



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.

DISEÑO DE UN REFLECTOR FRESNEL DE FOCO LINEAL PARA APLICACIONES DE CALOR DE PROCESOS



Versión definitiva

Asesor (es): Dr. Iván Salgado Transitó

Estudiante: German Godínez Granados

Junio de 2018

León, Guanajuato, México

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Dr. Iván Salgado Tránsito por la guía y apoyo que me brindó para lograr terminar la maestría.

Al Dr. Carlos Antonio Pineda Arellano por el apoyo que me brindó sin el compromiso de hacerlo. También agradezco la amistad que me ofreció fuera de cualquier jerarquía existente.

ON Y T

P N 2015-01-1651:

Potabilizador Integral Solar de Agua para Comunidades Rurale ”.

Al Mc. Diego Torres Mc. Adrián por sus enseñanzas y paciencia que en todo momento me brindaron, sobre todo por su gran amistad.

Al comité de sinodales, por las observaciones y correcciones a este trabajo de tesis, que gracias a ello se obtuvo una mejor presentación de este trabajo.

A todos los catedráticos con los que tuve el placer de tomar sus clases.

A todo el personal de la comunidad CIO, en especial a los de la unidad Aguascalientes con los cuales fuera de una relación laboral se convirtieron en amigos dejando de lado las jerarquías.

A Osvaldo Hernández por la amistad que me ha brindado toda la vida y su incondicional apoyo en todo momento.

A mis compañeros de generación que desde el inicio de esta etapa se volvieron mis amigos.

Al programa de becas por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), que me ofreció el recurso económico para lograr realizar la maestría.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, quienes me brindaron su apoyo en todos los sentidos y en todo momento.

Especialmente a mi esposa Itzel Leticia Reyes, quien me ofreció todo su amor y apoyo incondicional no solo en esta etapa si no en muchas otras y que por la gracia de Dios me dará un hijo, el regalo más grande que se puede dar en esta vida.

A familiares que me brindaron su apoyo tanto económico como anímicamente a lo largo de esta etapa en mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN	VIII
Capítulo 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Tecnología de Reflector Fresnel de Foco Lineal para producción de energía	3
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general.	6
1.3.2 Objetivos Específicos.	6
1.2 Justificación	6
1.2.1 Aplicaciones de la Energía Solar Térmica en Procesos Industriales	9
Capítulo 2	13
MARCO TEÓRICO	13
2.1 Estado del arte	13
2.2 Radiación solar	17
2.2.1 Movimiento aparente del sol	17
2.2.2 Dirección de la radiación.	20
2.3 Tecnologías de Concentración solar	24
2.4 Sistema solar de tipo Reflector Fresnel de Foco lineal (RFFL).	29
2.4.1 Consideraciones ópticas básicas para el sistema	29
2.4.2 Concentrador secundario, concentrador parabólico compuesto (CPC)	33
2.5 Consideraciones para el control del seguimiento aparente del sol	36
CONCLUSIÓN	39
Capítulo 3	40
METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ÓPTICO, MECÁNICO Y DE SEGUIMIENTO SOLAR	40
3.1 Diseño óptico de un sistema Fresnel lineal	40
3.1.1 Modelado óptico para los espejos	41
3.1.2 Modelado óptico para un CPC	46

3.2 Trazado de rayos.....	49
3.3 Diseño mecánico de la estructura de soporte del sistema Fresnel lineal	52
3.3.1 Consideraciones para el diseño mecánico del sistema	52
3.3.2 Diseño final del CUSP-CPC.....	53
3.3.3 Diseño estructural del concentrador RFFL.....	55
3.3.4 Sistema de transmisión mecánica para el sistema de giro de los espejos.....	58
3.4 Diseño de control automático de seguimiento solar.....	59
CONCLUSIÓN	64
Capítulo 4	65
RESULTADOS Y DISCUSIONES	65
(Análisis del sistema óptico, térmico del receptor, mecánico y control).....	65
4.1 Análisis del sistema óptico	65
4.2 Análisis térmico del receptor.....	68
4.3 Diseño y análisis del sistema mecánico.....	73
4.4 Análisis del sistema de control	76
Capítulo 5	82
CONCLUSIÓN	82
REFERENCIAS	85
Anexo A.....	89
Anexo B.....	103
Anexo C.....	105

LISTA DE FIGURAS

1.1 Funcionamiento de un colector solar tipo Fresnel de foco lineal y planta de energía termosolar Fresnel de Calasparra, España.....	4
2.1 Similitud entre un sistema RFL y uno	11
2.2 A) principales variables a considerar. B) esquema de un sistema Fresnel de foco lineal.....	12
2.3 Sistema RFL con un concentrador se	12
2.4 Construcción de un sistema RFL con un sistema secundario CPC.....	13
2.5 Variables a considerar para el movimiento de los espejos respecto al sol y un sistema RFL instalado por Mirroxxx en Sevilla, E	13
2.6 Planta solar Fresnel de foco lineal ubicada S ,	14
2.7 Movimiento de la tierra alrededor del sol.....	15
2.8 Trayectoria aparente del sol para la Ciudad de Nueva York.....	16
2.9 Trayectoria aparente del sol para Ecuador.....	16
2.10 Trayectoria aparente del sol para la Ciudad de México.....	17
2.11 Ángulo Zenit, Slope, ángulo azimut de superficie y ángulo azimut solar para una superficie inclinada. Vista en plano cartesiano donde se muestra el ángulo azimutal solar.....	18
2.12 Posición del sol en ángulo de altitud y azimut para una latitud de 21.84° al norte del Ecuador.....	20
2.13 Colector solar por torre central con espej h	22
2.14 Colector solar de disco par	22
2.15 Colector solar de canal para	23
2.16 Colector solar Fresnel de foco	23
2.17 Diferencia entre la lente plano-convexo (superior), y su equivalente de Fresnel (inferior).....	24
2.18 Concentradores Fresnel, (a) concentrador con lente Fresnel, (b) concentrador lineal Fresnel tipo parabólico.....	26
2.19 Diagrama esquemático de la captación solar de un concentrador Fresnel lineal.....	26
2.20 Ilustración gráfica de un rayo reflejado s	27

2.21 Esquema de la reflexión solar considerando un espejo de longitud L , para mostrar el efecto ocasionado por la di	27
2.22 Tipos de CPC. Edición propi	28
2.23 y 2.24 Parámetros del CPC y diagrama de rayos que convergen en el tubo receptor, respectivamente	29
2.25 Identificación de los segmentos de un CPC (invol , á)....	29
2.26 Orientación del sistema concentrador E-O y N-S, respectivamente.....	31
2.27 Sistema mecánico para seguimiento del sol e	32
3.1 Esquema del movimiento de los espejos planos d F	34
3.2 Trazo de rayo incidente solar sobre una línea de espejos posicionada del lado izquierdo del receptor, con movimiento sobre el eje c j	35
3.3 Trazo de rayo incidente solar sobre una línea de espejos posicionada del lado derecho del receptor, con movimiento sobre el eje central de la línea de espejos.....	36
3.4 Esquema de los parámetros que conciernen al CUSP-CPC.....	39
3.5 Truncamiento P	40
3.6 Parámetros a definir en Tonatiuh p P	42
3.7 Calculador de la posición del sol de T h	43
3.8 Perfil 2D del CPC con ayuda de Matlab consideran 10%	45
3.9 Modelo 3D del CPC considerando solo la sup	45
3.10 Diseño en 2D de la estructura de soporte ref P	46
3.11 Base par soporte de los espejos y forma en que sujeta la estructura de soporte del CPC.....	47
3.12 Estructura final de soporte para todo el sistema Fresnel.....	47
3.13 Sujetador de los espejos y ensamble de soporte de esp j j	48
3.14 Sistema de transmisión de torque para las líneas de j	49
3.15 Grafica de la trayectoria aparente del sol pa 21 M	50
3.16 Singularidad en el cálculo la trayectoria del sol para el 21 de Junio.....	50
3.17 R U INO M 2560.....	52
3.18 Modulo GPS para ARDUINO.....	52
3.19 Motor a pasos bipolar Nema 23 y su respec	53

3.20 Esquema de conexión entre los componentes que esencialmente integran el control automático.....	53
4.1 Trayectoria de los rayos solares reflejados por los espejos dentro del CUSP-CPC (ángulos de incidencia 45, 90 y 45 grados respectivamente y 0 grados en azimut)...	56
4.2 Trazo de rayos solares incidentes sobre todo el sistema a 45, 90 y a 45 grados de elevación (9am, 12pm y 3pm horas so)	57
4.3 Distribución térmica del tubo receptor medida con colores y mostrada gráficamente a lo largo del eje X (perímetro del tubo en la p)	58
4.4 Distribución térmica del tubo receptor a lo largo del eje X, para el 21 de Marzo a las 9am,12pm y 3pm respectivament	59
4.5 Distribución térmica del tubo receptor a lo largo del eje X, para el 21 de Junio a las 9am,12pm y 3pm respectivament	60
4.6 Distribución térmica del tubo receptor a lo largo del eje X, para el 21 de Septiembre a las 9am, 12pm y 3pm respectiva	61
4.7 Distribución térmica del tubo receptor a lo largo del eje X, para el 21 de Diciembre a las 9am, 12pm y 3pm respectivam	61
4.8 Diseño del solido con la descripción de los P	62
4.9 Ensamble y descripción de los componentes que integran el la base del sistema Fresnel	63
4.10 Ensamble mecánico general todo el F	63
4.11Análisis de elemento finito a la estructura del sistema Fresnel de foco lineal (4puntos).....	64
4.12 Análisis elemento finito a la estructura del sistema Fresnel de foco lineal (6)...	65
4.13 Ubicación de la señal emitida por lo sensores de in	66
4.14 Pulsadores que simulan los sensores inicio	66
4.15 Diagrama de flujo para calcular la elevación del sol y posiciona	68
4.16 Diagrama de flujo para calcular la hora solar (1/2 día solar) y definir la hora de inicio y final de	69

LISTA DE TABLAS

1.1 Industrias y procesos a diferentes temperaturas en el rango de baja y mediana	
temperatura.....	8
1.2 Información de diferentes prototipos de colectores solares.....	9
2.1 Ejemplos para calcular los días Julianos del año.....	19
3.1 Parámetros para realizar el CPC en T h.....	42

RESUMEN

El consumo global de energía ha incrementado drásticamente en las últimas décadas, los principales sectores consumidores son el industrial, el de generación de energía eléctrica y el de transporte. En el caso del sector industrial principalmente se consume energía eléctrica y calor de proceso. Muchos de los procesos de la industria requieren energía térmica para llevarse a cabo y en la mayoría de estos se obtiene dicha energía a través de la quema de un combustible fósil. La Agencia Internacional de Energía estima que muchos de estos procesos térmicos en la industria de alimentos, bebidas, plásticos, textiles y de papel entre otras, ocurren en temperaturas de baja y mediana temperatura ($<250\text{ }^{\circ}\text{C}$), esta temperatura puede alcanzarse fácilmente con tecnologías termosolares de media temperatura, entre las cuales se encuentra la tecnología Reflector Fresnel de Foco Lineal (RFFL).

Este trabajo se enfoca en el diseño óptico y mecánico de un sistema de concentración solar RFFL con una capacidad de potencia térmica de 15 000 kW y un área de captación de 8 m^2 . El sistema óptico está conformado por un arreglo de 32 espejos planos de $0.36\text{ m} \times 0.40\text{ m}$ cada uno, un reflector óptico secundario tipo concentrador parabólico compuesto (CPC) de factor de concentración solar de 2 soles y un tubo receptor al vacío recubierto de pintura selectiva como sistema de absorción. La estructura de soporte y de seguimiento solar está integrada por perfil PTR de $1\frac{1}{2}$ pulgada de acero al carbón A36, C11 (calibre 11). El mecanismo de seguimiento solar es de un grado de libertad y es activado por un motor a pasos. La orientación del colector RFFL es este-oeste. La construcción del prototipo no se reporta en este trabajo de tesis sin embargo ya se ha iniciado con su fabricación en el Centro de Investigaciones en Óptica A.C (CIO) unidad Aguascalientes. Para el diseño del prototipo se propone una metodología la cual involucra validar el diseño óptico del sistema mediante trazo de rayos, y evaluar la estabilidad y funcionalidad de la estructura de soporte mediante un análisis de elemento finito (FEM) para evaluar el factor de seguridad estructural en las zonas con mayor deformación. Adicionalmente se realizaron una serie de simulaciones para estimar la distribución de la temperatura en el receptor.

Este documento de tesis se compone de cinco capítulos. En el primer capítulo se mencionan los antecedentes de la tecnología de concentración solar de Reflector Fresnel de Foco Lineal. También se da una breve perspectiva de los efectos y problemas ocasionados por el uso de combustibles fósiles, y se describen los principales objetivos del trabajo. En el segundo capítulo se abordará el marco teórico bajo el cual este trabajo se respalda, analizando los principios básicos de un sistema RFFL así como la mención de las diferentes tecnologías de concentración solar para aplicaciones de calor solar (SHP *Solar hiht power* por sus siglas en inglés). El tercer capítulo describe la metodología que se utilizó para el diseño óptico, mecánico y del sistema electrónico del seguimiento solar del sistema RFFL, mencionando los parámetros y las herramientas con la que lograron los resultados del diseño y se presentan los diagramas y en los anexos los planos de manufactura. Por último, en el quinto capítulo se describen las principales conclusiones de este trabajo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Uno de los principales problemas ocasionados por el uso de los combustibles derivados del petróleo es la generación de gases de efecto invernadero y el consecuente cambio climático. Adicionalmente se generan diferentes formas de contaminación al medio ambiente (aire, agua y subsuelo). El efecto invernadero puede explicarse como la conformación de una especie de domo en la atmósfera de la tierra por la excesiva concentración de gases contaminantes [12]. Esta capa de gases permite pasar la radiación solar, pero evita la salida de calor emitido por la superficie de la tierra y la radiación reflejada por la misma superficie, ocasionando un almacenamiento de calor y un incremento de la temperatura promedio de la tierra.

Los principales gases de efecto invernadero son el dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno., estos se generan al quemar carbón, petróleo o gas los cuales se producen de actividades humanas cotidianas como encender un auto y preparar alimento (ya sea con gas o con leña). Los contaminantes que afectan al aire se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios permanecen en la atmósfera y son emitidos principalmente por la fuente, tales como los óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, hidrocarburos y partículas; mientras que los secundarios están sujetos a cambios químicos, entre los que destacan los oxidantes fotoquímicos y algunos radicales de corta existencia como el ozono. Bajo condiciones óptimas de combustión, el contenido total de carbono de los combustibles debería convertirse en CO_2 , sin embargo estas condiciones o procesos no existen en la realidad y es por ello que se producen pequeñas cantidades de carbono parcialmente oxidado y no oxidado. Estas pequeñas cantidades de carbono que no se oxidan inmediatamente al realizar combustión, generan partículas diferentes al CO_2 tales como metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano [12].

La convención Marco de las Naciones Unidas se refiere al término *cambio climático*, como la alteración del clima a nivel mundial ocasionado por las actividades humanas. La variación del clima siempre ha existido, pero en las últimas décadas esta variación ha mostrado una aceleración más brusca. Una de las causas directas en esta aceleración es provocada por la emisión de gases de efecto invernadero principalmente generado en zonas industrializadas [13].

Para minimizar el impacto negativo en el cambio climático se han buscado fuentes de energía que sean más limpias. Una de las fuentes de energía con mayor potencial y rentabilidad es la energía solar, ya que la cantidad de energía que incide sobre la superficie terrestre en un año es muy superior en potencial energético que todas las reservas petroleras del mundo.

El utilizar la energía solar no es algo nuevo, desde hace varios siglos ya se utilizaba para diferente labores de baja demanda energética, sin embargo con la llegada de la revolución industrial en muchos casos por los derivados del petróleo y carbón. El uso extendido de los derivados retrasó el desarrollo de las tecnologías de energía renovable. Existe la falsa percepción que el desarrollo de tecnologías de energía renovable es un tema relativamente nuevo, sin embargo desde principios de siglo había intentos por aprovechar este recurso energético. La inestabilidad en los precios del petróleo en las últimas décadas aunado a una creciente preocupación por los efectos del cambio climático, han propiciado el interés por el uso de fuentes de energía renovable, particularmente más por la energía solar. En la actualidad existen diferentes tecnologías para aprovechar la energía solar, la más conocida, tal vez es la fotovoltaica la cual consiste en la generación de energía eléctrica directa al incidir con radiación solar una celda solar fotovoltaica. Pero la conversión fotovoltaica, no es la única ruta de conversión de la energía solar en energía útil, también existen las tecnologías para generar energía térmica, que pueden ser utilizadas de forma directa en procesos industriales donde se requiere calor o también de manera indirecta como fuente de energía de un ciclo termodinámico de generación de potencia convencional. La generación de potencia por concentración solar (CSP), por sus siglas en inglés *concentrating solar power*, utiliza dispositivos ópticos (lentes o espejos) para captar y concentrar la radiación solar en puntos o zonas focales (receptor). A través del receptor se

hace circular un fluido de trabajo el cual se calienta por efectos del alto flujo radiactivo y este traslada la energía térmica a un bloque de generación de potencia convencional. Otra aplicación de la energía solar térmica son los conocidos calentadores solares de agua. Estos dispositivos han tenido un impacto considerable en el ahorro de energía convencional, ya que reducen el consumo de gas [10].

La conversión de la energía solar en calor es relativamente sencilla, ya que cualquier objeto al ser expuesto a la radiación solar absorbe una cierta cantidad de radiación, dependiendo de sus propiedades termo físicas, y esta se transforma directamente en energía térmica. Pero el verdadero reto es maximizar la absorción de radiación y minimizar las pérdidas ya sean por emisión (reradiación) o convección, para ello se suelen utilizar materiales avanzados como recubrimientos ópticos o pinturas selectivas. Los materiales utilizados son seleccionados dependiendo de la aplicación y temperatura de operación.

Las tecnologías termo solares tienen 3 principales aplicaciones: generación de electricidad, calor para procesos industriales y recientemente producción de combustibles. Sin embargo la dimensión y características de los dispositivos ópticos de concentración solar son diversas por la variación de las condiciones de operación requeridas para cada aplicación. Típicamente se considera que para aplicaciones de calor en procesos industriales los concentradores solares deben de trabajar en un rango de temperatura de (150-250 °C) mucho menor que los de generación de electricidad (450 °C) [17].

1.2 TECNOLOGÍA DE REFLECTOR FRESNEL DE FOCO LINEAL PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

Los sistemas de concentración solar de Reflector Fresnel de Foco Lineal (RFFL) en esencia se componen por un arreglo de espejos planos y un receptor lineal, el cual se posiciona en la línea focal del arreglo óptico construido con las líneas de espejos. Generalmente se suele utilizar un sistema óptico secundario de concentración en la línea focal para maximizar la concentración solar y obtener un flujo de radiación en el receptor mucho mayor.

Los primeros sistemas RFFL inicialmente utilizados en aplicaciones de generación de potencia se desarrollaron en los años 90 en la compañía Solarmundo en Bélgica, y en la universidad de Sídney en Australia [5]. Los primeros diseños estuvieron basados en el diseño de receptor tipo cavidad. Posteriormente se construyó un segundo sistema RFFL por Solar Power Group, compañía fundada en Múnich, Alemania por Solarmundo, para aplicaciones de generación directa de vapor. Actualmente la planta con tecnología RFFL más grande del mundo se encuentra en el municipio murciano de Calasparra, España., inaugurada en 2012 con una estimación de generación de 50 millones de kWh al año, suministrando energía eléctrica para aproximadamente 12 000 hogares y reduciendo las emisiones CO₂ anuales en 16 toneladas [12]. Esta planta termosolar fue construida sobre una superficie de 650 000 m², sobre el terreno se instalaron 28 filas de espejos reflectores de aproximadamente un kilómetro de largo cada una teniendo una superficie total de 302 000 m² de espejos. Los espejos logran concentrar una gran cantidad de flujo radiactivo sobre tubos receptores llenos de agua, generando vapor por la elevada temperatura alcanzada en el tubo receptor de 270 grados centígrados y una presión de 55 bares, con este vapor a esta presión se logra operar dos turbinas de vapor de 15 MW, cada una mueve un generador alterno a la turbina, logrando transformar la energía térmica del vapor en energía eléctrica que es entregada a la red, véase la figura 1.1 donde se puede observar la manera en que los rayos solares serán concentrados con un sistema Fresnel de foco lineal.



Figura 1.1. Funcionamiento de un colector solar tipo Fresnel de foco lineal y planta de energía termosolar Fresnel de Calasparra, España. [14]

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar un sistema Reflector Solar tipo Fresnel de Foco Lineal (RFFL) para aplicaciones de calor para procesos industriales.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Para lograr el desarrollo de este sistema de concentración solar, es necesario establecer ciertos objetivos específicos, los cuales son:

- I. Plantear y definir las características con las que debe contar el sistema, (diseño óptico y mecánico).
- II. Realizar el diseño óptico para alcanzar la concentración solar deseada.
- III. Llevar acabo el diseño de la estructura de soporte y de seguimiento solar que cumplan con los requerimientos del sistema óptico.
- IV. Realizar estudios de elemento finito para validar la estabilidad y robustez del sistema mecánico.
- V. Generar los planos de detalle de todo el sistema.

1.2 JUSTIFICACIÓN

México es un país productor de petróleo (aunque importador de refinados), y por la disponibilidad del petróleo no priorizó en las décadas pasadas la investigación y desarrollo de tecnologías sustentables y renovables. Pero el petróleo es un recurso finito, lo cual ha obligado a que países como México exploren nuevas fuente de energía alternativas, dentro de las cuales una con mayor potencial es, la energía solar, ya que esta fuente de energía es

prácticamente ”, de amplia disponibilidad a lo largo del país, y gracias a las enormes reducciones en el costo de fabricación de las celdas solares se ha vuelto una de las fuentes de alternativas de energía más factibles para sustituir a los combustibles fósiles y sus derivados.

Para aprovechar el recurso solar con el que se dispone existen varias rutas de conversión, la más conocida es la conversión fotovoltaica, sin embargo otro de los métodos prometedores es captar la radiación solar para un cambio térmico en un fluido, y aprovechar este cambio en casos como procesos industriales. Esto suele conseguirse con colectores solares.

Para realizar un correcto dimensionamiento de un sistema solar, el primer paso es conocer el recurso solar disponible en la zona de instalación del sistema. México cuenta con una posición privilegiada, ya que se encuentra en lo que se ha nombrado cinturón solar del mundo, esta zona está ubicada en las latitudes ± 35 respecto al ecuador [8].

Los concentradores solares, forzosamente requieren de un sistema de seguimiento, ya que estos solo operan con la componente directa de la radiación solar. En el caso de la radiación difusa, es casi nula la concentración por lo que no se considera.

Los numerosos procesos industriales que existen son clasificados dependiendo a la temperatura a la que operan: alta (mayor a 500 °C), mediana (100 - 500 °C) y baja temperatura (menor a 100 °C). En este trabajo se diseñará un sistema RFFL, para procesos industriales de mediana temperatura. Este tipo de sistemas comparado con otros de concentración solar, se perfila como uno de los más rentables por su sencillez constructiva entre otras ventajas mencionadas a continuación.

Algunos de los beneficios de la tecnología RFFL para generar energía, son:

- Una relativa sencillez para automatizar los componentes de estos sistemas y fácil adquisición de los mismos.
- Se puede operar por módulos individuales y en configuraciones tanto en paralelo como en serie.

- La construcción de estos sistemas puede lograrse con materiales comerciales, mano de obra local y costos relativamente bajos respecto a otros sistemas de concentración solar.

Actualmente no se cuenta con alguna otra tesis en el Centro de Investigaciones en Óptica A.C (CIO) referente a este tipo de colector solar, y por la poca y dispersa literatura encontrada tampoco se encontró una metodología para el diseño de esta tecnología.

Los concentradores solares de mediana temperatura pueden suplantar fuentes de energía convencionales para la industria papelera, textil, química, de alimentos, entre otras. También en procesos de esterilizado, secado, evaporización, así como acondicionamiento de naves industriales (calefacción y refrigeración).

