptico con estas dimensiones se muestra en la figura 3.10.

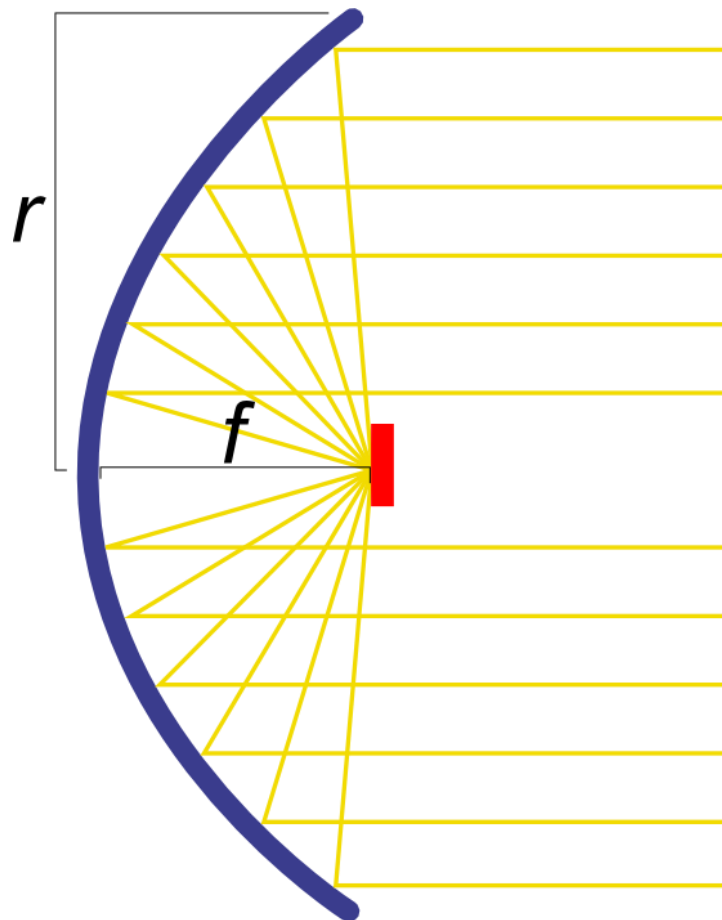


Figura 3.10 Esquema del arreglo óptico con concentrador parabólico para simulaciones en trazado de rayos.

La forma del concentrador se establece como inicialmente se definió, un cuadrado con lados de 1.2m, así la radiación llega al concentrador por un área de 1.44m<sup>2</sup>. Se puede observar en la figura 3.11 que las superficies se conforman por campos de puntos de colores (distinto color para cada componente óptico), los cuales representan el punto de impacto de un rayo de luz.

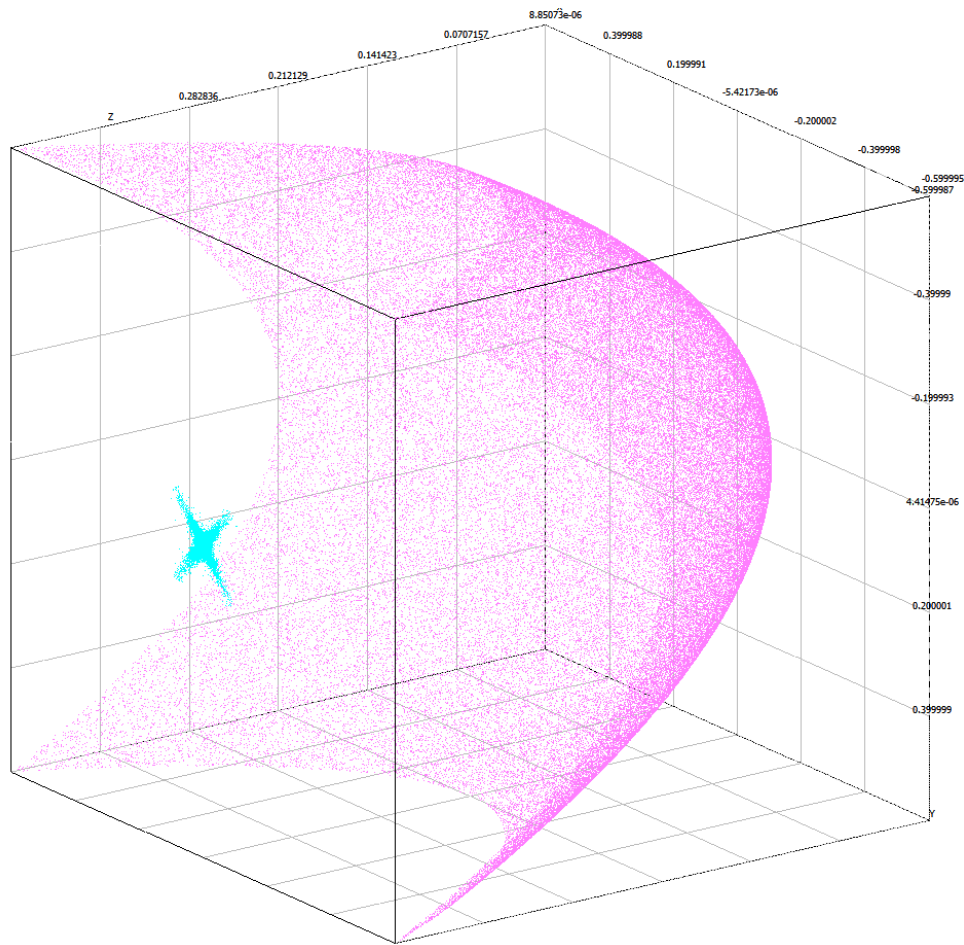


Figura 3.11 Arreglo óptico para simulación de trazo de rayos en concentrador parabólico.

Se debe establecer el ángulo de borde máximo para un concentrador parabólico, ya que es necesario limitar la incidencia de la radiación concentrada solamente en la cara del receptor orientada hacia el concentrador. Esto se obtiene con la ecuación 3.3, y al ángulo de borde se le da el valor máximo permisible que es  $90^\circ$ . Como nuestra apertura se mantiene fija con una geometría cuadrada de 1.2m de lado, el radio de un concentrador con apertura redonda, equivale al valor de la línea diagonal que divide al cuadrado en dos triángulos iguales, como se muestra en la figura 3.12. Siendo el valor de  $r$  de 84.85cm.

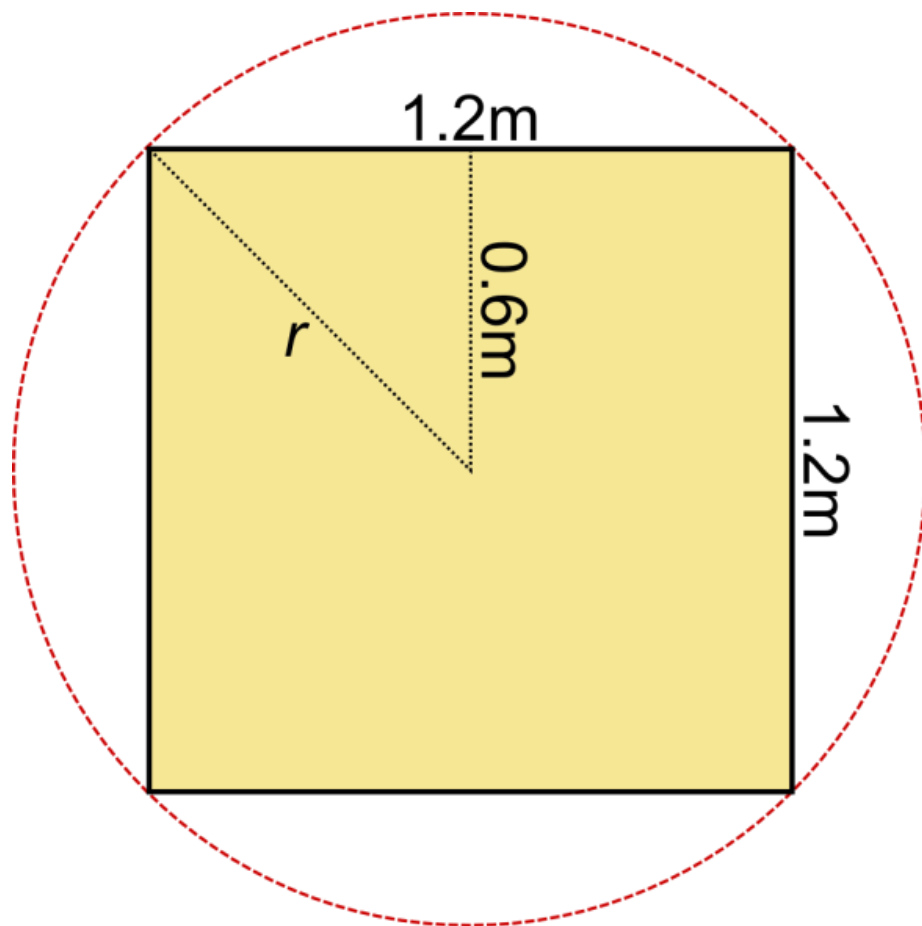


Figura 3.12 El valor del radio  $r$  equivalente para un concentrador de apertura circular.

El ángulo de borde mayor se verá reflejado solamente en las esquinas del cuadro de apertura, ya que es en esas partes del concentrador, donde se hizo coincidir la magnitud del radio de un concentrador con geometría circular. Como se busca que el ángulo de borde máximo sea de  $90^\circ$  y se tiene un radio fijo de 84.85cm, mediante la ecuación 3.10, se establece que la distancia focal mínima equivale a  $r/2$ , por lo tanto  $f_{min}$  es de 42.42cm.

Los resultados de estas simulaciones se muestran en la figura 3.13 Donde es posible observar que conforme mayor es la magnitud de la distancia focal, el factor de concentración decrece. Esto, como se mencionó anteriormente, se debe a la dispersión de la radiación por los errores de pendiente y de superficie, así como también de la dispersión de energía de cada rayo.

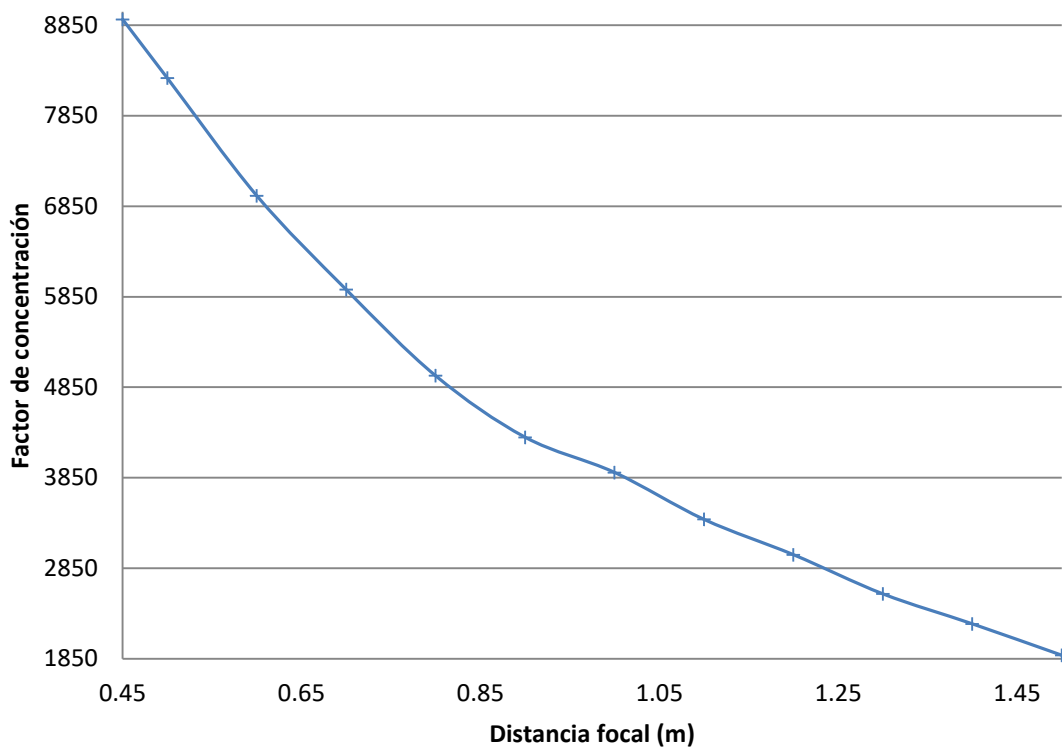


Figura 3.13 Niveles de concentración a distintas distancias focales en un concentrador parabólico.

En base a las simulaciones de trazado de rayos, la distancia focal óptima, sería la de menor magnitud, es decir, de 45cm, ya que es a esta distancia, donde los errores ópticos tienen menor efecto negativo sobre el factor de concentración y se encuentra dentro del rango de los parámetros de diseño.

En el caso de estas simulaciones, el ángulo de borde se ha manejado como un valor dependiente de la distancia focal. Pero este valor no se manifiesta de manera exacta en el receptor, ya que se ha truncado el contorno del perfil parabólico en revolución, ya que se tiene una apertura de geometría cuadrada y no redonda, obteniendo solamente en las cuatro esquinas del concentrador, el ángulo de borde máximo de diseño.

Posterior a estas simulaciones, se analizan ahora los resultados obtenidos con un concentrador esférico, utilizando los mismos parámetros dimensionales y ópticos que con el concentrador parabólico.

En la figura 3.14 se muestran los resultados obtenidos de simular el arreglo óptico con un concentrador esférico. Las oscilaciones en las magnitudes del factor de concentración se deben a la aberración esférica de un concentrador que tiene un ángulo de borde relativamente grande. A una distancia focal determinada se presenta un máximo, ya que es a esta distancia cuando existe un equilibrio entre la aberración esférica y los errores ópticos. A una menor distancia focal, la aberración esférica produce una caída en la concentración, y a grandes distancias focales, los errores ópticos acentúan la pérdida de concentración.



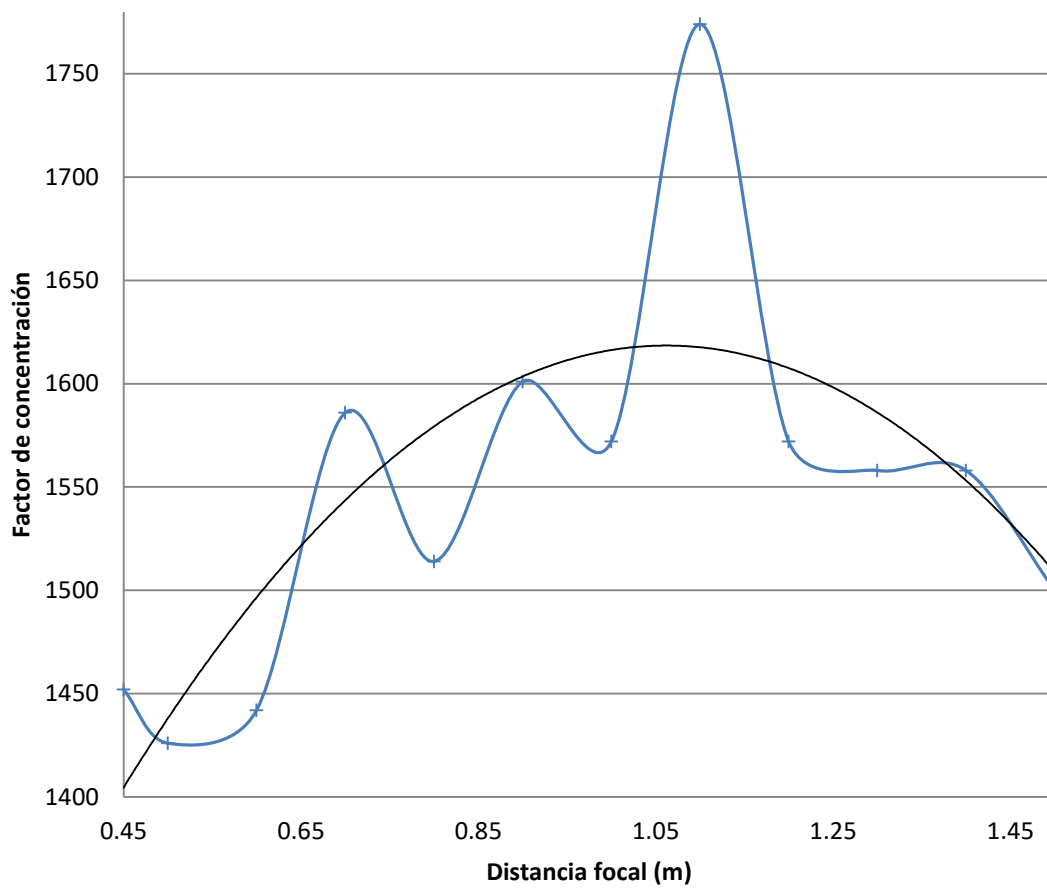


Figura 3.14 Niveles de concentración a distintas distancias focales en un concentrador esférico.

Comparando ambos tipos de concentradores, se puede observar que el parabólico presenta características de concentración superiores, incluso cuando la concentración en el esférico es máxima, su valor sigue estando por debajo del mínimo observado en el concentrador parabólico.

Por otro lado, es importante recordar la principal característica de un concentrador esférico, la cual nos dice que el desempeño de este será mayor cuando menor sea el ángulo de borde. O en otra palabras, que la distancia focal sea suficientemente grande comparada con la apertura del concentrador. Como la apertura de diseño del concentrador de este horno ya ha sido fijada, para reducir la magnitud del ángulo de borde, se debe aumentar la distancia focal. Pero como se observa en las simulaciones, existe un punto en el rango de distancias focales donde el factor de concentración comienza a decaer. Por lo tanto, es necesario utilizar la alternativa de seccionar el concentrador esférico en varios concentradores. De esta manera, utilizando la distancia focal donde se presenta un máximo cuando se trabaja con un concentrador esférico de superficie única, es posible manejar una relación entre distancia focal y apertura bastante grande.

Comparando la opción de utilizar una superficie única con la de seccionar en varios concentradores el área de apertura, se tiene que para la superficie única, el valor del ángulo de borde es de  $42.18^\circ$  cuando la concentración es máxima. En cambio, si se divide el concentrador en 16 facetas cuadradas concentradoras esféricas (4 por cada lado), tenemos que los nuevos concentradores tendrían una geometría de 30cm de lado. Esto resulta al equivalente de un concentrador circular con radio de 21.21cm. Por lo tanto, si se mantiene la misma distancia focal de 1.1m, el ángulo de borde resultante para este concentrador sería de  $11.01^\circ$ . El cual se encuentra dentro del rango en el cual los concentradores esféricos casi no presentan errores por aberración esférica.

Uno de los principales parámetros en el diseño, se trata de lograr el objetivo deseado con el diseño más sencillo posible; por lo que se deberá mantener el diseño del horno y del

helióstato, de la forma más simplificada, pero que a su vez nos permita obtener resultados satisfactorios basados en los objetivos iniciales de este trabajo.

Para trabajar con un concentrador esférico o parabólico de superficie única, se debe fabricar un cuerpo con una curvatura que se aproxime lo más posible a la parábola o esfera tridimensional de diseño, para poder así obtener resultados cercanos a los obtenidos en las simulaciones. El hecho de fabricar una superficie de tales dimensiones, requiere de maquinaria no disponible en la región, así mismo se requeriría una inversión suficientemente alta como para considerar la posibilidad de segmentar el concentrador en varias partes, que es lo que se analizará a continuación y poder así comparar los resultados de utilizar un concentrador único de los parámetros anteriormente manejados con varios concentradores.

Para segmentar el concentrador, se puede optar por utilizar facetas cuadradas, circulares o con forma de un polígono (normalmente hexágonos). Cada uno de estos tipos presenta sus ventajas y desventajas técnicas. La característica que hace más apto el uso de uno que otro, es principalmente el área que puede ocupar cada sección sin interferir con las secciones adyacentes sin obstruirlas o bien, sin dejar mucha área sin cubrir entre secciones, como es el caso de las facetas circulares.

Como parámetro adicional que simplifica en gran manera la fabricación del concentrador, se puede establecer, que la curvatura de cada faceta sea idéntica. Este parámetro reduce en un monto considerable el tiempo e inversión financiera necesaria para el diseño y la fabricación del concentrador. Con esto, se crea la necesidad de ajustar el origen de cada faceta, para hacer coincidir su distancia focal con su ubicación dentro de las coordenadas de la estructura del concentrador.

Cuando se utilizan facetas circulares, es imposible no desperdiciar área útil de la apertura del concentrador, ya que incluso un arreglo eficiente, puede llegar a desperdiciar hasta el 30% del área disponible, como se muestra en la figura 3.15.

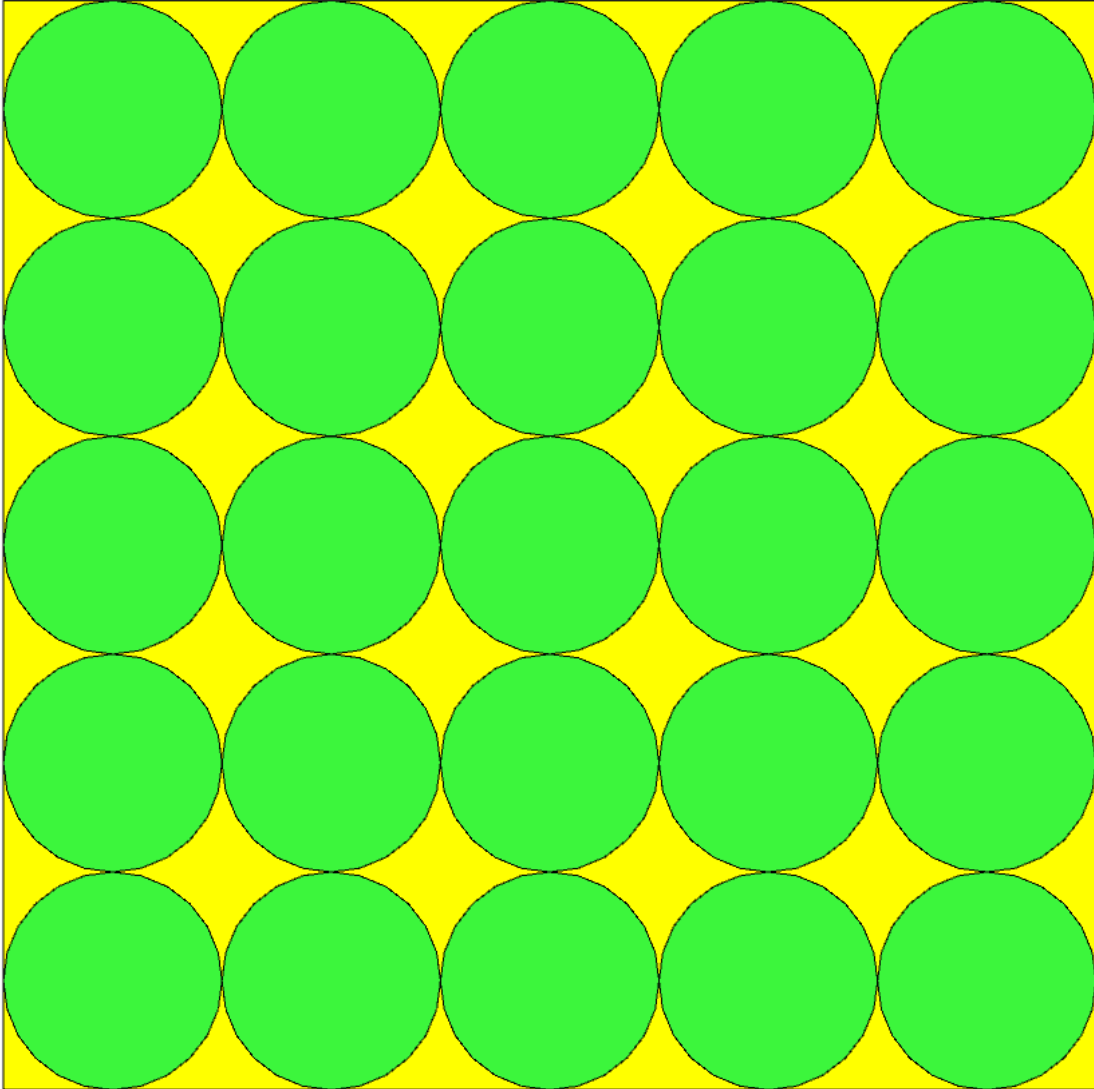


Figura 3.15 Arreglo de facetas circulares en apertura cuadrada.

Las zonas amarillas representan el área desperdiciada.

Al utilizar facetas hexagonales, tenemos que el aprovechamiento del área es mayor que cuando se utilizan facetas circulares, ya que es posible posicionar las facetas prácticamente unidas una a la otra en todo su perímetro, sin obstruirse y sin dejar espacios. Este tipo de geometría nos da la ventaja de que, en conjunto, todas las facetas pueden aproximarse a la forma de un concentrador con apertura circular, pudiendo hacer posible también, el uso de distancias focales iguales por niveles, sin traducirse esto en una caída de concentración significativa, como se muestra en la figura 3.16.

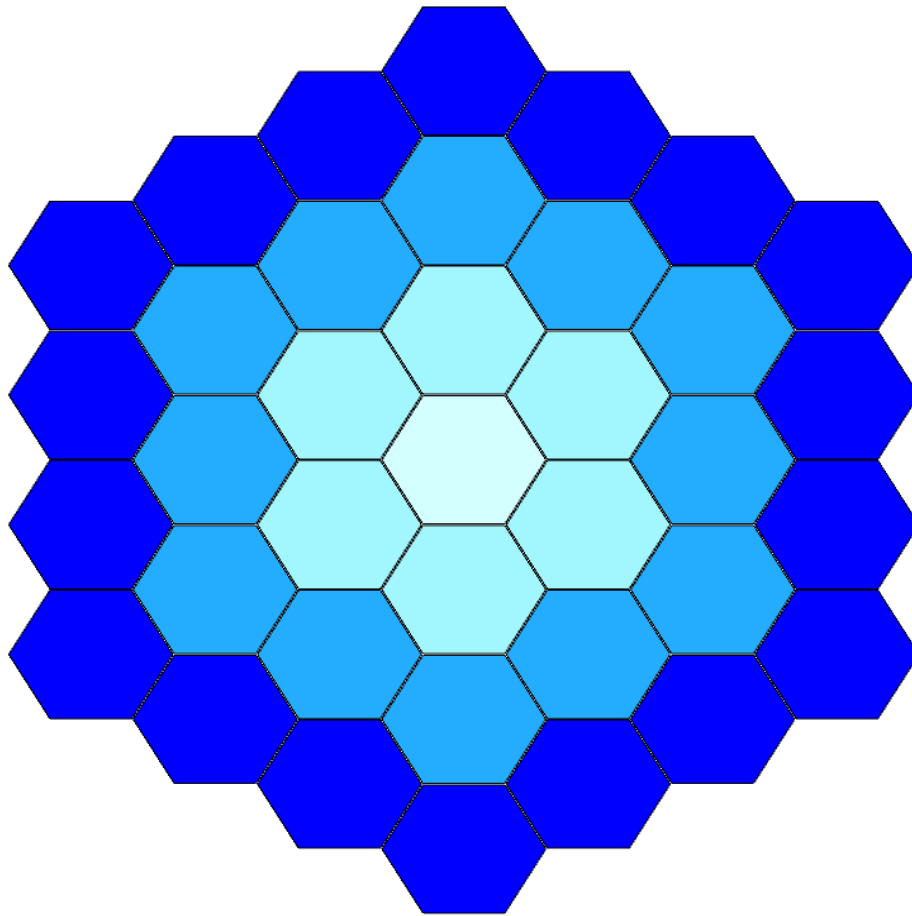


Figura 3.16 Arreglo de facetas hexagonales. Los colores representan

la distancia focal individual de cada faceta.

Por último, las facetas cuadradas nos dan la misma ventaja que las hexagonales, pudiendo aprovechar también con estas, casi en su totalidad el área de apertura del concentrador. Una característica que brindan las facetas cuadradas para esta aplicación, es que, como en el horno solar tenemos una apertura con geometría cuadrada, el aprovechamiento de área es aún mayor que si se utilizaran facetas hexagonales. Y como se mencionó anteriormente, es posible simplificar aún más la construcción del concentrador, si se utilizan facetas idénticas, es decir, con la misma distancia focal.

Para lograr este último punto, es necesario obtener una distancia focal para la cual, la concentración presente un máximo y la potencia se mantenga dentro de los parámetros de diseño. Para la curvatura de las facetas se analizan los tipos esféricas y parabólicas. Para determinar el número de facetas se opta por dividir el concentrador en una matriz con lados pares. Por simplicidad, se ha determinado utilizar un arreglo de 16 facetas, esto es, 4 facetas por lado. En el gráfico 3.3 se muestran los resultados de simulaciones hechas en Soltrace con facetas parabólicas y facetas esféricas. Todas con la misma distancia focal. Es importante mencionar que los valores del eje horizontal del gráfico se refieren a la distancia paralela a los rayos, desde el vértice de las 4 facetas centrales hasta el punto focal. Por lo tanto la distancia focal real será mayor que dicho valor de posición.