Para el aprovechamiento de la energía solar, existen dos vías principales por la que se puede lograr. Aprovechando la radiación para realizar un cambio térmico sobre algún fluido (termosolar), y posteriormente aprovechar el cambio en algún proceso que necesite de calor. Otra forma de aprovechar la radiación solar es el llamado efecto fotovoltaico, el cual ciertos materiales como el silicio pueden realizar, esto es, que al ser incididos por radiación solar pueden generar energía eléctrica.

Este trabajo se enfocará en la primera de las dos vías, definida como termosolar. Un interés importante de este trabajo es contribuir en el diseño de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de energía solar.

1.2.1 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN PROCESOS INDUSTRIALES

Dentro de un tiempo relativamente corto, el aprovechar la radiación solar como fuente de procesos industriales que operan a baja y media temperatura, cada vez serán más comunes debido a la reducción de los costos de los colectores solares [13].

Un alto porcentaje de procesos industriales actualmente ocurren en temperaturas de trabajo entre 80 – 250 C. Adicionalmente la demanda industrial representa alrededor del 15% de la demanda global de las demandas de energía final en países industrializados y en países del sur de Europa. De acuerdo con un estudio de ECOHEATCOOL hecho en 32 países, cerca del 30% de la demanda de calor de proceso industrial está entre las 100 – 400 C [8]. Dentro de ese rango, el 57% de la demanda está entre 100 – 150 C, lo que indica teóricamente que este porcentaje de demanda puede ser cubierto fácilmente por tecnologías de calentamiento de baja temperatura como los colectores de tubos evacuados o de placa plana.

Basados en una serie de estudios acerca de los requerimientos de energía térmica en la industria, se identificaron varios sectores con potencial para implementar un sistema termosolar que suministre calor a estos procesos. Los procesos industriales más factibles que utilizan calor de mediana temperatura son: pasteurización, secado, hidrólisis, destilación y evaporación, lavado y limpieza, esterilización, y la polimerización [18]. Véase la tabla 1.1, donde se describen algunos procesos del tipo de industria y las temperaturas de operación.

Uno de los objetivos de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) en el programa solar para procesos industriales fue desarrollar, mejorar y optimizar colectores térmico-solares para temperaturas que van de 80 a 250°C (colectores de mediana temperatura). En la tabla 1.2, se presentan algunos tipos de concentradores solares de mediana temperatura.

Tabla 1.1. Industrias y procesos a diferentes temperaturas en el rango de baja y mediana temperatura [3].

Industria	Proceso	Temperatura °C
Ladrillo y Bloque		
	Curado	60 - 140
Plásticos		
	Preparación	120 - 140
	Destilación	140 - 50
	Separación	200 - 220
	Extensión	140 - 160
	Secado	180 - 200
	Doblado	120 - 140
Química		
	Jabones	200 - 260
	Caucho Sintético	150 - 200
	Tratamiento Térmico	120 - 180
	Precalentamiento de agua	60 - 90
Alimentos		
	Pasteurización	60 - 80
	Secado de Lácteos	120 - 180
	Esterilización	60 - 80
	Cocción	60 - 90
	Concentrado de Lácteos	60 - 80
Papelera		
	Cocción y Secado	60 - 80
	Caldera de agua de alimentación	60 - 90
	Bloqueo	130 - 150
Madera y subproductos		
	Secado	60 - 100
	Precautado de agua	60 - 90
	Preparación de pulpa	120 - 170
	Preformado de Vigas	80 - 120
Textilera		
	Bloqueo, Teñido	60 - 90
	Secado Desengrasado	100 - 130
	Fijación	160 - 180
	Estampado	80 - 100

Tabla 1.2. Información de diferentes prototipos de colectores solares [17].

Nombre	Tipo de colector	Temperatura de operación [0C]	Flujo de trabajo	Costo
2AR Flat-Plate Collector	Colector plano con doble cubierta de vidrio antireflectiva	80-150	Agua-glycol	Sin estimación
SHUCO	Colector plano con doble cubierta de vidrio	80-150	Agua-glycol	2.7m2 Costo: €1195
AoSOL	CPC estacionario	80-110	Agua-glycol	Aproximado 150-200 €/m2 (precio de fabrica)
Solarfocus	CPC	80-120	Agua-glycol	Aprox: 350 €/m2 a pequeña escala
MaReCo	CPC asimetrico	50-90	Agua-glycol	150 €/m2
PARASOL	Canal Parabólico	100-200	Agua o vapor	Sin estimación
SOLITEM PTC 1800	Canal Parabólico	100-200	Agua	Sin estimación
PTC 1000	Canal Parabólico modular	80-300	Agua	Comercial 150 €/m2 Prototipo 400 €/m2
FASOL	Canal Parabólico	130-300	Agua	150 €/m2 para campos de 1000m2
Fix Focus Trough	Lineal de Fresnel	100-200	Agua, vapor, aceite térmico, aire	Comercial 200 €/m2
Linear Concentrating Fresnel Collector	Lineal de Fresnel	100-400	Agua, vapor, aceite térmico, aire	120 €/m2 a 150 €/m2
CHAPS	Canal Parabólico	80-150	Agua	235 €/m2 a 425 €/m2

Los argumentos antes mencionados dan una idea de porque México ha logrado tener avances incipientes en la investigación y desarrollo de tecnología RFFL, pero es claro que este tipo de tecnología promete ser rentable por el bajo costo de fabricación, fácil mantenimiento y operación comparado con otros sistemas de concentración. Por lo que, el gran recurso solar que tiene México y los datos observados en las tablas 1.1 y 1.2 pronostican una muy buena opción la creación de tecnología RFFL.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se da a conocer la teoría y consideraciones necesarias para la construcción de un sistema Reflector Fresnel de Foco Lineal (RFFL), así como una breve descripción de las diferentes tecnologías termosolares afines a este sistema y presentando los fenómenos que afectan directamente en este sistema, tales como ópticos, radiación solar, posición aparente del sol, entre otros.

2.1 ESTADO DEL ARTE

Canavarró Et Al 2014 [22], hace mención en su trabajo que en esencia un colector Fresnel de foco lineal es como uno de canal parabólico. Teniendo en cuenta esta similitud se deben considerar varios aspectos para determinar si puede o no suplantar un concentrador de canal parabólico por un RFL, como: la eficiencia térmica, el material y la sencillez de construcción.

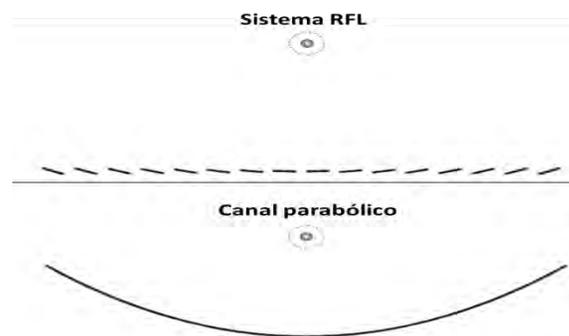


Figura 2.1. Similitud entre un sistema RFL y uno de canal parabólico.

En el trabajo de Beltagy Et Al [22], se muestra un modelo teórico de un concentrador solar Fresnel de foco lineal en donde se presentan las principales variables a considerar en tal concentrador, como: la inclinación de los espejos, ángulo de incidencia solar y la separación que debe de existir entre espejos para que no se dé el sombreado entre espejos, figura 2.2 a). Sharma Et Al, muestra una pequeña metodología para el diseño de un sistema Fresnel de foco lineal considerando el efecto de sombreado, y utilizando las

ecuaciones necesarias para concentrar la radiación en la línea focal por medio de los espejos, figura 2.2 b).

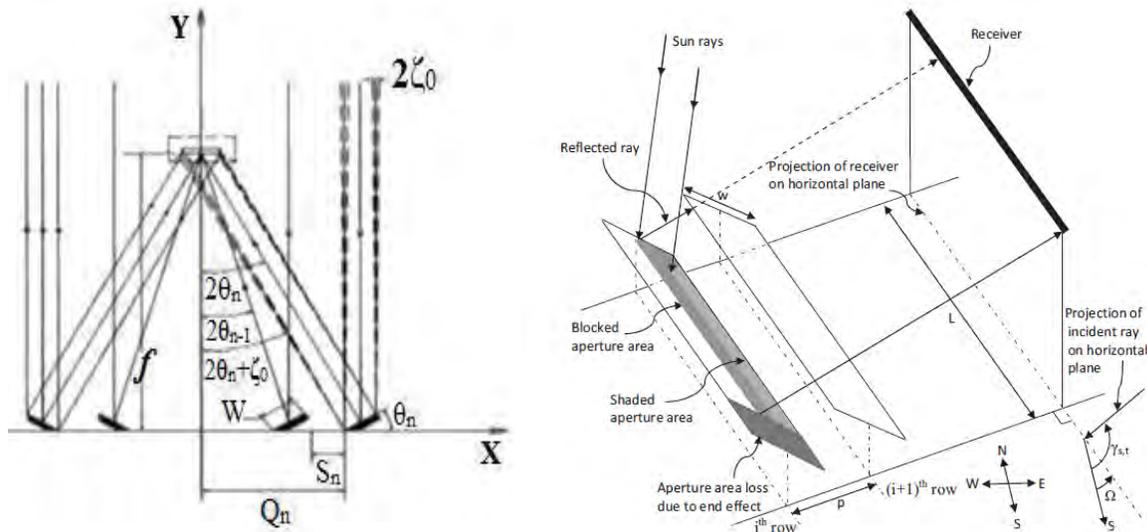


Figura 2.2. a) principales variables a considerar. b) esquema de un sistema Fresnel de foco lineal

Hongh Et Al 2014, nos muestra la combinación entre el sistema RFL y un sistema de concentración secundario, conteniendo esté al receptor y así lograr una mayor concentración solar. El sistema secundario puede variar en su forma, y esto dependerá de las necesidades de cada diseñador y del tipo de receptor a usar, pero en este trabajo se muestra el siguiente.

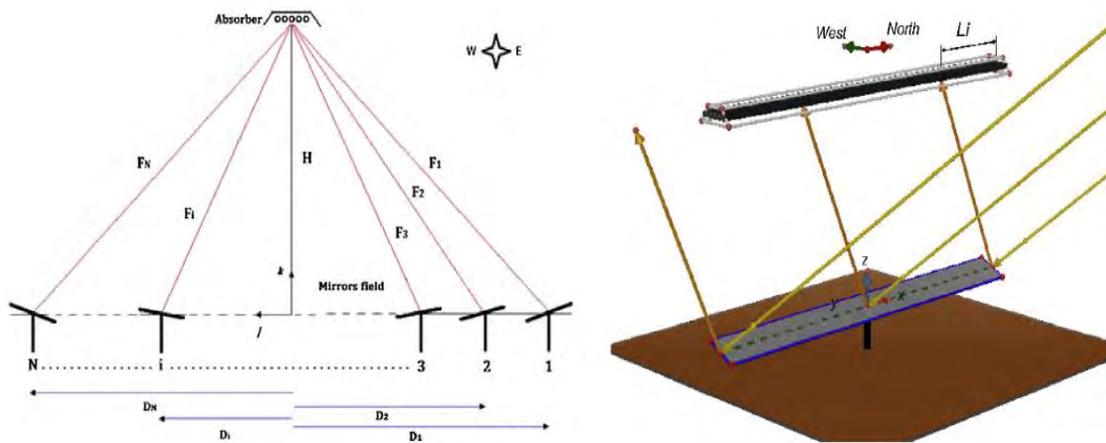


Figura 2.3. Sistema RFL con un concentrador secundario (diseño de Hongh).

En el trabajo de Jorge Choque Chacolla de la universidad nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú, presenta en tal trabajo un diseño y construcción de un sistema RFL con un concentrador secundario parabólico compuesto (CPC), mostrando imágenes de este sistema (figura 2.4), así como una breve metodología de como realizó su trabajo.



Figura 2.4. Construcción de un sistema RFL con un sistema secundario CPC [12].

Spoladore Et Al 2011, nos describe las demás variables a considerar para que los espejos de un colector solar Fresnel de foco lineal pueda concentrar los rayos solares, así mismo mostrándonos la planta termosolar situada en Sevilla, España. En esta planta se encuentra un RFL S ' E College como se logra ver en la figura 2.5.

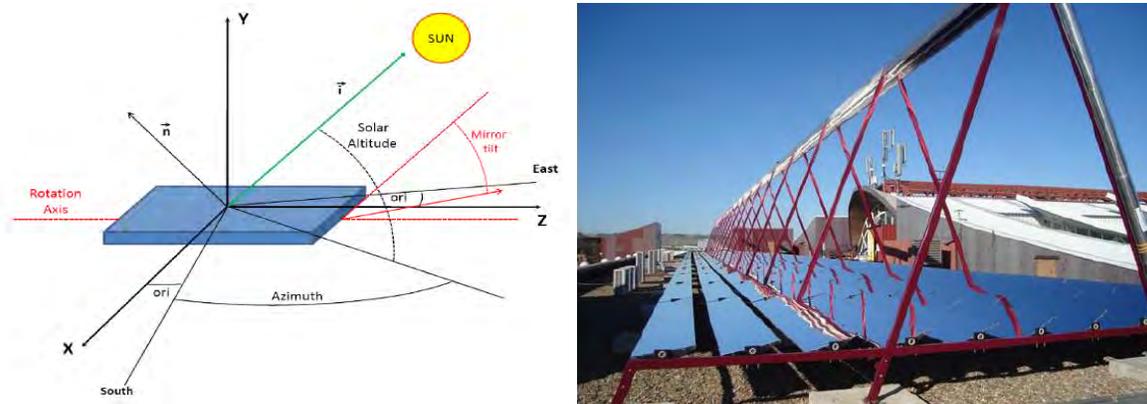


Figura 2.5. Variables a considerar para el movimiento de los espejos respecto al sol y un sistema RFL instalado por Mirroxx en Sevilla, España.

Una de las desventajas de un sistema RFL respecto a los de canal parabólico es que el rendimiento térmico global es menor. Obligando a que el área de superficie de captación sea un 33% mayor respecto a un sistema de canal parabólico. Empresas como Mirroxx o Ausra han adoptado este tipo de sistemas para aplicaciones industriales como la antes mencionada (refrigeración). Novatec tiene una planta de 1.4 MW en Murcia operativa desde Marzo de 2009 y Ausra inauguró otra en 2008 de 5 MW en Kimberlina, California.

En Salta, Argentina se ha instalado una planta solar con un sistema Fresnel de foco lineal para generar vapor y potencia eléctrica, en un área de 82 m². Altamirano integrante del centro INTI-S : generación térmica de potencia, elegimos la Fresnel porque encontramos la posibilidad de desarrollo íntegramente con materiales y mano de obra local. Todas las piezas las conseguimos o las fabricamos en el país. Esperamos hacerla más económica y al ser una energía de alta , ” [14].



Figura 2.6. Planta solar Fresnel de foco lineal ubicada en Salta, Argentina.

2.2 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar que incide sobre la atmosfera de la tierra es mayor que la que incide en la superficie terrestre, esto es ocasionado por el efecto de la atenuación. La radiación solar sufre atenuación al cruzar la atmosfera por las moléculas de aire, aerosoles, gases, gotas de agua y cristales de hielo. El recurso solar es variable dependiendo de la ubicación geográfica, ya que la inclinación de la tierra y la época del año afectan en el flujo de radiación que incide en cada país. Algunos países son privilegiados en tener una mayor cantidad de radiación que otros por su posición geográfica [1].

Fuera de la atmosfera de la tierra, una superficie normal al sol recibe $1,373 \text{ W/m}^2$, la llamada constante solar. Pero parte de la radiación que sobrepasa la atmosfera de la tierra se divide en radiación directa y difusa, la suma de la radiación directa E_b (radiación que proviene directamente del sol), con la radiación difusa E_d (es la que proviene de la atmosfera por dispersión, causada por las moléculas antes mencionadas), se le conoce como radiación global E_G [5].

Ecuación para calcular la radiación global

$$E_G = E_b + E_d \quad (1.1)$$

2.2.1 MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL

La tierra mantiene dos tipos de giro: uno alrededor del sol (traslación) en forma elíptica, y otro de rotación en torno a un eje trazado de norte a sur de la tierra. La traslación provoca los cambios temporales durante los años (las estaciones), y la rotación realiza los cambios en la iluminación de cierta parte de la tierra logrando tener los días y las noches. El movimiento de rotación de la tierra, no es un movimiento totalmente vertical, existe un pequeño ángulo de inclinación que es medido por la línea que une los centros entre la tierra y el sol, y su proyección sobre el ecuador de la tierra, en la figura 2.7 se muestra un esquema del movimiento de la tierra alrededor del sol y también se muestra que el ángulo de inclinación es de 23.45° ($23^\circ 27'$) [1] [4].

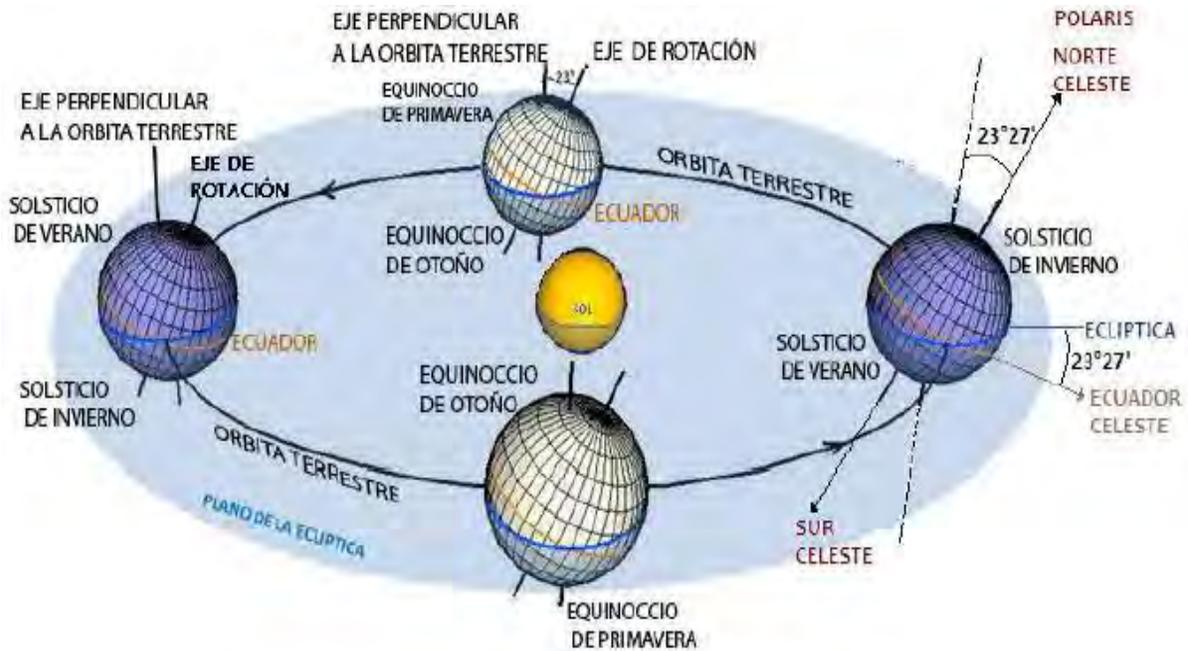


Figura 2.7. Movimiento de la tierra alrededor del sol [13]

Por la inclinación de la tierra es que el sol no siempre sale justamente por el este y se oculta en el oeste, sino en lugares cercanos a esos puntos (dependiendo de la posición del observador).

La trayectoria del sol a lo largo del año no es la misma en cualquier parte del mundo, esta depende de la latitud en donde se encuentre el observador. Por ejemplo, el sol no tiene la misma trayectoria en México que en Ecuador o que en Nueva York, ya que cada uno de estos países mantienen latitudes diferentes y es por eso que la perspectiva de la trayectoria del sol cambia. En las siguientes imágenes se muestra una comparativa de la trayectoria aparente del sol entre Nueva York (41° de latitud norte), Ecuador (0° de latitud norte) y Ciudad de México (19° de latitud norte) [1].

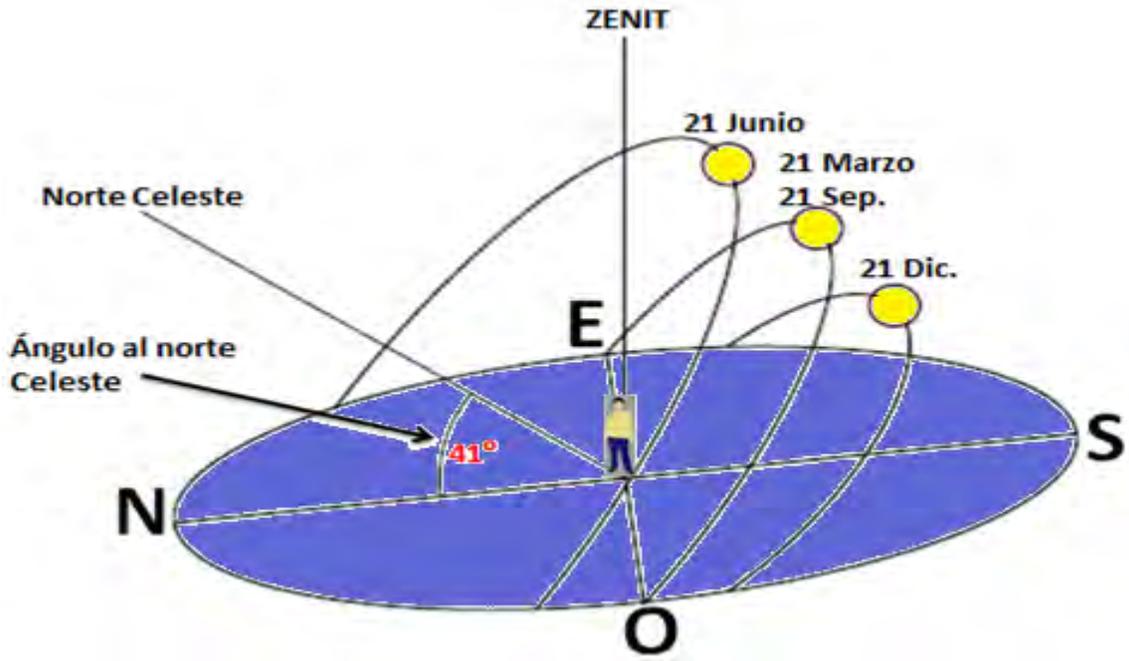


Figura 2.8. Trayectoria aparente del sol para la Ciudad de Nueva York. Edición propia