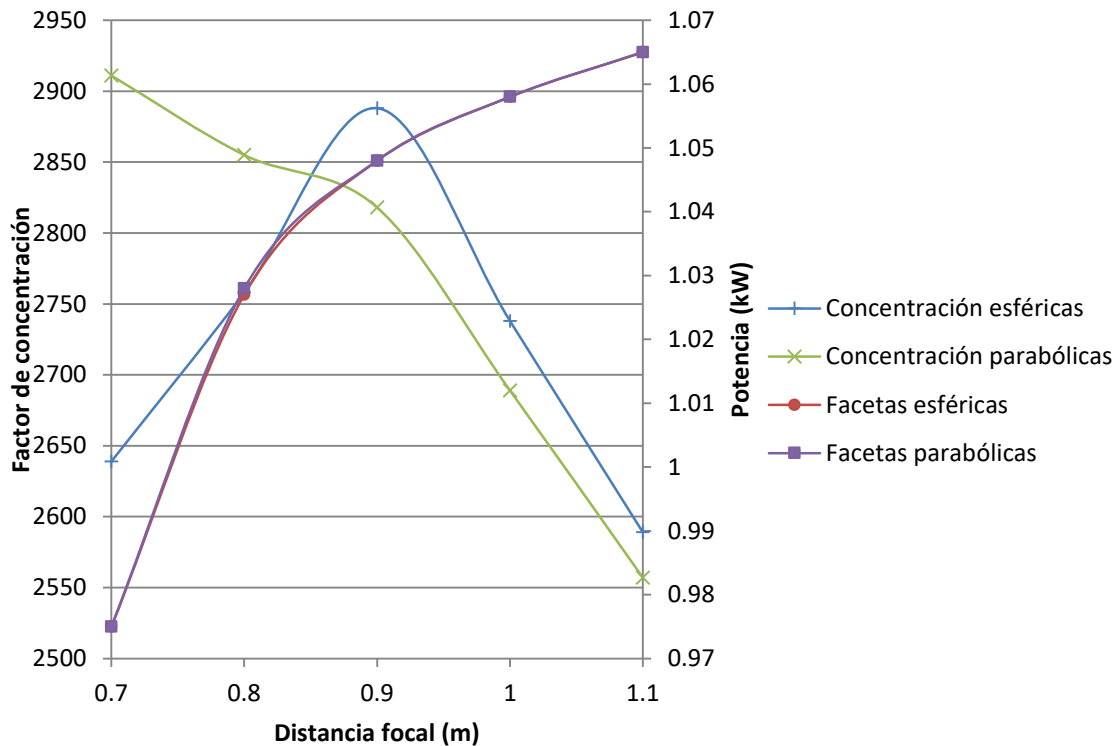


Figura 3.17 Comparación entre los resultados con facetas esféricas y parabólicas.

Es notable observar en la gráfica 3.3 que la concentración a bajas distancias focales, en un concentrador parabólico comienza a mejorar con respecto a la que se obtiene con un concentrador esférico. Esto es debido a lo analizado anteriormente dentro de las características de los concentradores, donde se mencionó que en los concentradores parabólicos, mientras menor sea la distancia focal, los errores ópticos son menos notables y su concentración es mayor; pero en un concentrador esférico, a bajas distancias focales y por lo tanto altos ángulos de borde, la aberración esférica es mayor y hace caer la concentración en mayor grado que los mismos errores ópticos. En este caso sin embargo, cuando se tiene un máximo de concentración con un parabólico, la potencia ha caído por debajo de 1kW, lo cual no cumple con el principal parámetro de diseño del horno solar. Esta caída de potencia se da al presentarse espacios abiertos en el concentrador, debido a la inclinación de las facetas, como se muestra en la figura 3.18;

donde es posible observar que dentro del área de apertura del concentrador, existen más espacios sin aprovechar cuando se tiene una distancia focal menor.

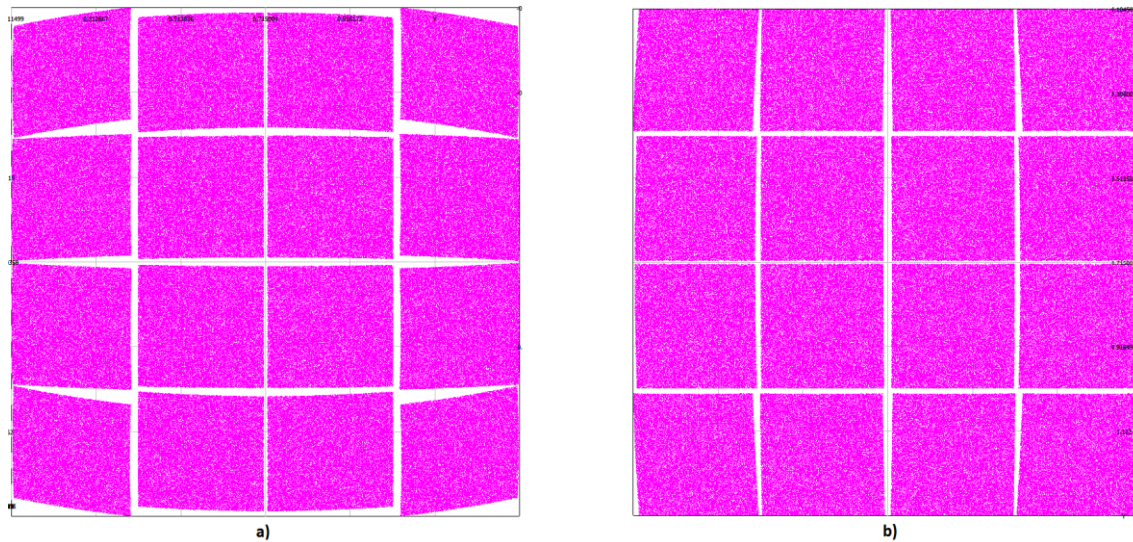


Figura 3.18 Espacios no aprovechados dentro del área del concentrador. En a) se tiene un receptor ubicado a 70cm del concentrador. En b) se tiene un receptor ubicado a 110cm del concentrador.

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos en simulaciones, el arreglo óptico que cumple de manera más cercana a los parámetros de diseño del horno solar, es el de un concentrador segmentado en 16 facetas cuadradas, con curvatura esférica con la misma distancia focal para todas. Los resultados de simulaciones muestran un máximo en la concentración cuando el receptor se posiciona a 90cm del vértice de las facetas centrales, sin embargo, por factor de seguridad en la potencia y para la reducción de la inclinación de las facetas, será utilizado el arreglo con el receptor a 100cm de las facetas centrales. Esto significaría entonces, una reducción de cerca del 5% en el factor de concentración cuando se comparan ambas distancias focales.



### 3.3.4 Diseño óptico del heliostato

Hasta este momento se tienen los datos de la eficiencia óptica del sistema y del tipo y dimensiones del concentrador. Ahora es necesario establecer las dimensiones del heliostato que enviará la radiación hacia este concentrador.

El dimensionamiento del heliostato depende de dos factores, el tamaño de apertura del concentrador y del tiempo que se desea que opere el horno solar. Las dimensiones del concentrador están establecidas como un cuadrado de 1.2m de lado. El tiempo de operación, se debe establecer en base al medio día solar, ya que ese parámetro sirve como un “eje de simetría” en la operación del horno. Estableciendo el tiempo de operación en base a horas antes y horas después del medio día solar.

Cuando se menciona el medio día solar, nos referimos al momento del día cuando el sol se encuentra exactamente a la mitad de su recorrido por el cielo para un día del año y ubicación geográfica en particular, ya que dependiente de la fecha y posición terrestre, el medio día solar varía para cada uno de estos. Cuando el sol viaja en el cielo, recorre un trayecto con forma de arco, cuando el sol se encuentra a la mitad de ese arco, se tiene que, estando en el hemisferio norte terrestre, el disco solar se encuentra exactamente hacia el sur geográfico. Si se considera que el arco de trayecto se trazara sobre un plano perpendicular a la línea del horizonte, se observaría lo mostrado en la figura 3.19.

Cuando se tiene que el ángulo  $w$  de la figura 3.16 llega a cero, el sol estará orientado hacia el sur geográfico y se presenta el medio día solar. Por ejemplo para Hermosillo, en el solsticio de verano (21 de junio), se tiene que  $w = 0$  a las 12:30, y en el solsticio de invierno (21 de diciembre) esta misma condición se presenta a las 12:23. Esto en base relaciones matemáticas de trayectorias solares, donde  $\gamma_s$  es el ángulo acimutal,  $w$  es el ángulo del arco solar,  $\delta$  es el ángulo de declinación terrestre con respecto a la posición del sol y  $\theta_z$  es el ángulo cenital. Por lo tanto, el medio día solar se da cuando  $\gamma_s$  es igual a  $90^\circ$  (el eje de referencia para el ángulo acimutal puede ser el sur o el oeste). En la figura

3.20 se muestra la descripción gráfica de la ubicación de estos valores para un punto sobre la superficie terrestre.

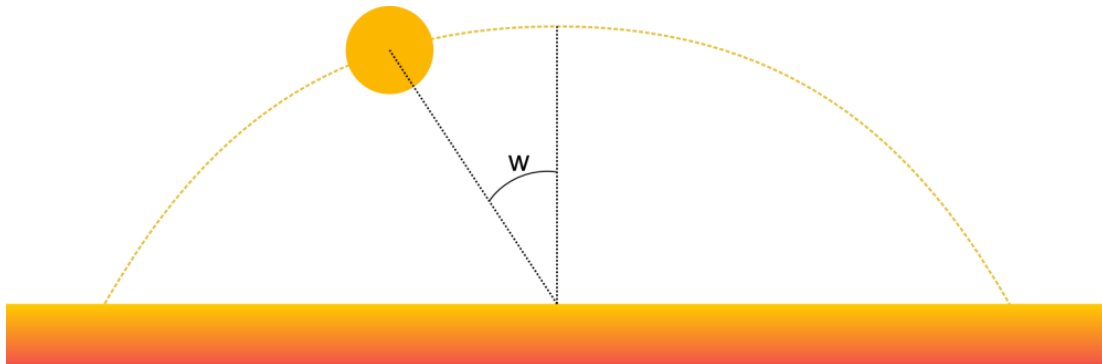


Figura 3.19 Trayectoria de arco del sol sobre un plano perpendicular al horizonte.

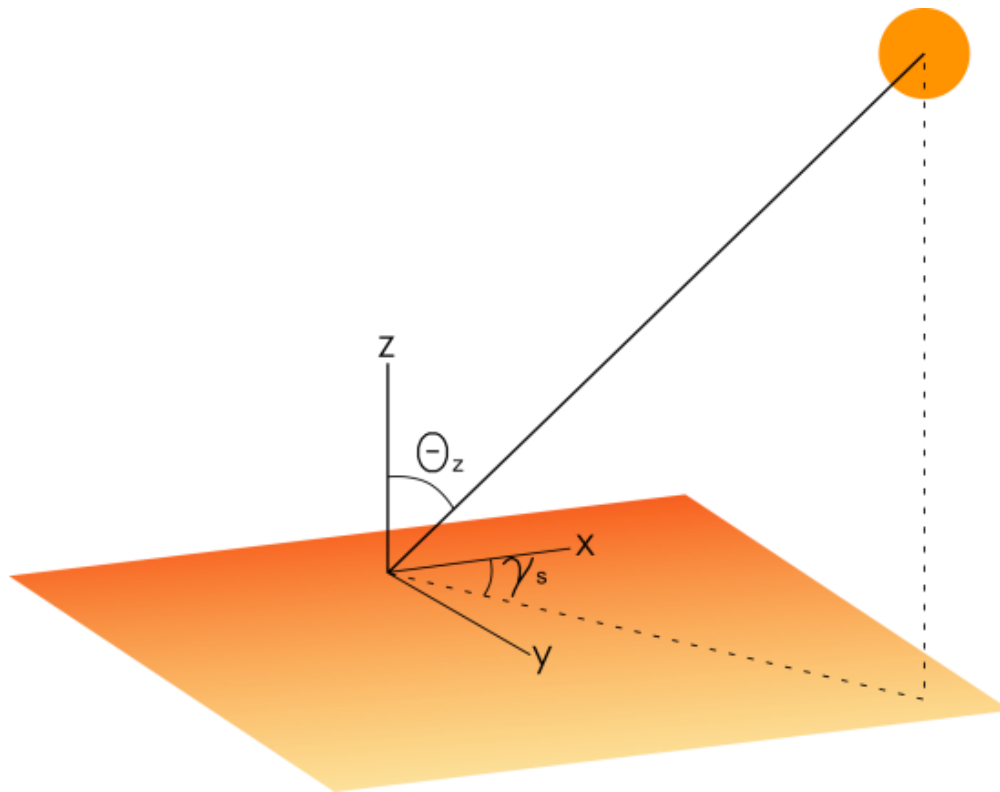


Figura 3.20 Ángulos solares sobre un punto geográfico.

Por lo tanto, para el parámetro de diseño del horno que se refiere al medio día solar, se tomarán como base para cálculos y simulaciones, los horarios de fechas específicas del año en curso, como son el 21 de marzo (equinoccio de primavera), 21 de junio (solsticio de verano), 21 de septiembre (equinoccio de otoño) y el 21 de diciembre (solsticio de invierno). Son estas fechas del año en las que se realizan los cálculos para determinar 3 posiciones del sol durante el día, al inicio de operación del horno, al medio día solar y al final de operación del horno. De esta manera se obtiene la información de las manchas solares proyectadas por el helióstato sobre el plano de apertura del concentrador.

El tiempo de operación nominal que se ha determinado para este horno solar es de 3 horas. Esto es, 1.5 horas antes y 1.5 horas después del medio día solar (aproximadamente de 10:30 a 13:30). Durante el transcurso de ese tiempo, el helióstato irá modificando su inclinación (en ambos ejes de movimiento) con respecto al sol, con la finalidad de mantener la mancha solar incidiendo siempre sobre la apertura del concentrador. Estas distintas variaciones angulares del espejo con respecto al sol, generan una deformación constante en la mancha proyectada, de la cual debe conocerse con certeza la geometría resultante para las posiciones inicial y final del tiempo de operación. Ya que es esta deformación la que determina las dimensiones del helióstato necesarias para cubrir la apertura del concentrador durante todo el tiempo nominal de operación del horno.

La deformación de la mancha solar, se debe a las distintas posiciones del helióstato con respecto al plano de apertura en el concentrador. En la figura 3.21 se observa un ejemplo de cómo varía la forma de lo que el concentrador “ve” como superficie reflectiva en el helióstato. Donde se tiene que el cuadro verde representa la apertura del concentrador, y los distintos romboides son proyecciones del helióstato a distintas horas de un día. En a) la proyección cubre el área de apertura en su totalidad, por lo tanto no existen zonas sin uso en el concentrador; en b) la proyección mostrada comienza a dejar zonas sin uso en la apertura, pero en un porcentaje relativamente pequeño; en c) la magnitud del área sin uso llega a ser representativa, por lo tanto se puede deducir que la dimensión del helióstato es demasiado chica para la hora en que se obtiene dicha proyección.

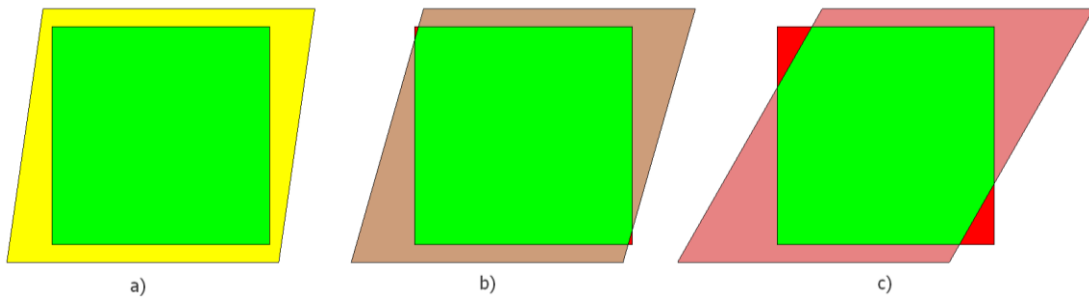


Figura 3.21 Proyecciones del heliostato sobre la apertura cuadrada del concentrador.

Estas deformaciones de la proyección se deben al fenómeno provocado por el factor coseno, el cual nos indica que la mancha de luz reflejada se verá afectada en magnitud del coseno del ángulo resultante entre la normal de la superficie y la dirección de los rayos que inciden en ella, como se muestra en la figura 3.22.

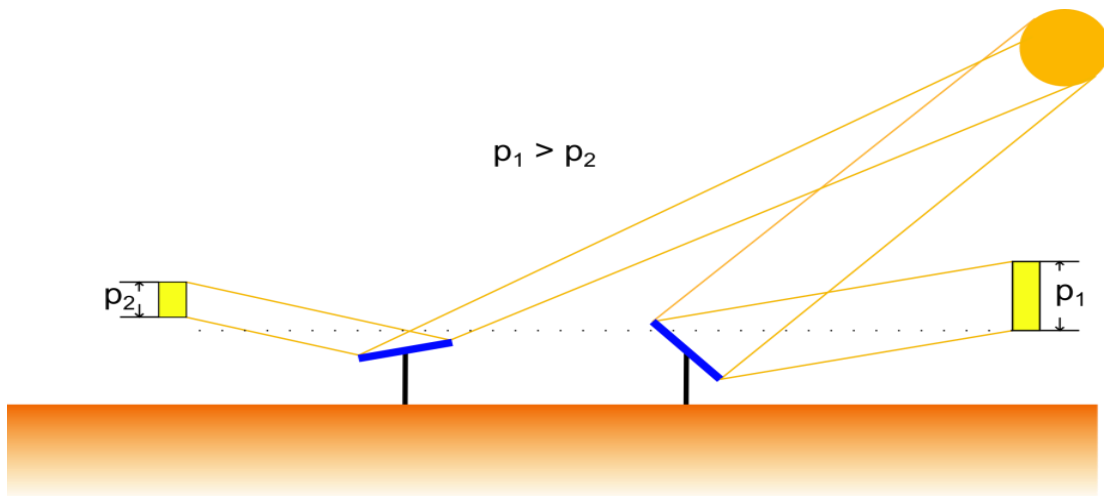


Figura 3.22 Efecto del factor coseno en la proyección de una luz reflejada.

La forma en que se hizo variar la geometría de las proyecciones comentadas, son para un heliostato que se encuentra alineado (sobre el eje norte-sur), por lo que las aristas inferior y superior de la proyección no varían en inclinación, pero sí en su posición con respecto al centro.

Utilizando un método gráfico, es posible obtener las proyecciones de un heliostato con espejo cuadrado sobre un plano. Para esto, es necesario modelar los objetos en un software de dibujo tridimensional, que en el caso de este trabajo fue utilizado el denominado Sketchup. Y de esta manera, orientar el objeto que representa al heliostato, de acuerdo a las posiciones necesarias para dirigir la mancha solar sobre el concentrador. Dichas posiciones serán obtenidas para los días característicos mencionados anteriormente. No se entrará en detalle con los cálculos vectoriales que dictan la posición del heliostato para los distintos horarios del día, ya que es algo relativo al control para seguimiento, un tema que no será tratado en gran detalle en este trabajo de tesis.

Como se mencionó anteriormente, el heliostato se encuentra alineado con el concentrador sobre el eje norte-sur. Para determinar de posiciones del heliostato, no es relevante la distancia entre el concentrador y el heliostato, ese tema será tratado más adelante. Los datos necesarios para obtener estas posiciones angulares son:

- Ubicación  $x$ ,  $y$ ,  $z$  del centro de giro del heliostato (se hacen coincidir ambos ejes de movimiento en un mismo plano).
- Ubicación  $x$ ,  $y$ ,  $z$  del centroide de la apertura del concentrador.
- Fecha
- Hora.

Con esta información se obtiene el vector normal de la superficie del heliostato, el cual es necesario determinar para cada hora y fecha especificada, para conocer las proyecciones de la mancha solar. En la tabla 3.1 se muestran los resultados de los vectores normales requeridos para cada horario en distintos días del año. Se establece que el eje  $Z$  es normal a la superficie terrestre, tomando la dirección hacia el cielo como

la positiva; el eje Y tiene la dirección este-oeste, tomando al este como la dirección positiva; y el eje X tiene orientación norte-sur, tomando al norte como la dirección positiva. El centro del helióstato se establece como el origen (0, 0, 0); el centro de la apertura del concentrador se ubica a 5 metros de distancia del origen en dirección al sur (-5, 0, 0).

Tabla 3.1 Valores del vector unitario normal de la superficie del helióstato

Fecha	Hora solar	Vector normal		
		<b>i</b>	<b>j</b>	<b>k</b>
21-mar-13	10:30	0.8529	0.2243	0.4715
	12:00	0.8636	0.0000	0.5041
	13:30	0.8529	-0.2244	0.4715
21-jun-13	10:30	0.7293	0.2407	0.6405
	12:00	0.7408	0.0000	0.6717
	13:30	0.7293	-0.2407	0.6405
21-sep-13	10:30	0.8495	0.2488	0.4653
	12:00	0.8627	0.0000	0.5056
	13:30	0.8495	-0.2488	0.4653
21-dic-13	10:30	0.9379	0.1872	0.2920
	12:00	0.9469	0.0000	0.3214
	13:30	0.9379	-0.1871	0.2920

Posterior al cálculo de las distintas orientaciones, se utilizan estos valores de i, j, k para orientar el modelo tridimensional de la superficie que representa el helióstato y con esto es posible conocer la proyección que corresponde a cada posición. Conociendo la geometría resultante de las proyecciones que se presentan al inicio y al final de la operación del horno, es posible dimensionar el espejo del helióstato, para evitar desperdiciar radiación, como se analizó en la figura 3.14, o bien, para no sobredimensionar el espejo. Como dimensión inicial, el espejo tendrá la geometría de un cuadrado con lados de 1m.

Como resultado del modelado de las superficies en espacio tridimensional, se obtuvieron las siguientes proyecciones para un espejo cuadrado con lados de 1m. En la figura 3.23 se observan cuatro pares de proyecciones para cada día característico. El motivo de usar sólo 2 proyecciones por día, es que las manchas del inicio y final de operación tienen las mismas dimensiones, pero su figura es inversa, con simetría sobre el eje vertical. Por lo tanto, sería redundante utilizar las manchas de inicio y final de operación del horno, ya que se obtiene la misma información de ambos casos. Lo cual se puede corroborar en la tabla 3.1, al comparar las magnitudes de  $i$  y  $k$  para un mismo día.

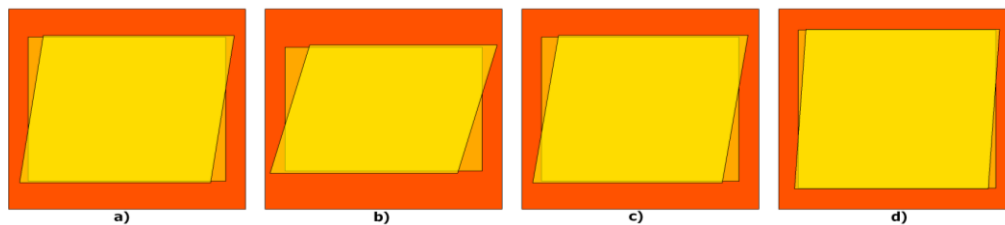


Figura 3.23 Proyecciones de la mancha solar obtenidas por un heliostato de 1m<sup>2</sup>.

En la figura 3.23 se muestran para a) la proyección del equinoccio de primavera, para b) la del solsticio de verano, para c) la del equinoccio de otoño y para d) la del solsticio de invierno. Es fácil observar que en verano, la mancha solar tiene menor área que las demás, esto se debe a que el sol se encuentra más cerca del cenit y por lo tanto el heliostato debe estar más inclinado con respecto de la apertura del concentrador para enviar la radiación, provocando esto una reducción en el factor coseno.

El cuadro naranja del fondo representa la apertura del concentrador, por lo que se puede deducir que un heliostato de 1m por lado es demasiado chico para cubrir el área de apertura. Por lo tanto, seguido a esto se dimensiona el heliostato en aumentos por lado de 10cm, hasta cubrir la totalidad del área de apertura para el día más desfavorable, que es el solsticio de verano. Obteniendo el resultado que se muestra en la figura 3.24. En donde se muestran 2 proyecciones, correspondientes al inicio de operación del horno

(romboide azul celeste) y al medio día solar (cuadrado verde azulado). El espejo que genera estas proyecciones tiene lados de 1.6m.

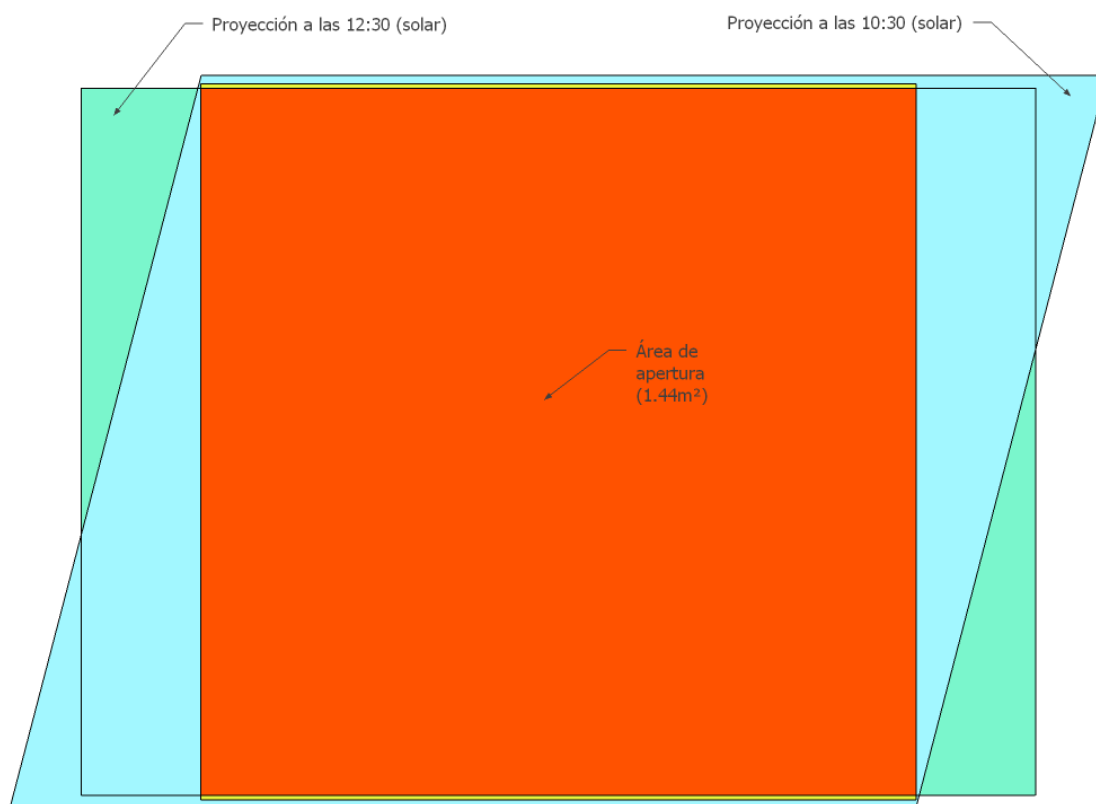


Figura 3.24 Proyecciones de la mancha solar con espejo cuadrado de 1.6m. El 21 de junio de 2013



A pesar de que un espejo de 1.6m de lado cubre casi en su totalidad el área de apertura en todo el tiempo nominal de operación del horno, su selección compromete el diseño en lo relacionado con los materiales comercialmente disponibles. Ya que a nivel local, el tamaño máximo de hoja de espejo tiene 1.5m de ancho, por lo cual, si se utilizara un espejo cuadrado de 1.6m de lado, se deberá construir en base a 2 hojas de espejo, lo cual constituye un aumento en la probabilidad de obtener errores ópticos mayores. Por lo tanto, se debe comparar lo obtenido con un espejo con lados de 1.6m, contra uno de 1.5m. Esto se evalúa en base a la cantidad de área del concentrador no cubierta y a la cantidad de área de proyección que queda fuera del concentrador. En la figura 3.25 se muestran los resultados de esta evaluación utilizando un método gráfico.

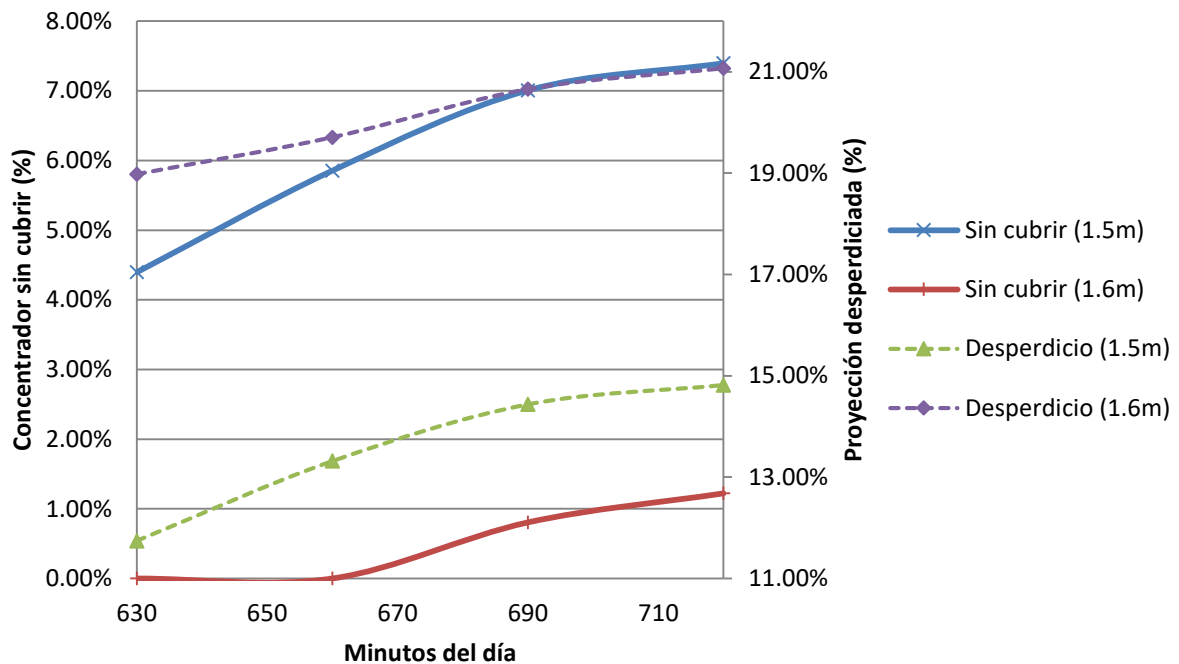


Figura 3.25 Comparativa entre espejos cuadrados con lados de 1.5m y 1.6m

Se observa que el espejo con lados de 1.6m cubre el área del concentrador casi en su totalidad; comenzando a fallar cerca del minuto 665 del día, teniendo al medio día un máximo de falla de 1.2% del área de apertura sin cubrir. A su vez, el espejo con lados de 1.5m nunca cubre en su totalidad el área del concentrador, iniciando con más de 4% de área sin cubrir y finalizando en un máximo de 7.4%. Por otra parte, el espejo más grande presenta siempre una mayor área de proyección desperdiciada, incluso su mínimo de área desperdiciada es 2% mayor que la máxima de desperdicio del espejo de menor tamaño. Para el espejo con lados de 1.5m, su máxima proyección desperdiciada es menor a 15%; y para el espejo con lados de 1.6m, su máxima proyección desperdiciada es mayor a 21%.

Tomando en cuenta estos datos, y considerando el factor de complicación que implicaría utilizar una superficie de dos espejos planos independientes en un helióstato, se opta por

utilizar una sola lámina cuadrada con lados de 1.5m. Con esto, es posible ahora dimensionar los componentes mecánicos para el movimiento del heliostato.

### **3.3.5 Diseño especial para pruebas: Receptor**

Como parte especial dentro del diseño de un horno, se requiere un receptor para aprovechamiento y caracterización la energía concentrada por los sistemas ópticos. Sin embargo, el tipo de receptor dependerá siempre de la prueba que se plantea realizar, es decir, no existe un diseño o metodología generalizada para dimensionar un receptor en específico. La única parte de un receptor que puede ser propuesta en base a las características del sistema óptico, es el tamaño de la apertura donde se recibirá la radiación.

Al tener las estimaciones de los errores y aberraciones ópticas del sistema de apuntamiento y del factor de concentración, se puede realizar una predicción con trazado de rayos del tamaño máximo de la mancha de radiación concentrada, y con esto dimensionar de forma optimizada la parte del horno que recibe la energía. En el caso de este horno solar, se desea mantener el área del receptor, lo más pequeña posible, ya que al tener un receptor alineado con el eje del concentrador, el área frontal del receptor, obstruirá la radiación que se envía desde el heliostato hacia el concentrador.

Con las ubicaciones determinadas de los componentes, se simula el arreglo óptico mediante trazo de rayos, que consta de un heliostato de 2.25m<sup>2</sup> y un concentrador de 16 facetas con curvatura esférica; se obtienen los resultados mostrados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores de potencia y nivel de concentración máximos obtenidos en Soltrace

Día	Tiempo (minutos)	Concentración	Potencia (kW)
21-mar	630	2571	1.0273
	720	2616	1.0273
	810	2583	1.0291
21-jun	630	2531	1.0266
	720	2633	1.0285
	810	2546	1.0275
21-sep	630	2596	1.0283
	720	2566	1.0278
	810	2578	1.0269
21-dic	630	2608	1.0273
	720	2567	1.0263
	810	2608	1.0297

Se puede observar que el parámetro de potencia máxima es alcanzado con los valores de errores ópticos estimados, así como también con las dimensiones calculadas para los componentes. Manteniéndose siempre la potencia sobre los 1000W. Es posible observar también la variación en el nivel de concentración, obteniéndose un máximo al medio día, durante la primer mitad del año, y en la segunda mitad del año, el máximo se obtiene al inicio y final de operación del horno en el día. La mancha solar resultante de las simulaciones se muestra en la figura 3.26.

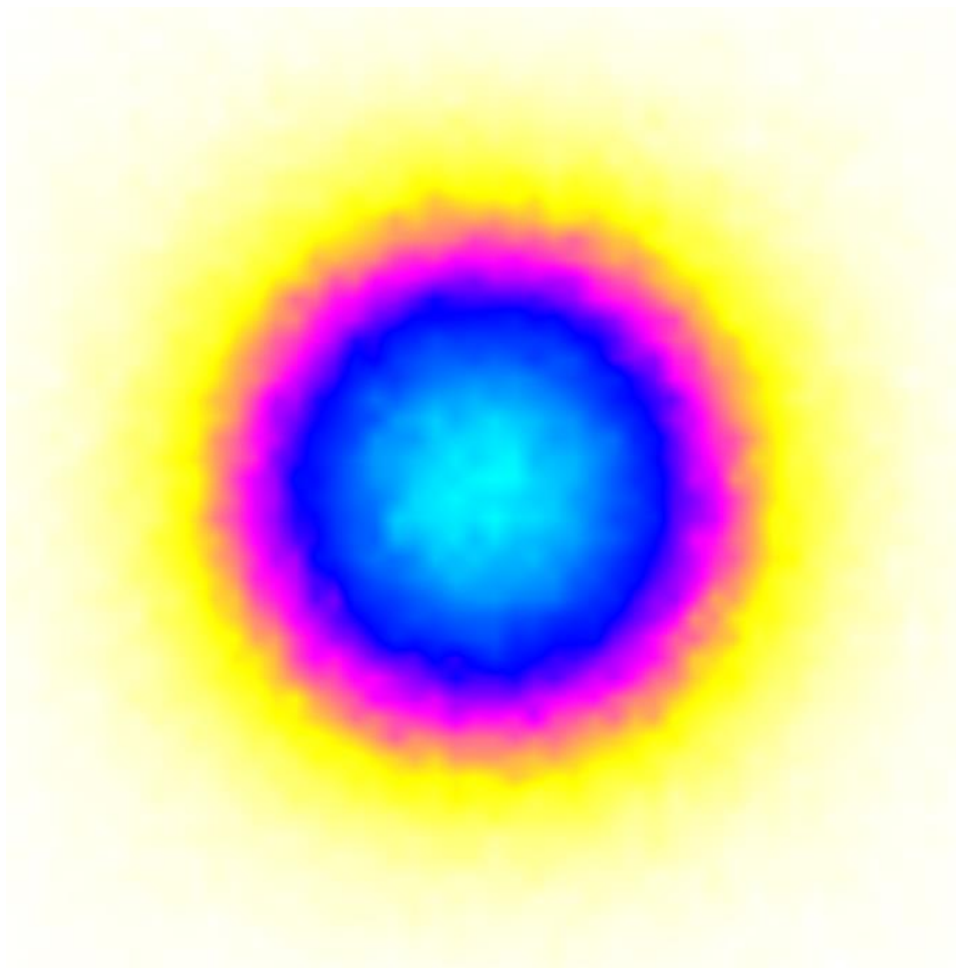


Figura 3.26 Mancha solar resultante del arreglo óptico del horno en Soltrace.

El tamaño aproximado de la mancha solar obtenido en las simulaciones es de 45mm de diámetro. Este valor nos sirve para dimensionar el receptor térmico de pruebas que se instala en la zona focal del concentrador, buscando mantenerse lo más cerca posible de la dimensión de la mancha solar, para así no obstruir más área de la necesaria pero a su vez aprovechar la máxima radiación posible. En la figura 3.27 se muestra la cantidad de

potencia recibida en un receptor circular a distintos diámetros. Como se puede observar, para tamaños pequeños de un receptor, el sombreado no representa un factor importante para la cantidad de potencia que se desea hacer incidir en el concentrador; sin embargo en caso de requerir utilizar alguna estación de trabajo de mayores dimensiones, el área de este representaría un porcentaje a considerar en los cálculos de energía que sería recibida en la zona focal.

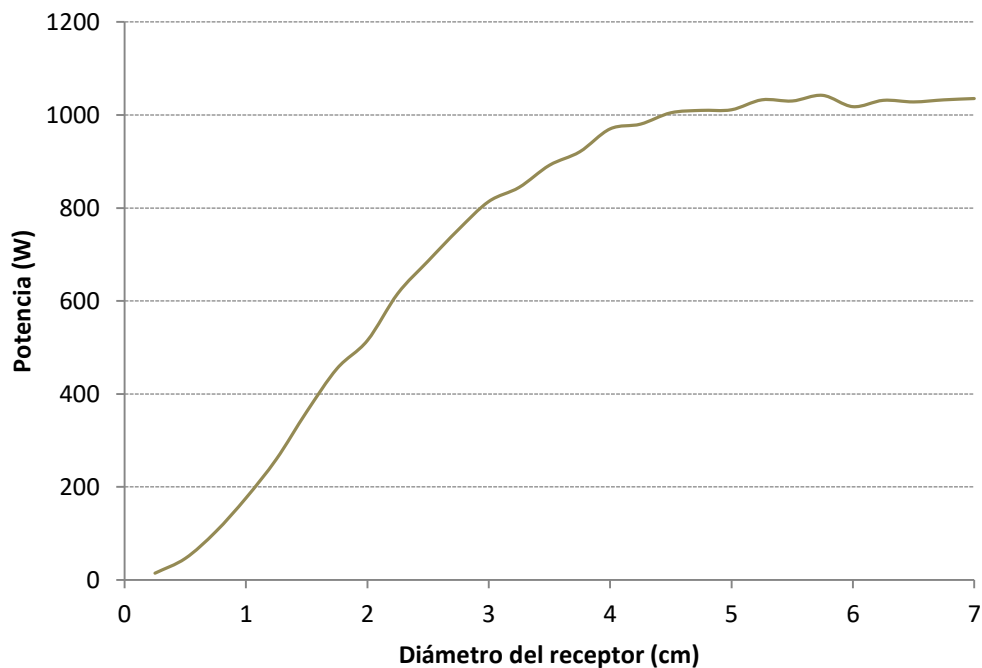


Figura 3.27 Potencia recibida sobre un receptor circular con distintos diámetros.

Por lo tanto, se plantea utilizar un RDP plano con una cara redonda orientada hacia el centro del concentrador. El diámetro del RDP será de 50mm, ya que sobre este diámetro la cantidad de potencia recibida se estabiliza; y se monta sobre la misma estructura donde está montado el concentrador en un arreglo centrado en el eje con este.

### 3.3.6 Diseño del concentrador: facetas

Según se analizó anteriormente, un concentrador segmentado, conformado por 16 facetas cuadradas cumpliría satisfactoriamente con los parámetros de diseño deseados. Para lograr esto, se plantea la fabricación de las facetas utilizando maquinaria de control numérico computacional para obtener una geometría de curvatura en revolución con alto grado de precisión.

Se plantea utilizar placas de aluminio de 0.75 pulgadas de espesor para maquinarse una de sus caras. Con esto se lograría una curvatura esférica con las características deseadas. A una menor rugosidad de la superficie trabajada, es decir, con una mayor cantidad de pasos de corte, mejor será el resultado en cuanto a características ópticas.

Es posible utilizar la misma superficie pulida del aluminio para obtener una superficie reflectiva, aun así, se revisa la opción de utilizar una película reflectiva de recubrimiento en base a materiales poliméricos como pudiera ser una película reflectiva para aplicaciones solares de las marcas 3M o Reflectech. El aspecto de una faceta maquinada se observa en la figura 3.28.

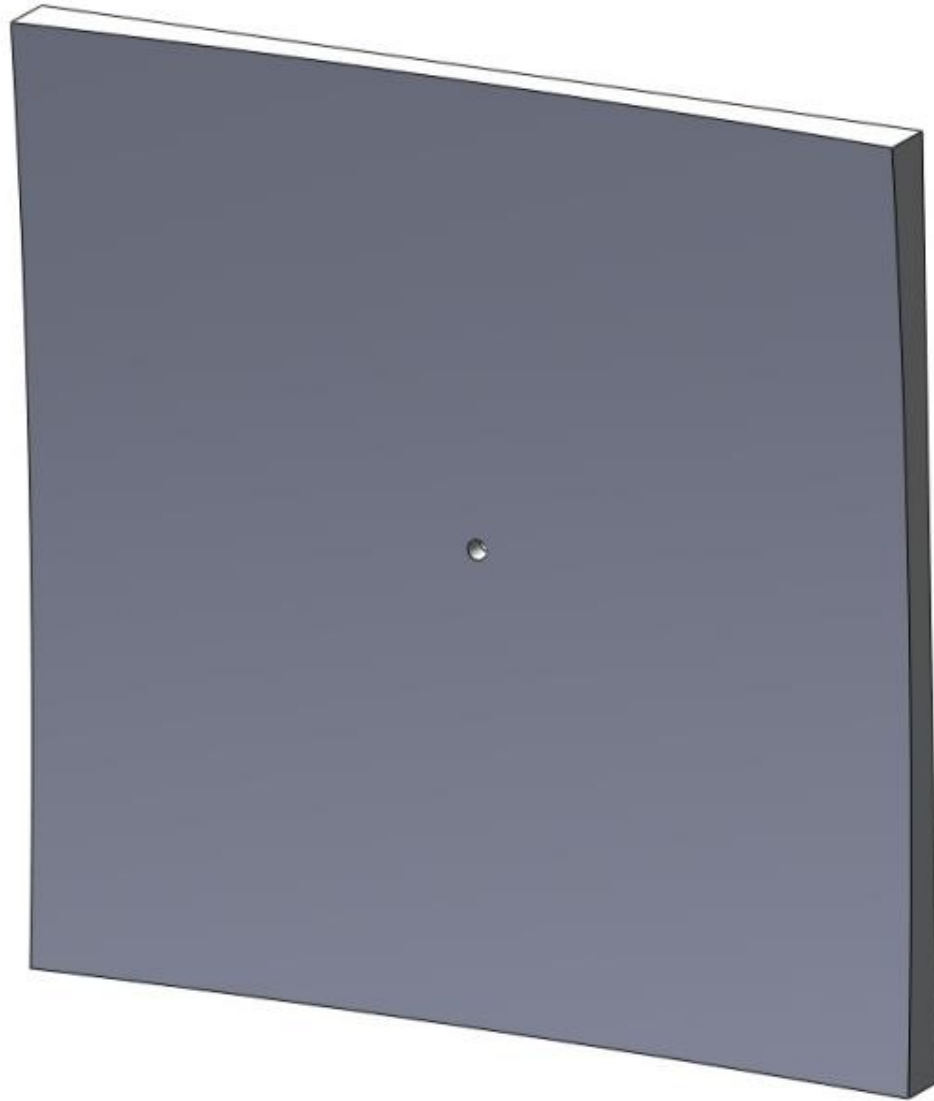


Figura 3.28 Faceta con geometría cuadrada y curvatura esférica.  
Fabricada en placa de aluminio de 0.75 pulgadas de espesor

Como alternativa a este método de fabricación, se plantea también, utilizar una sola placa de aluminio maquinada, la cual sería utilizada como molde para colar un material cerámico compuesto. Posteriormente se recubriría la cara esférica de la pieza colada con



la misma película reflectiva planteada en el párrafo anterior. Este método resultaría ser el más económico, pero posiblemente resultaría en un arreglo de facetas con un menor factor de concentración final por posibles imperfecciones superficiales al momento de fabricar las facetas.

En la cara posterior a la que presenta una curvatura, cada faceta poseería un sistema de soporte, el cual se utilizaría para montarse en una estructura. Dichos soportes deben tener capacidad de ajuste en 2 ejes.

### **3.3.7 Diseño del concentrador: estructura**

Como parte del concentrador, es necesario considerar también una estructura base capaz de soportar las 16 facetas de manera suficientemente rígida como para no presentar desviaciones en las facetas y a su vez que posea la facilidad de instalación y ajuste de inclinación de las facetas.

Para esto se plantea una estructura fabricada con perfil tubular rectangular (PTR) de acero para las partes de mayor carga y rigidez; y de perfil industrial de aluminio para las secciones en donde se deba realizar algún ajuste de posiciones entre las partes (figura 3.29).

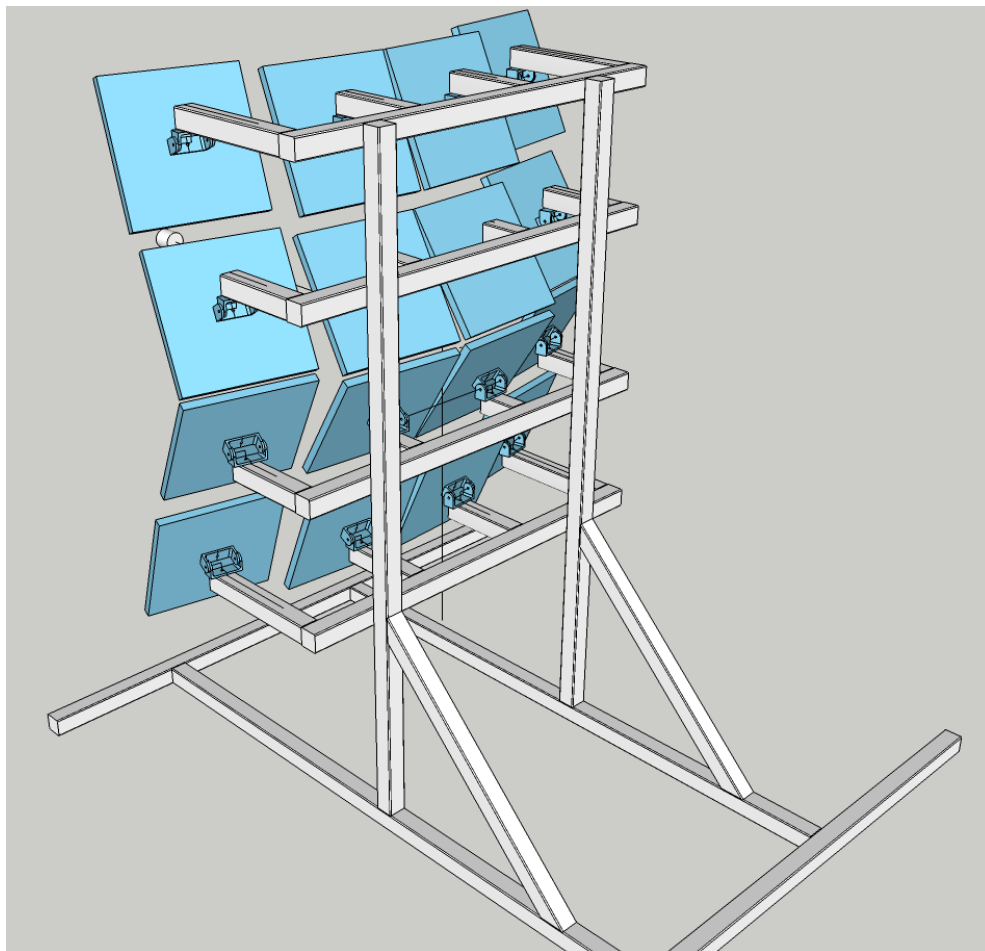


Figura 3.29 Estructura de soporte para las facetas que conforman el concentrador, cada una con su orientación.

### 3.3.8 Diseño del heliostato: mecanismos

Un heliostato debe operar bajo condiciones de vientos determinadas. Para este diseño, se analiza la información estadística de velocidades de viento que se ha registrado durante

dos años en la Plataforma Solar de Hermosillo. De donde se encuentra que en la zona, los vientos promedio se dan con velocidades entre 2m/s y 4m/s. A su vez, a lo largo del año, se presentan vientos sostenidos con velocidades de 8m/s, sobre todo entre los meses de marzo a septiembre. Ocasionalmente, dentro de esos meses, se presentan rachas de viento con velocidades pico que oscilan entre los 15m/s a 31m/s.

Estos datos son útiles para dos partes del diseño del helióstato. Una es la parte estructural y la otra la que se refiere a los mecanismos que moverán los ejes para el seguimiento solar. En el caso del diseño de mecanismos, los datos útiles en cuanto a cargas de viento son los que nos describen las velocidades promedio sostenidas, ya que es en estos casos cuando el helióstato deberá seguir funcionando sin interrumpir su secuencia de apuntamiento al concentrador. Y la información de sobre velocidades máximas de viento, nos dictarán las cargas que el viento ejercerá sobre la estructura del helióstato, cuando este se encuentre en posición de descanso, o bien, de seguridad.

La posición de seguridad del helióstato, es en la que la posición del espejo tiene su vector normal hacia el cielo, esto es, que la superficie del helióstato se encuentra paralela a la dirección del viento, por lo tanto, las cargas sobre los mecanismos y los componentes estructurales se minimiza. Ya que el área frontal en relación al flujo del viento es mínima. La figura 3.30 muestra las fuerzas y momentos a los que está sometido un helióstato frente a un flujo de viento.

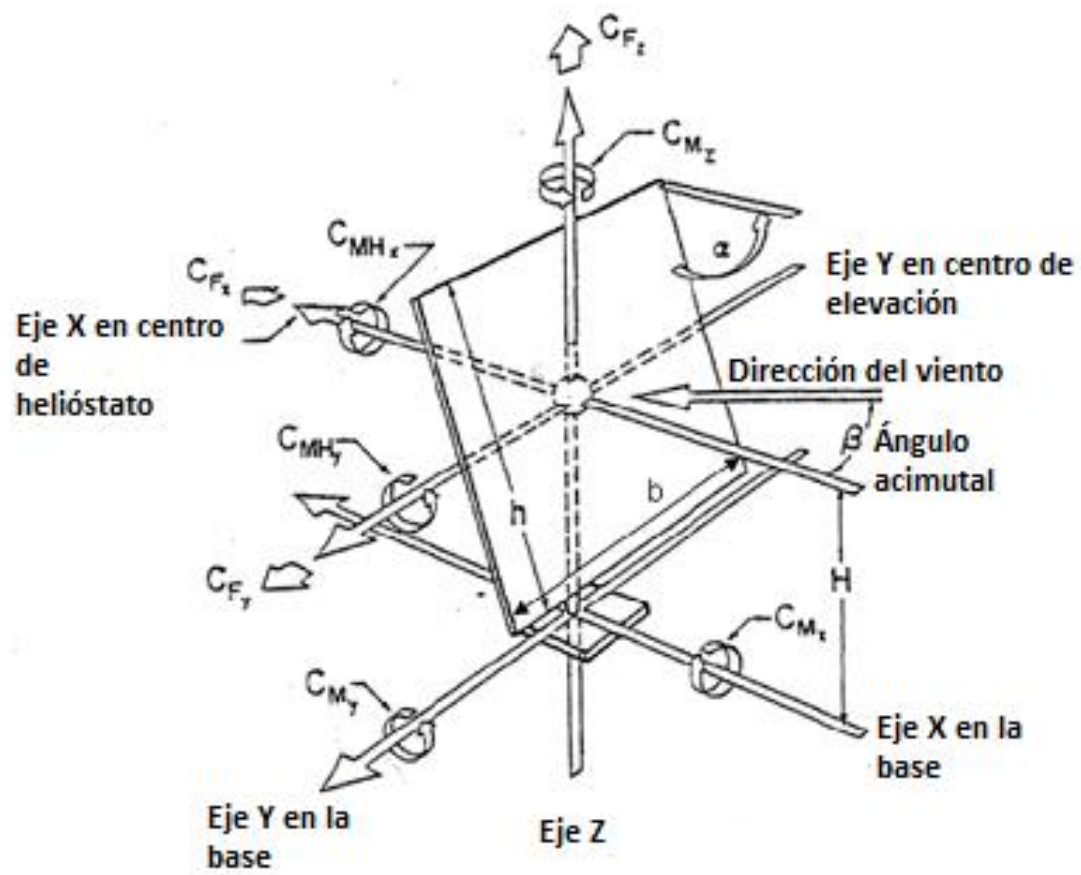


Figura 3.30 Fuerzas y momentos sobre un heliostato y su base en los 3 ejes cartesianos.

Para el diseño del helióstato en este trabajo, los datos de fuerzas y momentos presentes en la base o cimentación, no serán analizados. No así para los momentos presentes en el eje de elevación ( $M_{H_y}$ ) y acimutal ( $M_z$ ), evaluando estas condiciones para dimensionar los elementos mecánicos para los sistemas de movimiento angular en ambos ejes.

Para determinar la magnitud de momento torsionante en los ejes, se utiliza la ecuación #, donde  $M$  es el momento [Nm],  $c_M$  es el coeficiente de carga del viento [-],  $\rho$  es la densidad del aire a temperatura ambiente [ $\text{kg/m}^3$ ],  $v$  es la velocidad media del viento [m/s],  $A$  es el área de la superficie del espejo y  $L$  es la longitud del lado del espejo [m]. [37]

$$M_{x,y,z} = c_{x,y,z} * \left(\frac{\rho}{2}\right) * v^2 * A * L \quad (3.16)$$

Para este análisis, la velocidad del viento será la establecida para la operación del helióstato, que será la máxima en el año que se presenta de forma sostenida en la Plataforma Solar de Hermosillo, siendo esta de 8m/s; la densidad del aire se considera a  $1.2\text{kg/m}^3$ , el área del helióstato es de  $2.25\text{m}^2$ , la longitud del lado  $L$  es de 1.5m y el coeficiente de carga de viento varía para la posición en que se encuentre el helióstato con respecto a la dirección de flujo del viento, obteniéndose esta mediante correlaciones matemáticas. [38]

Para obtener la magnitud del momento en los ejes de elevación y acimutal, el coeficiente de carga de viento  $c$  que se utilizará es el máximo resultante para cada eje de las correlaciones matemáticas de referencia, el cual se da para el eje acimutal, al tener el helióstato una inclinación en elevación de  $30^\circ$  ( $0^\circ$  es la posición de descanso) sobre el eje de elevación y un ángulo de  $135^\circ$  en acimut con respecto a la dirección del viento, en este caso, cuando se tenga el helióstato apuntando hacia el sur y el viento fluya desde la dirección sureste; de la misma forma, para el eje de elevación, la  $c$  es máxima cuando se tiene el helióstato apuntando hacia el sur con una posición en elevación de  $30^\circ$  y el viento fluye desde el sur. El comportamiento de la correlación obtenida para el coeficiente de carga de viento  $c$  se muestra en la figura 3.31 (El valor correspondiente a  $c$ , se representa como  $CM_y$  o  $CM_z$ , para los distintos ejes de rotación). Donde las 3 líneas

superiores muestran el valor de  $c$  para el eje Z (línea negra es máximo, línea azul es medio y línea roja es mínimo); y las 3 líneas inferiores muestran el valor de  $c$  para el eje Y (línea verde es máximo, línea café es medio y línea rosa es mínimo).