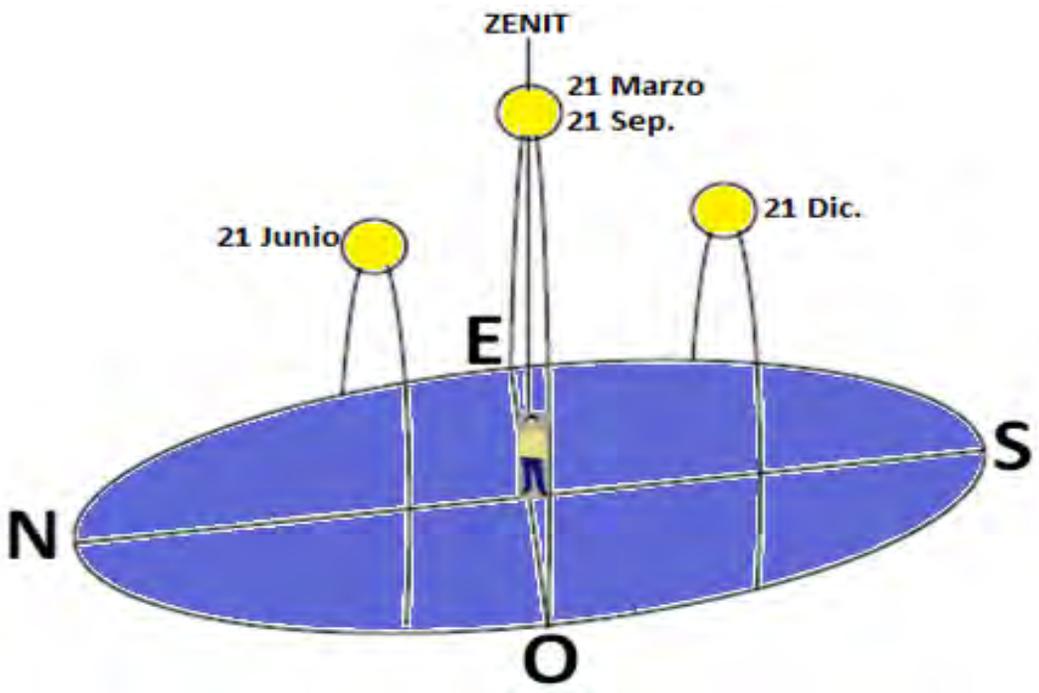


Figura 2.9. Trayectoria aparente del sol para Ecuador. Edición propia

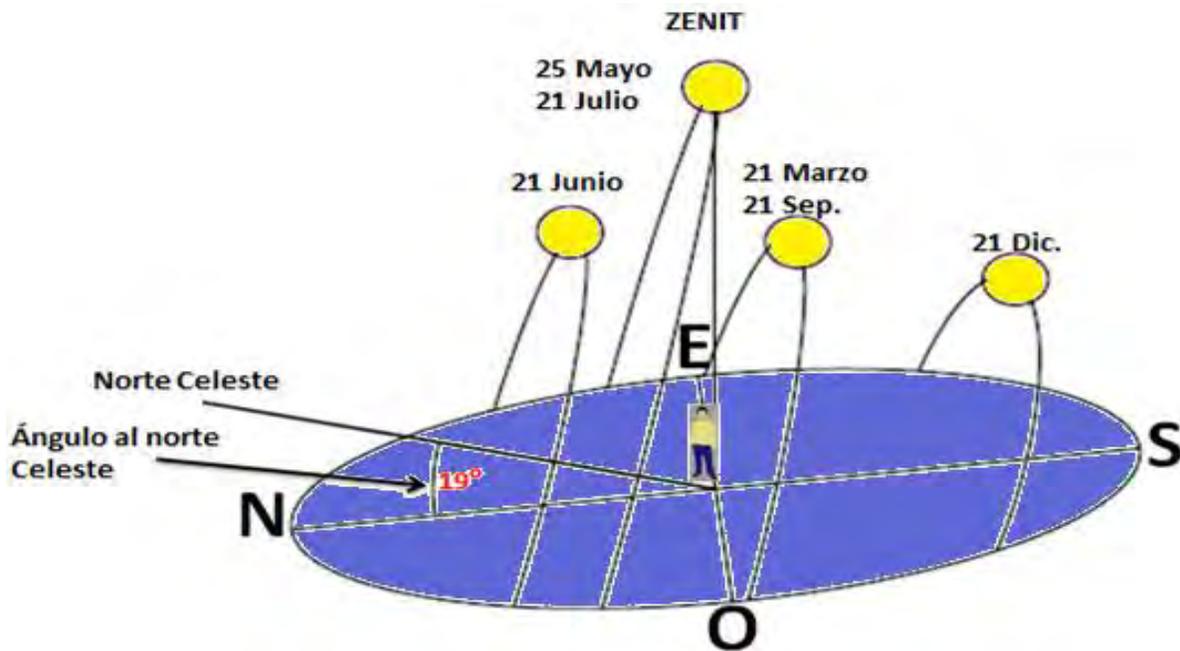


Figura 2.10. Trayectoria aparente del sol para la Ciudad de México. Edición propia

2.2.2 DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN.

Las relaciones geométricas entre un plano y su orientación con respecto a la tierra en cualquier momento, y la posición del vector solar con respecto a ese plano, se puede describir en términos de las siguientes relaciones matemáticas (Benford y Bock, 1939). Para ello se deben definir algunos ángulos, los cuales se ilustran en la figura 2.11. Los ángulos y su descripción son los siguientes [1]:

ϕ Latitud: es la localización angular al norte o al sur del Ecuador, al norte es positivo; $-90^0 \leq \phi \leq 90^0$.

δ Declinación: es la posición angular del sol al mediodía solar (es decir, cuando el sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, positivo al norte; $-23.45^0 \leq \delta \leq 23.45^0$.

β Slope: es el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y el horizontal; $0^{\circ} \leq \beta \leq 180^{\circ}$. ($\beta > 90^{\circ}$ significa que la superficie tiene un componente orientado hacia abajo).

γ Ángulo azimut de la superficie: es la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local, con cero hacia el sur, al este es negativo y al oeste es positivo; $-180^{\circ} \leq \gamma \leq 180^{\circ}$.

ω Ángulo de hora: es el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a 15° por hora; por la mañana se asignaran valores negativos (antes de las 12pm), y por la tarde se asignaran valores positivos (después de las 12pm).

θ_s Ángulo de incidencia: es el ángulo entre la radiación del haz en una superficie y la normal a esa superficie.

Los siguientes ángulos son descritos por la posición del sol en el cielo:

θ_z Ángulo Zenit: también conocido como cenital, es el ángulo entre la vertical y la línea al sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación del haz en una superficie horizontal.

α_s Ángulo de altitud solar: es el ángulo entre la horizontal y la línea al sol, es decir, el complemento del ángulo cenital.

γ_s Ángulo solar Azimut: es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación del haz en el plano horizontal, que se muestra en la Fig. 2.12. Los desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos.

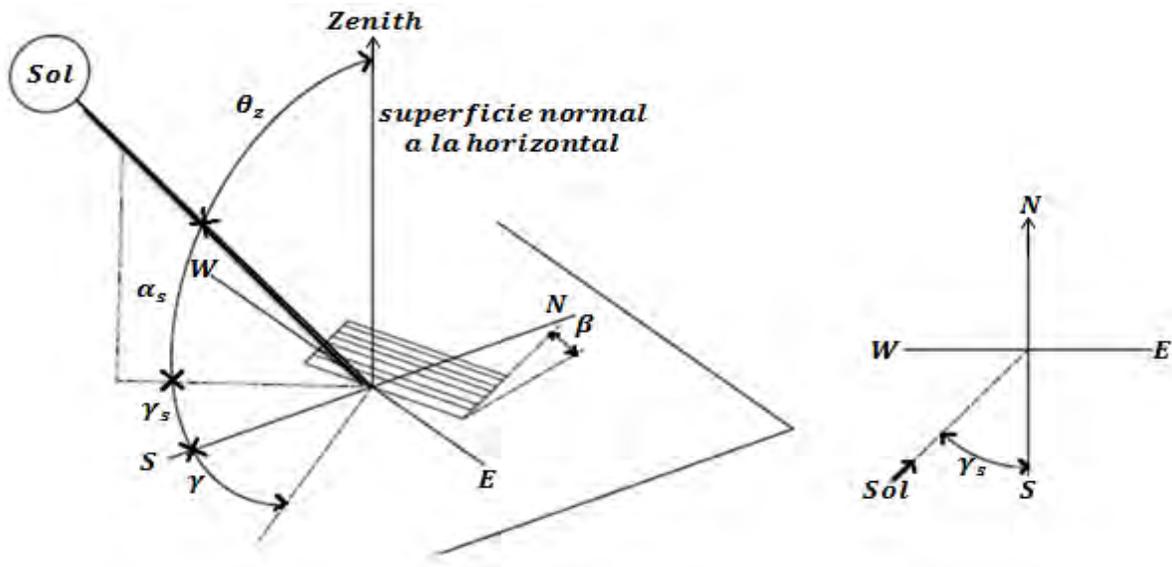


Figura 2.11. Ángulo Zenit, Slope, ángulo azimut de superficie y ángulo azimut solar para una superficie inclinada. Vista en plano cartesiano donde se muestra el ángulo azimutal solar. Edición propia.

Para el caso de este proyecto es necesario calcular los ángulos azimutales y de elevación del sol a cualquier hora y día del año, para esto se cuenta con las siguientes ecuaciones:

La declinación δ puede ser calculada con la aproximación de Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.1)$$

Donde la variable n es el día Juliano del año, este se obtiene con la ayuda de la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Ejemplos para calcular los días Julianos del año [1].

Mes	n en función de i	Dato	n
Enero	i (número de día)	17	17
Febrero	31+i	16	47
Marzo	59+i	16	75
Abril	90+i	15	105
Mayo	120+i	15	135
Junio	151+i	11	162
Julio	181+i	17	198
Agosto	212+i	16	228
Septiembre	243+i	15	258
Octubre	273+i	15	288
Noviembre	304+i	14	318
Diciembre	334+i	10	344

Después de determinar la declinación se puede calcular el ángulo cenital con la siguiente ecuación (la altitud solar es complemento del ángulo zenit a 90 grados):

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.2)$$

Posteriormente se puede obtener el ángulo solar azimut:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \text{csc}^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (2.3)$$

Donde $\text{sign}(\omega)$ será +1 cuando ω sea positivo y será -1 cuando ω sea negativo.

El cálculo del ángulo zenital es para poder obtener el ángulo de elevación del sol, ya que este es complemento del ángulo zenit, como ya se mencionó en la descripción del ángulo de elevación. Con el ángulo de elevación se puede obtener una gráfica como se ve en la figura 2.12 (se consideró una latitud de $\phi = \pm 21.84^\circ$):

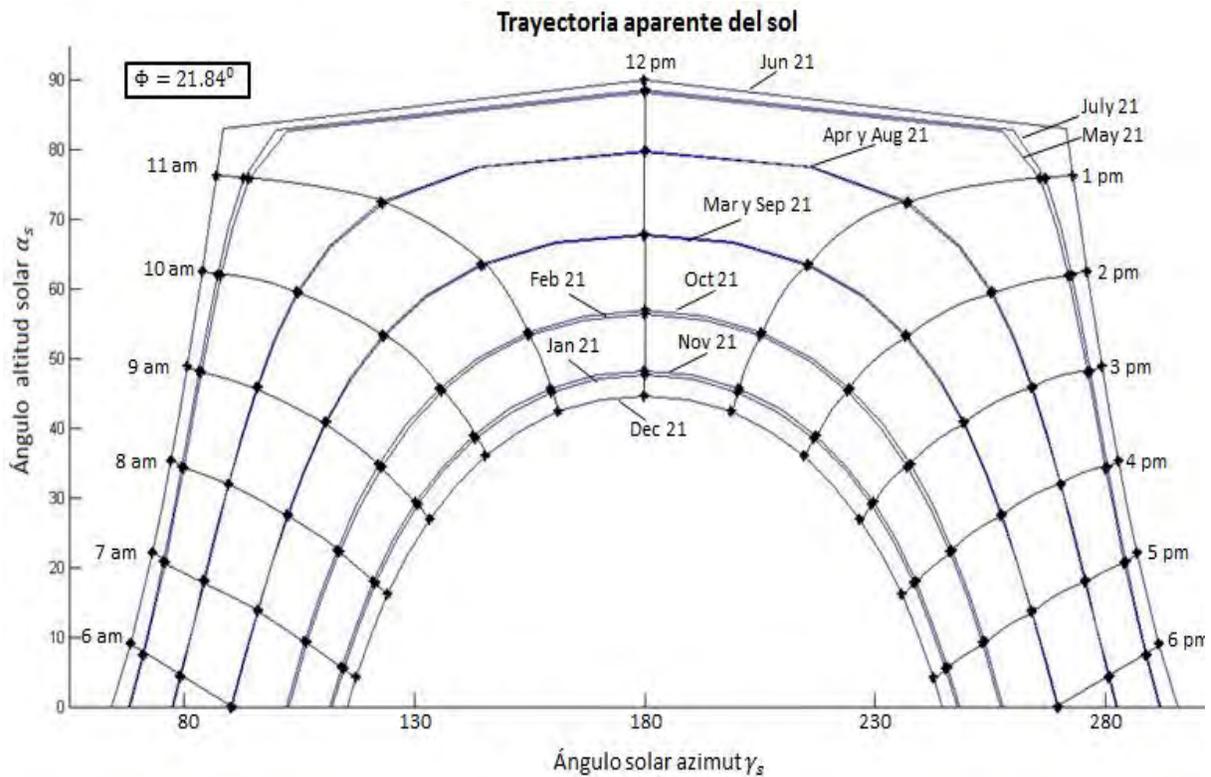


Figura 2.12. Posición del sol en ángulo de altitud y azimut para una latitud de 21.84° al norte del Ecuador.
Edición propia.

2.3 TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR

Los colectores termosolares son esencialmente intercambiadores de calor. Estos transforman la radiación solar en energía térmica, y con la ayuda de un fluido de trabajo se transporta esta energía a su lugar de uso. Los colectores solares suelen dividirse en dos categorías: los que tienen un sistema de concentración y los que no lo tienen. El que no tiene un sistema de concentración y no mantiene un seguimiento aparente del sol, el área de apertura de tal colector es igual al área de recepción. Mientras que en el que sí tiene un sistema de concentración de seguimiento solar, regularmente el área de apertura es mayor al área de recepción. Los colectores con sistemas de concentración suelen usar dispositivos que reflejan o concentran la radiación hacia el receptor, provocando que el flujo de radiación se concentre obteniendo una mayor densidad de flujo radiactivo por unidad de

área. Todos los concentradores termosolares concentran radiación solar en un receptor, el cual absorbe esta radiación y la transforma en calor, este es removido por un fluido (normalmente agua, aire o aceite) que fluye a través del receptor [6].

Los concentradores solares pueden ser clasificados en: imagen o no-imagen, esto depende físicamente de la óptica con la que cuenta el concentrador solar. Si se formará una clara imagen del sol sobre el receptor se trata de un concentrador de imagen, si por el contrario no se genera una imagen del sol en el receptor se trata de un concentrador de no-imagen [3].

Los concentradores contienen ciertas ventajas y desventajas respecto a los colectores planos convencionales.

Ventajas:

- Las temperaturas que se consiguen son mayores en un colector concentrador que en un colector plano.
- La eficiencia térmica es relativamente mejor, ya que el área del receptor es menor que la del concentrador, lo que indica una menor área de pérdida de calor.
- El mantenimiento es relativamente sencillo, lo que genera bajos costos en construcción y mantenimiento.

Desventajas:

- Únicamente pueden aprovechar la componente directa de la radiación solar, la radiación difusa que se concentra es prácticamente nula, lo que significa que en días nublados es muy baja la concentración solar.
- Se requiere de un sistema de seguimiento solar aparente, para poder obtener mayor eficiencia y captación de radiación solar directa.
- La parte concentradora usualmente es material reflejante, lo que indica que se requiere de limpieza continua, y que con el paso del tiempo la reflectancia es cada vez menor.

Los sistemas concentradores suelen tener un sistema electro-mecánico para seguir el movimiento aparente del sol para maximizar la captación de la radiación. Pueden tener uno

o dos ejes de rotación, y pueden estar orientados en dirección norte-sur o este-oeste [1]. Para los sistemas de baja concentración usualmente se cambia su posición periódicamente, esta posición se les suele cambiar por semana o por mes, esto depende del diseño de cada colector, por dar ejemplo, algunos concentradores que son posicionados con orientación este-oeste, se les cambia su posición cada semana y esto no impacta de manera significativa en su rendimiento.

Los concentradores solares que comercialmente se usan hoy en día son:

- Canal parabólico.
- Receptor de torre central.
- Concentrador Fresnel de foco lineal.
- Discos parabólicos.

Estos tipos de concentradores a su vez son divididos en dos categorías por la manera en la que concentran la radiación solar.

1.- Concentración puntual, esta consiste en concentrar el flujo radiactivo en una zona focal puntual. Ya que son sistemas de concentración 3D y se obtienen altos factores de concentración y altas temperaturas (300-1000⁰ C). En esta categoría se encuentran:

1.1 Receptor de torre central: son espejos planos (heliostatos) que siguen la posición del sol a lo largo del día para poder reflejar la radiación solar directa incidente sobre un receptor, posicionado en la torre a una cierta altura. Véase la figura 2.13.

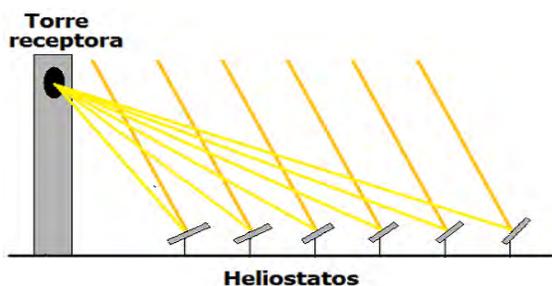


Figura 2.13. Colector solar por torre central con espejos o heliostatos [16].

1.2 Discos parabólicos: Son espejos con forma de una parábola de revolución muy similar a las antenas parabólicas utilizadas en sistemas de telecomunicaciones. El sistema refleja la radiación solar incidente en una zona puntual donde se encuentra el receptor. Véase la figura 2.14

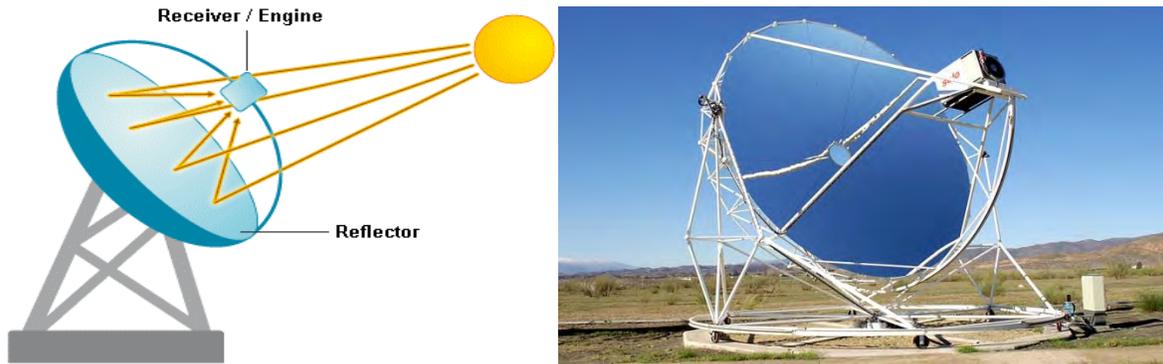


Figura 2.14. Colector solar de disco parabólico [18].

2.- Concentración lineal, esta consiste en captar la radiación solar sobre un receptor lineal, regularmente estos receptores son tubos de vacío, que se encuentran posicionados por encima del sistema de concentración. Este tipo de concentración alcanza temperaturas menores que la concentración puntual debido a que el sistema de concentración es 2D. Dentro de este tipo de concentración tenemos:

2.1 Canal parabólico: este consiste en un canal de forma parabólica compuesto por algún material reflectivo, este canal mantiene un foco lineal a lo largo del mismo y se posiciona por encima del material reflectivo. El tubo regularmente es de vacío que contiene algún fluido que transporta el calor generado por la concentración. Véase la figura 2.15.



Figura 2.15. Colector solar de canal parabólico [16]

2.2 Concentrador Fresnel de foco lineal: este consiste en la concentración por medio de espejos planos o ligeramente curvos, los cuales se colocan en el mismo plano horizontal con una misma distancia focal, relativamente corta. Los espejos que integran a este sistema van girando sobre su propio eje a lo largo del día para seguir al sol. Es común ver que en la parte focal donde se coloca el receptor se agregue un segundo sistema de concentración para maximizar la captación de radiación solar. Véase la figura 2.16.

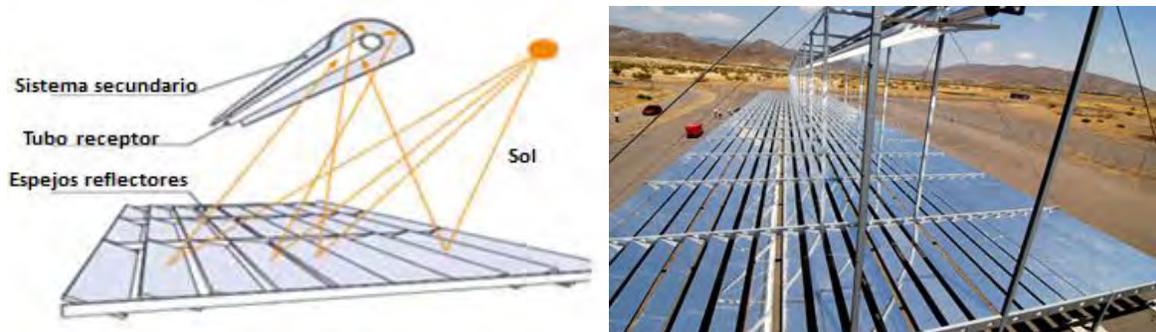


Figura 2.16. Colector solar Fresnel de foco lineal [24].

2.4 SISTEMA SOLAR DE TIPO REFLECTOR FRESNEL DE FOCO LINEAL (RFFL).

2.4.1 CONSIDERACIONES ÓPTICAS BÁSICAS PARA EL SISTEMA

Augustin-Jean Fresnel (1778-1827) fue un físico francés que trabajó como ingeniero de puentes hasta que Napoleón, a su regreso de la Isla de Elba, lo destituyó. Se retiró a Normandía donde inició estudios sobre óptica, completando las investigaciones de Young sobre las interferencias luminosas. Existe un experimento para estudiar la interferencia de la luz en el que se usan los espejos de Fresnel, que son dos espejos a diferente ángulo para que la luz llegue al mismo tiempo a una pantalla [9].

Las lentes de Fresnel son vidrios tallados o plásticos fabricados de la misma forma, cuya misión es hacer que los rayos de luz se comporten, al atravesarlas, como cuando atraviesan lentes plano convexas. Los rayos de luz que llegan paralelos al eje óptico tienden a concentrarse en un punto o foco (se focalizan). Los rayos que salen del foco atraviesan la lente y salen paralelos al eje óptico en un tubo de luz (colimados).

Esencialmente las lentes de Fresnel suplantán de cierta forma a las lentes plano-convexas, ya que las lentes de Fresnel simulan a las plano-convexas de grandes dimensiones y con esto se reduce tanto las dimensiones como el material para su fabricación. Véase la figura 2.17.

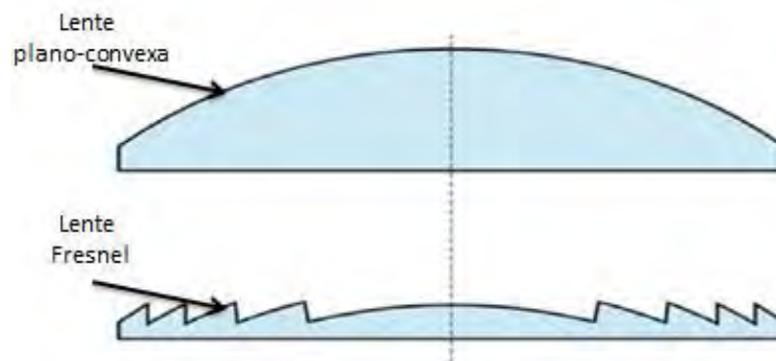


Figura 2.17. Diferencia entre la lente plano-convexo (superior), y su equivalente de Fresnel (inferior) [2].

Teniendo en cuenta que el sistema reflector Fresnel de foco lineal, en esencia es un sistema de reflexión y absorción de rayos solares, estos deben de ser considerados así como los causados por el de seguimiento aparente del sol.

Para el caso de este proyecto se consideraron los efectos de tres fenómenos ópticos importantes, los cuales son:

- I. La reflectancia: es la cantidad reflejada de un haz de luz que incide sobre una superficie.
- II. La absorción: es la cantidad absorbida de un haz de luz que incide sobre una superficie.
- III. Concentración geométrica: es la relación entre la densidad de radiación que incide en el área del sistema concentrador y la utilizada por el receptor.

La reflectancia o reflexión, se describe mejor por la *ley de reflexión*, la cual dice que: todo haz que incide sobre una superficie especular mantendrá en mismo ángulo de incidencia que el reflejado, ” [2], pero cabe mencionar que el flujo de radiación reflejado solo será una parte del incidente.