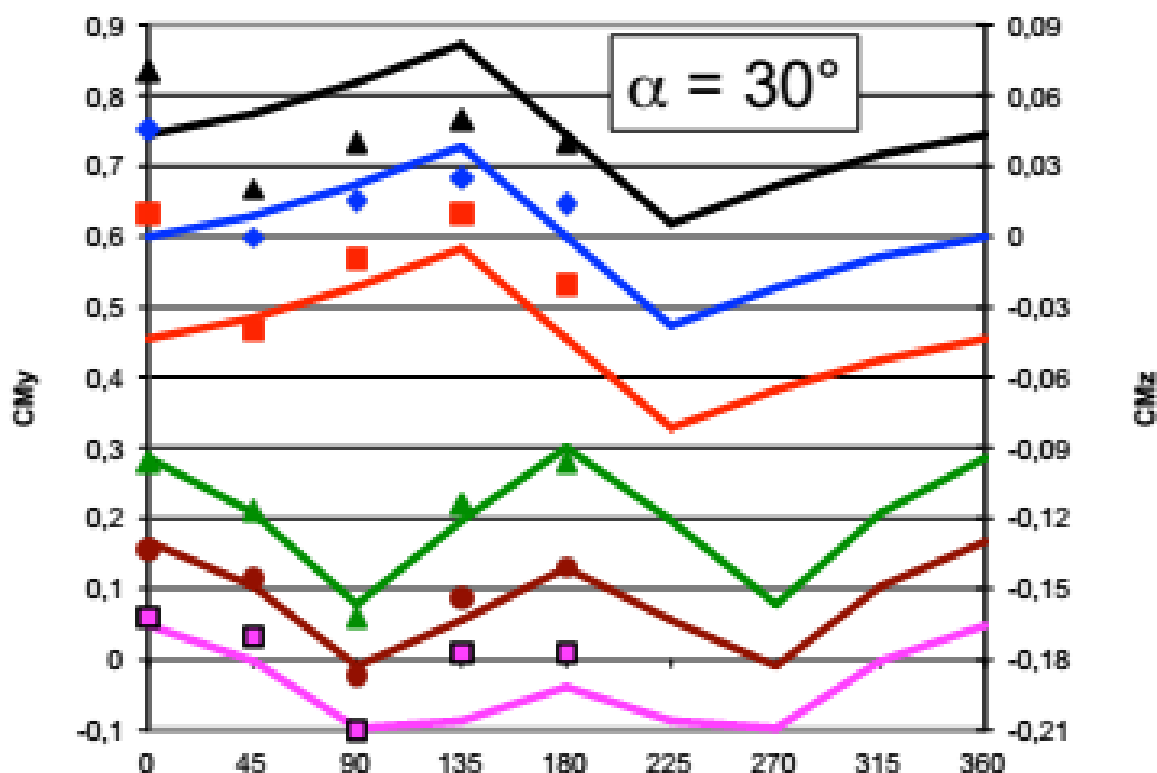


Figura 3.31 Valores del coeficientes de carga de viento  $c$  a distintos ángulos de incidencia del viento en el eje acimutal.[38]

Para el diseño del helióstato, los valores a utilizar de estas correlaciones, serán los máximos, con el fin de dimensionar los elementos mecánicos y estructurales de manera que el sistema esté preparado para operar bajo posibles condiciones de cargas máximas. El valor de  $\alpha$  se refiere al ángulo de elevación. El valor de  $CM_y$  le corresponde al coeficiente de carga que actuará sobre el eje de elevación (en la figura 3.30 se muestra como  $CM_{Hy}$ ); el valor de  $CM_z$  le corresponde al coeficiente de carga que actuará sobre el eje acimutal (en la figura 3.31 se muestra como  $CM_z$ ).

El valor para los cálculos a utilizar en el eje de elevación es de 0.30 y para el eje acimutal es de 0.08. Por lo tanto, aplicando los valores mencionados, a la ecuación 3.12.

Se tiene que

$$M_z = (0.08) \left( \frac{\frac{1.2\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \right) \left( \frac{8\text{m}}{\text{s}} \right)^2 (2.25\text{m}^2)(1.5\text{m}) = 10.36\text{Nm}$$

$$M_y = (0.3) \left( \frac{\frac{1.2\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \right) \left( \frac{8\text{m}}{\text{s}} \right)^2 (2.25\text{m}^2)(1.5\text{m}) = 38.88\text{Nm}$$

Los mecanismos y estructura se dimensionan entonces para momentos de torsión de 38.9Nm. A esto, se le agregará además un factor de seguridad de 1.5. Con lo cual, se obtiene finalmente un par torsor para cargas durante la operación del helióstato de 58.35Nm.

De la misma manera, se calcula el momento de torsión cuando existen corrientes de viento con altas velocidades. Estos sucesos se tomarán como especiales, por lo que se determina que el helióstato no permanecerá operando al presentarse rachas de viento con velocidades arriba de los 10m/s, por lo tanto, este deberá tomar su posición de seguridad.

Según las correlaciones matemáticas el coeficiente de carga de viento  $c$ , al estar el helióstato en posición de seguridad ( $90^\circ$ ) es máximo sobre del eje de elevación cuando el viento fluye desde el sur, dando como resultado un coeficiente  $c$  de -0.10. Calculando ahora las cargas sobre el helióstato para velocidades de viento correspondientes a tormentas (32m/s), se obtiene que el momento resultante en el eje de elevación es de -207.36Nm. Comparando los coeficientes de carga, efectivamente se tiene que  $c$  es menor cuando el helióstato se encuentra en posición vertical, sin embargo, las velocidades de viento son mayores, pero de menor duración. Afectando esto básicamente al sistema de cimentación del helióstato y en menor medida a los mecanismos de movimiento. Aun conociendo que esa magnitud de torque se presentará por lapsos relativamente cortos de tiempo, se debe insertar un factor de seguridad en el dimensionamiento del sistema de

movimiento; el cual se establece en 1.5, quedando como momento final de diseño la magnitud de 311Nm.

Estas cargas por viento, actúan sobre los mecanismos de posicionamiento angular del heliostato, de los cuales actualmente es posible encontrar los que utilizan engranes, tornillos, actuadores lineales hidráulicos o neumáticos o sistemas de fricción como bandas dentadas. El sistema de movimiento que se plantea utilizar en este heliostato se compone de elementos de bajo costo pero a su vez, cuentan con gran capacidad de precisión en movimiento. De los mencionados anteriormente, cada uno tiene sus ventajas y desventajas, pero para el caso especial de un heliostato de pocos metros cuadrados como el de este trabajo, un sistema puede tener baja capacidad de torque en sus etapas iniciales de reducción de movimiento angular.

Cuando se tiene un sistema de transmisión de bajo costo, es común tener una baja precisión en el movimiento. Esta característica, que no se da en los sistemas de transmisión por fricción, ya que se tiene que la parte que entrega el movimiento nunca pierde contacto con la parte que recibe el movimiento, esto da como resultado la inexistencia de un juego u holgura entre componentes mecánicos, lo que se traduce como un sistema de bajo costo de fabricación con un alto grado de precisión.

Por otro lado, los sistemas de transmisión por fricción, tienen baja capacidad de reducción de velocidad, cuando se les compara con un mecanismo de tornillo sin fin y corona. Ya que, para un volumen determinado, la reducción que se obtiene con el sistema de tornillo sin fin, puede ser hasta 100 veces mayor que la reducción resultante de un sistema de banda dentada o discos de fricción.

Inicialmente, el diseño de los sistemas de movimiento se plantea para 2 etapas de reducción, sin embargo, es necesario revisar, si la relación de reducción final del tren de transmisión permite utilizar un motor eléctrico de bajo costo, esto es, de bajo torque.

Debido a esto, es necesario obtener la mayor reducción posible sin elevar demasiado el costo de los sistemas de movimiento. Por lo que, para la primera etapa de reducción, que



es la que será sometida a la menor magnitud de carga por corrientes de viento y de operación, se opta por utilizar un par de engranes de tornillo sin fin y corona. De esta manera se obtiene el sistema de mayor costo, pero para una baja capacidad de carga, lo que equilibra sus características en cuanto a costo-beneficio.

Como siguiente etapa de reducción, que es la que está unida directamente a la estructura del helióstato, es decir, la que recibirá las cargas directas del viento, debe ser por principio la más robusta, por lo tanto, puede llegar a ser la más costosa. Por lo cual, es en esta etapa donde se decide utilizar un sistema de transmisión por fricción, mediante el contacto de 2 discos.

Esta forma de transferir movimiento es frecuentemente utilizada en los mecanismos de posicionamiento de grandes telescopios. Pero a diferencia de un telescopio, un helióstato sí está sometido a las cargas por corrientes de viento, por lo que se hace necesario adecuar los componentes de manera que puedan operar con cargas no sólo debidas al peso de las piezas (como en un telescopio), sino también con el torque inducido por cargas de viento. Para esto ha sido necesario aplicar recubrimientos de alto coeficiente de fricción, para evitar que se presente un deslizamiento entre partes. Es debido a este factor que la implementación de sensores de posición angular ayudará a mantener siempre el helióstato en la posición requerida, aun cuando se presentara deslizamiento en el mecanismo de giro, tema del cual se comentará más adelante.

Se requiere que los mecanismos del helióstato puedan mantener fija la estructura del espejo en condiciones de tormenta, cuando la posición se encuentra en estado de descanso a  $90^\circ$ . En estas condiciones, el torque que se ejercerá sobre el eje es de 311Nm, por lo tanto, se busca un par de discos de fricción, cuyos diámetros permitan el mayor grado de reducción en el espacio disponible. Para esto, con la finalidad de evitar una fabricación especial de piezas grandes, se utiliza para el disco de diámetro mayor, una sección de tubo de acero con diámetro de 24 pulgadas. Por simplicidad en el diseño, el diámetro interior, es el que se usa como superficie de fricción con el otro disco de menor

diámetro, del cual, se obtiene que, el diámetro mínimo factible para el diseño es de 1.5 pulgadas (figura 3.32).

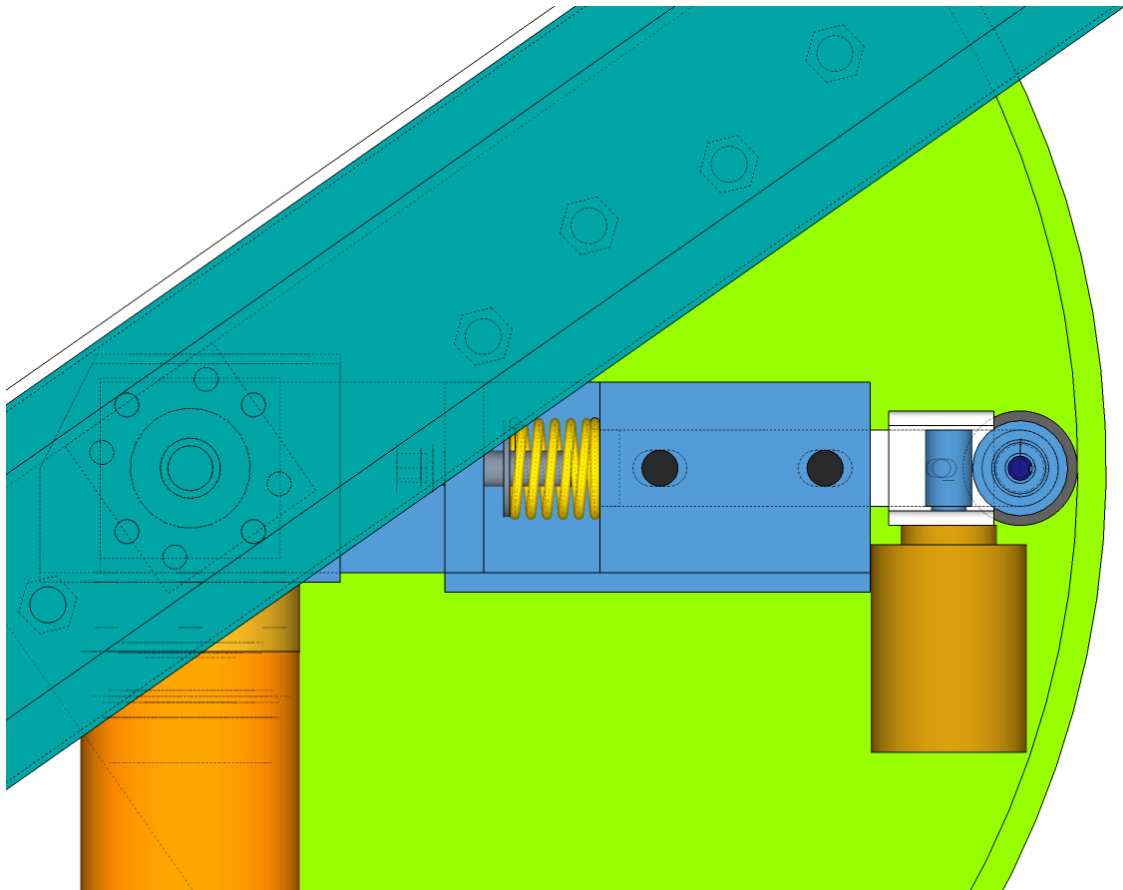


Figura 3.32 Sistema mecánico de movimiento de elevación.

Con esto se obtiene una reducción de

$$e = \frac{\text{Diámetro del disco impulsado}}{\text{Diámetro del disco impulsor}} = \frac{24\text{pulg}}{1.5\text{pulg}} = 16 \quad (3.17)$$

Con esta primera reducción, si se optara por instalar un motor eléctrico con capacidad de 1Nm, se tiene que se necesitaría una etapa adicional de

$$1a. \text{ etapa de reducción} = \frac{\text{Torque de trabajo}}{\text{Etapa final de reducción}} = \frac{311\text{Nm}}{16} = 19.43 \quad (3.18)$$

Por lo tanto, se determina que se requiere un par de tornillo sin fin y corona con reducción de 20:1. Es en esta primera etapa de reducción donde se aplica el parámetro de diseño del sistema de movimiento, que nos dice que el elemento de mayor costo, será el de menor capacidad de carga. Debido a que, por lo general los engranes son más costosos que cualquier otro elemento mecánico de transmisión de potencia, se utiliza en esta etapa de baja carga, un par de engranes comerciales, que aparte de proporcionar un elevado grado de reducción en poco espacio, brinda un freno mecánico al sistema de movimiento, evitando que la carga ejercida sobre el espejo del helióstato sea transmitida hasta el motor eléctrico.

Resumiendo, para la etapa de reducción posterior al motor eléctrico, se utiliza un reductor de tornillo sin fin y corona, el cual impulsa a un rodillo o disco de fricción en contacto con un tambor de fricción (cara interior del tubo), resultando este tren de transmisión en una reducción final de

$$e = (20)(16) = 320$$

Con esta reducción final, se tiene que un motor eléctrico de 1Nm cumple con los parámetros de diseño del sistema de movimiento, sin embargo, para adecuar el sistema de potencia del helióstato, con el sistema de control de la Plataforma Solar de Hermosillo, se requiere utilizar preferentemente motores de 12V/CD, por lo tanto, un motor que opera con ese voltaje y que entregue un torque nominal de 1Nm, se convierte en un componente relativamente costoso y de gran tamaño para las dimensiones disponible en el helióstato. Es por este motivo que se opta por instalar un motor-reductor que opera con un torque nominal de 1.25Nm. Debido al torque de salida que entrega el motor reductor, no es de nuestro interés su relación de reducción.

Para asegurar que los elementos de fricción (rueda y tambor) se mantengan siempre en contacto y sobre todo con cargas normales entre sí, se implementa un dispositivo que permite ajustar la distancia (y por lo tanto la carga normal) entre ambos elementos. Este dispositivo cuenta con un resorte de ajuste, el cual se encuentra normalmente comprimido, ejerciendo así una fuerza que entre rueda y tambor (figura 3.33).

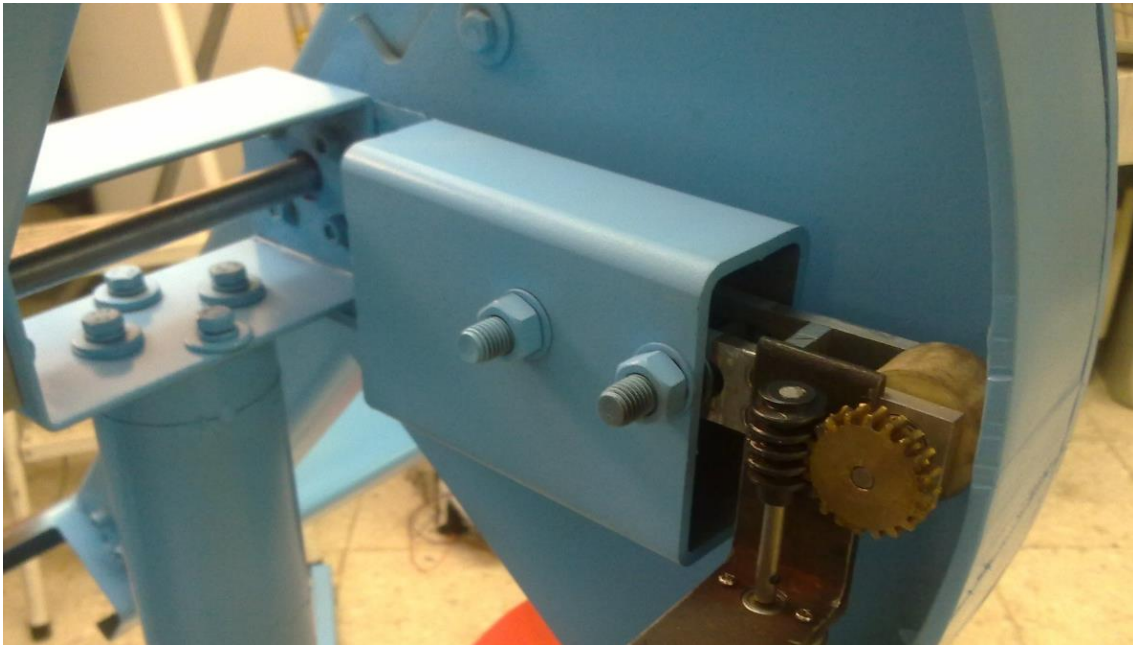


Figura 3.33 Mecanismo donde se observa el sistema de fricción entre rodillo y tambor.

### 3.3.9 Diseño del heliostato: estructura

Para determinar las dimensiones del marco estructural que soporta al espejo del heliostato, se aplica un sobredimensionamiento deliberado de los elementos estructurales, con el fin de reducir en gran medida la deformación de estos bajo cargas de viento. Sin embargo, un escenario crítico para la deformación de la estructura, y por lo tanto del espejo, es cuando se aplican cargas de magnitud equivalente a las producidas en un caso de vientos de operación, como se muestra en la figura 3.34. La cual muestra un marco fabricado con perfil denominado polín de acero tipo C de 4" x 2" de cédula 16 (1.52mm)

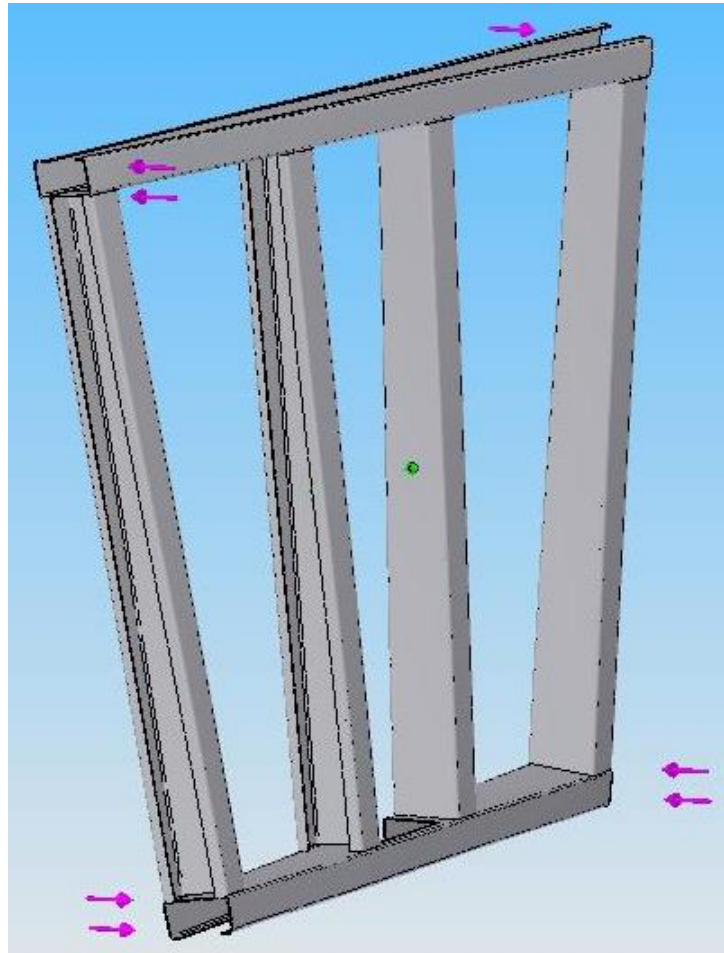


Figura 3.34 Fuerzas aplicadas sobre las esquinas del marco estructural.

Este escenario, es poco probable, sin embargo se estima que esta forma de deformación del marco, es la que permite mayor desplazamiento sobre el plano nominal del espejo, y por lo tanto, se produce un mayor esfuerzo en las partes. En este caso, el centro de giro del marco se encuentra fijo (punto verde en la parte central del elemento central-lateral del marco). Las fuerzas se aplican de forma perpendicular al plano del espejo, de manera alternada en su dirección sobre cada esquina. Los resultados obtenidos por una simulación en Solidworks mediante el método de elemento finito, nos muestra que, efectivamente, el esfuerzo en los elementos estructurales seleccionados no es significativos, no así en las uniones de estos. Esto se muestra en la figura 3.35, donde se puede apreciar mediante la escala de color, los puntos donde existe una mayor magnitud de esfuerzo, para el caso de estudio en cuestión.

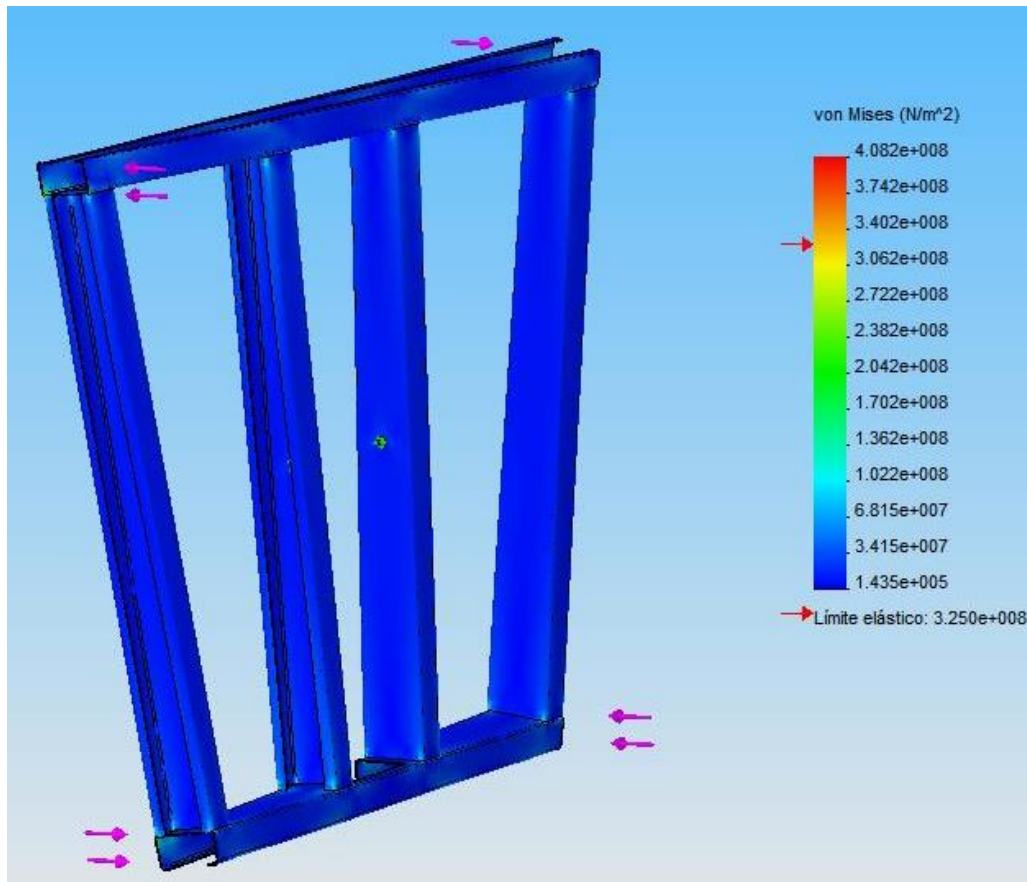


Figura 3.35 Modelo del marco del espejo sujeto a fuerzas en las esquinas, mostrando la magnitud de los esfuerzos presentes.

Se sabe entonces, mediante la simulación, que los puntos donde se excede el límite elástico del material (flecha roja en la escala de colores) se da en las uniones de los elementos, y esto se debe a que el área de contacto entre ellos, queda registrada en la simulación como un área de muy baja magnitud, localizándose en esas zonas un esfuerzo muy alto por la concentración de fuerzas.

En la figura 3.36 se observa en la escala de colores, el factor de seguridad resultante para el diseño propuesto, en el escenario en cuestión. Es de esperarse que los factores de seguridad más altos se encuentra a lo largo de los elementos estructurales, más no así en

las uniones entre ellos. Se resuelve esta situación, instalando refuerzos en las uniones del marco ya fabricado.

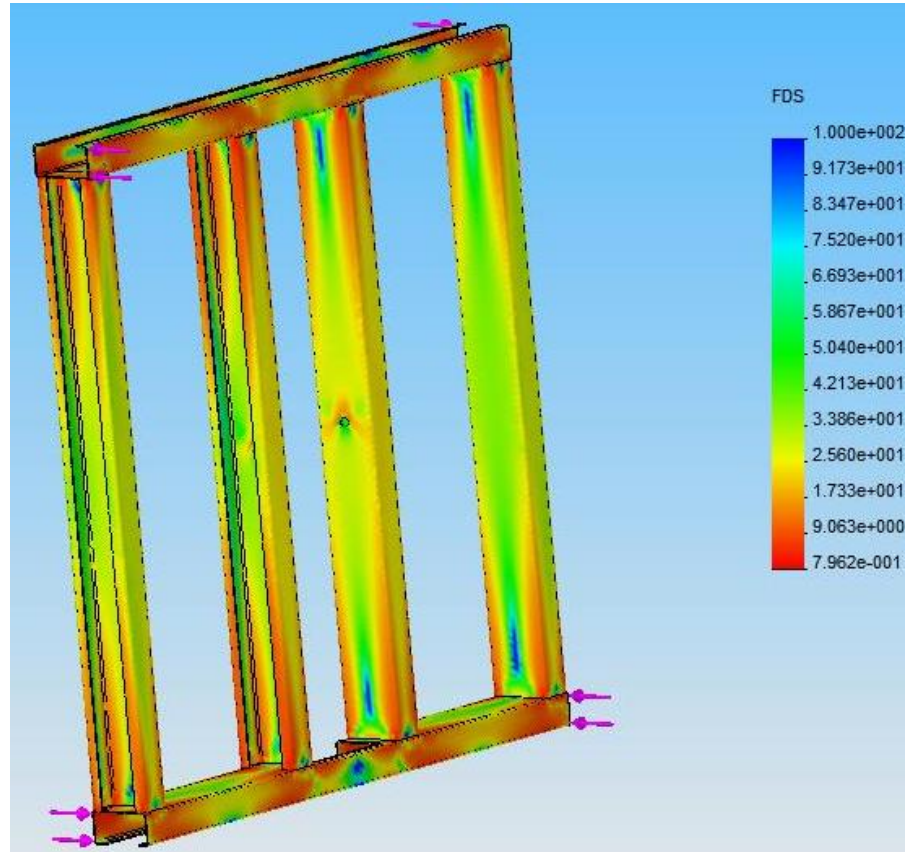


Figura 3.36 Escala de colores del factor de seguridad del marco, bajo la aplicación de fuerza en las esquinas.

El diseño final del helióstato propuesto para este trabajo se compone entonces, de un helióstato con un espejo de  $2.25\text{m}^2$ , con movimiento en dos ejes. Dicho movimiento se obtiene utilizando 3 etapas de reducción de velocidad angular, siendo la primera de un tren de engranajes en arreglo epicicloidial, la segunda un par de engranes de tornillo sin fin y corona, y finalmente un par de discos de fricción. Obteniéndose una reducción total de 320. Ambos sistemas de movimiento (eje de elevación y eje acimutal) son dimensionados idénticos para facilidad de fabricación. La estructura del helióstato se realiza con elementos estructurales tipo “C” de lámina de acero al carbón con cédula 18.



En la figura 3.37 se muestra el modelo tridimensional del helióstato, y el prototipo una vez fabricado.

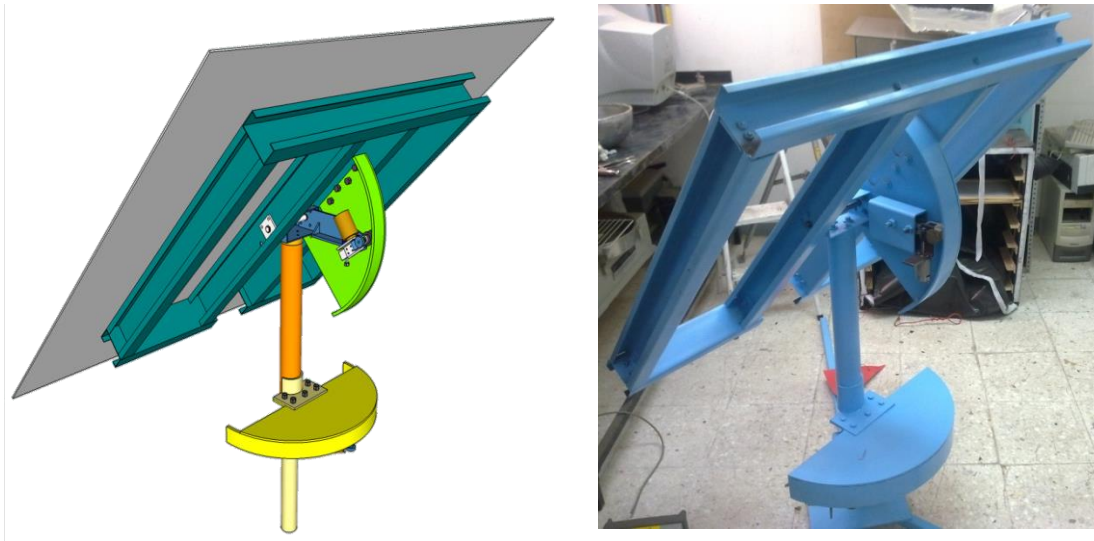


Figura 3.37 Modelo tridimensional propuesto (izquierda). Prototipo fabricado (derecha).