La absorción o refracción, es un porcentaje de luz que es absorbido por el material del que este compuesto la superficie, en términos ópticos es la cantidad de luz que se transmite de un medio a otro. El porcentaje de absorción depende de los componentes moleculares de los cuales esté formado el cuerpo al que incide el haz, y por tanto cada tipo de cuerpo contiene su propio coeficiente de absorción.

Los concentradores solares son diseñados con un factor de concentración, el cual puede ser óptico o geométrico. El factor de concentración óptico se define como la razón de la irradiancia en la superficie del concentrador entre la irradiación incidente en el receptor [6]. La concentración geométrica es la razón del área de captación sobre el área del receptor. Para este proyecto se utilizará la concentración geométrica que esta descrita en la ecuación 2.4.

$$C = \frac{\text{Área de captación}}{\text{Área del receptor}} \quad (2.4)$$

Para este trabajo la concentración será definida por esta razón. En un concentrador Fresnel primeramente los rayos solares inciden sobre la superficie de los espejos, y luego son reflejados a un foco en común, con esto, se logra aumentar la densidad del flujo radiante y permitir una mayor transferencia de calor que la que se tendría exponiendo directamente el receptor al sol.

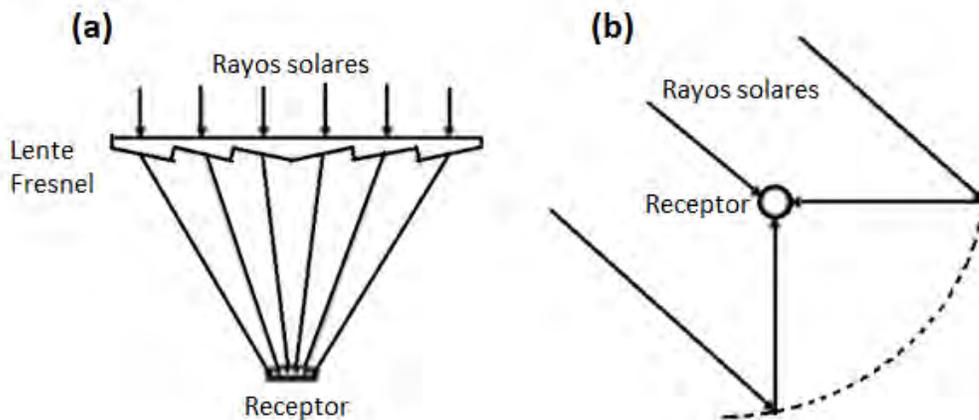


Figura 2.18. Concentradores Fresnel, (a) concentrador con lente Fresnel, (b) concentrador lineal Fresnel tipo parabólico. Edición propia.

El principio básico de un concentrador Fresnel, es que se puede simular una parábola con espejos lineales y delgados los cuales tengan una inclinación diferente pero un punto focal en común [3]. En este punto suele colocarse el receptor pero regularmente se coloca un sistema secundario para maximizar la concentración en el receptor. Véase la Fig. 2.19 donde de forma esquemática se muestran las componentes de un sistema RFFL y cómo es que se concentran los rayos solares.

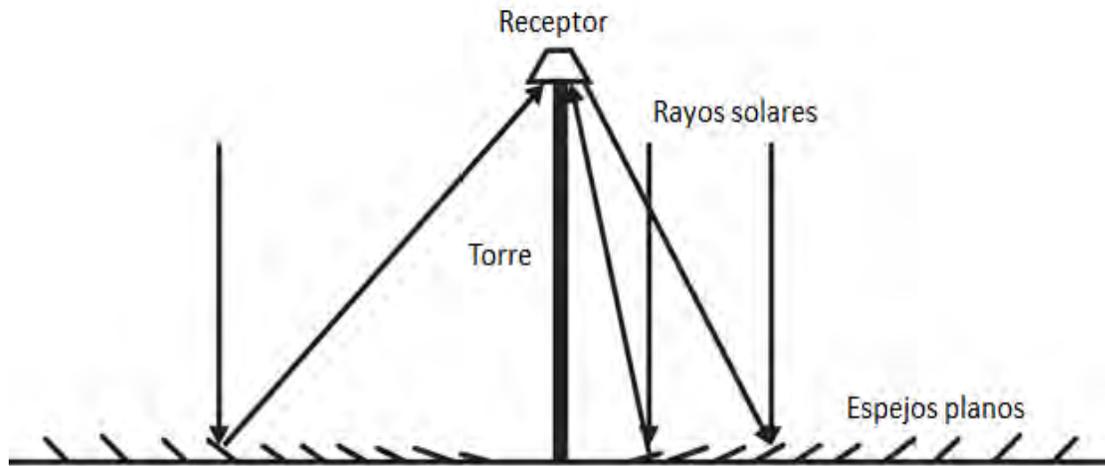


Figura 2.19. Diagrama esquemático de la captación solar de un concentrador Fresnel lineal. Edición propia.

Para lograr que los rayos solares se concentren en el punto focal debe considerarse la *ley de reflexión*, mencionada anteriormente, véase la Fig. 2.20 en donde se puede ver que:

$$\theta_i = \theta_r$$

donde θ_i y θ_r son los ángulos de incidencia y reflexión, respectivamente. Solamente las superficies especulares pueden formar imágenes por efecto de reflexión, para este proyecto, este tipo de superficies son las más adecuadas en aplicaciones solares de concentración óptica [3].

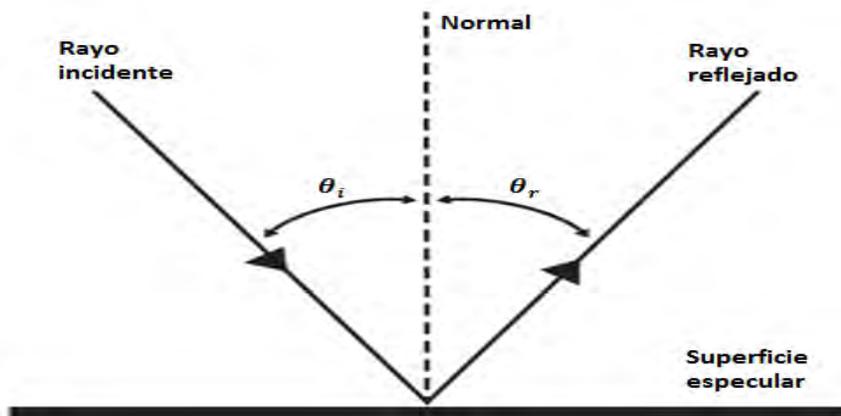


Figura 2.20. Ilustración gráfica de un rayo reflejado sobre una superficie especular.

Como se puede observar en la figura 2.20, los rayos solares se reflejarán con el mismo ángulo que el incidente, pero dependiendo de la inclinación con la que la radiación solar impacta a la superficie especular (espejo), la cantidad de rayos solares reflejados por el espejo cubrirán un área mayor que los incidentes. En la figura 2.21 se muestra este efecto. Nótese que si el ancho del espejo (L) que está inclinado un ángulo (γ) respecto al piso, refleja un ancho mayor que el incidente (x') como si los rayos solares se hubiesen dispersado por la reflexión.

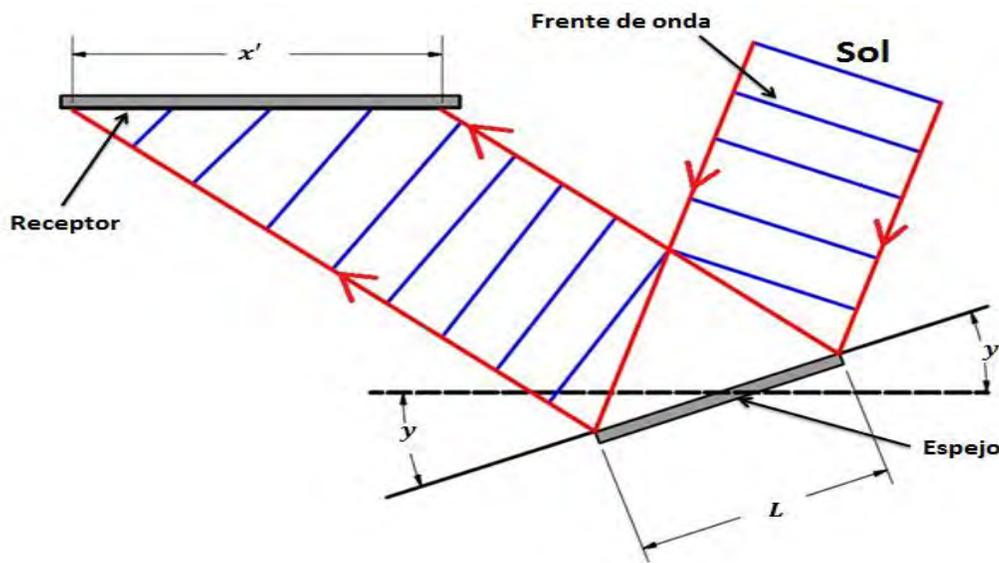


Figura 2.21. Esquema de la reflexión solar considerando un espejo de longitud L , para mostrar el efecto ocasionado por la dispersión. Edición propia.

2.4.2 CONCENTRADOR SECUNDARIO, CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC).

Los sistemas secundarios para los concentradores Fresnel de foco lineal son integrados para maximizar la concentración que se obtiene de la reflejada por los espejos, de esta forma se tiene un mayor flujo de radiación en el receptor. La figura geométrica de un CPC se define principalmente por la forma de su receptor, para nuestro caso se utilizará un receptor tubular (tubo de vacío) asignado al inicio de este trabajo [22].

Existen 4 tipos diferentes de CPC, los cuales regularmente son diseñados respecto al tipo de receptor como ya se mencionó., uno de los más usados es el que contiene un

concentrador plano con dos reflectores parabólicos, puestos uno a cada lado del receptor. En la Fig. 2.22 se puede observar los diferentes tipos de CPC, todos contienen la misma apertura " α " y el mismo ángulo de aceptación mínimo " θ_c ".

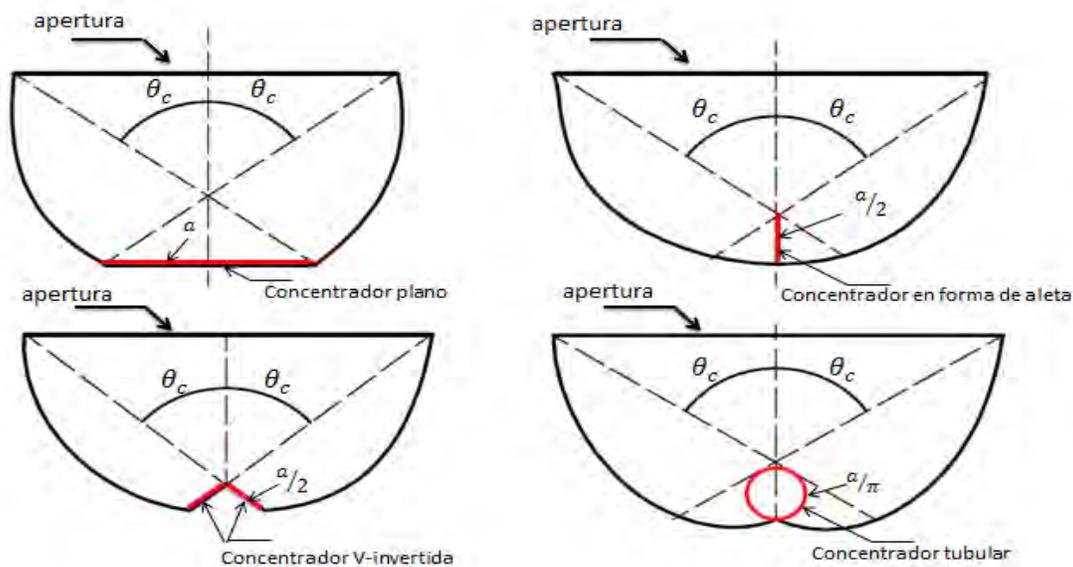


Figura 2.22. Tipos de CPC. Edición propia.

El CPC que se propone diseñar en este proyecto será el que contiene un concentrador tubular. Los CPC son un sistema de concentración óptico de no-imagen, particularmente el CPC con concentrador tubular mantiene dos secciones (una involuta y una parábola), las cuales están unidas en un cierto punto, el punto ρ como se muestra en la Fig. 2.23.

La geometría de un CPC permite ópticamente que todos los rayos incidentes sobre sus paredes sean concentrados en una zona focal (mientras la incidencia tenga un ángulo igual o menor al ángulo de aceptación mínimo), la cual puede ser de varias formas como se ve en la figura 2.22. En un CPC puede ocurrir una o varias reflexiones en las paredes reflectoras y convergerán en el concentrador tubular. Los rayos que inciden con un ángulo mayor al de aceptación mínima no serán concentrados.

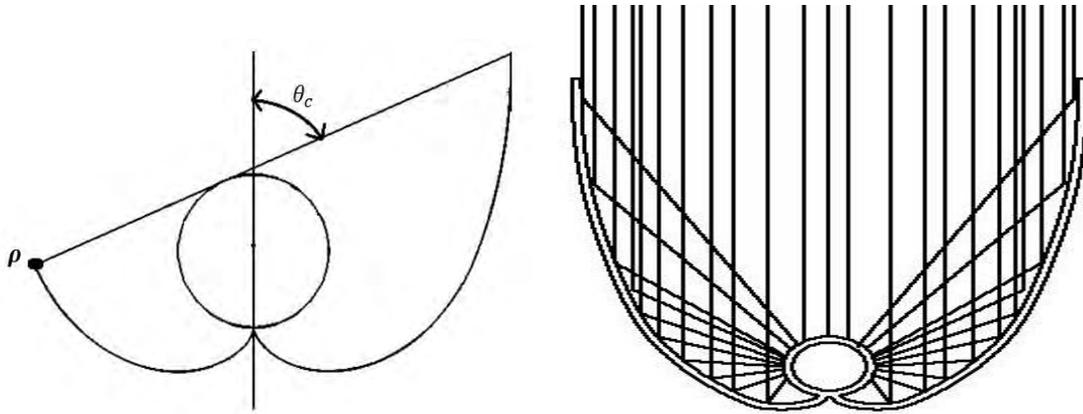


Figura 2.23 y 2.24. Parámetros del CPC y diagrama de rayos que convergen en el tubo receptor, respectivamente. Edición propia.

Los extremos de las parábolas de los CPC regularmente terminan por ser casi paralelos al eje vertical del receptor y no contribuyen de manera significativa al incremento de la concentración solar. Una parte de estos extremos regularmente suele ser eliminado o truncado, pero con esto se pierde un 10% de la concentración que se desea, por lo que se sugiere que, se considere este 10% más a la concentración deseada y posteriormente calcular el semiángulo de aceptación mínimo.

Las ventajas ópticas que los CPC ofrecen, respecto a otros sistemas de concentración solar, los ha llevado a ser ampliamente utilizados a nivel industrial en aplicaciones como: tratamiento de agua, fotocátalisis heterogénea y homogénea con foto-Fenton [27].

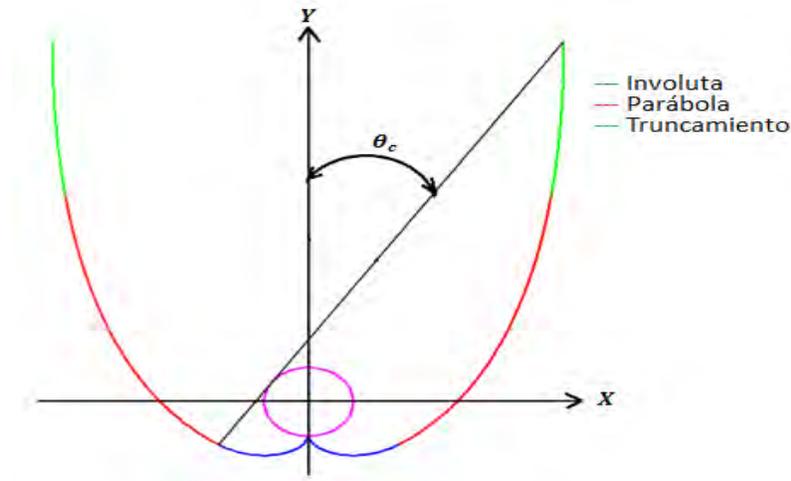


Figura 2.25. Identificación de los segmentos de un CPC (involuta, parábola y truncamiento). Edición propia.

2.5 CONSIDERACIONES PARA EL CONTROL DEL SEGUIMIENTO APARENTE DEL SOL

Para que nuestro sistema pueda realizar el seguimiento del sol se establecieron ciertos requerimientos a cumplir:

1. Debe mantener una relativa sencillez en su cinemática para que el control sea de igual forma lo más sencillo.
2. Debe ser funcional en cualquier día y época del año.
3. Debe mantener el seguimiento del sol en el horario de trabajo.

Para poder satisfacer los requerimientos anteriores, a lo largo de la historia se han tenido sistemas de seguimiento solar que comúnmente se usan en la astronomía:

1. Sistemas **ecuatoriales**, son aquellos que mantienen uno de sus ejes (el que tendrá movimiento) en el mismo plano que el ecuador de la tierra, de esta forma el eje movable del sistema logrará seguir al sol sobre el plano ecuatorial manteniendo al resto del sistema fijo.
2. Sistemas de **tránsito**, en esencia son lo mismo que los ecuatoriales, pero en este caso el plano es el de la latitud de la posición del lugar donde se quiere (90 respecto a los ecuatoriales).

3. Sistemas *alt-acimut*, son aquellos que realizan el seguimiento del sol en dos ejes, que dentro de la abreviatura del nombre, se describe como seguimiento en altura y en acimut.

El sistema más adecuado hasta el momento para un sistema RFFL es el ecuatorial, de tal forma que, tomando en cuenta las líneas de espejos del sistema, estas deberán de estar posicionadas perpendicularmente al plano ecuatorial y así lograr que los espejos sigan al sol en el plano ecuatorial de la tierra [15]. Los sistemas orientados Norte-Sur requieren de un sistema de seguimiento continuo lo que termina por ser un sistema más complicado que los que están orientados Este-Oeste. Pero a pesar de todo, los sistemas ecuatoriales dan un ajuste muy superior al tipo de desplazamiento de la bóveda celeste, y por la manera en la que se desplaza es fácil automatizar este tipo de seguimiento. Sin embargo la orientación ecuatorial colecta más energía en el verano que en el invierno (debido a la duración de los días). Obsérvese la Fig. 2.26 en la que se muestran seguimientos aparentes del sol orientando el sistema E-O y N-S, respectivamente.

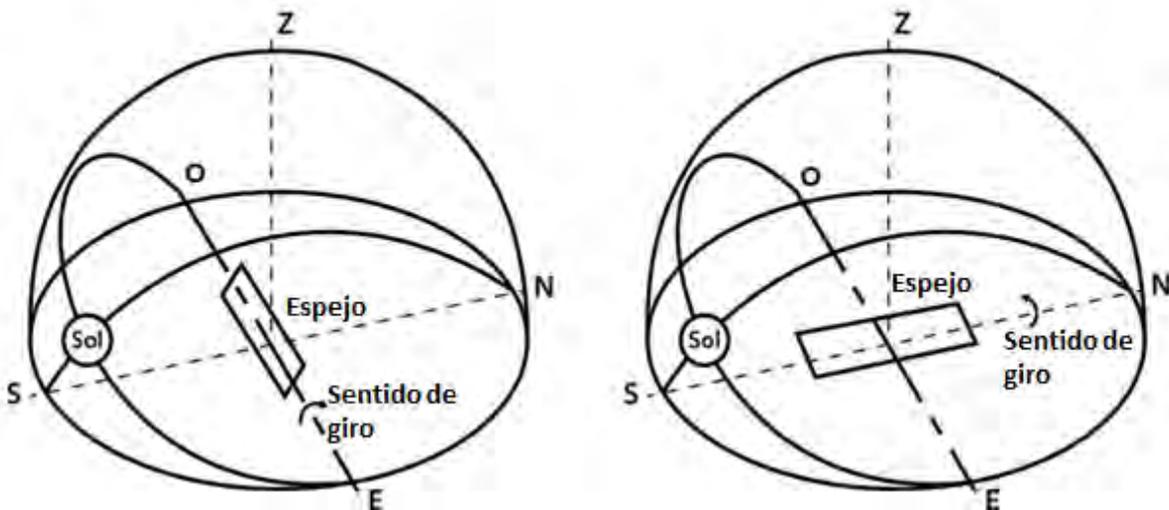


Figura 2.26. Orientación del sistema concentrador E-O y N-S, respectivamente [3].

Como ya se mencionó, la orientación del sistema será N-S para que el seguimiento aparente del sol sea en E-O (plano ecuatorial). Conociendo que cada línea de espejos debe tener una inclinación propia para lograr que los rayos solares incidan en un punto focal en

común. Estas líneas de espejos deben moverse de la misma forma y a la misma velocidad en el horario de trabajo del sistema, que para un sistema ecuatorial que sigue el movimiento del sol solo en altura, existe 15 por hora. Obsérvese la Fig. 2.27.

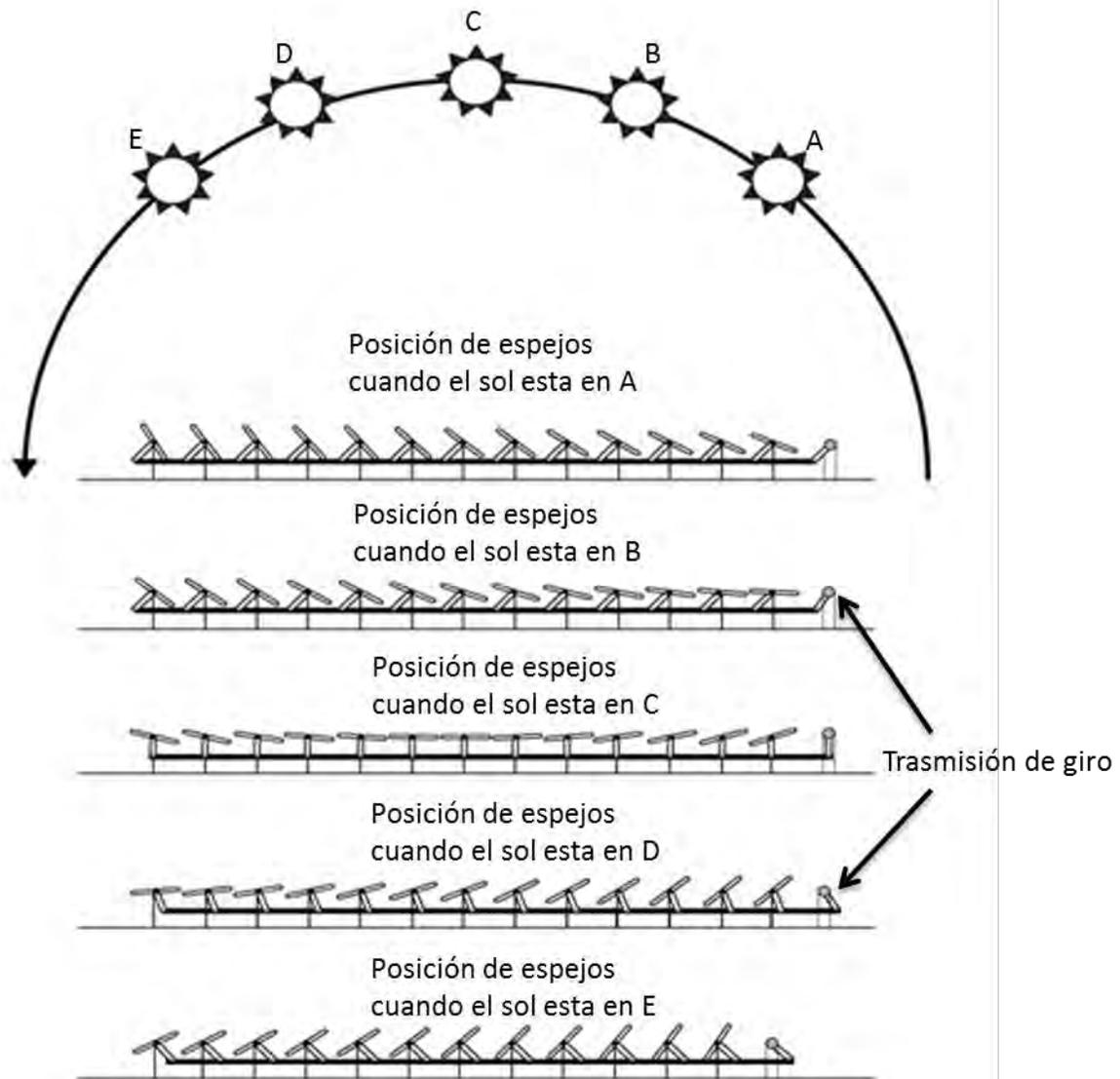


Figura 2.27. Sistema mecánico para seguimiento del sol en diferentes posiciones. Edición propia.