### 3.3.10 Diseño del helióstato: control

Para el sistema de control de movimiento del helióstato, con el cual es posible realizar apuntamiento solar, se instalan sensores de posición angular en los ejes de movimiento de la estructura. Esto permite que el sistema de adquisición de datos, conozca en todo momento, cuál es la inclinación del helióstato en elevación o su rotación en el eje de movimiento acimutal. Los sensores utilizados son potenciómetros de efecto electro magnético *Hall*, con el cual, dependiendo de la posición angular en que se encuentre el

eje de giro del potenciómetro, se obtiene una señal de voltaje de salida variable. Estos potenciómetros tienen una resolución de  $0.08^\circ/\text{mV}$ .

Utilizando la señal de salida de cada potenciómetro, es posible conocer con certeza la posición que tiene el helióstato; esta información es utilizada a su vez para insertarse en el sistema de control que es utilizado en el Campo de Pruebas de Helióstatos con la que operan sus helióstatos.

La información de los sensores de posición es procesada por el controlador tipo CompactRIO de National Instruments. El cual es manejado desde una interfaz gráfica en el software LabVIEW. El mismo controlador CompactRIO envía la potencia eléctrica que requieren los motores del helióstato para posicionarse.

### **3.3.11 Determinación de la distancia entre helióstato y concentrador**

La forma más efectiva para posicionar un helióstato para apuntamiento, es de tal forma que este siempre opere reflejando la radiación hacia la misma dirección desde donde viene el sol. Ya que de esta forma, el área de captación del helióstato, será siempre mayor que si este dirigiera los rayos hacia el otro sentido, como se mencionó anteriormente por el efecto del factor coseno en las proyecciones solares. Tales casos se muestran en la figura 3.22. Donde se tiene que el helióstato de la derecha tiene su objetivo en la misma orientación que la dirección donde proviene la radiación solar. En cambio, en el helióstato de la izquierda, su objetivo se ubica orientado hacia otro cuadrante del que se encuentra el sol, por lo que su proyección será siempre menor que la del otro helióstato a lo largo de todo el día.

Es debido a esto, que el posicionamiento de los componentes de este horno seguirá este principio, aprovechando de una manera más efectiva la radiación que se puede captar a lo largo del periodo de operación del horno.

Existe una desventaja en este tipo de arreglo, que es el sombreamiento. Ya que al posicionar el objetivo en el mismo cuadrante que el sol, existe la posibilidad de que el cuerpo del interfiera con los rayos que recibe el helióstato y disminuya con eso la potencia entregada en todo el sistema. Es por esto que se requiere estimar la distancia mínima para que el concentrador y su estructura, no provoquen un sombreamiento en el helióstato.

Mediante geometría se determina, para el día más propenso a que esta situación se presente, a partir de qué distancia deja de existir sombra del concentrador en el espejo del helióstato. Como el horno se propone para operar alrededor del mediodía solar, se considera el día en que el ángulo cenital sea mayor en el medio día. Esta condición se da durante el solsticio de invierno (21 de diciembre), cuando la declinación terrestre tiene su mayor ángulo con respecto a la dirección de los rayos del sol.

Por lo tanto, se debe obtener para el medio día, el vector solar y así determinar, aplicando las dimensiones del concentrador, la distancia a la que este no interfiere con el helióstato.

El concentrador tiene una apertura cuya altura es de 1.2m, pero su parte inferior se encuentra a una altura que se relaciona con la dimensión del espejo del helióstato. Como no existe un efecto significativo en la variación de las cargas por viento en relación a la distancia desde el piso hasta el espejo de un helióstato [39], se posiciona el centro de giro del eje de elevación, a una altura de 0.95m, dejando un espacio entre el espejo en posición vertical y el piso de 0.3m. Esto nos permite tener al receptor del horno, alineado con el centro del helióstato y el eje del concentrador. Posicionando la altura del receptor dentro del rango de altura para mesas de trabajos de precisión [40].

Una vez determinada la altura que tiene el helióstato hasta el suelo, se obtiene la distancia que tiene el concentrador, también hasta el nivel de suelo. Que en este caso, como el eje del concentrador está alineado con el centro del helióstato se tiene que la altura total del concentrador es de 1.55m (figura 3.38). A esta altura, se le adiciona una magnitud equivalente al 20% para prevenir que elementos de la estructura del

concentrador obstruyan el paso de la radiación hacia el heliostato, quedando finalmente una altura para cálculos de 1.86m.

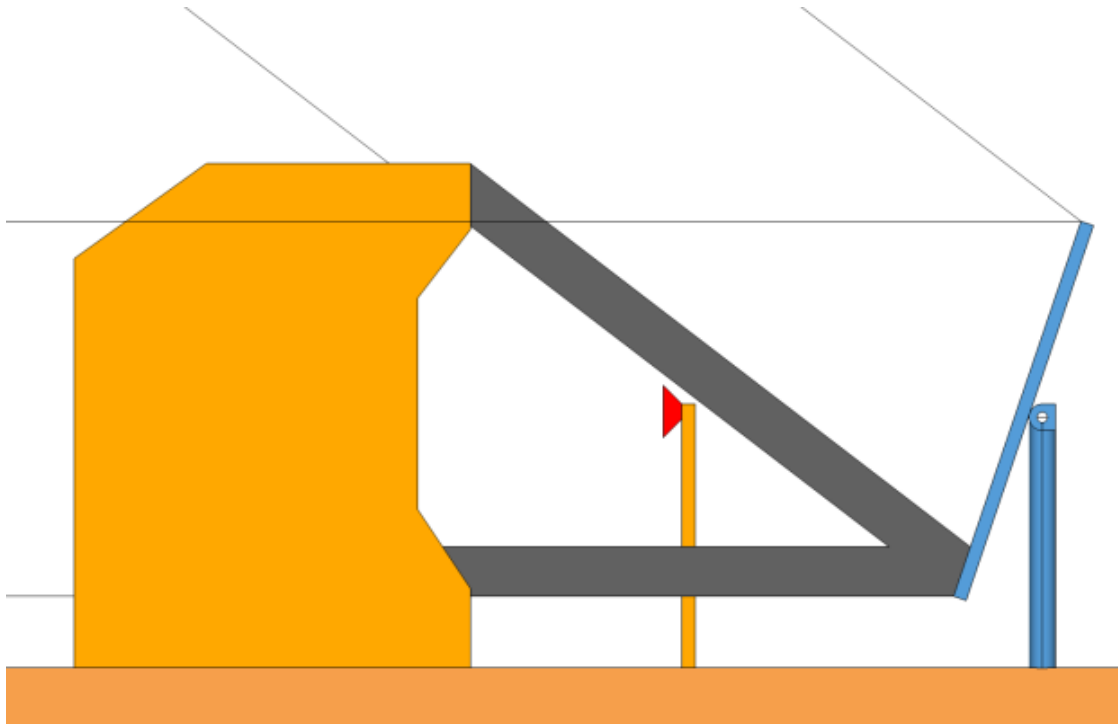


Figura 3.38 Esquema para estimar la distancia mínima sin sombreado.

Para la posición del sol en el día 21 de diciembre se tiene que el vector solar es  $(0.793, 0, 0.608)$ . Con esta información, se modela en software de dibujo tridimensional, el volumen correspondiente al concentrador y su estructura, el heliostato y las líneas que representan la dirección de los rayos solares que captará el heliostato. Mostrándose en la figura el esquema para esta estimación. En la figura 3.38 se puede observar una franja de color gris, que representa la zona de radiación que el heliostato deja de recibir por causa de la sombra de la estructura del concentrador.

Se determina modelar las condiciones para sombreado existentes el 21 de diciembre dos horarios, el medio día y el de inicio de operaciones, que es a las 10:30 (hora solar). Para mostrar la importancia de seleccionar el horario de inicio de operación, en la figura 3.39 se observa que a pesar de que al medio día, no se presentan sombras sobre el heliostato, a las 10:30 cuando el sol tiene un ángulo cenital mayor, se sombrea una sección del heliostato. Este ejemplo se da cuando la distancia del heliostato al concentrador es de 2.7m.

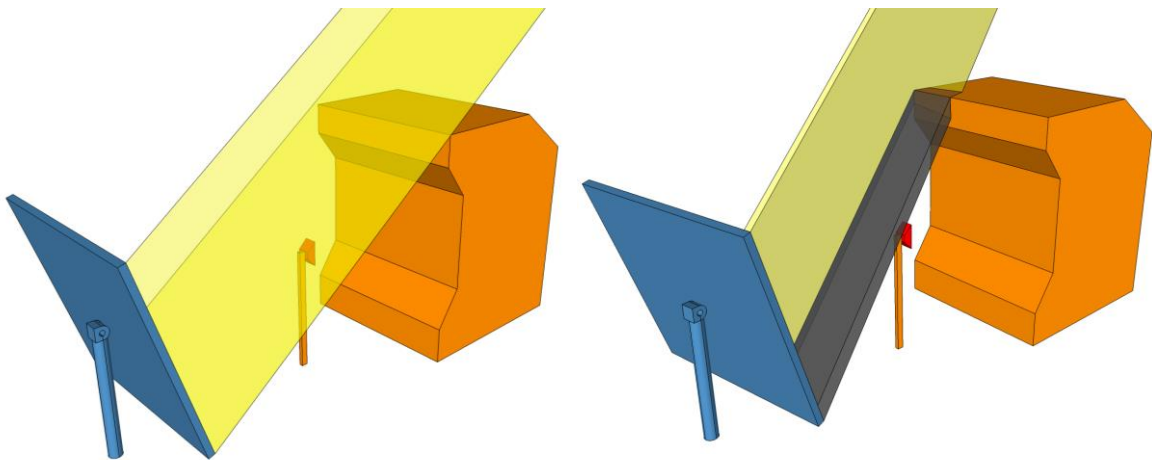


Figura 3.39 Heliostato sin sombras al medio día (izquierda).

Heliostato sombreado a las 10:30 (derecha).

En base al modelado de los volúmenes, la distancia mínima en la que no existen sombras en ningún momento de operación del horno, es de 2.95m, por lo que se determina ubicar el concentrador a 3.0m del heliostato. La importancia de mantener la menor distancia entre componentes, se debe a los efectos que se presentan también en los concentradores; los errores ópticos son de mayor impacto, así como también se tiene que el cono de luz va proyectando una mayor área conforme más lejano se encuentre el objetivo, contribuyendo esto a generar una caída en la concentración.

### **3.4 Metodología para la caracterización**

La sección de caracterización del horno solar trata sobre las pruebas y los resultados obtenidos acerca de las principales propiedades con que se desempeña el horno diseñado en el capítulo anterior. Las pruebas que han sido realizadas, han servido para adquirir experiencia en su ejecución, y conocer así los distintos factores y/o dificultades que pueden presentarse, y afectar los resultados de las pruebas de caracterización.

Como se ha mencionado en los objetivos específicos de este trabajo, las pruebas se basarán en conocer las siguientes características con que opera el horno solar:

- Características de seguimiento del helióstato
- Características de apuntamiento del helióstato
- Características de deriva de la mancha solar concentrada
- Estimación de potencia en la zona focal
- Eficiencia óptica del sistema
- Generación de curva de calentamiento en un receptor térmico

### **3.5 Caracterización del horno solar**

Una vez que se ha definido en el diseño del horno solar mediante la metodología seguida, y este ha sido puesto en operación, lo siguiente es conocer sus características en base a lo planteado en los objetivos particulares de este trabajo. Para ello, es necesario diseñar las pruebas que nos permitan cuantificar los datos requeridos para determinar la información de caracterización del horno.

Basándonos en los objetivos particulares de esta tesis se busca obtener la eficiencia óptica de todo el sistema, analizar la precisión de seguimiento solar del helióstato, la

precisión de apuntamiento a torre central y al concentrador del horno solar, grado máximo de concentración, eficiencia del sistema óptico, la potencia máxima y obtención de una curva de temperatura para un receptor particular.

Para determinar este conjunto características, se requiere trabajar básicamente sobre el área de radiación concentrada, para lo cual es importante montar un sistema de recepción que permita censar la cantidad de energía que se está direccionando hacia esta área en particular.

Al tratarse de densidades de flujo radiativo altas, es importante manejar un sistema de enfriamiento que proteja los instrumentos que intervienen en las pruebas. Así como también son requeridos filtros ópticos y manipulación digital de imágenes para hacer posible la medición de intensidades de luz la zona de radiación concentrada.

### **3.5.1 Precisión de seguimiento del helióstato y del sistema**

El obtener la precisión de seguimiento del helióstato es necesario para conocer la factibilidad del diseño mecánico y de control automático de este para ser usado en un horno solar, ya que un helióstato con mucha desviación durante su operación, generaría una falla en el apuntamiento hacia el concentrador, y por lo tanto en un receptor de radiación concentrada, lo que conlleva a una caída en el factor de concentración o una falla al momento de tener un receptor fijo en un área reducida.

Para obtener esta información, se deben realizar pruebas de seguimiento y apuntamiento; con esto será posible encontrar las características cualitativas y cuantitativas del grado de desviación que presenta el helióstato sobre la trayectoria del sol. Es necesario también, realizar una prueba sobre la mancha solar concentrada, para así conocer el grado de desviación total que existe en el sistema del horno solar.

### 3.5.2 Prueba de seguimiento solar

Es necesario conocer la efectividad de los parámetros utilizados en el sistema de control automático, esto funciona como una prueba preliminar y se lleva a cabo apuntando la normal del espejo del heliostato directamente al sol. Para efectuar la prueba de seguimiento solar, se siguió el siguiente procedimiento:

1. Instalar una cámara con filtro óptico (número 10) sobre la superficie reflectiva del heliostato. Buscando posicionar esta de tal manera que la dirección de la lente se encuentre paralela a la normal del espejo. Para esta prueba se utilizó una cámara de seguridad con comunicación Ethernet, marca D-Link.

2. Inicializar la operación del heliostato en modalidad de seguidor solar y capturar imágenes de manera periódica de la cámara viendo al sol, durante un lapso de varias horas. En el caso de esta prueba, la frecuencia de captura fue de 60 segundos durante alrededor de 5 horas (9:00 a 14:00).

3. Las imágenes se procesan de manera individual con el software de imagen VisionAssistant de NI, para obtener las coordenadas dentro de la imagen del centroide del círculo solar. Aplicando una función umbral de color, es posible dividir todos los tonos de gris presentes en una imagen en solamente dos colores de alto contraste, delimitando de esta manera el contorno del círculo solar. Seguido a esto, se determina la posición del centroide del sol y se determinan sus coordenadas (figura 3.40).





Figura 3.40 Imagen de círculo solar en su forma original (izquierda).

Tratamiento de la misma imagen con función de umbral de color (derecha).

4. Los datos de coordenadas de los centroides se enlistan para la hora que corresponde a la captura de cada imagen, obteniendo así una curva de desviación del seguimiento del sol con respecto al tiempo de operación.

5. Al conocer el ángulo de apertura de  $4.6\text{mrad}$  del cono solar, es posible relacionar esta magnitud con la desviación angular de los ejes de giro del heliostato y el desplazamiento del círculo solar dentro de la imagen de la siguiente manera:

a. Analizando las imágenes, se tiene que el radio del círculo solar, equivale a una cantidad específica de pixeles; en este caso el diámetro solar que se forma por un cono con ángulo de  $9.2\text{mrad}$ , equivale en las imágenes a 78 pixeles. Dando esto una equivalencia de  $0.1179\text{mrad/pixel}$ .

b. Se obtiene la diferencia entre el punto  $(x,y)$  inicial donde se ubica el centroide de la primera imagen al iniciar la prueba y las ubicaciones subsecuentes para los siguientes centroides. Con la relación del punto anterior, las diferencias en pixeles se transforman en  $\text{mrad}$ .

6. Se grafican los resultados para los dos ejes de movimiento de las desviaciones netas durante la operación.

### **3.5.3 Prueba de apuntamiento en blanco lambertiano sobre torre central**

De forma semejante a la prueba anterior, debe ser analizada la característica del funcionamiento del helióstato operando no como un seguidor solar, si no como un helióstato. En esta siguiente prueba, el objetivo donde serán capturadas las imágenes se encuentra fijo, buscando con esto, conocer la desviación o deriva del helióstato cuando se pretende mantener reflejada la luz del sol en un punto fijo a lo largo de un periodo de tiempo.

Esta prueba se realiza en tres modos distintos, apuntamiento sobre un blanco fuera de eje, como sería un blanco en lo alto de una torre central (figura 3.41); apuntamiento sobre un blanco en el eje, como sería un blanco central semejante al concentrador de un horno solar; y finalmente apuntamiento sobre un receptor del horno solar, para análisis de la deriva de la mancha solar concentrada. Al estar enfocadas estas pruebas de precisión de seguimiento al uso del helióstato en un horno solar, la hora del día y la duración de estas se basan en los tiempos de operación de dicho horno, el cual es de 10:30 a 13:30. Se determina capturar imágenes cada 60 segundos durante este lapso.



Figura 3.41 Blanco lambertiano posicionado en la torre central.

Las imágenes guardadas, de la misma manera que en la prueba anterior, son procesadas independientemente para aplicar un umbral de color y establecer la mancha solar

reflejada por el helióstato, como una figura cuyo centroide se registra para su procesamiento.

El procedimiento para dichas pruebas es semejante a la prueba preliminar de seguimiento realizada, pero a diferencia de la prueba anterior, la cámara fotográfica debe ser montada en una base fija, viendo esta hacia el objetivo de apuntamiento que tendrá el helióstato. Para esta prueba se utilizó una cámara de alta resolución marca ALLIED, modelo PIKE, montada sobre un trípode. Existe también una diferencia en la formulación utilizada para traducir el desplazamiento del centroide de una imagen, a una variación angular en los ejes del helióstato. Estas relaciones se obtienen de la siguiente manera:

- a. Se debe capturar una imagen maestra, donde es necesario colocar un objeto de dimensiones conocidas o marcas con distancias conocidas entre ellas.
- b. La imagen maestra se debe transformar con la finalidad de alterar la deformación por perspectiva, mediante software de procesamiento de imágenes (este paso es necesario sólo cuando la cámara no se encuentre paralela a la normal de la superficie donde incide la imagen a capturar).
- c. Una vez transformada la imagen maestra, se obtiene la equivalencia de distancia/píxel. Contabilizando los píxeles que se encuentran entre las marcas u objeto con dimensiones conocidas.
- d. Finalmente, relaciones trigonométricas se aplican a las distancias entre el helióstato y la superficie de proyección, para obtener las magnitudes angulares para los cambios de ubicación presentes en la deriva de cada prueba.
- e. Teniendo estas equivalencias, los siguientes pasos son los mismos para cada prueba, es decir, captura de imágenes (sin variar las posiciones entre cámara y superficie de proyección), procesamiento y graficación.

Finalmente se grafican los resultados de las desviaciones netas de la proyección solar sobre el blanco durante el periodo de operación.

El procesamiento de imágenes de la proyección del helióstato sobre el blanco lambertiano de la torre central del campo de pruebas de helióstatos, se puede observar en la figura 3.42.



Figura 3.42 Imágenes de la proyección del helióstato sobre el blanco lambertiano en la torre central del campo (izquierda). Tratamiento de la misma imagen con función de umbral de color (derecha).

#### **3.5.4 Prueba de apuntamiento a un blanco frente al helióstato**

La metodología seguida para la ejecución de esta prueba, es idéntica a la que trata sobre el apuntamiento en un blanco sobre la torre central. Para facilitar la preparación de esta prueba, una gran parte del área del espejo del helióstato fue bloqueada con material opaco; esto con el fin de tener una proyección de menor tamaño en área y por lo tanto evitar la necesidad de instalar una superficie demasiado grande (figura 3.43). La superficie de proyección se colocó a 8m de distancia del helióstato en dirección sur. El procesamiento de imágenes de la proyección del helióstato sobre la superficie posicionada frente a este, se muestra en la figura 3.44.



Figura 3.43 Superficie del heliostato parcialmente cubierta para generar una proyección de menor área.



Figura 3.44 Imágenes de la proyección frontal del helióstato sobre una superficie (izquierda). Tratamiento de la misma imagen con función de umbral de color (derecha).

### 3.5.6 Prueba de deriva de la mancha solar concentrada

La metodología seguida en esta prueba, es la misma que la que se aplicó en la prueba de apuntamiento sobre un blanco frente al helióstato. Con la diferencia que ahora, la proyección del helióstato se hace incidir sobre el concentrador. Y a su vez, la cámara tendrá como objetivo un receptor plano posicionado en la zona focal del horno solar.

De igual manera, las imágenes deben ser procesadas para ubicar el centroide de cada mancha concentrada sobre el receptor y finalmente graficar las desviaciones registradas durante el lapso de operación, que como se especificó anteriormente, quedaba establecido desde las 10:30 hasta las 13:30.

En la figura 3.45 se muestra el procesamiento de imágenes de la mancha solar concentrada sobre una superficie receptora en la zona focal del horno. La diferencia de esta prueba con respecto de las otras, es que aquí, la proyección de luz no proviene directamente del espejo del helióstato, si no que esta ya ha sido redireccionada por el

concentrador fresnel, para concentrarse en la zona focal, trabajando así todo el conjunto de elementos ópticos del horno solar.

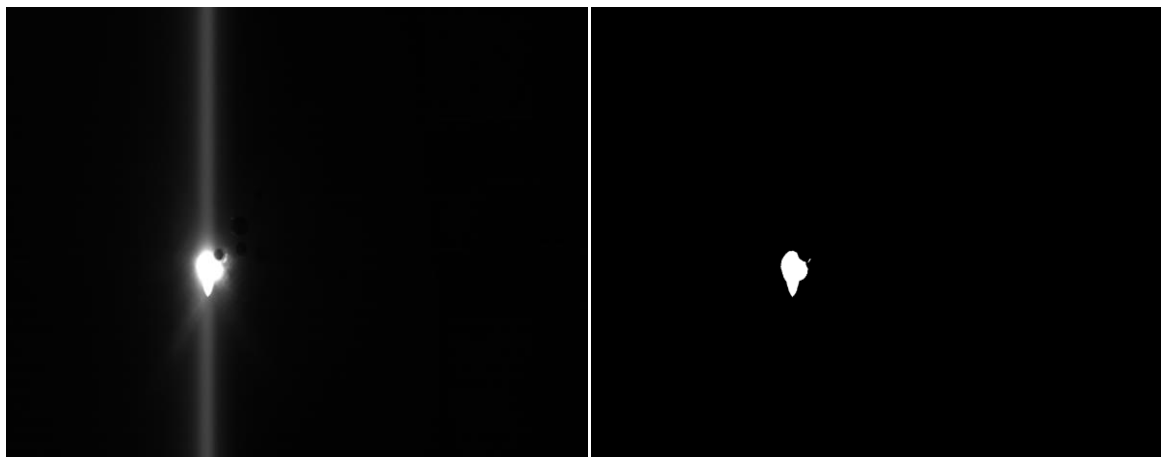


Figura 3.45 Imagen de la mancha solar concentrada del horno (izquierda). Tratamiento de la misma imagen con función de umbral de color (derecha).

### 3.5.7 Estimación de potencia del horno solar

Uno de los objetivos de este trabajo trata sobre la estimación de la potencia máxima que es posible entregar por el horno solar. Esta característica requiere de una experimentación en la que se debe medir el flujo de calor sobre un punto determinado y posteriormente comparar esta magnitud de flujo de calor con la intensidad de brillo que es capturado en ese mismo espacio y tiempo, por una cámara en un receptor[41][42].

Para llevar a cabo esta prueba se requiere de una placa plana que presente un alto grado de specularidad óptica en la cara donde incidirá la luz, así como también una baja reflectividad. Esto con la finalidad de poder captar desde cualquier dirección, la luz que incide en la placa. Este receptor plano debe también contar con la capacidad de movimiento en 2 direcciones, sobre un plano perpendicular al eje del concentrador, ya que de esta manera, será posible censar el flujo de calor sobre varios puntos de la placa (Figura 3.46).





Figura 3.46 Placa plana utilizada como receptor, con capacidad de movimiento en dos ejes.

Es necesario también utilizar un sensor de calor de alta densidad radiativa del tipo Gardon, el cual debe ir instalado en la placa a nivel de la superficie, que recibirá la radiación del concentrador. Este debe tener un sistema de enfriamiento activo por agua para evitar daños y/o descalibración. Ambos, tanto la placa como el sensor Gardon se mueven juntos en dos direcciones sobre el plano de la placa.

El sensor Gardon tiene una señal de salida en mili voltios, señal que es lineal desde  $0\text{W}/\text{cm}^2$  hasta los  $169\text{W}/\text{cm}^2$ . Pudiendo así traducir directamente dicha salida a una magnitud de niveles de concentración o potencia sobre un área determinada.

Finalmente para comparar la información obtenida del sensor Gardon con la intensidad de luz reflejada por la placa, es utilizada una cámara y software de edición y procesamiento de imágenes. La cámara se coloca sobre un trípode a una distancia mínima que permita captar en cuadro todos los desplazamientos de la placa receptora sin salirse esta de la imagen. Por la intensidad de la luz presente en la placa, los ajustes de captura de la cámara son de mínima apertura del obturador y mínimo tiempo de exposición, de esta manera es posible también eliminar la luz ambiental que forma parte de la mancha de luz concentrada.

La idea básica de este método trata sobre tomar mediciones de radiación en varios puntos dentro de una proyección de una mancha solar concentrada en una placa receptora, y posteriormente comparar los valores de estas mediciones del Gardon con los de la intensidad de luz captada por la cámara para esos mismos puntos, de esta manera se pueda obtener una relación entre intensidad de luz y flujo de calor. Esto hace posible contabilizar la cantidad de radiación que incide sobre el receptor en base a la luz observada por la cámara. El método para efectuar esta prueba se describe a continuación

1. Sobre un receptor plano cuya normal se encuentra paralela al eje del concentrador de lente fresnel, se captura una imagen maestra, con marcas a distancias conocidas. La finalidad de esto es, como se mencionó en las pruebas anteriores, transformar dicha imagen y las subsecuentes para modificar la deformación por

perspectiva que se presenta; así como también, con el fin de convertir los pixeles de la imagen a una magnitud real de distancias o áreas (figura 3.47).



Figura 3.47 Imagen maestra original con objetos de dimensiones conocidas (izquierda). La misma imagen con corrección por perspectiva (derecha).

2. Se inicializa la operación del horno solar para generar una mancha de radiación concentrada sobre el receptor (figura 3.48).



Figura 3.48 Horno solar en operación, generando una mancha de radiación concentrada sobre la placa de aluminio.

3. Se inician lecturas del sensor Gardon con el objetivo de encontrar el punto de la placa donde se ubique el más alto nivel de concentración de luz, es decir la señal de mayor magnitud. Para esto es necesario mover la placa con el sensor hacia la dirección en que visiblemente se encuentre la mayor intensidad de luz reflejada.

4. Una vez encontrado el punto de mayor concentración, se debe registrar la lectura del Gardon y realizar la captura de la primera imagen; es en este punto de donde se toma la referencia para ser usado como el origen de los movimientos y por lo tanto, a partir de ahí se distribuyen los demás puntos para realizar capturas de radiación con el sensor Gardon (figura 3.49).

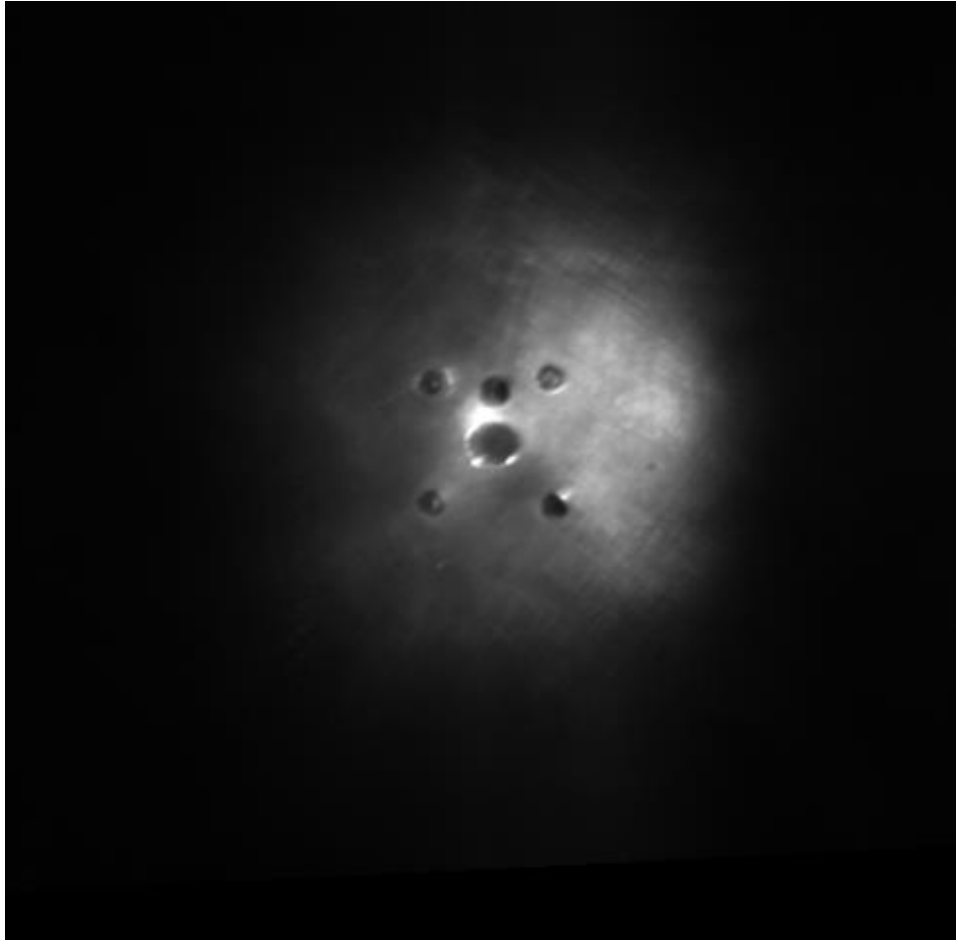


Figura 3.49 Posicionamiento del sensor Gardon en el punto del receptor donde existe un máximo de flujo de calor.