CONCLUSIÓN

El recurso de radiación solar del cual depende totalmente nuestro sistema RFFL, resulta ser solo una fracción de la que incide superficialmente a la tierra, pero aun así hay que contemplar de qué forma se comporta el movimiento del sol para captar esa radiación. Considerado los principios y fenómenos básicos que le conciernen al sistema RFFL, se procede a establecer una metodología para que el diseño óptico y mecánico, y logren mantener la mayor eficiencia térmica en el receptor.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ÓPTICO, MECÁNICO Y DE SEGUIMIENTO SOLAR

En este capítulo se presentan las consideraciones que se tomaron en cuenta al momento de diseñar el sistema óptico de un sistema RFFL (arreglo de espejos y dimensionamiento del receptor secundario CPC), ya que los espejos planos deben estar inclinados dependiendo del ángulo de incidencia del vector solar modificando su posición de manera dinámica acorde al movimiento aparente del sol. Los otros componentes del sistema Fresnel son estáticos. El propósito es tener un apropiado diseño mecánico de la estructura de soporte y diseño electrónico del sistema de seguimiento del sol.

3.1 DISEÑO ÓPTICO DE UN SISTEMA FRESNEL LINEAL

Como ya se ha venido mencionando a lo largo de este trabajo, los espejos o superficies reflejantes se colocan en posiciones cercanas a la superficie del suelo. Los espejos tienen que reflejar los rayos incidentes sobre su superficie y concentrarlos en la línea focal donde se encuentra el tubo receptor, cada línea de espejos debe de tener un ángulo de inclinación diferente respecto al eje formado por el tubo receptor y la normal a la superficie. Un sistema RFFL está compuesto por varias líneas de espejos planos, los cuales están orientados a una zona focal, con esto se logra incrementar el factor de concentración solar, es decir, se incrementa el flujo de radiación solar sobre el receptor. En algunos casos se suele emplear un sistema óptico de reflexión secundario para incrementar aún más el factor de concentración. Finalmente la radiación es concentrada en un tubo receptor el cual absorbe la energía térmica y la trasfiere mediante un proceso de transferencia de calor por conducción y convección aun fluido de trabajo. La energía térmica almacenada en el fluido es finalmente transferida en un intercambiador de calor para generar vapor, de ahí a una turbina para generar energía eléctrica.

Tomando de referencia la esquemática de un sistema RFFL en la Fig. 2.13, se muestra el diagrama general de un sistema RFFL, con el cual se puede ilustrar consideraciones y metodología que se estableció para el diseño de este tipo de sistemas. Se puede observar que se requiere de dos sistemas trabajando en conjunto, por una parte el

sistema concentrador conformado por los espejos, y por otra parte el receptor secundario tipo CPC. A continuación se presentan las principales variables para el diseño del sistema de espejos.

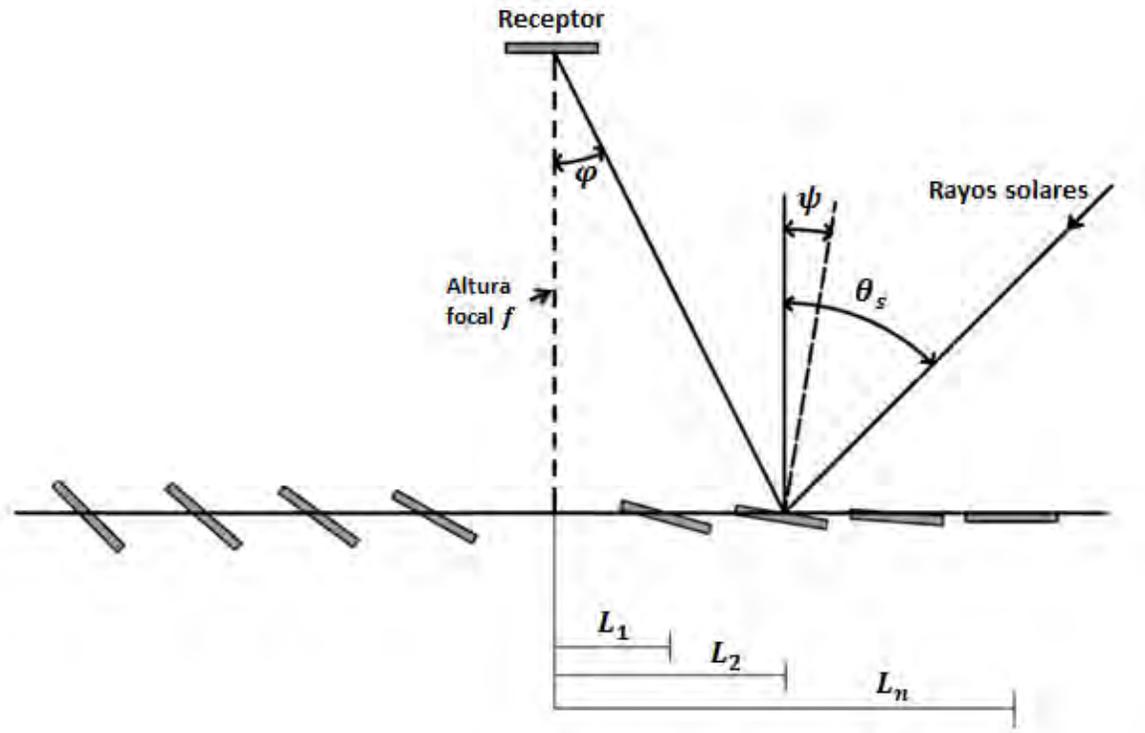


Figura 3.1. Esquema del movimiento de los espejos planos del sistema Fresnel lineal. Edición propia.

3.1.1 MODELADO ÓPTICO PARA LOS ESPEJOS

En la Fig. 3.1 se observan cada una de las hileras de espejos planos cerca de la superficie, y en la parte superior se encuentra el tubo receptor, cada hilera de espejos tiene un ángulo de inclinación diferente como función de la distancia L a la que se encuentran del eje del sistema RFFL. El ángulo de inclinación definido mediante el ángulo formado entre la normal a la superficie del espejo y el eje del sistema, se denota letra griega ψ , el cual será diferente para cada línea de espejos. La inclinación ψ permite, que cada rayo proveniente del sol con ángulo θ_s , sea reflejado al receptor el cual está situado a una altura f (punto focal) medida desde el plano horizontal de abertura de colector Fresnel lineal.

Teniendo en cuenta la *ley de la reflexión*, para el caso de la primera línea de espejos situada exactamente debajo del receptor y un ángulo de incidencia solar $\theta_s = 45^\circ$ con esto se puede decir que:

$$L_0 = 0 \quad (3.1)$$

$$\psi_0 = 22.5^\circ \quad (3.2)$$

Lo que indica una clara relación entre en ángulo de inclinación de cada línea de espejos con el ángulo de incidencia solar. Esta relación a su vez dependerá de la posición de cada línea de espejos respecto al eje focal, definida tanto por la distancia horizontal hasta el eje del foco como la altura del mismo foco. Estas consideraciones provocarán las variaciones en el ángulo de los rayos reflejados. Véase las figuras 3.2 y 3.3.

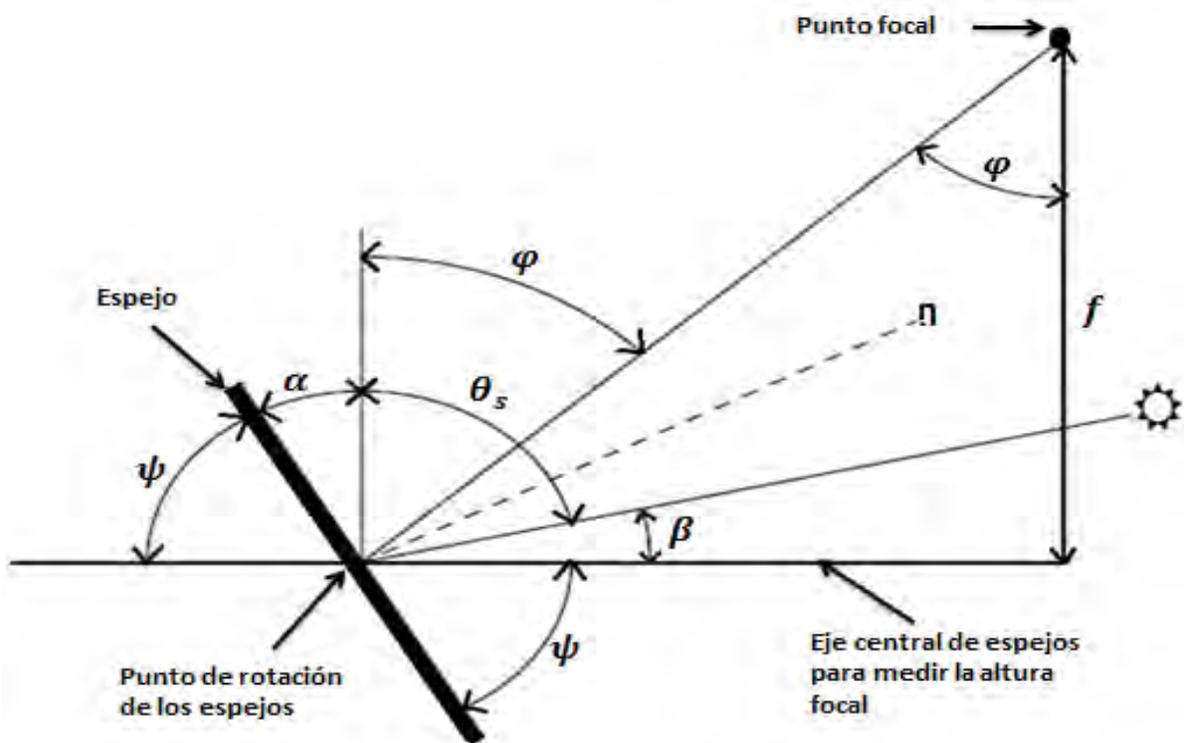


Figura 3.2. Trazo de rayo incidente solar sobre una línea de espejos posicionada del lado izquierdo del receptor, con movimiento sobre el eje central de la línea de espejos. Edición propia.

De la figura 3.2 se observa una línea de espejos situada del lado izquierdo del receptor, de la cual se puede obtener la siguiente relación entre los ángulos de incidencia y reflexión. Y así obtener la inclinación de los espejos situados del lado izquierdo del receptor:

$$\theta_s + \beta = 90^\circ \text{ donde se puede despejar } \beta, \beta = 90^\circ - \theta_s$$

$$\psi + \alpha = 90^\circ \text{ donde se despeja } \alpha, \alpha = 90^\circ - \psi$$

Realizando también la siguiente relación, se puede obtener:

$\psi + \beta = \varphi + \alpha$, sustituyendo queda: $\psi + (90^\circ - \theta_s) = \varphi + (90^\circ - \psi)$ por lo tanto:

$$\varphi = 2\psi - \theta_s \quad (3.3)$$

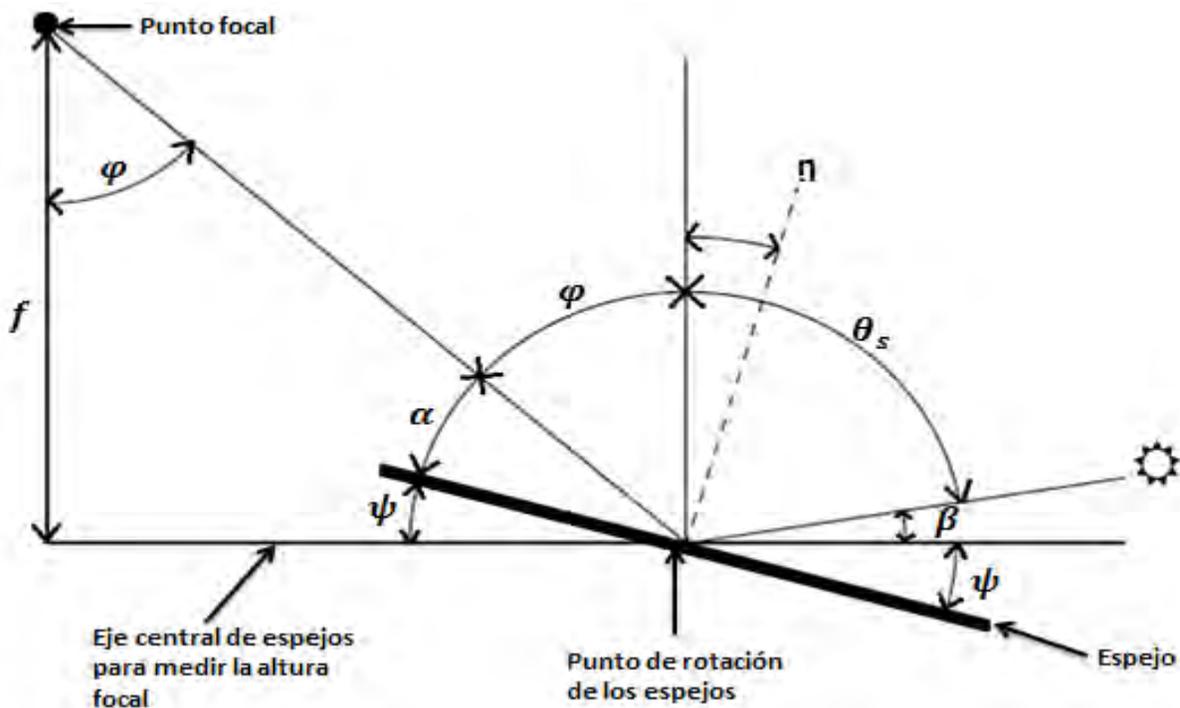


Figura 3.3. Trazo de rayo incidente solar sobre una línea de espejos posicionada del lado derecho del receptor, con movimiento sobre el eje central de la línea de espejos. Edición propia.

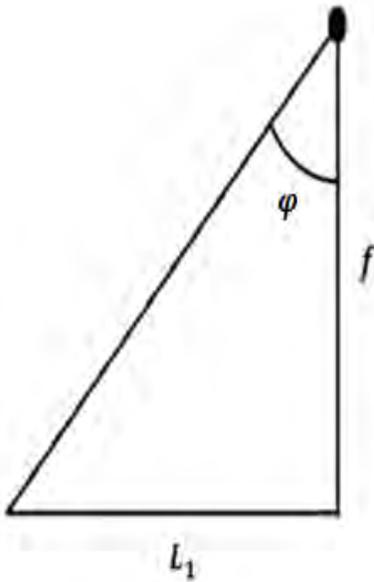
De la figura anterior se pueden obtener las siguientes relaciones para, de igual forma, obtener una ecuación que nos ayude a designar la inclinación de los espejos, pero esta vez los que se encuentran situados del lado derecho del receptor:

$$\psi + \alpha + \varphi = 90^\circ \text{ y } \beta + \theta_s = 90^\circ \text{ por lo que puede decir que: } \psi + \alpha + \varphi = \beta + \theta_s$$

Y considerando que $\alpha = \beta + \psi$, se sustituye y se obtiene, $\psi + (\beta + \psi) + \varphi = \beta + \theta_s$

$$\varphi = \theta_s - 2\psi \quad (3.4)$$

Después de obtener la relación directa de los ángulos de incidencia solar, reflexión e inclinación de los espejos, se obtiene la posición horizontal de cada línea de espejos con trigonometría básica:

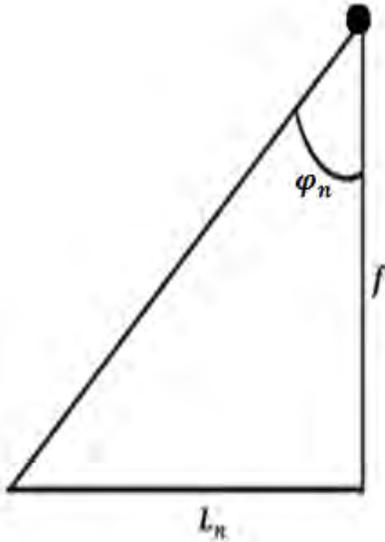


Donde se tiene que:

$$\tan \varphi = \frac{L_1}{f} \quad (3.5)$$

De esta ecuación se conoce a φ por la ecuación (3.3), esto para el lado izquierdo.

De esta forma se puede concluir que, las líneas siguientes a la primera del lado izquierdo estarán definidas de la siguiente manera, n significa el número de fila:



$$\tan \varphi_n = \frac{L_n}{f}$$

$$\varphi_n = 2\psi_n - \theta_s$$

De esta forma se puede corroborar que, si asignamos condiciones iniciales, como un ángulo de incidencia solar de $\theta_s = 45^\circ$ y una posición de $L_0 = 0$ lo cual indica que $\varphi_0 = 0$, se obtiene:

$$\varphi_0 = 2\psi_0 - \theta_s, \quad \gg \quad \varphi_0 = 0$$

$$\psi_0 = \frac{\theta_s}{2} = \frac{45^\circ}{2} = 22.5^\circ$$

Como lo único que cambia en los espejos situados en el lado derecho es el ángulo de inclinación respecto a los del lado izquierdo, estos mantendrán la misma distancia ya que el comportamiento será el mismo a lo largo del tiempo de trabajo, de tal manera que solo se debe cuidar que una línea de espejos no provoque sombra a la línea que le sigue, así que las posiciones de los espejos del lado izquierdo son las mismas que los del lado derecho:

$$L_i = L_d \quad (3.6)$$

Una vez designada la distancia que tendrá cada línea de espejos del lado derecho se puede calcular la inclinación respecto al foco, con la misma ecuación (3.5), que del lado izquierdo:

$$\tan \varphi = \frac{L_1}{f}$$

Y una vez obtenida la inclinación respecto al foco, se obtiene la inclinación de cada línea de espejos con la ecuación (3.4):

$$\varphi = \theta_s - 2\psi, \quad \gg \quad \psi = \frac{\theta_s - \varphi}{2}$$

3.1.2 MODELADO ÓPTICO PARA UN CPC

Para el diseño óptico de un concentrador parabólico compuesto (CPC), se necesita delimitar primeramente el factor de concentración (geométrica en este caso), la cual se calcula con la ayuda de la ecuación (3.7). Posteriormente, el CPC está compuesto por dos secciones geométricas que se unen en el punto **p** (observe la Fig. 3.4), estas geometrías son: una sección de involuta y una sección de parábola. La involuta es la parte envolvente de la parte inferior del círculo hasta el punto **p**, y la parábola comienza en el punto **p** hasta la parte superior de la curva (punto **Q**). La siguiente ecuación es para la obtención de la concentración geométrica del CPC inversamente proporcional al seno del semiángulo de apertura. Ecuación obtenida de Kalogirou, Soteris A. segunda edición, 2014.

$$C_{CPC} = \frac{1}{\sin \theta_c} \quad (3.7)$$

Para obtener la apertura del CPC se cuenta con la siguiente ecuación:

$$W < 2\pi D \quad (3.8)$$

Donde **D** es el diámetro del tubo receptor y **W** será dos veces la apertura del CPC.

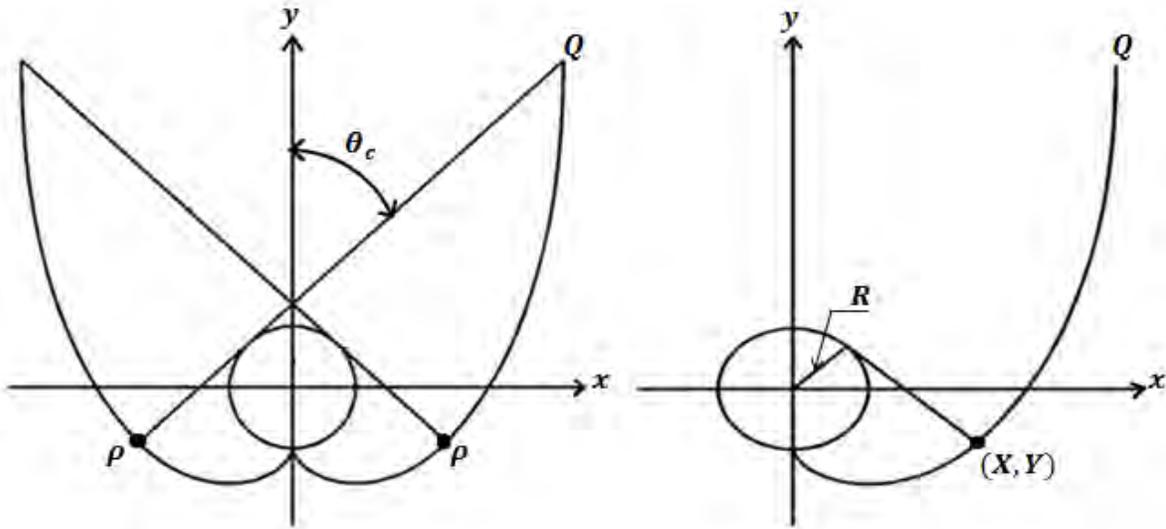


Figura 3.4. Esquema de los parámetros que conciernen al CUSP-CPC. Edición propia.

Las geometrías que componen al CPC están descritas por los ecuaciones (3.9 y 3.10), para la involuta y para la parábola, respectivamente, ambas ecuaciones dependen del radio del círculo (receptor) y del semiángulo de aceptación mínimo θ_c :

para la parte de la involuta:

$$\rho(\theta) = R\theta, \quad |\theta| \leq \theta_c + \pi/2 \quad (3.9)$$

para la parábola:

$$\rho(\theta) = R \left\{ \frac{[\theta + \theta_c + \pi/2 - \cos(\theta - \theta_c)]}{1 + \sin(\theta - \theta_c)} \right\}, \quad \theta_c + \pi/2 \leq \theta \leq +3\pi/2 - \theta_c \quad (2.10)$$

Las ecuaciones anteriores calculan los puntos (en coordenadas polares) para el CPC, cabe mencionar y recalcar que el incremento en θ_c debe ser en radianes. Si se desea realizar la transformación a coordenadas cartesianas solo hacemos uso de las siguientes ecuaciones:

$$X = R\sin(\theta) - \rho\cos(\theta) \quad (3.11)$$

$$Y = -R\cos(\theta) - \rho\sin(\theta) \quad (3.12)$$

A los concentradores CPC se suele hacer un truncamiento (un corte en la parte final de la parábola), debido a que esta parte del concentrador representa cerca del 50% de la

superficie reflectiva y contribuye con apenas el 10% de la concentración solar, lo cual permite su fácil eliminación para tener una reducción de material al momento de su construcción, y con pérdidas ópticas mínimas. Ver Fig. 3.5.

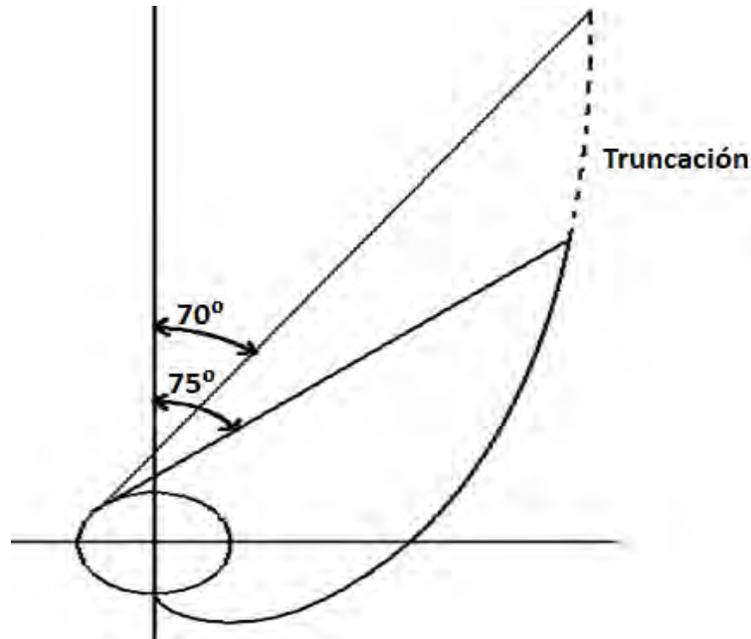


Figura 3.5. Truncamiento de un CPC. Edición propia.