5. Se deben realizar mediciones con el Gardon en varios puntos, moviendo la placa en ambas direcciones sobre su plano y completar cierta cantidad de mediciones, tales que servirán para generar una curva de calibración entre flujo de calor a intensidad de luz. Para esto, se debe fijar el Gardon en un punto, se registra su lectura y posteriormente se captura la imagen correspondiente a dicho punto. Esto se repite hasta completar una cantidad considerable de datos (figura 3.50).

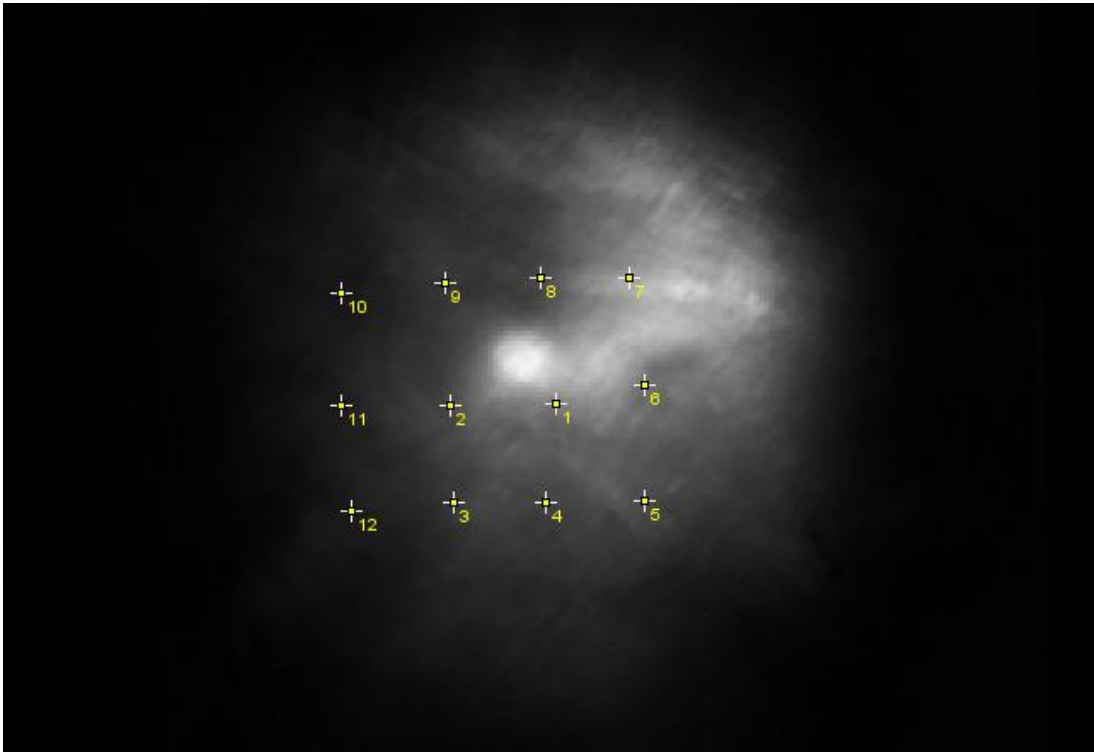


Figura 3.50 Alrededor del punto referencia (zona más blanca) se registraron los datos de flujo de calor en 12 ubicaciones diferentes marcadas con una cruz.

6. Al haber obtenido cierto número de registros del Gardon con sus respectivas imágenes, se deben procesar las imágenes para modificar la alteración por perspectiva y en caso de ser necesario, oscurecer todas las imágenes en la misma medida con el fin de eliminar ruido ambiental (figura 3.51).

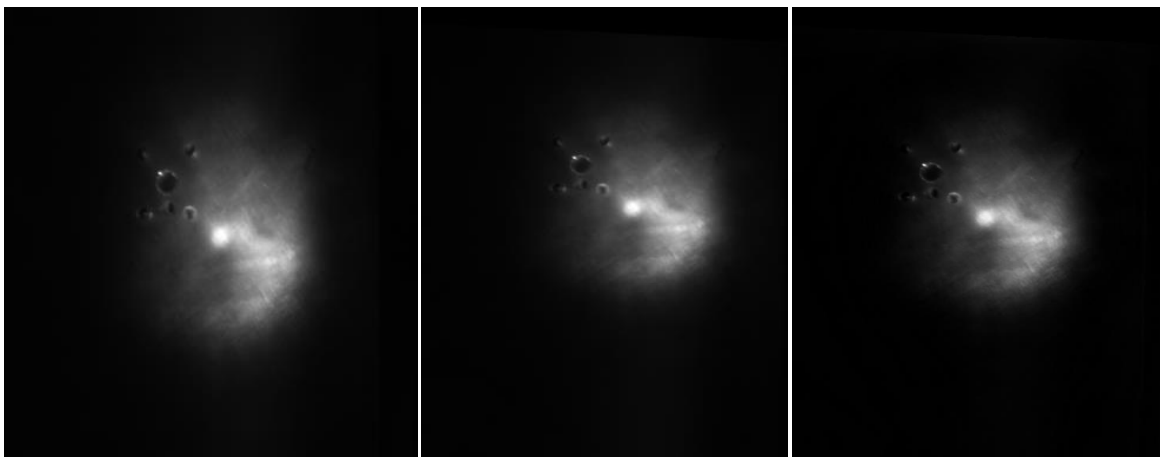


Figura 3.51 Procesamiento de una de las imágenes donde se muestra la toma original (izquierda), la imagen con corrección por perspectiva (centro) y la imagen oscurecida con fondo sustraído para eliminación de ruido ambiental (izquierda).

7. Una vez corregidas todas las imágenes, se debe iniciar la comparación entre las lecturas del Gardon con las intensidades de gris (la cual se mide de 0 para un negro total hasta 255 para un tono blanco) de las imágenes. Para esto, utilizando software de análisis de imágenes como es ImageJ, se obtienen las coordenadas del punto de referencia seleccionado (como se dijo anteriormente, para este caso es el punto de mayor intensidad de luz) y a partir de esta ubicación se deben localizar los demás puntos donde se tomaron las lecturas del flujo de calor. El método requiere que sean analizadas las zonas de las imágenes donde no aparece contaminación visual sobre la superficie de la placa (áreas planas sin grandes variaciones en la reflectividad de la placa), y así coleccionar la mayor cantidad de datos de intensidad de luz de cada imagen.

8. Con la información obtenida en el paso anterior es posible construir una curva que describa la relación entre tono de gris de las imágenes y flujo de calor sobre un área determinada. Para trazar esta curva se aplican los resultados medios de tono de gris de los puntos donde se registró la lectura del Gardon, que a su vez son promediados también para finalmente construir una tabla de valores con su respectiva curva. Para la cual es necesario ajustar una ecuación que describa su comportamiento.

9. Finalmente, utilizando el software de análisis de imágenes, se le asigna un valor de potencia a cada pixel de la imagen, en base a la relación matemática que se obtuvo en el paso anterior. De esta manera se tendrá que cada valor de tono de gris que posean los pixeles equivale a una cierta cantidad de watts, los cuales se contabilizan y dan como resultado la sumatoria de potencia radiativa que está incidiendo en la placa.

Siguiendo este método, es posible estimar la potencia que llega a la zona focal del horno solar. Para esta prueba se instaló una placa de aluminio con espesor de 1/8 de pulgada con caras pulidas con lijadora grano grueso (220) y con un recubrimiento de polvo grafito. En el centro de esta placa se encuentra instalado un sensor Gardon marca Vatell modelo TG1000-27, con capacidad de medir un flujo de calor máximo de 169W/cm<sup>2</sup>. Este conjunto de componentes tienen capacidad de movimiento en dos direcciones gracias a un sistema manual de tornillo-manivela mostrado en la figura 3.40.

La cámara utilizada para captura de imágenes es de la marca ALLIED tipo PIKE que cuenta con una resolución de 1280x960 pixeles. Los programas utilizados para editar y analizar las imágenes son GIMP, ImageJ y VisionAssistant de NI.

### 3.5.8 Cálculo de eficiencia óptica del horno solar

Para obtener la eficiencia óptica en el horno solar, es necesario conocer dos magnitudes, una es la potencia instantánea que recibe del sol el helióstato del horno; y la otra es la potencia que realmente está incidiendo en un receptor en la zona focal del concentrador, la cual fue estimada en la prueba anterior.

$$\text{Eficiencia}[\%] = \frac{\text{Potencia estimada}}{\text{Potencia real}} \times 100\% \quad (3.19)$$



Para poder comparar el valor obtenido del método utilizado para estimar la potencia, con el valor calculado que inicialmente sería posible obtener de este sistema óptico, es necesario tomar en consideración la magnitud de la radiación normal directa presente al momento de haber sido efectuada la prueba anterior.

En la Plataforma Solar de Hermosillo se cuenta con un pirheliómetro que toma registro de la radiación directa normal en tiempo real. Utilizando los datos registrados por este equipo de medición es posible conocer la magnitud de irradiancia presente en todo momento mientras sean capturadas las imágenes y registradas la lecturas del sensor Gardon en el horno.

Por lo tanto, haciendo coincidir las lecturas con las que corresponden a cada captura de imagen, es posible conocer la potencia que está recibiendo el horno solar mediante su heliostato. El área utilizada para convertir la irradiancia en potencia será entonces la del concentrador, ya que de esta manera no es considerada el área de proyección desperdiciada que pasa alrededor del concentrador, para el cálculo de eficiencia.

$$\text{Potencia real}[W] = \text{Irradiancia} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \times \text{Área del concentrador}[m^2] \quad (3.19)$$

Se deberá por lo tanto estimar en base a estas dimensiones, a las lecturas del sensor de radiación y a los registros de radiación directa, la eficiencia óptica del sistema utilizando la ecuación 3.19.

### **3.5.9 Nivel máximo de concentración**

El procedimiento para obtener el valor de concentración máxima es relativamente sencillo, ya que se trata de una medición directa de la señal de salida del sensor de flujo de calor y posteriormente se debe convertir esta señal con la curva de calibración que el fabricante del sensor ofrece, a un valor de flujo de calor, para finalmente comparar este con el valor de la radiación solar directa presente en el momento de dicha medición (figura 3.52).

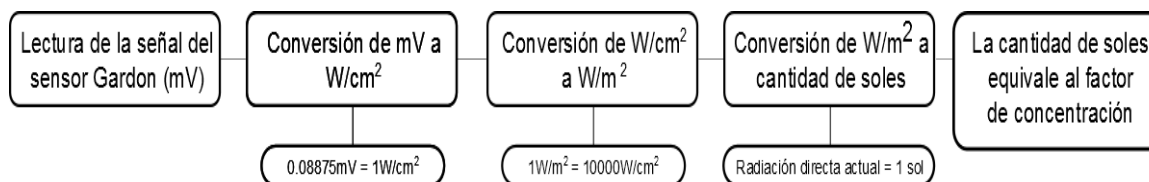


Figura 3.52 Diagrama de flujo para determinar el factor de concentración medido por el sensor Gardon.

Como se mencionó anteriormente, el sensor Gardon utilizado entrega una señal de salida lineal de 0.08875mV por cada  $W/cm^2$ . Por lo tanto, este factor debe ser aplicado a los mV registrados al momento de hacer la prueba.

A pesar de ser un método sencillo, la forma de localizar el punto en que se presenta una máxima concentración de radiación, puede ser lento y meticuloso. Para esto es necesario mover el sensor Gardon sobre 3 direcciones, esto con el fin de posicionar la sección de recepción del sensor sobre la mancha que visiblemente tiene mayor intensidad de luz.

Con la mesa diseñada para efectuar estos movimientos, se debe localizar la ubicación dentro de la mancha solar concentrada, que registra la señal de salida más alta. Este valor es utilizado para realizar la conversión de unidades en base al diagrama de la figura 3.52.

### 3.5.10 Curva de temperatura presente en un receptor

Para efectos de esta prueba, fue construido un receptor de cavidad elaborado con paredes de concreto, el cual en su interior fue recubierto con placas de lana mineral de 10mm de espesor. Las dimensiones y composición del receptor se muestran en la figura 3.53.

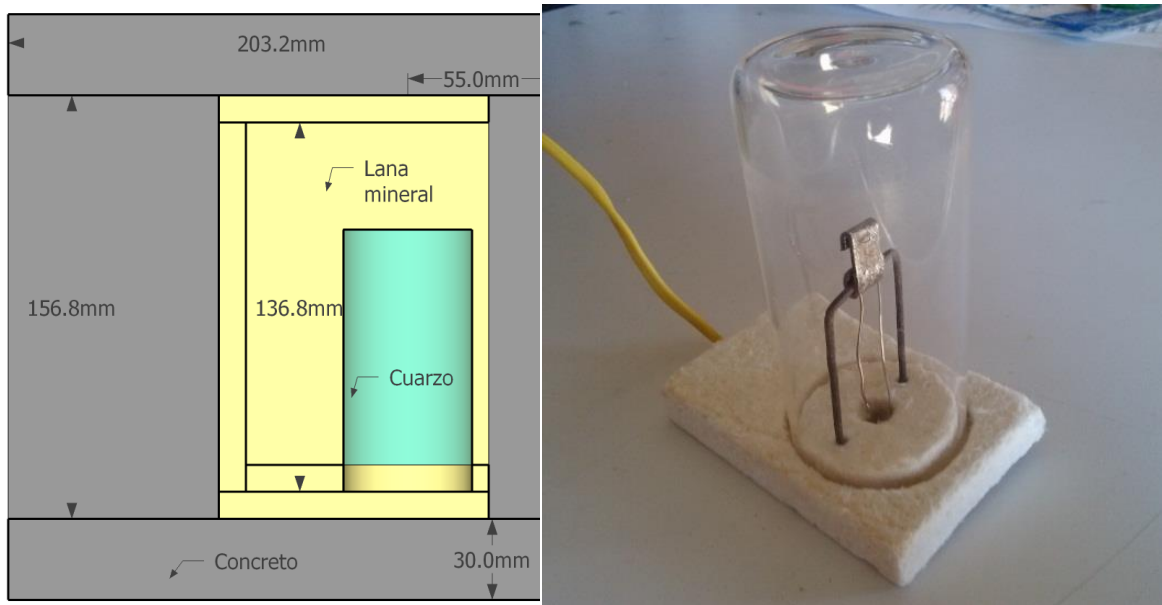


Figura 3.53 Corte transversal del receptor de cavidad utilizado en la prueba (izquierda) y vista del arreglo de instalación del sensor de temperatura.

En el interior de la cavidad del receptor, se instaló un tubo de cuarzo de 45mm con la cara superior cerrada, el cual porta en su interior una pieza metálica que lleva un sensor de temperatura tipo K. Los datos de esta prueba fueron registrados con una frecuencia de 1 segundo, utilizando un adquisidor de datos de la marca Campbell Scientific, modelo CR10.

La duración de cada corrida está determinada por el comportamiento de la temperatura en el receptor, siendo un factor importante la variación de la temperatura con respecto al tiempo.

## **CAPÍTULO 4**

### **4. RESULTADOS**

Las pruebas establecidas en el capítulo anterior fueron llevadas a cabo con un concentrador preliminar de tipo fresnel, en vez del concentrador de 16 facetas basado en el diseño del horno. Esto, debido a que la fabricación del concentrador diseñado anteriormente, requiere de una extensión de tiempo que se prolongaría en gran manera, y considerando los tiempos calendarizados para la realización de esta tesis, se vuelve inviable la construcción tanto de las facetas como de la estructura del concentrador.

Estas pruebas serán las mismas que, en un trabajo subsecuente a esta tesis, serán realizadas sobre el horno solar con el concentrador conformado con 16 facetas, mismo que fue diseñado en el capítulo 3.

#### **4.1 Lente fresnel**

Con la finalidad de poder comparar el concentrador diseñado en el capítulo 3, con el que fue utilizado en las pruebas de caracterización del horno solar, es necesario conocer cómo funciona una lente fresnel.

Anteriormente fueron comentados varios aspectos de cómo opera un concentrador esférico y uno parabólico; así como también, cómo funcionan los arreglos ópticos de varias facetas con la curvatura necesaria para concentrar la radiación solar. De forma semejante, una lente fresnel se conforma de superficies que permiten que la radiación sea dirigida hacia una zona focal. Una forma generalizada de entender el funcionamiento de este tipo de lentes es considerando la superficie de esta, como una curva segmentada (figura 4.1).

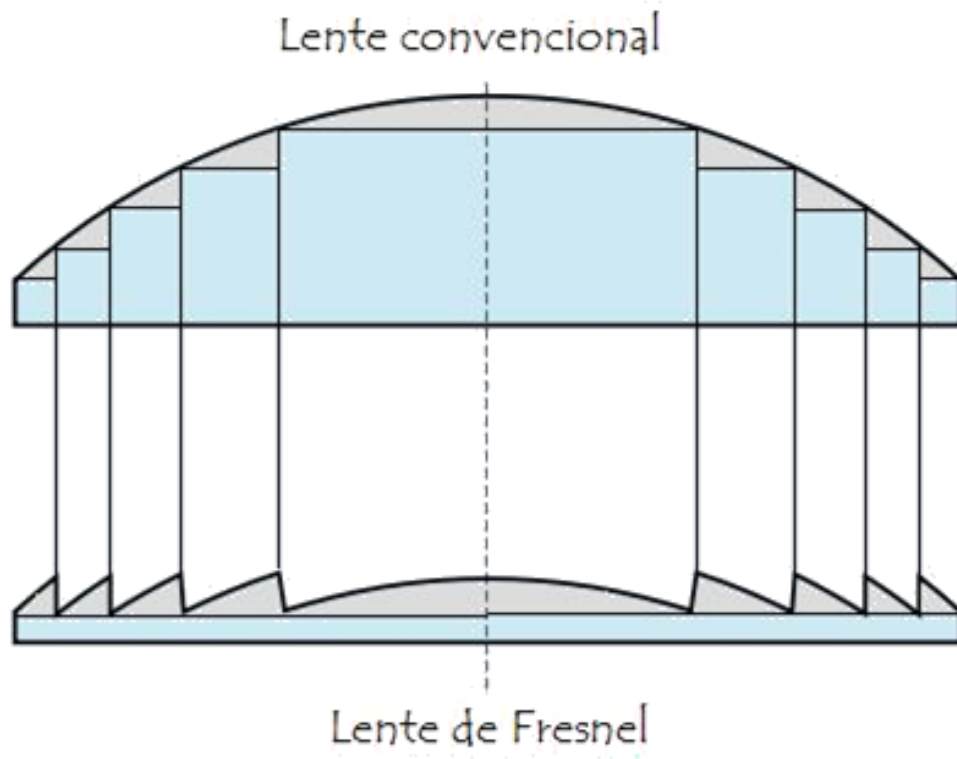


Figura 4.1 Lente fresnel comparada con una lente normal.

Como se observa en la figura 4.1, la característica más útil de las lentes fresnel, es que ópticamente, es posible aproximar el efecto de una lente convencional, pero empleando un espacio más reducido. Esto es debido a que la superficie de la lente que contiene la curvatura necesaria para concentrar (o dispersar) la luz, no se modifica, si no que tan sólo se altera la distancia de dicha superficie con respecto de la cara opuesta de la lente.

Dependiendo del diseño óptico, una lente fresnel contiene un alto o bajo número de “discontinuidades” o segmentos en su curvatura (figura 4.2).



Figura 4.2 En la imagen de la izquierda y de la derecha se muestra una lente fresnel con un bajo número y un alto número de segmentos de curvatura, respectivamente.

De manera análoga, un concentrador que refleja la luz, tiene una superficie que presenta una eficiencia óptica reflectiva (reflectancia); así también, una lente fresnel presenta una eficiencia óptica, pero en este caso se trata de la cantidad de radiación que es capaz de viajar a través de la lente, la que determina qué tan eficiente es esta en términos energéticos, identificando a esta característica como transmitancia.

Para este trabajo se utilizó una lente fresnel rectangular con dimensiones de 31.75 pulgadas (0.806m) en horizontal y 42.5 pulgadas (1.08m) en vertical. El tipo de enfoque es puntual y la distancia focal es de 30 pulgadas (0.76m). El material de construcción de

la lente es acrílico, el cual presenta en promedio una transmitancia del 88% (figura 4.3).  
[43]



Figura 4.3 Lente fresnel utilizada como elemento concentrador primario en el horno solar.

Los datos útiles para cálculos correspondientes a la lente utilizada son los siguientes:

- Área efectiva:  $0.87\text{m}^2$
- Transmitancia estimada del acrílico: 0.88
- Error de pendiente: Desconocido
- Error de superficie: Desconocido

En base a estos datos, es posible obtener una estimación de la potencia que se estará enviando a la zona focal del horno solar. Considerando que la reflectancia del espejo del helióstato es 0.8, tenemos una eficiencia óptica combinada de

$$\rho_t = (\rho_h)(\tau_f) \quad (4.1)$$

Donde  $\rho_h$  y  $\tau_f$  se refieren a la reflectancia del helióstato y a la Transmitancia de la lente fresnel, respectivamente; dando esto un total de 0.704.

El nivel de concentración de un arreglo óptico depende, entre otros factores, de las características del error de superficie y error de pendiente. Por lo tanto, es posible obtener de manera teórica, la potencia esperada del horno; más no el nivel de concentración.

Para determinar la potencia, se tiene la entrada inicial de energía, la cual es la radiación directa normal promedio estimada anteriormente, que es de  $1000\text{W/m}^2$ . La cual incide primeramente sobre el helióstato y posteriormente pasa a través de la lente fresnel. Por lo tanto, la potencia se reduce de manera

$$\text{Potencia final} = \eta_h \eta_f (A_c) \text{Irradiación inicial} \quad (4.2)$$

Donde  $\eta_h$  y  $\eta_f$ , se refiere a la eficiencia óptica del helióstato y de la lente fresnel, respectivamente.  $A_c$  es el área de apertura del concentrador, la cual permite concentrar sólo una fracción del total de radiación que envía el helióstato al concentrador. Teniendo por lo tanto una potencia estimada de

$$\text{Potencia teórica final} = 612\text{W}$$



## 4.2 Prueba de seguimiento solar

Los resultados de esta prueba preliminar se observan en las figuras 4.4 a la 4.6, donde se muestran las desviaciones en ambos ejes de seguimiento, siendo la serie X la que corresponde al eje acimutal y el eje Y al de elevación. El objetivo de efectuar esta prueba durante distintos días, es el de verificar la repetibilidad de la forma de las desviaciones, es decir, que mantengan semejanza cualitativa entre ellas.

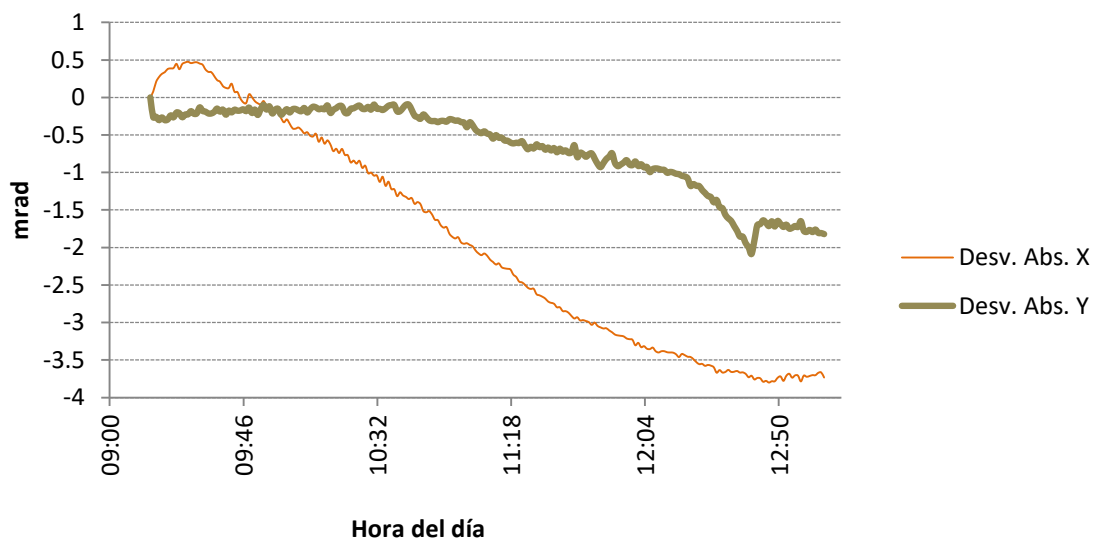


Figura 4.4 Desviación del seguimiento para el día 28 de noviembre de 2013.

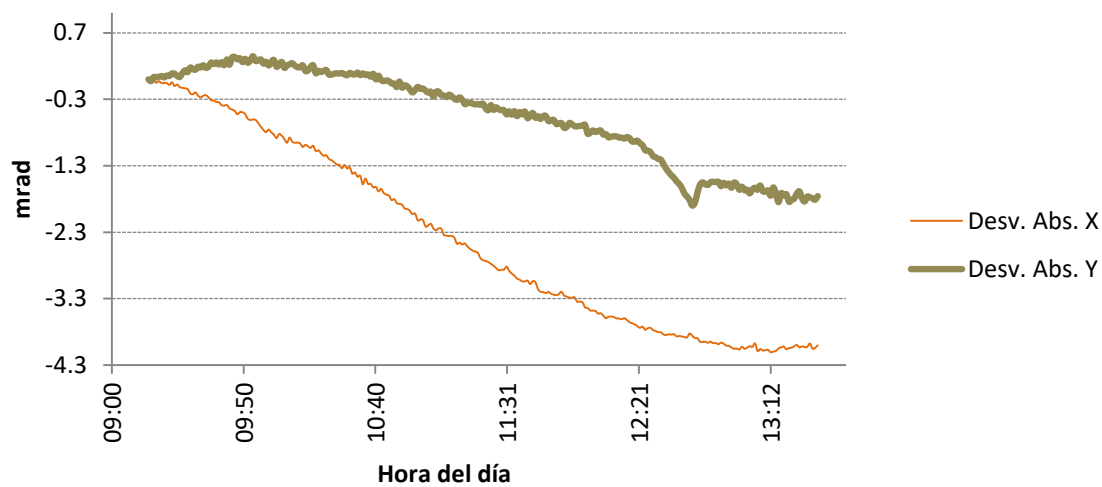


Figura 4.5 Desviación del seguimiento para el día 10 de diciembre de 2013.

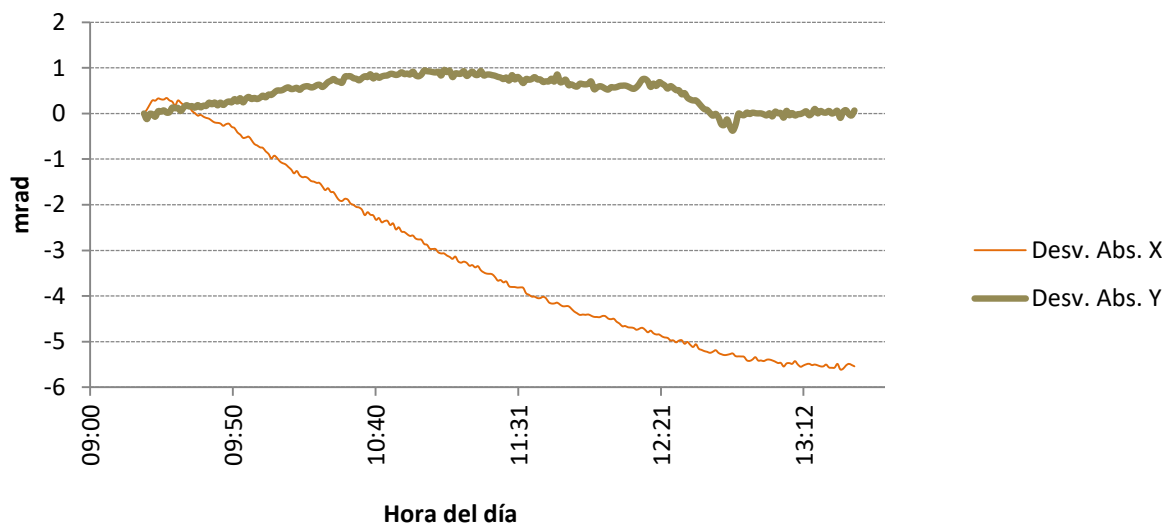


Figura 4.6 Desviación del seguimiento para el día 16 de diciembre de 2013.

Es posible observar que existe semejanza en la forma en que se presenta la desviación tanto para el eje de elevación como el acimutal. Pero la magnitud de la desviación varía para cada día en que se efectúa la prueba. Aun así, la mayor desviación sigue estando dentro de límites normales para un heliostato.

### 4.3 Prueba de apuntamiento sobre torre central

En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran los resultados de análisis de deriva de la proyección del heliostato sobre el blanco lambertiano, para el día 16 de enero y 17 de enero, respectivamente.

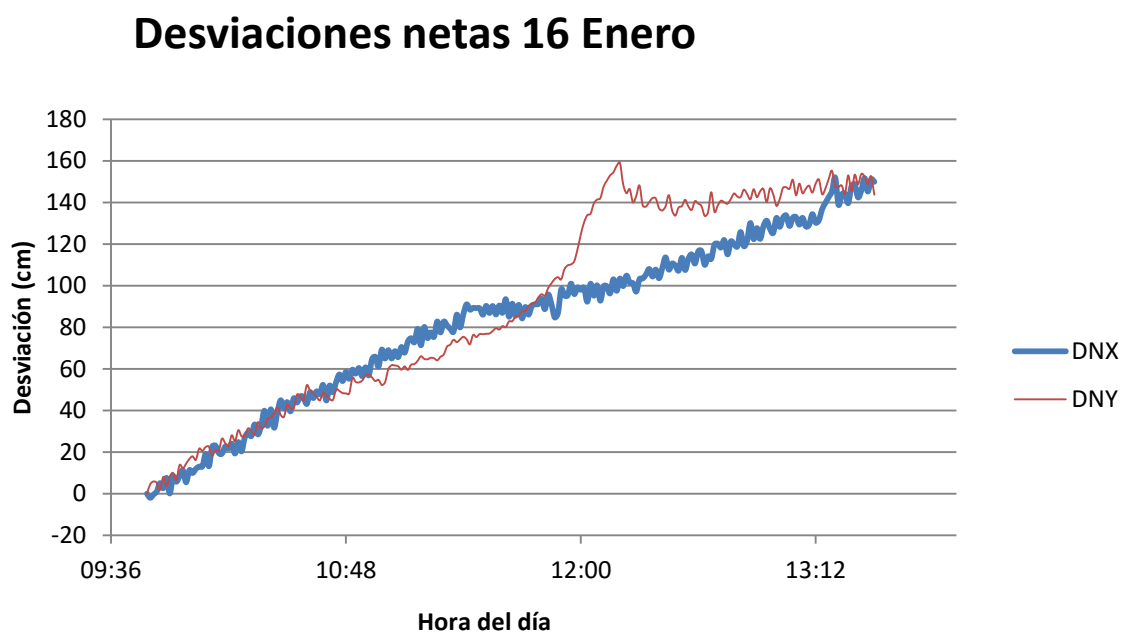


Figura 4.7 Desviación de la proyección del heliostato sobre el blanco lambertiano para el día 16 de enero.

## Desviaciones netas 17 Enero

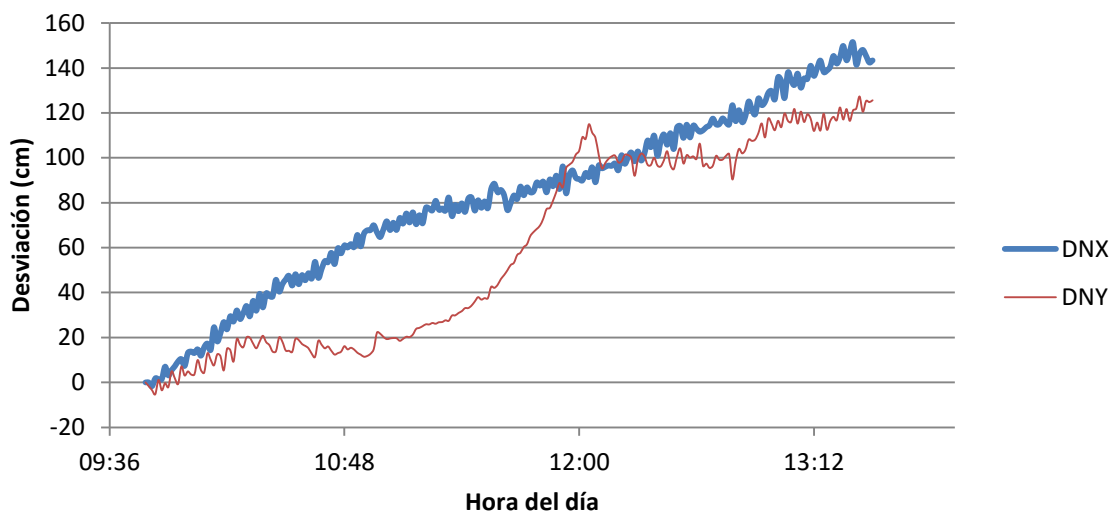


Figura 4.8 Desviación de la proyección del heliostato sobre el blanco lambertiano para el día 16 de enero.

La desviación neta observada en las gráficas se refiere a la diferencia entre una posición inicial y la posición que fue tomando la proyección durante la prueba. Se tiene que para dos días de pruebas, el comportamiento de la deriva es similar, aunque con magnitudes de desviación ligeramente distintas.

El plano del terreno sobre el cual están instalados los heliostatos, se considera uniforme con una elevación (coordenada  $z$ ) de 200m. La posición del heliostato dentro del campo tiene las coordenadas (13.2, 33.2, 200.95) (m). El punto central del blanco lambertiano se considera con coordenadas (0, 0, 220.95), estableciéndose por lo tanto la distancia  $d_{h-BL}$  entre ambos con la relación

$$d_{h-BL} = \sqrt{(x_h - x_{BL})^2 + (y_h - y_{BL})^2 + (z_h - z_{BL})^2} \quad (4.3)$$

Dando esto como resultado  $d_{h-BL} = 40.94$ m. Esta distancia es utilizada para obtener la desviación que el heliostato presentó, pero cuantificada en magnitud angular (figura

4.4). La componente horizontal (X) de la deriva, la línea entre el helióstato y el centro del blanco lambertiano y la línea formada por el punto final de la deriva y el helióstato, conforman un triángulo (figura 4.4), del cual se conocen las distancias de 2 lados,  $d_{h-BL}$  y  $DNX$ , y dos ángulos internos  $b$  y  $c$ . De acuerdo con el *teorema del seno*, es posible obtener el ángulo  $d$ , que tendrá el valor de la desviación angular neta del helióstato.

$$\frac{a}{\text{seno}\alpha} = \frac{b}{\text{seno}\beta} = \frac{c}{\text{seno}\gamma} \quad (4.4)$$

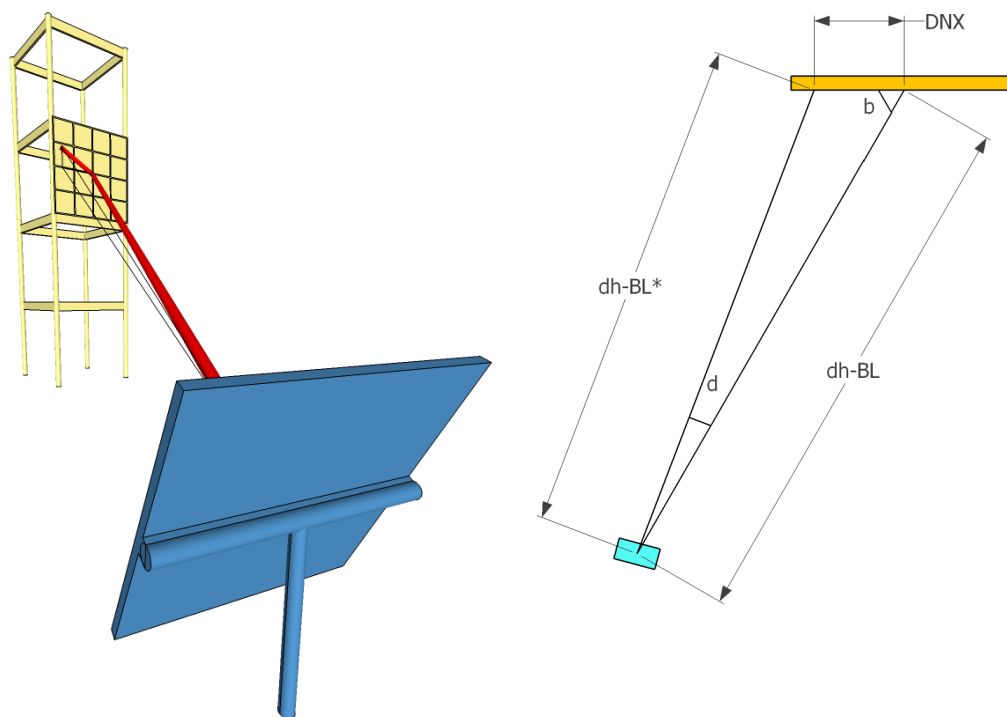


Figura 4.9 Líneas imaginarias utilizadas para determinar el valor de la desviación angular del helióstato en pruebas de deriva.

Según se muestra en la imagen 4.9 (derecha), es posible conocer la distancia  $d_{h-BL^*}$ . Aplicando la misma ecuación utilizada para obtener  $d_{h-BL}$ , se sustituye el valor de la coordenada  $x_{BL}$  por  $DNX$ , dando como resultado  $d_{h-BL^*} = 40.89\text{m}$  para los días 16 y 17 de enero.

Posteriormente, se sustituyen los valores y aplicando el teorema del seno, se obtiene la siguiente ecuación

$$d = \text{seno}^{-1} \left[ \frac{DNX \times \text{senob}}{d_{h-BL^*}} \right] \quad (4.5)$$

El valor del ángulo  $b$  se obtiene trazando un triángulo rectángulo formado por los valores  $d_{h-BL}$ ,  $x_h$  y  $y_h$ . Con esto, finalmente se tiene que

$$d = \text{seno}^{-1} \left[ \frac{0.153\text{m} \times \text{seno}(71.19^\circ)}{40.89\text{m}} \right] = 0.2029^\circ$$

Convirtiendo las unidades angulares, tenemos que la desviación de la proyección para el eje acimutal del helióstato, se presentó una desviación máxima de  $3.54\text{mrad}$  para el movimiento acimutal, con lo que, según la segunda ley de reflexión óptica, realmente en el eje del helióstato se presentó aproximadamente la mitad de la magnitud mencionada, siendo esta finalmente de  $1.77\text{mrad}$ . El procedimiento para obtener la deriva en el eje de elevación es el mismo, obteniéndose en este una desviación máxima muy aproximada entre los dos días de prueba de  $1.33\text{mrad}$ .

Con la finalidad de obtener un resultado más preciso en la desviación angular del helióstato, se debe realizar un ajuste en la geometría del movimiento, ya que la superficie del espejo se encuentra desfasada con respecto a los ejes de giro. En este caso, la distancia de desfasamiento es muy baja en relación a las distancias de las proyecciones, por lo que este ajuste no representaría una variación significativa en los resultados.

#### 4.4 Prueba de apuntamiento a un blanco frente al heliostato

En la figura 4.10 se muestran los resultados del análisis de deriva de la proyección del heliostato sobre una superficie ubicada al frente de este, simulando con esta prueba, que la superficie de proyección se tratara como el área de apertura de un concentrador en eje con el heliostato.

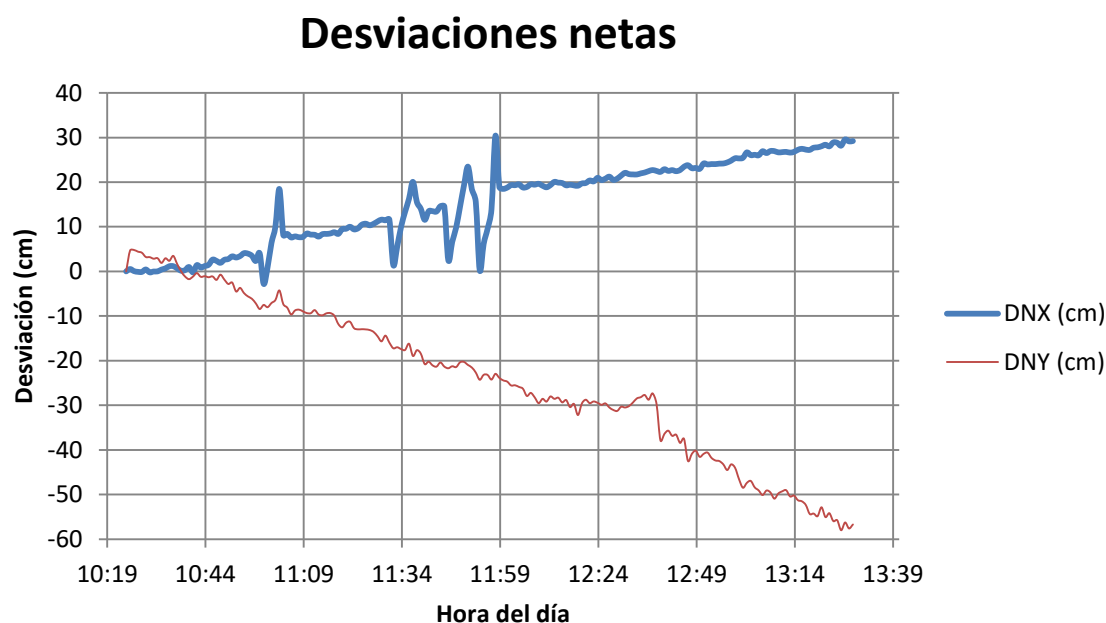


Figura 4.10 Desviaciones netas de la proyección frontal del heliostato durante el periodo de tiempo de operación del horno solar.

Se puede observar en la figura 4.10 que las formas de las desviaciones son claramente distintas a las que se presentan cuando el apuntamiento se realiza sobre la torre. Esto se debe a que la forma de la deriva se altera cuando se utilizan objetivos con distintas ubicaciones. En este caso, a pesar de tener una distancia entre objetivo y heliostato de 8m (sólo un 20% de la distancia entre torre y heliostato), las desviaciones fueron del orden de 55cm, es decir, un 36% de las anteriores; obteniendo de esto que, la variación en las desviaciones no se da en forma lineal con respecto a la distancia entre heliostato y objetivo, al modificarse la ubicación de los blancos de apuntamiento. Las desviaciones

que generan picos y valles en la curva se deben al movimiento que se da en el heliostato en presencia de rachas de viento con altas velocidades.

#### 4.5 Prueba de deriva de la mancha solar concentrada

En la figura 4.11 se muestran los resultados de análisis de deriva de la mancha solar concentrada resultante del arreglo óptico del horno solar. Donde se aprecia el comportamiento de la desviación de la mancha en dos direcciones, la horizontal y la vertical.

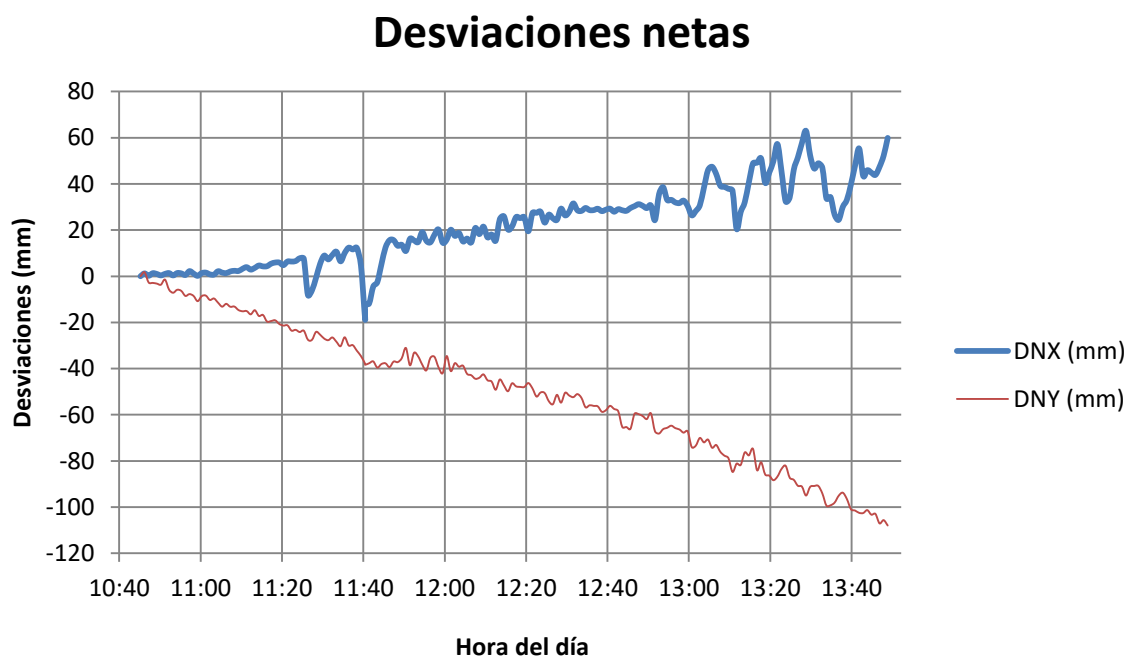


Figura 4.11 Posición del centroide de la mancha solar concentrada durante las horas de operación del horno, incidiendo sobre una placa plana en la zona focal del concentrador.

Es notable que la forma de la deriva tiene similitud con la forma de la deriva en la prueba anterior, ya que la ubicación de este nuevo objetivo tiene las mismas coordenadas (salvo la coordenada en Y, del eje norte-sur, la cual no tiene relevancia en los parámetros del control del heliostato), que la superficie donde se proyectó la luz



reflejada por el heliostato en la anterior prueba de apuntamiento frontal. Los picos pronunciados en la gráfica se deben de igual manera que en otras pruebas, a la presencia de rachas de viento.

#### 4.6 Estimación de potencia del horno solar

En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de cuantificación de potencia, en base a la comparación de 12 imágenes (identificadas con el número en el orden que fueron capturadas más la letra *a*) y las lecturas del Gardon en 12 puntos dentro de la mancha solar concentrada; de las cuales 5 lecturas debieron ser descartadas por presentar valores irregulares.

Tabla 4.1 Valores medios obtenidos del tono de gris en 12 puntos de 12 imágenes distintas y el valor de la lectura del Gardon correspondiente a cada punto.

Punto	1ª	2ª	3a	4a	5a	6a	7a	8a	9a	10a	11a	12a	Promedio	mV
1		102.02	100.65				101.39	109.49	118.93	124.16	120.85	109.12	85.400	1.8
2					84.83	66.5	89.24	75.83		102.59	103.1	86.78	60.207	1.1
3					51.81	54.38	51.36	55.47	55.18	57.28	60.67	55.36	48.713	0.9
4	61.62	59.14			52.76		64.62	60.16	59.95	56.8	61.61	60.6	39.807	0.8
5	83.38	71.71	78.44	88.78		79.49	78.97	70.07	76.32	59.74	57.28	60.3	58.328	1
6	143.58	147	135.62				158.81		151.69	124.31	133.06	104.4	80.549	0.8
7		174.86	178.14	155.45	159.01			198.97	206.22	172.04	143.91	179.7	132.719	0.9
8			83.34	79.87	89.07				103.49	105.98	97.97	98.73	67.374	0.8
9			53.29	50.85	52.23	62.55	58.71			65.57	62.9	57	43.030	0.81
10	29.1		23.57	23.52	21.6	26.27	26.21	25.87				26.75	15.434	0.5
11	26.1			29.09	25.69	24.21	31.01	31.54	23.36	33.1			21.114	0.6
12	28.49			25.28	23.84	24.12	23.53	24.5	29.63	31.76	32.56		21.104	0.4

Los renglones que aparecen subrayados en amarillo, son valores descartados, ya que no presentan congruencia entre lo registrado en intensidad de gris y la lectura de flujo de calor del sensor Gardon. Los valores de la tabla 4.1 se utilizan para graficar y

posteriormente trazar la curva característica del comportamiento que se presenta al comparar la luz reflejada por la placa y la señal registrada por el sensor de flujo de calor (figuras 4.12 y 4.13).

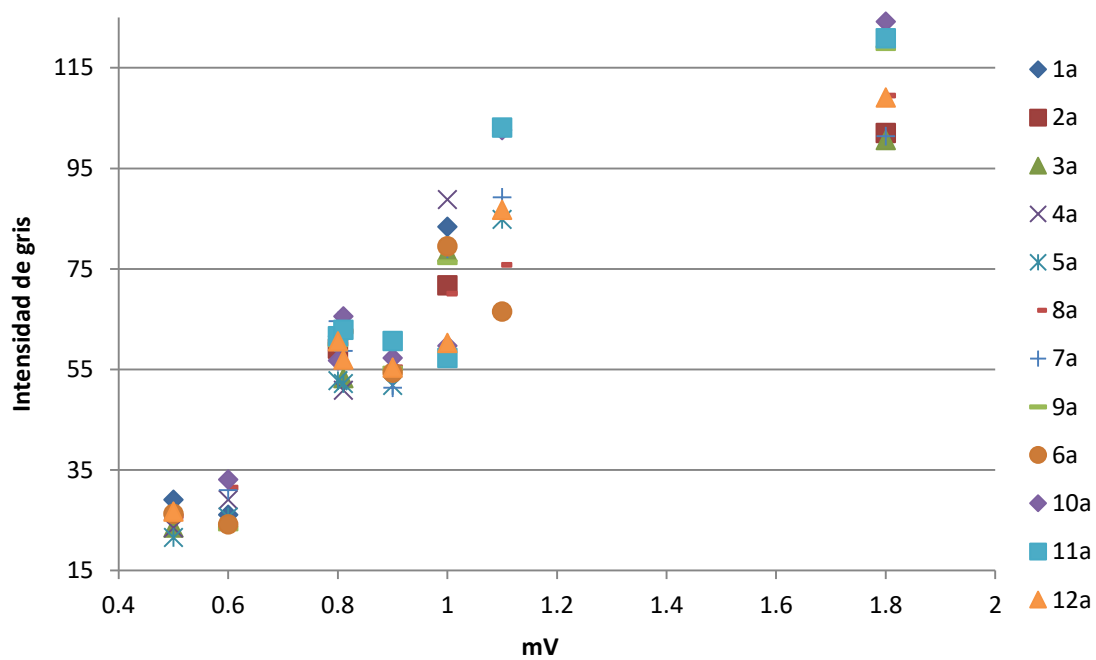


Figura 4.12 Valores medios de intensidad de gris correspondientes a la señal (mV) del sensor Gardon.

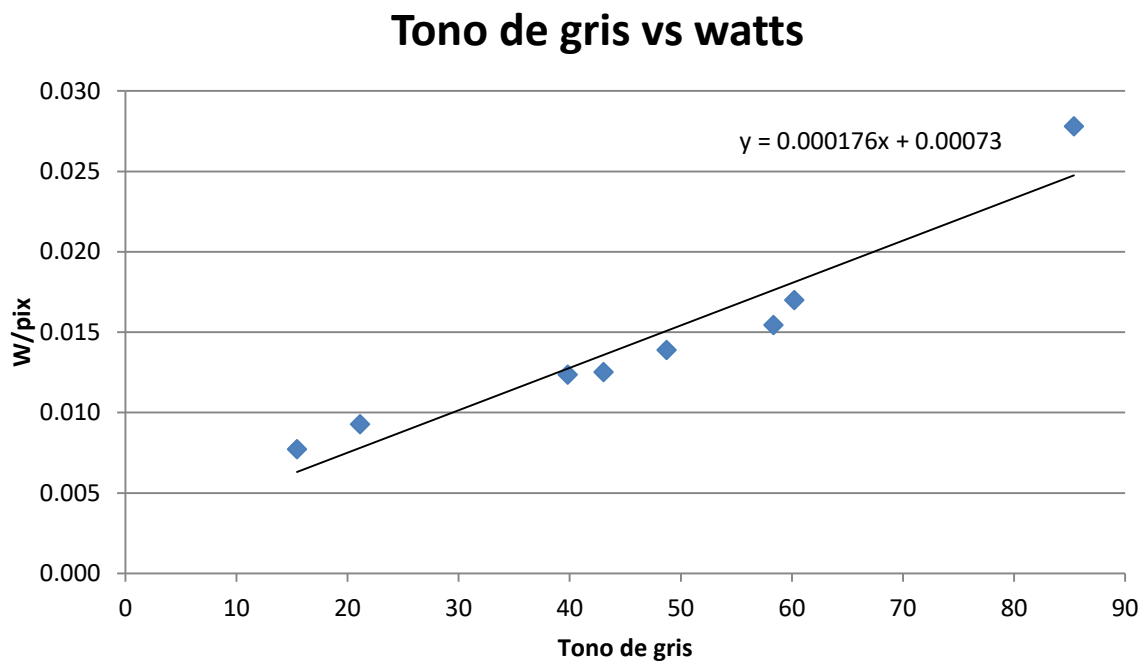


Figura 4.13 Curva ajustada a los valores obtenidos de intensidad de gris y potencia por pixel.

La curva de ajuste se limita a una ecuación lineal, en concordancia con trabajos anteriores donde ha sido observada una relación lineal entre intensidad de gris y flujo de calor[44].

Como se observa en la figura 4.13, la escala del eje vertical contiene los valores de potencia. Para obtener este valor es necesario realizar la conversión entre mV (señal de salida del sensor Gardon) y potencia por cada pixel. Para lo cual se debe convertir la señal del Gardon que son milivoltios a un valor de flujo de calor en  $W/cm^2$ .

Según especificaciones del fabricante, el sensor Gardon entrega una señal lineal de  $0.0887mV/W/cm^2$ . Por lo tanto, cada mV equivale a  $11.26W/cm^2$ . A su vez, se tiene que según las dimensiones obtenidas de las imágenes, cada 2.701 pixeles representan 1mm. En base a estas dos relaciones, es posible obtener la cantidad de potencia aproximada contenida por pixel en base al tono de gris de este.

Finalmente, tomando para muestras una cierta cantidad de imágenes, en nuestro caso 5 muestras, fueron editadas para eliminar sus zonas con tonalidades irregulares y así, posibilitar la contabilización de valores de potencia de sus píxeles. Utilizando GIMP, se aplicó el tono medio de gris que se encontraba alrededor de las zonas irregulares para uniformizar las partes que presentaban zonas oscuras o brillantes (figura 4.14).

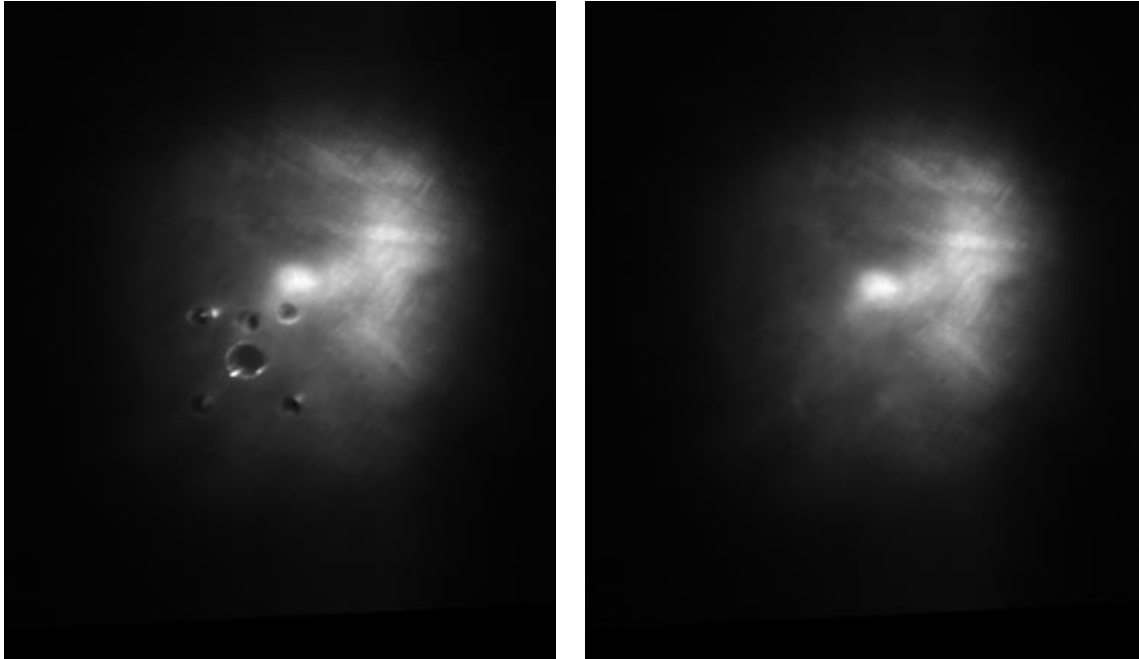


Figura 4.14 Comparación entre la imagen que ha sido editada para eliminar las irregularidades por presencia de objetos en la cara de la placa.

En la figura 4.15 se muestra el histograma con la cantidad de píxeles clasificados en base a su tono de gris y/o potencia equivalente, presentes en la imagen 6a y 12a.