Para determinar la eficiencia térmica de todo el sistema se debe calcular el producto de todas las concentraciones geométricas, que en este caso es la de los espejos y la del CPC. Con la ecuación 3.13 se puede calcular la eficiencia térmica del sistema, (Duffie J.A. and Beckman W.A, 1991):

$$\eta_{receiver} = \left(\frac{\alpha C G_0 - \varepsilon \sigma (T_{receiver}^4 - T_{sur}^4) - U_{cov} (T_{receiver} - T_{\infty})}{C G_0} \right) \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_{receiver}} \right) \quad (3.13)$$

Dónde:

α = absortividad del tubo receptor

ε = emisividad del tubo receptor

σ = constante de Stefan–Boltzmann

C = concentración geométrica de todo el sistema

G_0 = irradiación promedio en la tierra

$T_{receiver}$ = temperatura del receptor (grados Kelvin)

T_{sur} = temperatura promedio terrestre (grados Kelvin)

U_{conv} = concentración promedio

T_{∞} = temperatura ambiente (grados Kelvin)

3.2 TRAZADO DE RAYOS

Para el diseño óptico y el trazo de rayos del sistema Reflector Fresnel de foco lineal se realizaron las siguientes suposiciones:

- I. Todos los espejos mantienen una specularidad perfecta y no muestran ninguna deformación.
- II. Cada línea de espejos está sujeta al eje de transmisión de movimiento.
- III. El eje de movimiento para cada una de las líneas de espejos se encuentran sobre el mismo plano.
- IV. El sol pasa por el cenit.
- V. Todos los espejos tienen el mismo ancho.
- VI. Se utilizará un CPC (concentrador parabólico compuesto), como sistema secundario de concentración el cual estará situado en la parte superior del sistema Fresnel lineal.

Con las ecuaciones de posición de sol antes descritas se puede realizar una simulación de la radiación solar incidente al tubo receptor con ayuda del software Tonatiuh, el cual es un software libre y muy eficiente para simulaciones de trazo de rayos en sistemas de energía solar, ya que permite evaluar el rendimiento óptico de una gran variedad de sistemas de concentración solar como torre central, disco parabólico, RFFL, CPC, canal parabólico, etc. También nos permite predecir el comportamiento del sistema en cualquier

día del año a cualquier hora en cualquier parte del mundo con solo ingresar la UTC (*universal time center*), latitud y longitud del lugar.

Para diseñar el sistema RFFL en Tonatiuh primeramente hay que diseñar el CPC, este debe contener las características que el diseñador ocupe. Para simular el CPC en la plataforma de Tonatiuh, hay que seleccionar en la parte de *insert-shape-Trough_AsymmetricCPC* posteriormente hay que definir los siguientes parámetros:

<i>rInt</i>	Radio interno del tubo receptor.
<i>rExt</i>	Radio externo del tubo receptor.
<i>acceptanceAngleCW</i>	Semiángulo de aceptación del lado derecho (en radianes).
<i>acceptanceAngleCCW</i>	Semiángulo de aceptación del lado izquierdo (en radianes).
<i>truncationAngle</i>	Ángulo de truncamiento respecto del extremo superior de la distancia de truncación (<i>truncationOrigin</i>).
<i>truncationOrigin</i>	Distancia vertical de la truncación.
<i>Length</i>	Longitud del CPC.

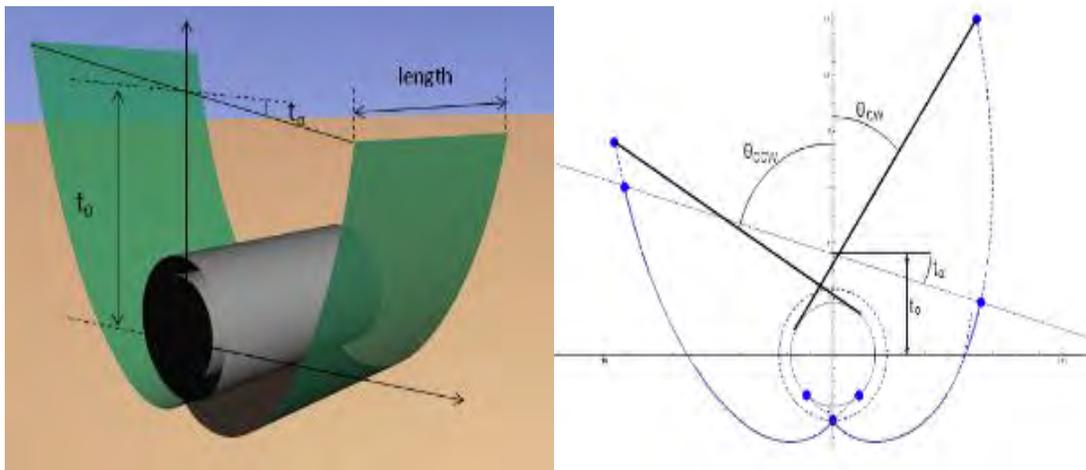


Figura 3.6. Parámetros a definir en Tonatiuh para el CPC.

Para el caso de este proyecto se establecieron los siguientes valores a los parámetros:

Tabla 3.1. Parámetros (adimensionales) para realizar el CPC en Tonatiuh.

Parametro	Valor
rInt	0.025
rExter	0.029
acceptanceAngleCW	0.5
acceptanceAngelCCW	0.5
truncationAngle	0
truncationOrigin	0.37
legent	1.8

Para el caso de los espejos, solo se debe poner en los parámetros las dimensiones de los mismos y las distancias tanto de altura respecto al CPC y la separación (tanto de lado derecho como del izquierdo) del eje central.

Al posicionar los espejos con la altura y la distancia calculada se les inserta a cada línea de estos un sistema de seguimiento solar, definido en Tonatiuh como `Lineal_Fresnel_traker`, mencionando que dentro de los parámetros debe conocerse en que eje se deben mover los espejos para seguir al sol, y si este movimiento es de manera absoluta o relativa respecto al todo el sistema.

Al tener todo el sistema con los parámetros que se desean, se realizaron simulaciones de posicionamiento del sol para el caso en particular de Aguascalientes México, este estado mantiene coordenadas de 21 38' de latitud al norte y -102 52' de longitud al oeste, y el UTC en Aguascalientes es de 6 horas más que la hora reloj local. Las simulaciones fueron realizadas para los equinoccios y solsticios a las 9am, 12pm y 3pm., estas horas en particular fueron seleccionadas ya que es la hora de inicio, mitad y final en el que operará del sistema, respectivamente. Las simulaciones a las horas descritas mantendrán un ángulo de incidencia solar sobre los espejos de 45, 90 y 45 grados de elevación. Se menciona dos veces el ángulo de 45 grados ya que el sol simula una curva como se observa en la figura 2.20. Todos estos datos son correspondientemente insertados en la ventana que se despliega al seleccionar *Enviorment-Sun Light-Sun Position*

Calculator. El sistema RFFL está orientado Este-Oeste para mantener un sistema ecuatorial (mencionado en el capítulo 2).

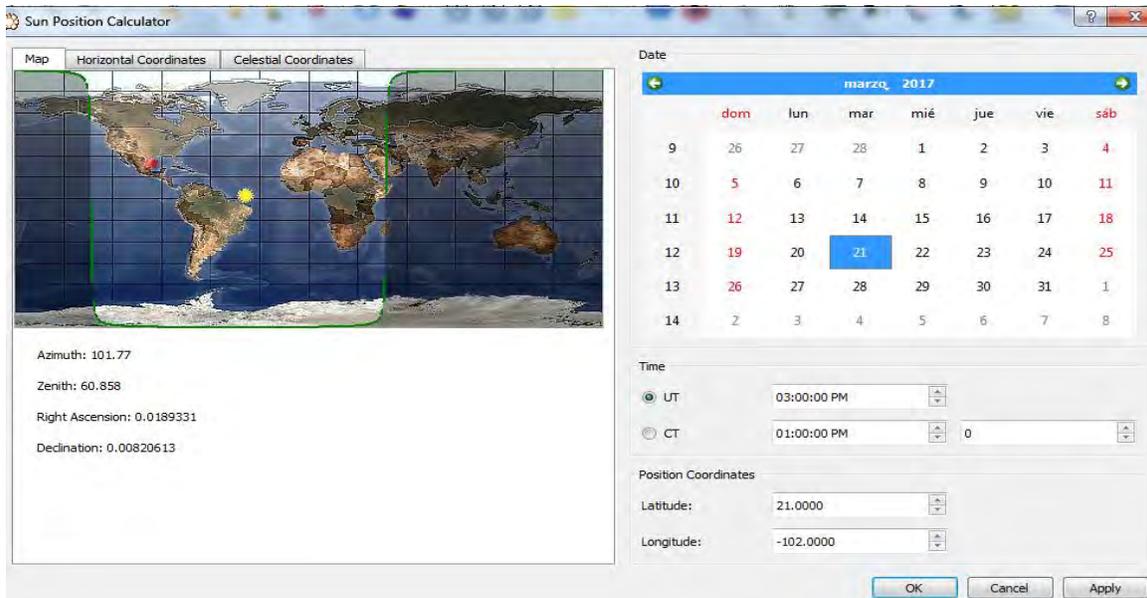


Figura 3.7. Calculador de la posición del sol *sun position calculator* de Tonatiuh.

3.3 DISEÑO MECÁNICO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL SISTEMA FRESNEL LINEAL

3.3.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA

Para este trabajo se consideró como parámetro de diseño principal lograr obtener calor para procesos industriales, a través de alcanzar temperaturas de operación 150 C. El sistema de concentración debe contener una configuración óptica óptima con un relativo bajo costo de inversión, y que su mantenimiento y operación sea lo más sencillo posible. Por lo antes mencionado se establecieron las siguientes consideraciones para llevar a cabo el diseño del sistema mecánico:

- I. Se buscará una configuración óptica óptima para garantizar una alta eficiencia en la concentración solar, sin elevar demasiado los costos a una futura fabricación.

- II. La fabricación del sistema no deberá contener procesos de manufactura complicados, esto por si en algún momento se desea producir este sistema en serie o en masa.
- III. El diseño deberá ser modulable o flexible en términos de manufactura, de tal manera que si se desea realizar un diseño del mismo sistema pero con especificaciones no tan diferentes se pueda lograr.
- IV. El sistema deberá presentar buenas características de resistencia a condiciones de deformaciones, esfuerzos y climáticas., esto garantizará un buen funcionamiento en cualquier día del año.

3.3.2 DISEÑO FINAL DEL CUSP-CPC

Para el diseño del receptor secundario tipo CPC el procedimiento seguido fue el siguiente: primeramente se dimensiona el ancho máximo que pueden tener los espejos ya que estos no deberán exceder la dimensión del área de apertura del CPC. Con la ayuda de la ecuación **3.8**, la cual nos dice que el ancho de los espejos debe ser menor al producto del diámetro del receptor por dos veces el valor de la constante π , lo que nos da:

$$W < 2\pi D, \quad 2\pi(58mm) = 364.42mm$$

Por lo tanto: $W = 360mm$

Cabe mencionar que el diámetro del tubo receptor (tubo de vacío para calentadores solares), ya está definido al igual que su longitud por: $D = 58mm$ y $L = 1.8m$.

Posteriormente se realizó el perfil 2D del CPC, primero se calculó el semiángulo (con ecuación **3.7**) de apertura teniendo en cuenta que se estableció obtener un factor de concentración de dos soles por parte del CPC:

$$C_{CPC} = \frac{1}{\sin(\theta_c)}; \quad \theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{1}{C_{CPC}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1}{2}\right) = 30^\circ$$

Teniendo en cuenta que el semiángulo de apertura máximo es de 30° debe saberse que cualquier rayo que incida al CPC con un ángulo mayor a este no será concentrado en el tubo receptor. Haciendo uso de las ecuaciones **3.9** a la **3.12**, y con la ayuda del software Matlab se obtiene el perfil 2D del CPC como se muestra en la figura 3.8:

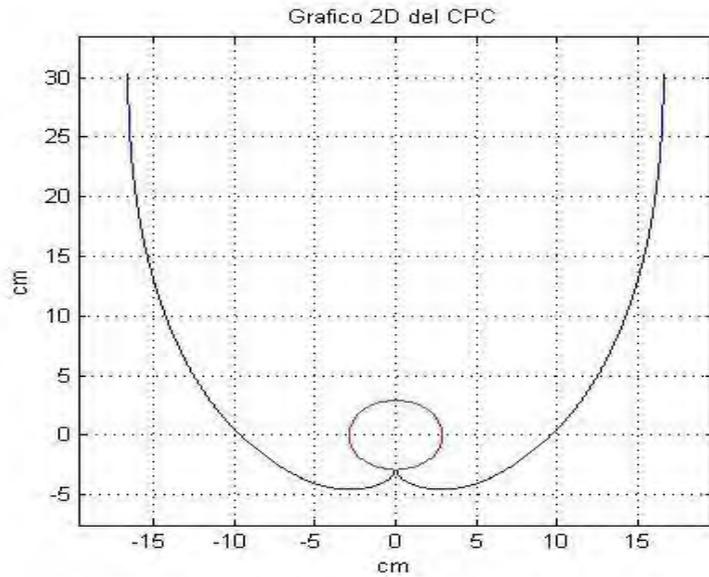


Figura 3.8. Perfil 2D del CPC con ayuda de Matlab considerando un 10% de truncamiento.

Al tener el perfil con las dimensiones del CPC, se procedió a realizar el modelo CAD (en SolidWorks 2016), con una longitud de 1.8m igual a la longitud del tubo receptor:

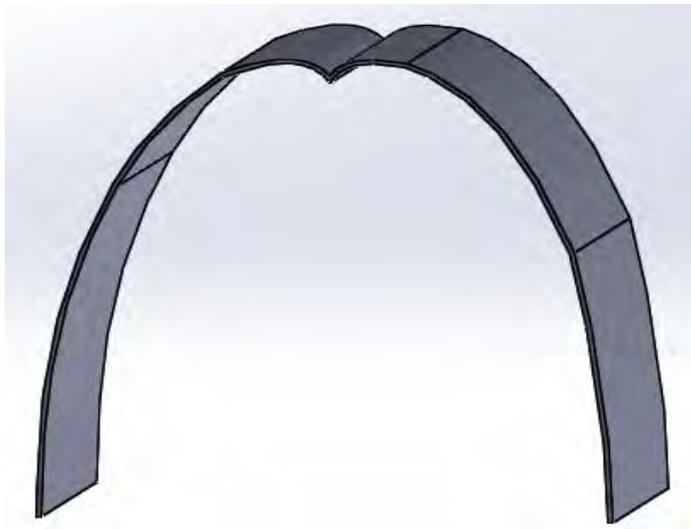


Figura 3.9. Modelo 3D del CPC considerando solo la superficie reflectiva.

Para la fabricación del CPC se utilizó acero galvanizado reflejante calibre 22 (0.8mm), con esto se asegura que se tendrá reflexión, forma y no se generará corrosión al estar en contacto con el agua. Por ser un calibre relativamente delgado se debe considerar

algún tipo de molde que pueda mantener la geometría del CPC, de lo contrario no se mantendrá la figura que se aprecia en la figura 3.9. Por tal motivo el CPC debe tener una estructura de soporte que mantenga su forma en todo momento, y para esto se diseñó una pequeña estructura con placa de acero ASTM A36 calibre 18 (1.2mm) y solera ASTM A-36 1" X ¼ .

Con la placa de acero se fabricarán unas costillas con una forma trapezoidal en la parte exterior y la forma del CPC en la parte interior (considerando el grosor de la lámina con la que se realiza el CPC), y varias costillas se unen mediante una solera para formar la estructura de soporte.

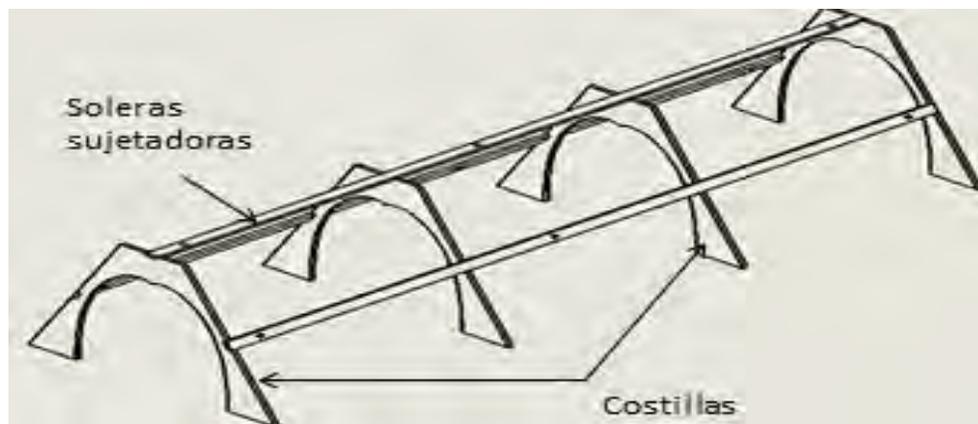


Figura 3.10. Diseño en 2D de la estructura de soporte reflector secundario tipo CPC.

3.3.3 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL CONCENTRADOR RFFL

Para el diseño CAD (se utilizó SolidWorks versión 2016) del sistema RFFL se realizaron varias configuraciones, pero se obtuvo una configuración final la cual logra cumplir con las consideraciones establecidas anteriormente.

Este sistema está integrado por 32 espejos planos con dimensiones de 36cm de ancho por 40cm de largo por 3mm de espesor, y un receptor CUSP-CPC situado a 3m de altura sobre el plano de los espejos. Gracias a todas las ecuaciones desarrolladas anteriormente se realizaron programas computacionales, para obtener la configuración óptica más adecuada y alcanzar con todo el sistema una concentración geométrica de 16 soles ($C_g = 16$).

Primeramente hay que mencionar la parte del marco para los espejos, el cual se encargará de soportar las líneas de espejos que reflejan la luz solar en el concentrador secundario. Este marco esta hecho de PTR (perfil tubular rectangular) ASTM A-500 de 1"1/2 . El marco está diseñado para soportar bien los cambios por dilatación térmica, fatiga por soportar a los espejos, cargas de viento, futuras incorporaciones de más equipo e instrumentación, etc. Véase la figura 3.11.



Figura 3.11. Base par soporte de los espejos y forma en que sujeta la estructura de soporte del CPC.

La base o marco de los espejos es de PTR de 1 ½ pulgadas de lado por lado. Mientras que el soporte para el CPC es de perfil tubular rectangular de 1 ½ pulgadas, pero a este no se le puede nombrar PTR ya que el acero con el que se construye es ASTM A-36. Esta estructura para colocar al CPC mantendrá una forma trapezoidal, la cual se sujeta con tornillos (M12) al marco de los espejos, (esto para poder montar y desmontar cuando se requiera), y en la parte superior será soldada.

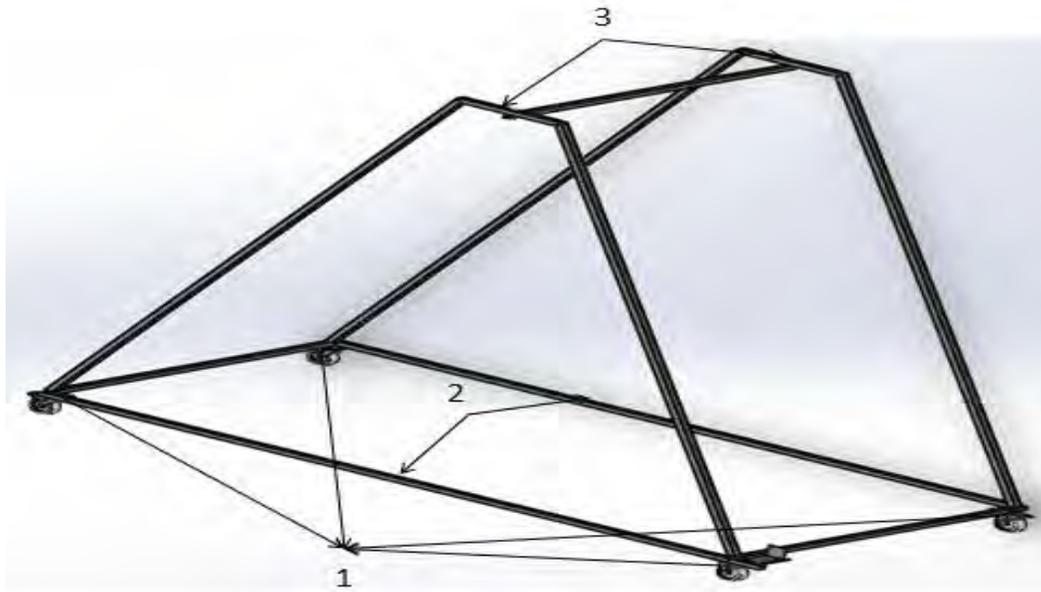


Figura 3.12. Estructura final de soporte para todo el sistema Fresnel.

Para validar la estabilidad de la estructura de soporte se realizó un análisis de elemento finito para determinar la distribución de esfuerzos por efecto de la gravedad con la ayuda de SolidWorks, "SOLIDWORKS Simulation" designando los parámetros de: *Asesor de sujeciones (fija)*, y *Asesor de cargas*. Para el Asesor de sujeciones, se seleccionó la cara de la base que une a las llantas con la estructura (1 en la figura 3.12), y para el Asesor de cargas se seleccionó la cara superior de los perfiles (3 en la figura 3.12), y la cara superior de los PTR más largos que se encuentran en la parte inferior de la estructura (2 en la figura 3.12)., aplicando una fuerza que se ejerce por el peso estimado del CUSP-CPC y el sistema de espejos de 265 y 500 N (para los punto 2 y 3 respectivamente). Véase el análisis en los resultados.

Para el montaje de los espejos se utilizará de igual forma un perfil tubular rectangular ASTM A-36 en la parte inferior de los espejos (o parte no reflectora), para soporte de peso de los mismos. Los espejos que se utilizarán, como ya se mencionó, mantendrán medidas de 36 cm de ancho por 40 cm de largo por 3 mm de espesor (comercialmente conocidos de media luna por el espesor), estos espejos son comerciales lo que facilitará la construcción de sistema.

Para lograr que los espejos se puedan mover, primeramente hay que pensar en el sistemas mecánico que nos ayude a realizar esto. Para este sistema se contemplaron chumaceras de piso de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro interno, también un sujetador para los espejos el cual estará incrustado en las chumaceras, y de esta manera se tiene el movimiento rotatorio de los espejos.