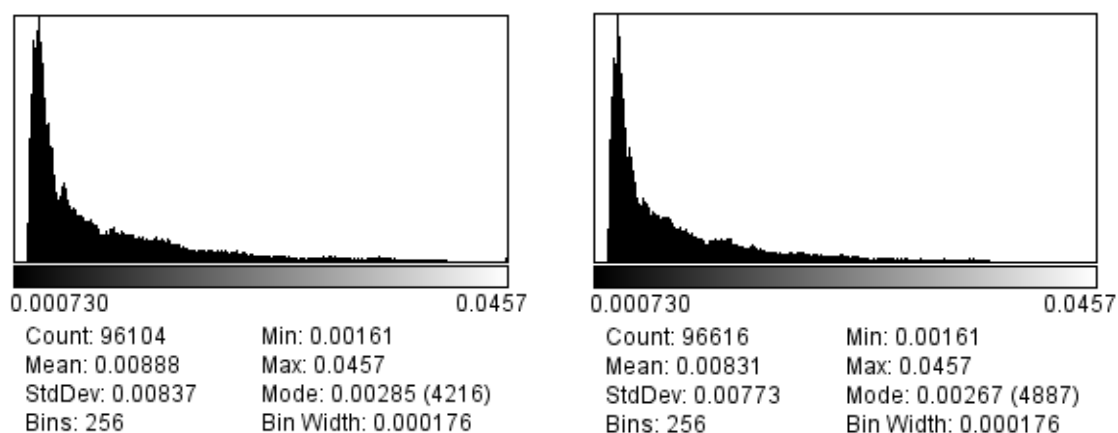


Figura 4.15 Histograma donde se muestra la cantidad de pixeles (eje vertical) clasificados según su potencia equivalente (eje horizontal) según la calibración obtenida anteriormente.

Utilizando los datos del histograma, se contabiliza la potencia total que contiene todo el conjunto de pixeles que conforman la mancha solar, dando como resultado la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Potencias estimadas en 5 imágenes aleatorias, mediante el método de comparación de intensidad de luz.

Imagen	Potencia (W)
2a	595.92
3a	627.11
6a	637.38
9a	619.87
12a	600.32
<b>Promedio</b>	<b>616.12</b>

Esta magnitud de potencia tiene concordancia con la potencia estimada inicialmente.

#### 4.7 Cálculo de eficiencia óptica del horno solar

En base a la fecha y hora de los registros del sensor Gardon durante las pruebas anteriores, se obtiene la radiación directa presente durante la toma de muestras. Según los datos del pirheliómetro, en el día 26 de febrero de 2014, para las horas en que se capturaron las imágenes, la irradiancia registrada se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores de irradiancia instantánea registrada en los instantes en que se capturaron las imágenes.

<b>Imagen</b>	<b>Hora</b>	<b>Radiación directa (W/m<sup>2</sup>)</b>
2a	13:24	954.04
3a	13:25	949.74
6a	13:29	950.30
9a	13:32	943.89
12a	13:36	945.56

Por lo tanto se tiene que, aplicando lo revisado en la metodología para esta prueba, la potencia realmente recibida por el horno en los instantes de interés, se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Valores de potencia real útil para cada instante de captura.

<b>Imagen</b>	<b>Hora</b>	<b>Potencia real (W)</b>
2a	13:24	830.01
3a	13:25	826.27
6a	13:29	826.76
9a	13:32	821.19
12a	13:36	822.63

Finalmente, para obtener valores de eficiencia, se sustituyen los valores de potencia estimada en la prueba anterior, en la ecuación de eficiencia 4.6, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Estimaciones de la eficiencia óptica del horno solar.

<b>Imagen</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
2 <sup>a</sup>	71.79
3 <sup>a</sup>	75.89
6 <sup>a</sup>	77.09
9 <sup>a</sup>	75.48
12 <sup>a</sup>	72.97
Media	<b>74.64</b>

#### **4.8 Nivel máximo de concentración**

Con la mesa diseñada para efectuar estos movimientos, se localiza el punto que registra la señal más alta, la cual es de 14.8mV.

Según datos de registro de radiación solar directa, recopilados por el pirheliómetro instalado en el CPH, para la hora en que se llevó a cabo la prueba de concentración máxima, la radiación directa al instante (10/marzo/2014 a las 12:55 p.m.) era de 945.95W/m<sup>2</sup>. La señal de 14.8mV equivale por lo tanto, a 1762.89 soles, es decir, un factor de concentración máximo de 1762.

#### 4.9 Curva de temperatura presente en un receptor

Los resultados de las pruebas realizadas el día 14 de abril se muestran en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18, en las cuales se observa que la temperatura máxima obtenida fue de 1007°C, 1021°C y 1017°C para la primera, segunda y tercera pruebas, respectivamente. Las pruebas dan como resultado que en el receptor utilizado, el horno solar tiene la capacidad de mantener temperatura sobre los 800°C durante periodos de más de 20 minutos.

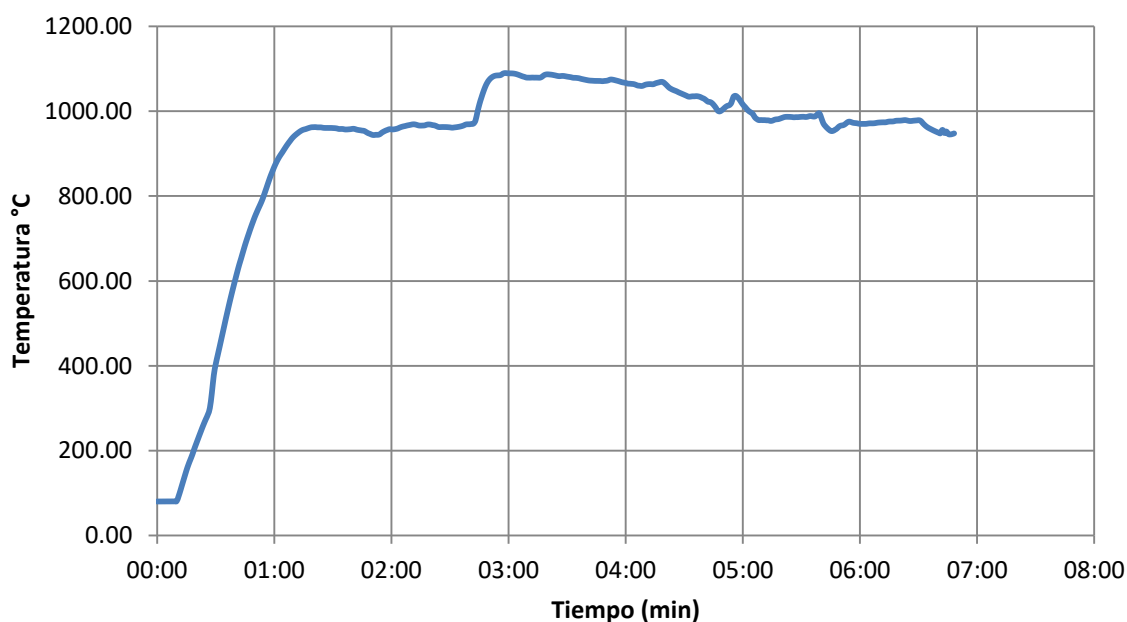


Figura 4.16 Curva de temperatura registrada en la primera prueba al interior del receptor de cavidad.



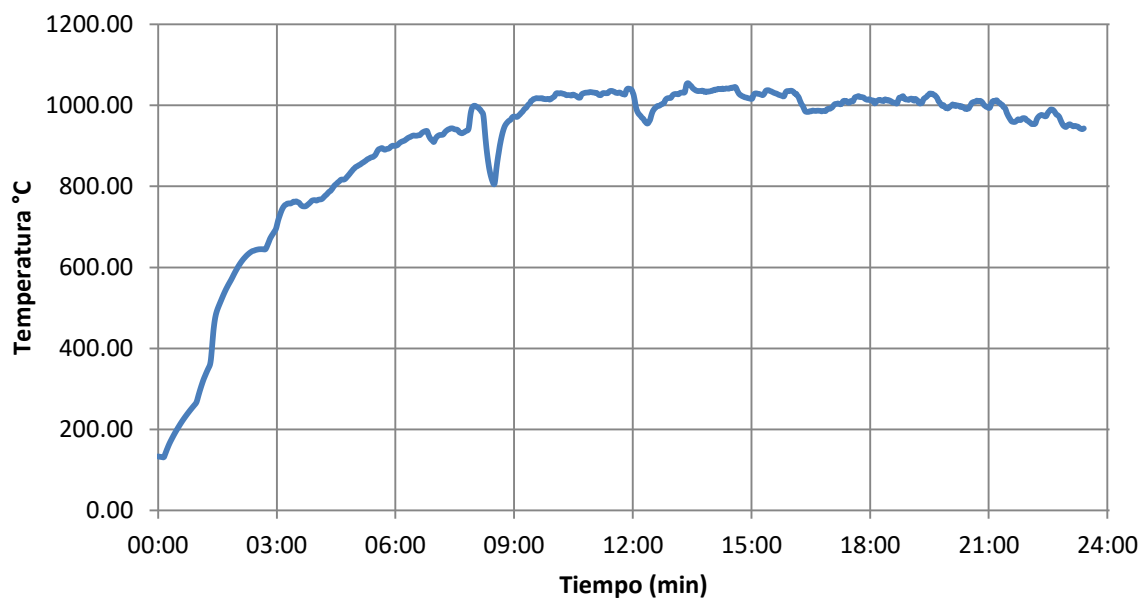


Figura 4.17 Curva de temperatura registrada en la segunda prueba al interior del receptor de cavidad.

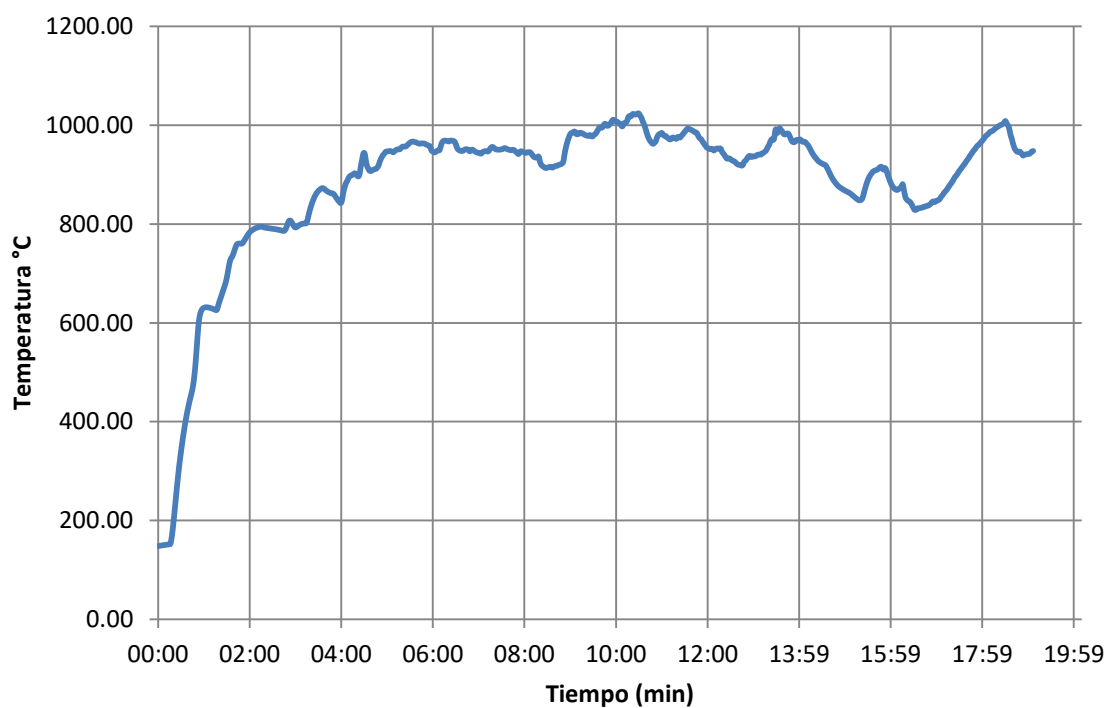


Figura 4.18 Curva de temperatura registrada en la tercera prueba al interior del receptor de cavidad.

El receptor construido y utilizado en la experimentación se muestra en la figura 4.19, donde es posible apreciar a este antes, durante y después de las pruebas.

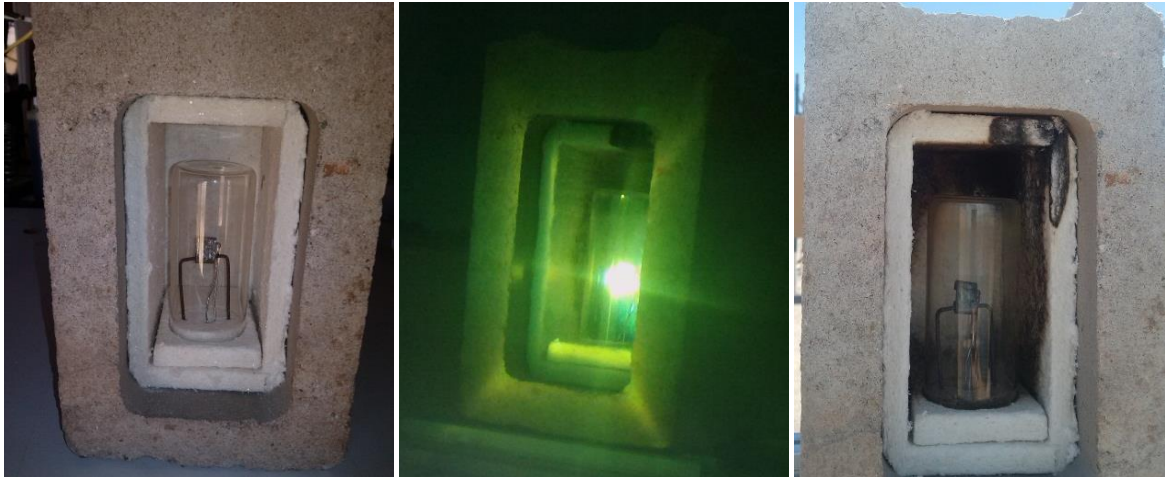


Figura 4.19 Receptor de pruebas mostrado antes, durante y después de ser sometido a la radiación concentrada del horno solar.

Durante la primera prueba, la radiación solar directa fue en promedio de  $981.07\text{W/m}^2$ , para la segunda de  $976.82\text{W/m}^2$  y para la tercera de  $965.72\text{W/m}^2$ .

Para cada prueba fue necesario localizar detenidamente el punto focal, manipulando con ajuste fino el objetivo de apuntamiento del helióstato, para mantener así el sensor de temperatura del receptor en la zona de mayor densidad de flujo radiativo. Una vez obtenido esto, el horno solar queda operando en modo automático, por lo que la desviación de la mancha por la deriva del helióstato provoca que la temperatura máxima tenga un periodo de duración determinado.

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSIONES

Fue desarrollada la metodología para el diseño y caracterización un horno solar de alta concentración. En base a las alternativas que fueron revisadas, se optó por la opción de diseño basada en un horno con un solo helióstato y un concentrador conformado por 16 facetas de apertura cuadrada con curvatura esférica, teniendo todas una misma distancia focal. Posicionando el foco del concentrador en eje común con la línea imaginaria entre en centro del helióstato y el centro del concentrador.

Los estudios con simulaciones de trazado de rayos, arrojaron resultados de niveles de concentración entre 2546 y 2633. Entregando a su vez una magnitud de potencia de 1.02kW. Los niveles máximos de concentración variaron en un rango de  $\pm 2\%$  a lo largo del año, pero manteniéndose la potencia con variaciones despreciables.

Según simulaciones el tamaño de la mancha solar concentrada se observó con un diámetro de aproximadamente 50mm para más del 90% de radiación concentrada.

En el diseño del helióstato se optó por utilizar un sistema de movimiento que no ha sido implementado en ningún otro helióstato, el cual se basa en una etapa final de reducción que trabaja por fricción de un rodillo dentro de un tambor. Este sistema ha dado buen resultado en cuanto a estabilidad y rigidez operando con vientos sostenidos de baja velocidad.

El tipo de retroalimentación del control implementado en el helióstato ha dado resultados satisfactorios en cuanto a la relación de costo y beneficio, ya que se optó por instalar potenciómetros digitales de efecto Hall en cada uno de los ejes de movimiento, estos potenciómetros operan como sensores de posición angular. Presentando buena precisión y repetibilidad, sin embargo posee cierta cantidad de histéresis, lo cual puede ser compensado en los algoritmos de control para disminuir sus efectos.

En la experimentación, el concentrador de diseño que consistía de 16 facetas cuadradas fue sustituido por una lente fresnel con un área de apertura de  $0.88\text{m}^2$ . El nuevo arreglo óptico conformado por un heliostato y lente fresnel se utilizó para conocer las características del horno solar resultante.

La metodología seguida para la ejecución de las pruebas de caracterización del horno solar, es aplicable a cualquier tipo de horno solar, independientemente de su configuración óptica. Los resultados obtenidos se basan en los objetivos particulares de esta tesis. Se realizaron pruebas para conocer la precisión de seguimiento solar, apuntando el heliostato al sol durante 4 horas, 2 horas antes y 2 horas después del mediodía. Como desviación máxima en el eje acimutal se registraron  $2.1\text{mrad}$  y  $5.5\text{mrad}$  para el eje de elevación. La magnitud de estas desviaciones, indican que el sistema de control automático implementado en los sistemas de seguimiento del heliostato, son aptos para ser utilizados en este.

Las pruebas de apuntamiento en distintos blancos arroja buen resultado en cuanto a repetibilidad, sin embargo es necesario implementar polinomios de ajuste de deriva[45] para mejorar la desviación que presenta en el heliostato cuando se apunta hacia un blanco en la torre (desviación de  $1.50\text{m}$  en 4 horas de operación) o bien, en un blanco frente a este, como es el concentrador del horno. Esta deriva, provoca que la mancha concentrada en el foco de la lente fresnel, tenga un alto grado de desviación para esta aplicación, siendo el valor máximo de  $110\text{mm}$  en el eje vertical y de alrededor de  $50\text{mm}$  en el eje horizontal. Dicha desviación se da durante el tiempo completo de operación del horno solar.

Se obtuvo una estimación de la potencia total incidiendo sobre un receptor plano en el horno solar. El método utilizado para estimar esta magnitud se basa en la comparación de dos variables al momento de realizar la prueba; el flujo de calor medido por un sensor de radiación y la intensidad de luz reflejada sobre el receptor en cuestión. Aplicando esta metodología fue posible obtener una aproximación de la potencia con la que opera el horno solar, siendo la media estimada de  $616\text{W}$ , magnitud que tiene concordancia con lo

calculado teóricamente para el sistema. Esto a pesar de que este método es susceptible a varios errores tanto de medición como de la preparación de la estación de experimentación.

De igual manera, apoyado en las estimaciones de potencia del horno, se calcularon los niveles de eficiencia óptica, registrándose un promedio del 74%, esto es 4 puntos porcentuales de error en relación a la eficiencia óptica esperada.

Finalmente se analizó el comportamiento de la curva de temperatura de un receptor de cavidad, el cual registró una lectura máxima de 1021°C sostenidos durante un periodo de tiempo determinado. En el receptor se encuentra instalado un recinto cilíndrico de cuarzo dentro del cual se protege el material a analizar para reducir las pérdidas de calor por convección.

Los resultados obtenidos en las pruebas para determinar la temperatura máxima en un receptor determinado, indican que el horno cuenta con la capacidad de realizar experimentación con materiales sometidos a altas temperaturas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, es necesario implementar ajustes en el sistema de control del helióstato, con el fin de reducir en lo más posible, las desviaciones de la mancha solar concentrada debidas a la deriva del helióstato; ya que esto ocasiona caídas de temperatura en un receptor según se aleje la mancha solar del área de interés.

El helióstato elaborado para este trabajo presenta las características deseables para su operación en un horno solar, así como también en una planta térmica de torre central. Sus sistemas de movimiento son únicos en su tipo, aportando con esto una nueva forma de mecanismos para movimiento en los helióstatos. De igual manera, el uso de potenciómetros de efecto Hall aplicados cerrar el lazo de control, aporta una mejora en la forma en que son programados los campos de helióstatos ya que, su uso abre la posibilidad de tener sensores de posición angular en los ejes finales de movimiento de los helióstatos, ayudando esto a simplificar los sistemas de control y reduciendo los costos de hardware dedicados al seguimiento solar.

## **5.1 Trabajo a futuro**

En el proceso de construcción del horno solar, es necesario conocer las características de cada uno de los componentes que lo conforman. En este trabajo, las pruebas de caracterización realizadas se llevaron a cabo en un concentrador preliminar, el cual ha servido de apoyo para efectuar diversas pruebas para conocer las propiedades más relevantes del heliostato del horno; así como también hizo posible establecer y practicar la metodología de experimentación que será aplicada sobre el horno solar funcionando con el concentrador estudiado en el capítulo 3.

Se plantea concluir la construcción del horno solar conforme al diseño establecido durante este trabajo, y posteriormente efectuar las pruebas de caracterización descritas en el capítulo 4, sobre el horno solar con concentrador de 16 facetas esféricas de apertura cuadrada.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Joseph Michalsky, "The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050)," vol. 40, no. 3, 1988.
- [2] Ibrahim Reda and Andreas Afshin, "Solar position algorithm for solar radiation applications," vol. 76, no. 5, 2003.
- [3] D. Martínez and J. Rodríguez, "Tratamiento superficial de materiales mediante luz solar concentrada: una opción mediante energías renovables," *Revista de metalurgia*, vol. 34, no. 2, pp. 104-108, 1998.
- [4] Felix Trombe, "Self-regulating automatic heliostat reflecting mirror device," 2712772 A, Julio 12, 1955.
- [5] Felix Trombe, "Composite mirrors of large area in particular for concentrating solar energy," 2707903 A, Mayo 10, 1955.
- [6] Felix Trombe, "Furnace for the treatment of substances by means of the energy supplied by a concentrated radiation," 2793018 A, Mayo 21, 1957.
- [7] Julia Herniak. (2011, Agosto) Renewable energy world. [Online].  
<http://www.renewableenergyworld.com/rea/blog/post/2011/08/solar-furnaces-a-powerful-use-of-solar-power>
- [8] Sollab. Sollab - Alliance of european Laboratories on solar thermal concentrating systems. [Online]. <http://www.sollab.eu/psi.html>
- [9] Sandia National Laboratories. (2014) Sangia.gov. [Online].  
[http://energy.sandia.gov/?page\\_id=338](http://energy.sandia.gov/?page_id=338)
- [10] PSA. Plataforma Solar de Almería. [Online].  
<http://www.psa.es/webeng/instalaciones/horno.php>
- [11] LACYQS. (2011) Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. [Online].  
<http://xiuhcoatl.cie.unam.mx/lacyqs/en/index.php/facilities/high-flux-solar>
- [12] DLR. DLR Institute of Solar Research. [Online].  
[http://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-8558/14717\\_read-28267/](http://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-8558/14717_read-28267/)

- [13] Weizmann Institute of Science. (2012) Weizmann Institute of Science - Solar furnace. [Online]. <http://davidson.weizmann.ac.il/en/content/solar-furnace>
- [14] Javier Dufour. (2011, Junio) MadrI+D. [Online]. <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2011/06/02/131225>
- [15] Nobuhei Hukuo and Hisao Mii, "Design problems of a solar furnace," *Solar energy*, vol. 1, no. 2, pp. 108-114, 1957.
- [16] W. A. Baum and J. D. Strong, "Basic optical considerations in the choice of a design for a solar furnace," *Solar energy*, vol. 2, no. 3, pp. 37-45, 1958.
- [17] Peter Glase, "Engineering research with a solar furnace," *Solar energy*, vol. 2, no. 2, pp. 7-10, 1958.
- [18] Takemaro Sakurai, Osamu Kamada, Körö Shishido, and Köji Inagaki, "Construction of a large solar furnace," *Solar energy*, vol. 8, no. 4, pp. 117-126, 1964.
- [19] Felix Trombe and Albert Le Phat Vinh, "Thousand kW solar furnace, built by the National Center of Scientific Research, in Odeillo (France)," *Solar energy*, vol. 15, no. 1, pp. 57-61, 1973.
- [20] Allan Lewandowski, Carl Bingham, Joseph O'Gallagher, Rolan Winston, and Dan Sagie, "Performance characterization of the SERI High-Flux solar furnace," *Solar energy materials*, vol. 24, no. 1, pp. 550-563, 1991.
- [21] A. Neumann and U. Groer, "Experimenting with concentrated sunlight using the DLR solar furnace," *Solar Energy*, vol. 58, no. 4, pp. 181-190, 1996.
- [22] A. Neumann and J. Kaluza, "A method for spectral analysis of concentrated solar radiation," *Renewable energy*, vol. 10, no. 2, pp. 197-201, 1997.
- [23] P. Haueter, T. Seitz, and A. Steinfeld, "A New High-Flux Solar Furnace for High-Temperature Thermochemical Research," *Solar Energy Engineering*, vol. 12, no. 1, 1999.
- [24] Christian Gueymard, "The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models," vol. 76, no. 4, 2003.
- [25] Green Rhino Energy. (2013) Solar power - Radiation. [Online].



<http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/empiricalevidence.php>

- [26] SolarGIS. SolarGIS.info - Free download of solar radiation maps: DNI. [Online]. [http://solargis.info/doc/\\_pics/freemaps/1000px/dni/SolarGIS-Solar-map-DNI-Mexico-en.png](http://solargis.info/doc/_pics/freemaps/1000px/dni/SolarGIS-Solar-map-DNI-Mexico-en.png)
- [27] Kora Shishido and Masao Sugiura, "A Grinding Apparatus For Making A Middle-Size Parabolic Mirror Using The Link Mechanism Method," *Optomechanical Systems Engineering*, 1987.
- [28] David Riveros Rosas et al., "Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico," 2010.
- [29] Yogi Goswami, Frank Kreith, and Jan Kreider, *Principles of Solar Engineering*, 2nd ed. Philadelphia, E.U.A.: Taylor & Francis, 1999.
- [30] Ari Rabl, *Active solar collectors and their applications.*: Oxford University Press, 1985.
- [31] William Stine and Michael Geyer. Power from the sun.net. [Online]. <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>
- [32] 3M Corp. Solar mirror film. [Online]. [http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\\_US/Renewable/Energy/Product/Films/Solar\\_Mirror](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Renewable/Energy/Product/Films/Solar_Mirror)
- [33] Michael DiGrazia and Gary Jorgensen, "Reflectech mirror film: design flexibility and durability in reflecting solar applications," Arvada y Golden, Colorado. E. U., 2010.
- [34] R. Echazú, C. Cadena, and L. Saravia, "Estudio de materiales reflectivos para concentradores solares," Buenos Aires, 2000.
- [35] M. Hongn and S. Flores Larsen, "Determinación mediante termografía de la reflectancia infrarroja de materiales especulares," vol. 16, 2012.
- [36] NREL: Concentrating Solar Power Research - Soltrace. (2012) National Renewable Energy Laboratory. [Online]. <http://www.nrel.gov/csp/soltrace/>
- [37] Andreas Pfahl, Michael Buselmeier, and Martin Zschke, "Determination of wind

loads on heliostats," in 2011.

- [38] Thomas H. Roos, "A wind loading correlation for an isolated square heliostat part 2: Moments and side forces," in *Southern African Solar Energy Conference*, 2012.
- [39] Verma Vishnu, R. K. Singh, and A. K. Ghosh, "Evaluation of wind load on heliostat," 2010.
- [40] CCSSO. (1998, Aug.) Centro Canadiense de Salud y Seguridad Ocupacional. [Online]. [http://www.ccsso.ca/oshanswers/ergonomics/standing/standing\\_basic.html](http://www.ccsso.ca/oshanswers/ergonomics/standing/standing_basic.html)
- [41] Solar Facilities for the European Research Area, "Guidelines on flux measurement for users,".
- [42] Keith Lovegrove and Wes Stein, *Concentrating solar power technology. Principles, developments and applications*. Cambridge, U.K.: Woodhead publishing, 2012.
- [43] Joaquim Pizzutti dos Santos and Mauricio Roriz, "Influencia del ángulo de incidencia en la transmitancia de luz natural a través de materiales transparentes," vol. 12, no. 1, 2012.
- [44] Clifford K. Ho, Siri S. Khalsa, David Gill, and Clanan A. Sims, "Evaluation of a New Tool for Heliostat Field Flux Mapping".
- [45] Cuitláhuac Iriarte Cornejo et al., "Compensation of heliostat drift by seasonal sampling," 2014.
- [46] Rudolf L. Sizmann, Lorin L. Vant Hull Carl-Jochen Winter, *Solar power plants, fundamentals, technology systems, economics*. Berlin, Alemania: Springer-Verlag, 1991.
- [47] María José Cuesta Santianes, Marta Pérez Martínez Juan Antonio Cabrera Jiménez. (2006, Mayo) Energía solar de concentración. [Online]. [http://www.energiasrenovables.ciemat.es/?pid=4000&id\\_seccion=9&tipo=documentos&id=269](http://www.energiasrenovables.ciemat.es/?pid=4000&id_seccion=9&tipo=documentos&id=269)
- [48] S. Mustafiz, M. R. Islam N. Bjorndalen, "High temperature solar furnace: Current applications and future potential," *Energy sources*, pp. 153-159, 2033.