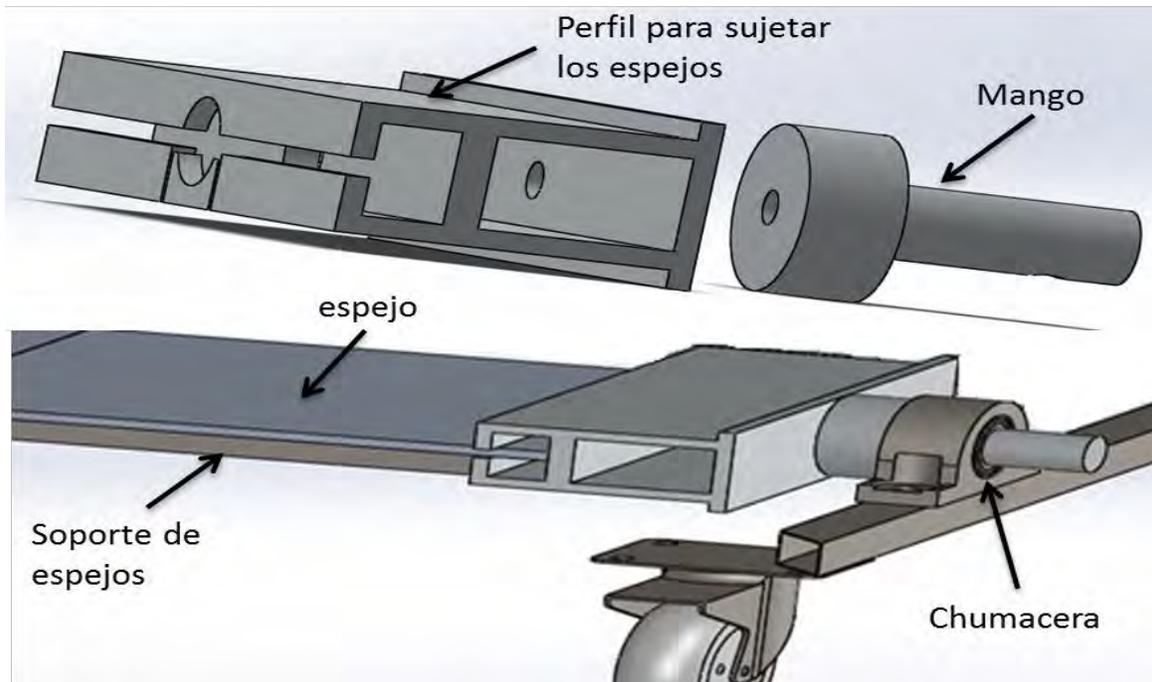


Figura 3.13. Sujetador de los espejos y ensamble de soporte de espejos con el sujetador.

3.3.4 SISTEMA DE TRASMISIÓN MECÁNICA PARA EL SISTEMA DE GIRO DE LOS ESPEJOS

Los espejos deberán mantener una inclinación única respecto al sol y al foco del sistema, es por ello que se pensó en la mejor opción para evitar tener un sistema de control rotatorio individual para cada línea de espejos. Por eso se instaló en el diseño mecánico un sistema de transmisión de torque con un eje de $1'' \times \frac{1}{4}$ de pulgada, que, por medio de tornillos sujetos a una extensión perpendicular de los sujetadores de los espejos se puedan lograr mover al mismo tiempo todas las líneas de espejos. Dejando en claro que las líneas de espejos ya se habrán posicionado con la inclinación adecuada para comenzar a operar. Los tornillos estarán sujetos a la solera y a la extensión de los sujetadores de los

espejos con cuatro tuercas que mantendrán un amarre sin perder movimiento rotatorio como se muestra en la figura 3.14:

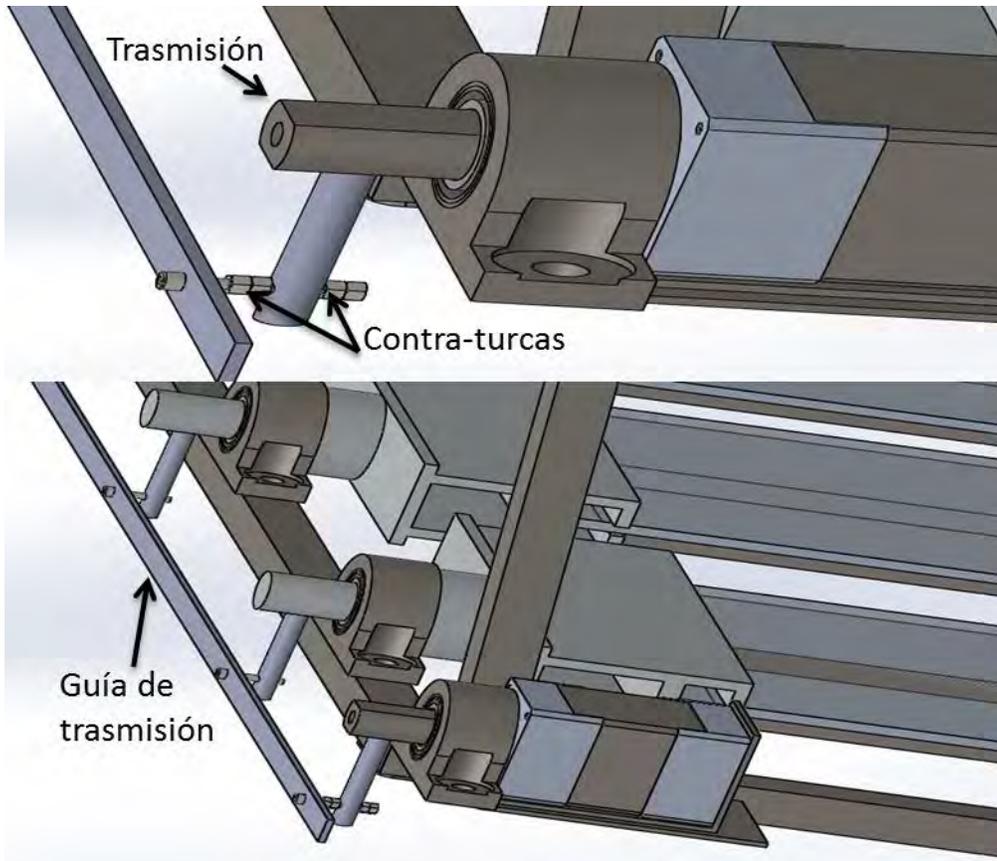


Figura 3.14. Sistema de transmisión de torque para las líneas de espejos.

3.4 DISEÑO DE CONTROL AUTOMÁTICO DE SEGUIMIENTO SOLAR

En este proyecto el control automático fue únicamente para seguimiento aparente del sol en elevación, este movimiento se dio únicamente por los espejos del sistema y para tener los grados en elevación que aparentemente el sol tiene, se debe contar con la gráfica de la trayectoria del sol como la que se muestra en la figura 3.15, para el caso de Aguascalientes la latitud es de $21^{\circ}50'24''$ al norte. Con la ayuda del software Matlab versión 2013b y con las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 se realizó un programa para obtener la gráfica de la trayectoria aparente del sol con los ángulos de elevación y azimut. Pero como se ve en la figura 3.16 en ciertos días del año (a mediados de cada año), lugares con

latitudes menores a 23.45° el sol logra sobrepasar el cenit del observador y esto ocasiona que la gráfica de la trayectoria del sol tenga una singularidad.

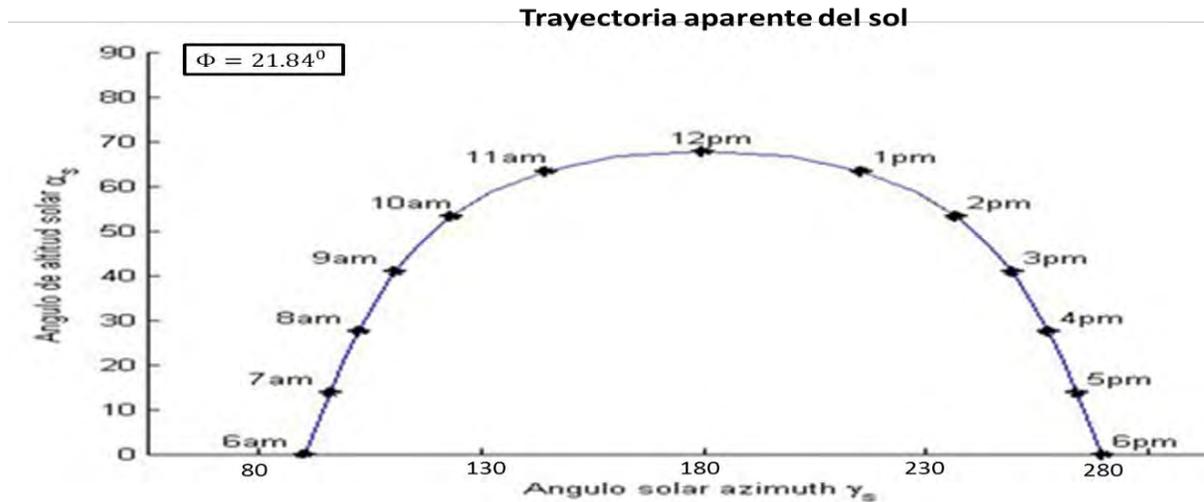


Figura 3.15. Grafica de la trayectoria aparente del sol para el 21 de Marzo.

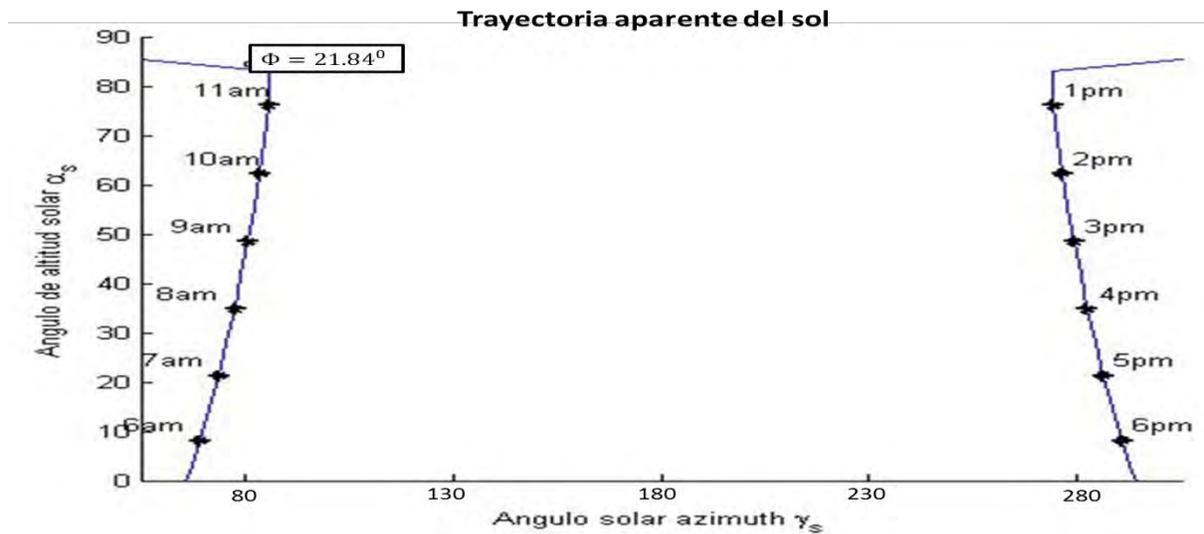


Figura 3.16. Singularidad en el cálculo la trayectoria del sol para el 21 de Junio.

Como se puede ver en la figura 3.16, los ángulos de la trayectoria del sol no tienen sentido por lo que al momento de realizar el control esto no nos servirá. Para evitar esta singularidad se asigna el valor de 21.45° en la latitud, solo para los días en los que se

presenta esta singularidad, que va desde el 31 Mayo al 4 de Junio para el caso en particular de la latitud de Aguascalientes.

Para este trabajo se utilizan los valores de elevación que se obtienen a las 9 am de cualquier día del año, y posteriormente se irá asignando una distribución de 15 grados por hora, esto debido a la rotación de la tierra sobre su eje como se menciona en la descripción del ángulo de hora ω .

Para desarrollar el control automático de los espejos este se divide en dos partes: una parte es el sistema de control electrónico y la otra es la programación del micro procesador a utilizar. Para este proyecto se contempla en el sistema electrónico dos sensores (inicio y final de operación), los cuales no serán más que unos interruptores en esencia, estos deberán ser posicionados como si los espejos recibieran rayos solares a 30 grados (al inicio y final de operación).

Para la programación se debe contemplar la señal que pondrá en funcionamiento el control automático tanto electrónico como de programación, logrando así que entre en función la ecuación del tiempo (**Ecuación 3.14**) y saber a qué hora reloj local es el $\frac{1}{2}$ día solar. Para contemplar que a esa hora el sol se encuentra a 90 grados de elevación y que por tanto a esa hora los espejos consideren la máxima elevación solar, porque a partir de esa hora el sol empezará a disminuir su altitud. Considerando que $B = (n - 1) \frac{360}{265}$ y n es el número que se puede obtener con la ayuda de la tabla 2.1 se procede al uso de la siguiente ecuación. [1]

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (3.14)$$

El resultado de la ecuación anterior es una parte para calcular la hora solar, ya que posterior a esta ecuación se calcula la diferencia en minutos de la hora reloj local:

$$hora\ solar = hora\ reloj + 4(L_{st} - L_{loc}) \quad (3.15)$$

Donde L_{st} y L_{loc} son la longitud estándar y longitud local respectivamente. El valor de su diferencia por 4 es la cantidad de minutos que se suman a la hora reloj.

Considerando que la hora reloj es 12 pm, a esta hora se le sumaran o restaran los minutos del resultado de $4(L_{st} - L_{loc})$ y este resultado será la hora reloj a la que el sol tiene su máxima altura. A esta hora se le restará y sumará 3 horas, de este modo se tendrán las horas exactas de inicio y final de operación. Posteriormente con la ayuda de la ecuación 2.2, se obtiene la altura solar (α_s) la cual es complemento del resultado de esta ecuación (del ángulo zenit) a 90 grados, es decir:

$$\alpha_s = 90 - \theta_z \quad (3.16)$$

El microprocesador a utilizar en el control será un ARDUINO Mega 2560. Este microprocesador contiene más que la cantidad necesaria de entradas y salidas (tanto digitales como analógicas) para controlar todo el sistema, esto para que en caso de mejoras o nuevas propuestas con más entradas y/o salidas no sea un inconveniente hasta cierto punto. También se utilizará un módulo GPS para ARDUINO y un motor a pasos NEMA-23 con su respectivo driver.

Considerando que el módulo GPS arroja datos como; la hora reloj, la latitud, la longitud, entre otros valores., se toma el dato de la hora reloj para calcular la cantidad de grados que los espejos tienen que moverse por minuto, y así mismo se obtienen los datos para el cálculo de las ecuaciones anteriores.

$$Grados = \left\{ [(hora\ reloj - hora\ inicio)15] + \left[\frac{minutos\ X\ 15}{60} \right] \right\} + \alpha_s \quad (3.17)$$

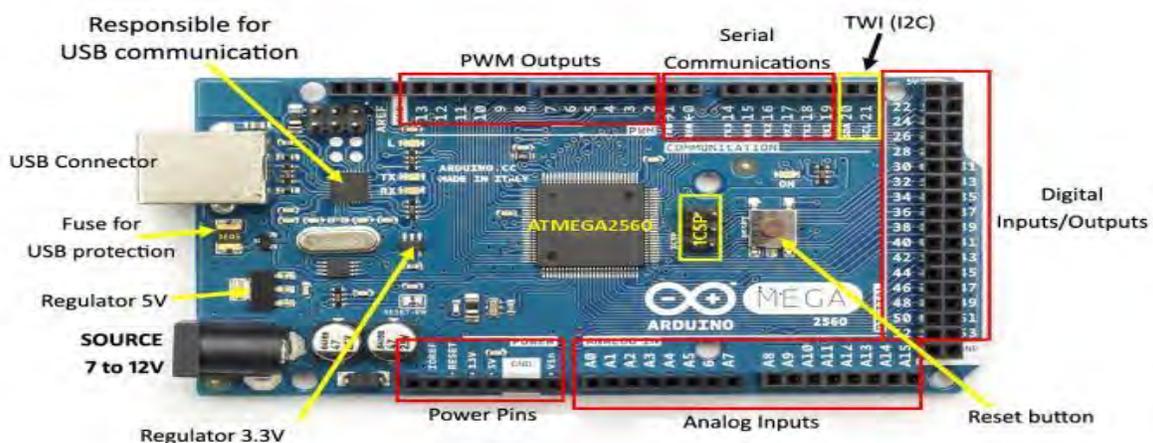


Figura 3.17 ARDUINO Mega 2560



Figura 3.18. Modulo GPS para ARDUINO.



Figura 3.19. Motor a pasos bipolar Nema 23 y su respectivo driver de control.

Los componentes mostrados en las figura **3.17**, **3.18** y **3.19** son los que esencialmente realizarán el control automático del sistema de seguimiento. A continuación se muestra un esquema conceptual de cómo será la conexión entre estos componentes:

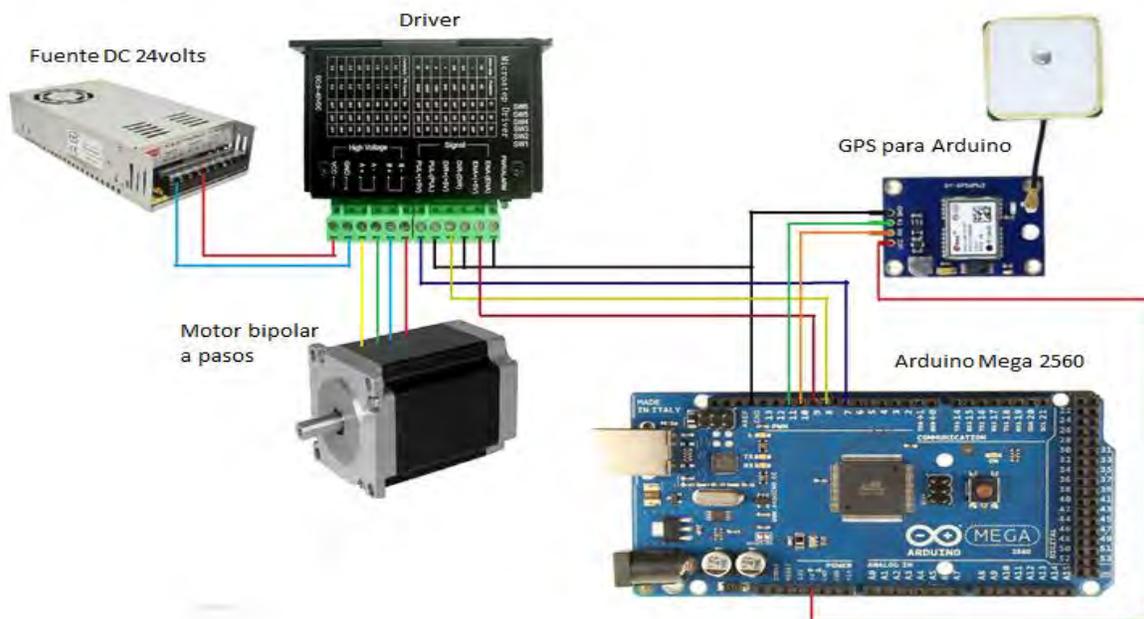


Figura 3.20. Esquema de conexión entre los componentes que esencialmente integran el control automático.

CONCLUSIÓN

La metodología para el diseño de un sistema RFFL se presenta de una manera cronológica, ya que para poder saber el ancho de los espejos se debe conocer primero la apertura del CPC y esto se logra con las ecuaciones descritas en el capítulo 2. Considerando las medidas del CPC se pueden establecer las medidas y componentes necesarios para la integración del sistema Fresnel, presentando la mejor opción por las propiedades de los materiales en el diseño mecánico. Finalmente se mencionan las consideraciones a contemplar para la realización del sistema de control automático, así como los componentes que en esencia realizarán tal control. Al desarrollar la metodología descrita en este capítulo se obtuvieron ciertos resultados que demuestran la viabilidad de este proyecto, como un buen diseño óptico y un buen diseño mecánico con sus respectivos análisis.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIONES

(ANÁLISIS DEL SISTEMA ÓPTICO, TÉRMICO DEL RECEPTOR, MECÁNICO Y CONTROL)

En este capítulo se describen las ventajas obtenidas del diseño óptico y mecánico del sistema RFFL. Se muestran los análisis de cada uno de los resultados que se presentan. Por último se dan ciertas recomendaciones en base a los análisis.

4.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA ÓPTICO

Como ya se mencionó, cada línea de espejos debe tener una inclinación determinada como función de su ubicación respecto al eje del sistema (coordenadas geométricas) y la posición del sol. El objetivo es que los rayos solares incidentes sobre la superficie de los espejos sean reflejados hacia el área de apertura del concentrador CPC y finalmente impacten en el tubo receptor. El sistema RFFL tiene un solo eje de movimiento solar (de elevación). La trayectoria solar corre de este a oeste con una elevación máxima de 90 grados al medio día solar. Para observar teóricamente si el seguimiento aparente del sol es el adecuado por parte de los espejos, se realizaron las simulaciones para 45 y 90 grados de elevación solar (los 45 grados se realizaron en el cuarto y primer cuadrante, 9 am y 3 pm respectivamente).

Primeramente se realizó el trazo de rayos del CPC únicamente, sin considerar ningún espejo, únicamente para validar su funcionamiento y observar si efectivamente se logra la concentración esperada.

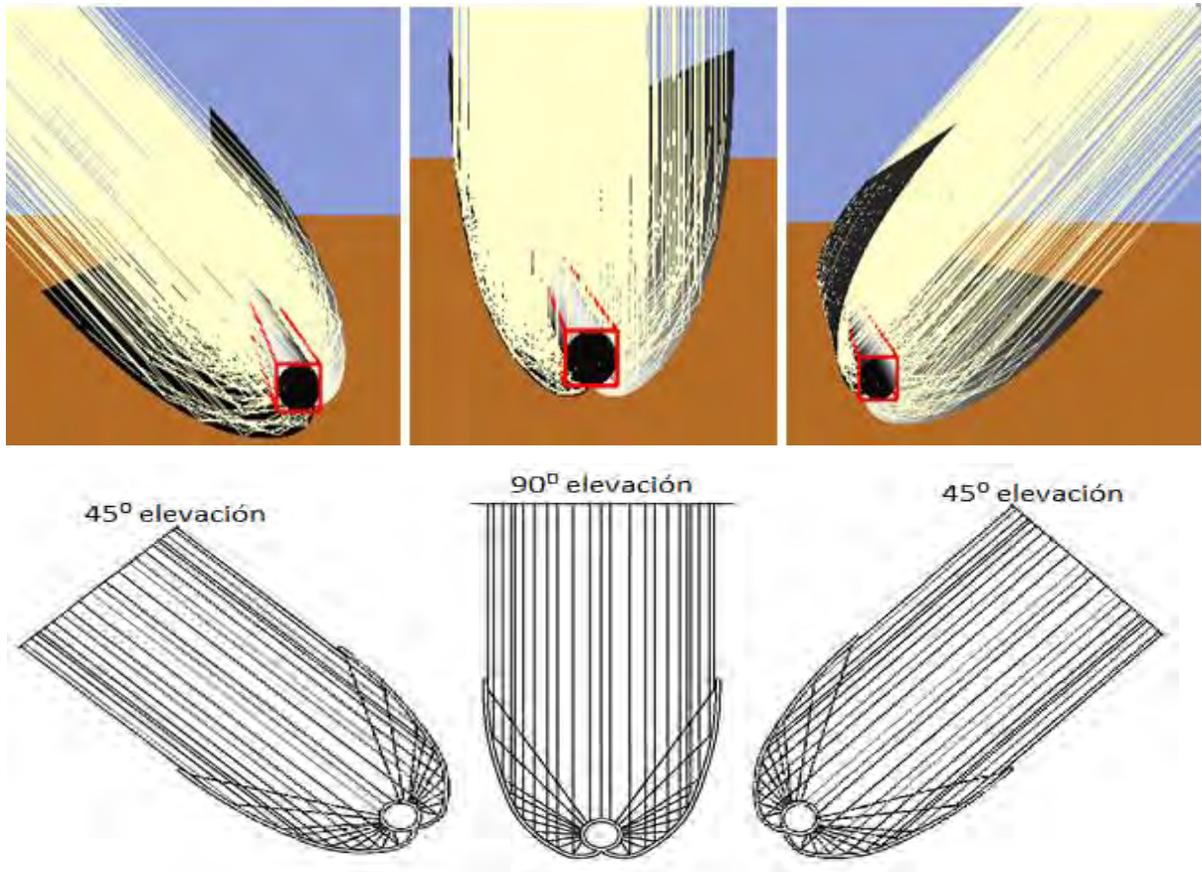


Figura 4.1. Trayectoria de los rayos solares reflejados por los espejos dentro del CUSP-CPC (ángulos de incidencia 45, 90 y 45 grados respectivamente y 0 grados en azimut).

Se puede observar que el CPC concentra de la forma esperada los rayos solares siempre y cuando estos no sobrepasen el semiángulo de aceptación mínimo de 30 grados debido a que se trata de un CPC de factor de concentración de 2 soles.

En la figura 4.2 se puede observar, que el sistema no solo se tiene una buena concentración de los rayos solares sino que además no se produce sombra entre los espejos a esas elevaciones, por lo que teóricamente las ecuaciones implementadas son adecuadas para el seguimiento aparente del sol por parte de los espejos. Las elevaciones simuladas son las que se tendrán en el tiempo de trabajo, que, teniendo en cuenta que al medio día solar (12pm solar) se tiene la elevación solar máxima de 90 grados, las horas de inicio y final de operación más cruciales para el efecto de sombreado sería a las 9 am y a las 3 pm (horas solares). Se puede observar en la figura 4.2 que en general todo el sistema RFFL ejerce su

función de manera adecuada, ya que se logra concentrar los rayos que inciden en los espejos planos sobre el receptor tubular del CPC.

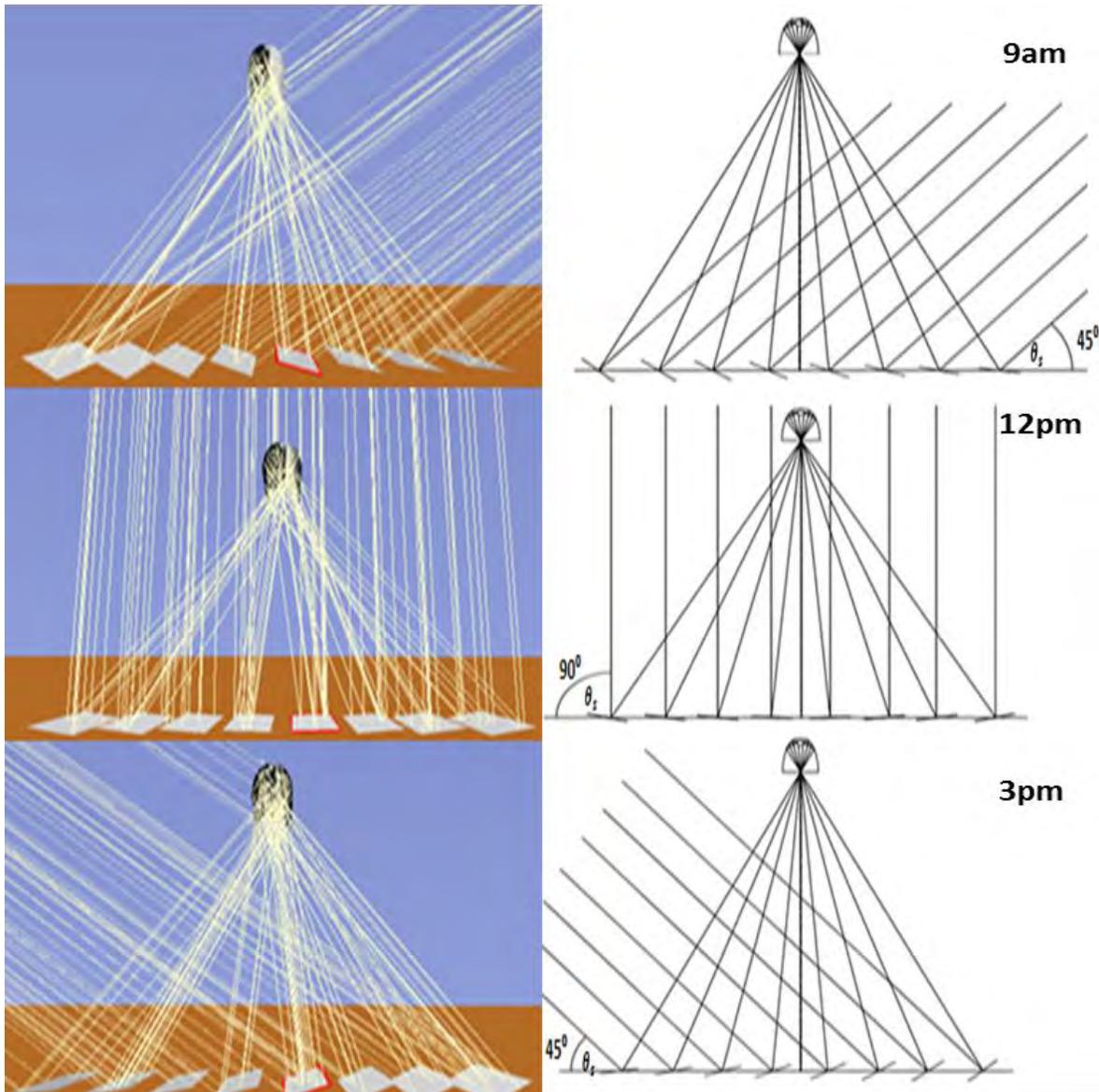


Figura 4.2. Trazo de rayos solares incidentes sobre todo el sistema a 45, 90 y a 45 grados de elevación (9 am, 12 pm y 3 pm horas solares respectivamente)

4.2 ANÁLISIS TÉRMICO DEL RECEPTOR

Con ayuda del software Tonatiuh se pudo calcular la distribución del flujo de radiación que incide sobre el tubo receptor del sistema RFFL. En base a ello es posible realizar un análisis de distribución de flujo sobre el tubo receptor.

De la figura 4.3 se puede observar que el flujo radiactivo pico incidente en el tubo receptor en condiciones ideales es de hasta 18 kW/m^2 . Se puede observar que el flujo radiactivo se encuentra principalmente en la parte derecha en cada una de las imágenes, pero esto se debe a que a lo largo del tubo se mantiene aproximadamente la mitad del diámetro del tubo siendo más incidido por los rayos reflejados.

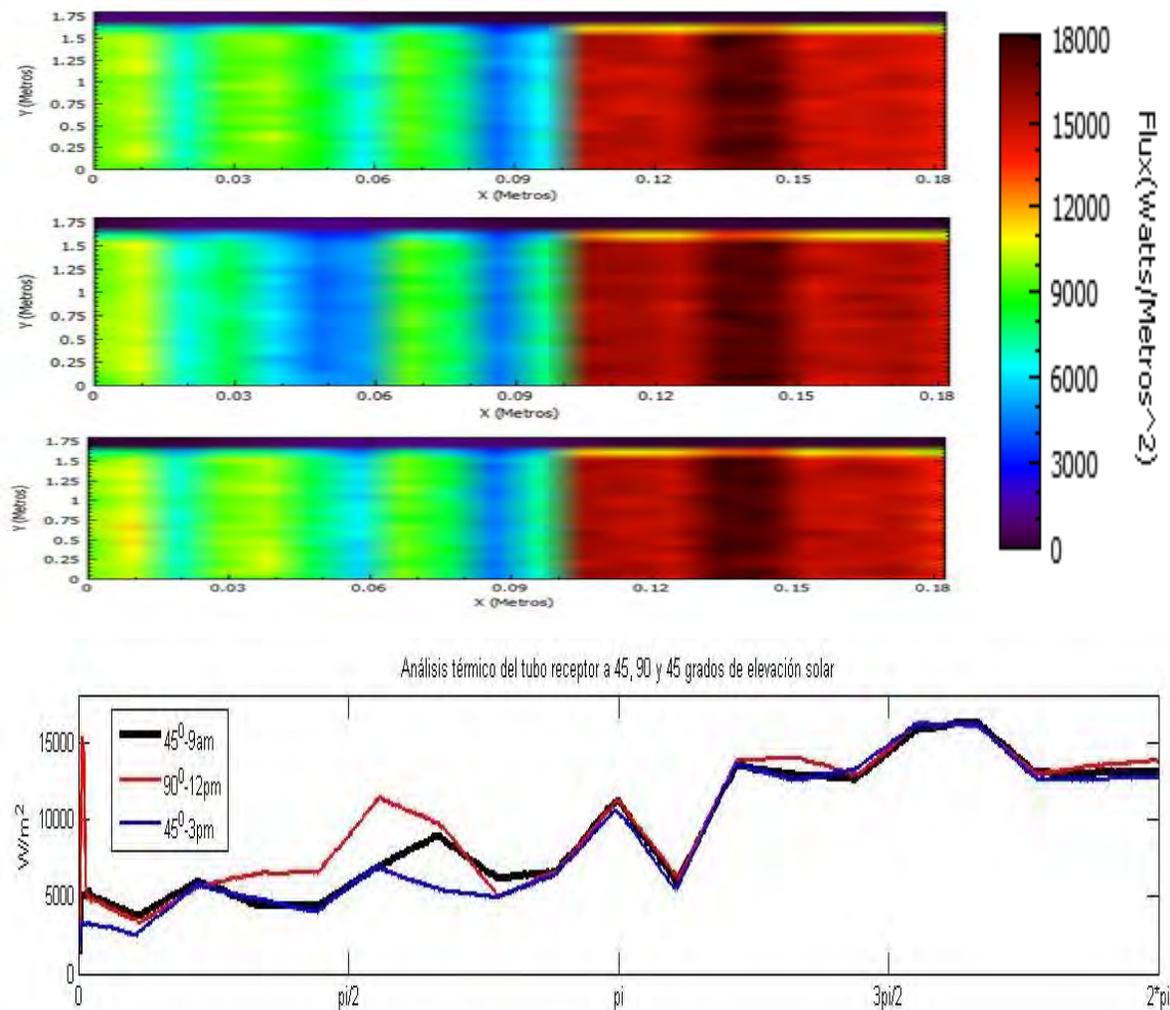


Figura 4.3. Distribución térmica del tubo receptor medida con colores y mostrada gráficamente a lo largo del eje X (perímetro del tubo en la parte central de la longitud).

La concentración y la distribución de radiación antes mostradas fueron para el caso en el que el sol se mueve de este a oeste, sin embargo esta trayectoria del sol únicamente se presenta solo una sola vez durante todo un año, por lo que la mejor manera de evaluar el funcionamiento óptico del sistema es evaluar la trayectoria solar en otras épocas del año, esto se consigue fácilmente con ayuda del software Tonatiuh. Por ello se simularon cuatro días del año (los dos solsticios y los dos equinoccios), a las 9 am, 12 pm y 3 pm (horas solares) de cada uno de esos días y de esta manera se obtuvo una simulación del comportamiento promedio del sistema durante el año. Para cada hora que se simuló se le aplicó una inclinación a todo el sistema Fresnel de 0, 5 y 21 grados.

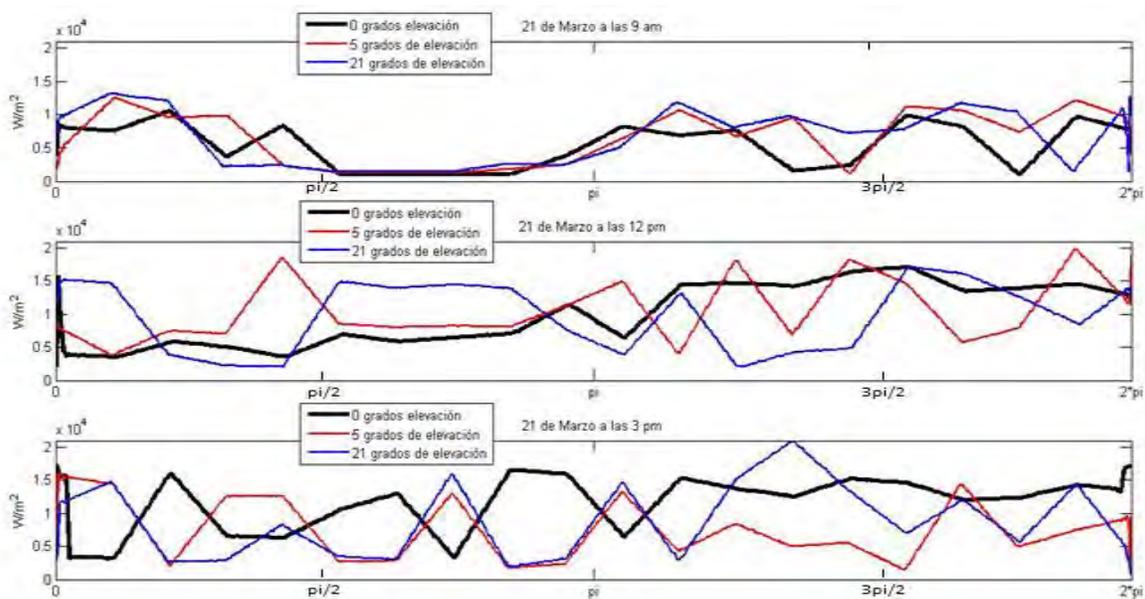


Figura 4.4. Distribución térmica del tubo receptor a lo largo del eje X, para el 21 de Marzo a las 9 am, 12 pm y 3 pm respectivamente.

La distribución de energía térmica en el tubo receptor para el 21 de Marzo logra ser mejor con una inclinación del sistema de 21 grados, pero esta diferencia no es tan significativa respecto a 0 y 5 grados de inclinación, por lo que implementar un sistema de elevación para este día no resulta ser conveniente por la poca diferencia, esto implicaría un mayor trabajo de diseño mecánico por resultados poco convenientes.

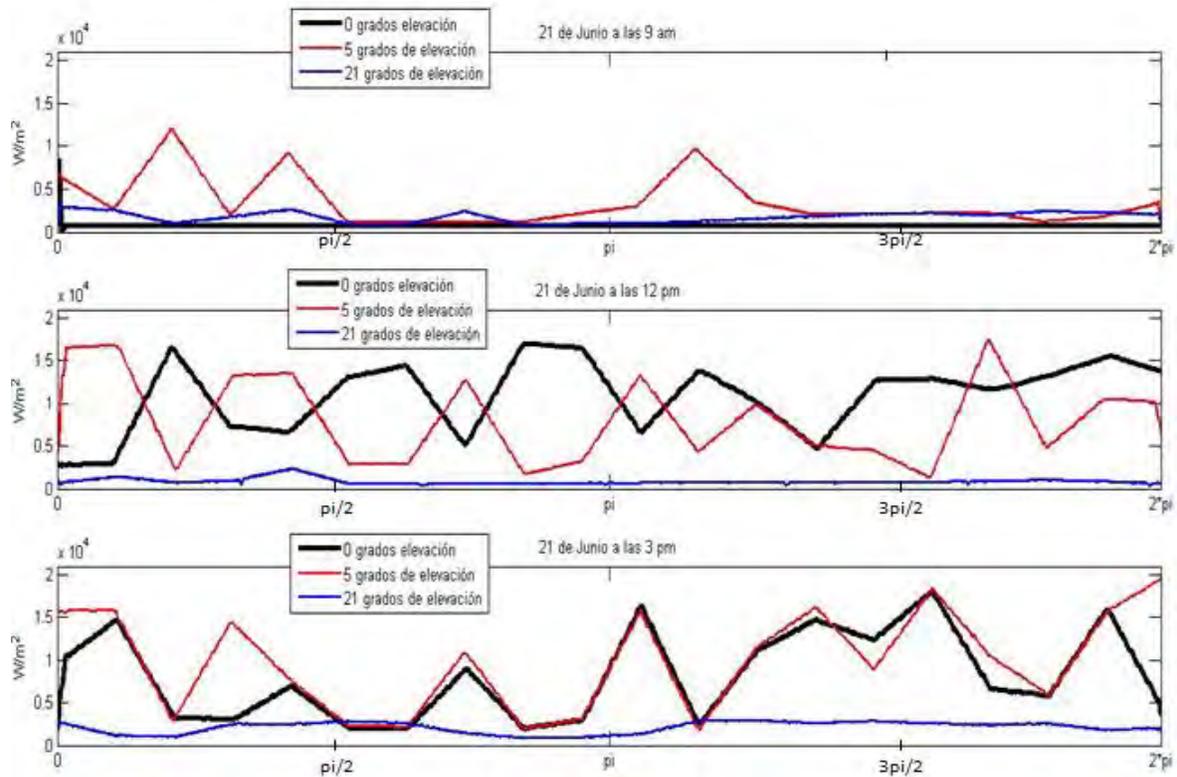


Figura 4.5. Distribución térmica del tubo receptor a lo largo del eje X, para el 21 de Junio a las 9 am, 12 pm y 3 pm respectivamente.

Para el 21 de Junio la más alta energía térmica obtenida es con un ángulo de inclinación de 5 grados pero no por mucho respecto a 0 grados. A las 9 am se tiene una mayor energía térmica a 5 grados respecto a 0 y 21 grados, pero a esa hora la radiación es menor que en las otras horas, por lo tanto, como en el caso anterior, implicaría un mayor esfuerzo para cuestiones de diseño por una diferencia poco significativa en la distribución térmica.

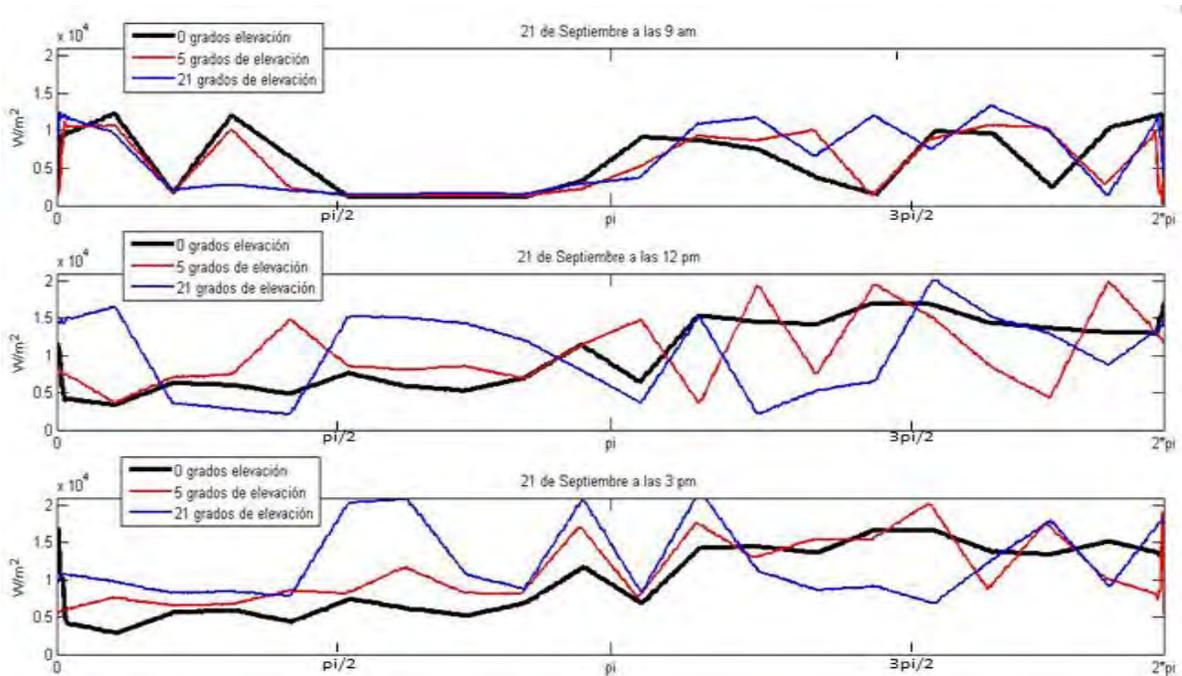


Figura 4.6. Distribución térmica del tubo receptor a lo largo del eje X, para el 21 de Septiembre a las 9 am, 12 pm y 3 pm respectivamente.

Para este caso, a 21 grados de elevación del sistema Fresnel resulta tenerse más energía térmica respecto a 0 y 5 grados de elevación, pero muy similar que en el caso del 21 de Marzo estas graficas mantienen una diferencia no tan significativa y nuevamente, intentar diseñar un sistema de elevación implica un mayor esfuerzo por una diferencia poco significativa.

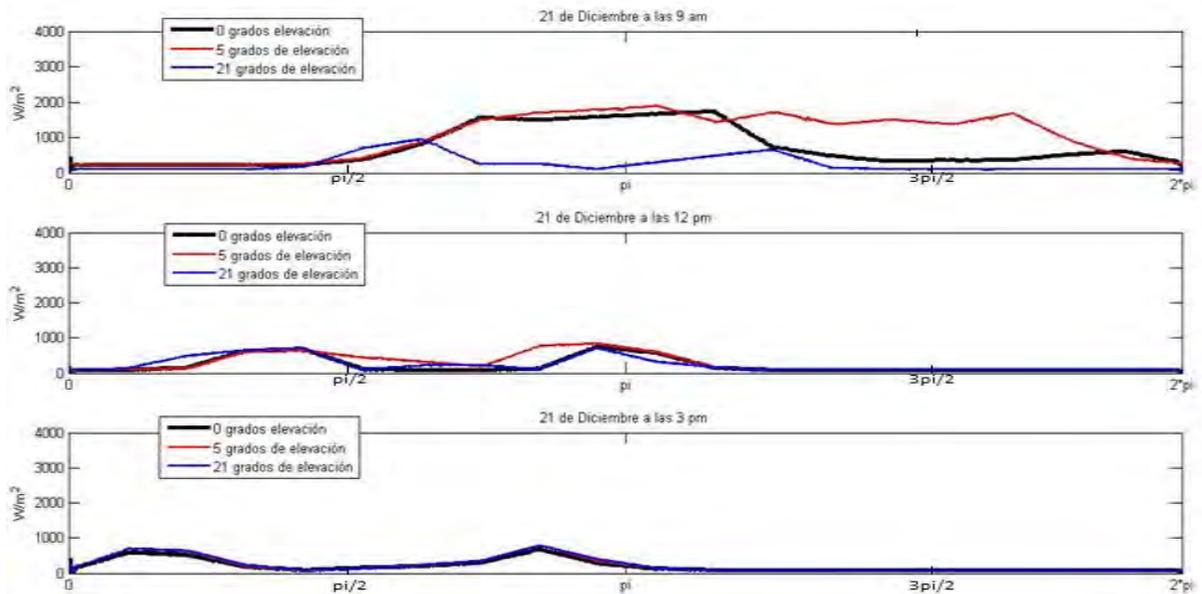


Figura 4.7. Distribución térmica del tubo receptor a lo largo del eje X, para el 21 de Diciembre a las 9 am, 12 pm y 3 pm respectivamente.

Para el caso del 21 de Diciembre la mejor y más alta distribución de energía térmica resulta ser con 5 grados de elevación, pero al igual que en los casos anteriores no resulta conveniente implementar un sistema de elevación por la poca diferencia respecto a 0 y 21 grados de elevación. Y en particular para este caso la cantidad de energía térmica es muy poca por lo que incluso, en un balance entre la energía eléctrica requerida para la operación del sistema y la energía térmica obtenida por este, y tal vez resulte tan viable la operación en esos días, por tal motivo se podría optar por ni siquiera operar el sistema en días cercanos al 21 de Diciembre en base a estos resultados.

En general las gráficas muestran que para algunos casos se obtiene una mejor distribución térmica con 5 o con 21 grados de elevación, pero como se ha mencionado, la diferencia que se obtendría al implementar un sistema de elevación sería muy poca a diferencia de no implementarlo, y por otro lado, que no se mencionó, está el aspecto económico, al implementar o integrar más cosas implica una elevación en costos de una futura construcción.

En general se recomienda que se opere el sistema cuando hay sido terminado, con un ángulo de incidencia solar igual o mayor a 30 grados, de lo contrario ocasionará el

efecto de sombreado entre espejos y la eficiencia caerá significativamente y se tendrá una distribución térmica ineficiente. Considerando las gráficas se recomienda para este sistema RFFL, que se mantenga una elevación del sistema de 0 grados ya que la diferencia de esta distribución con los otros ángulos de elevación no es tan significativa como para complicar tanto el diseño como la construcción de este sistema.

4.3 DISEÑO Y ANÁLISIS DEL SISTEMA MECÁNICO

El diseño final de cada una de las componentes del sistema RFFL así como del sistema mecánico completo se muestra en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10. Una vez que se diseñó el sistema por completo se realizó un análisis de elemento finito a la estructura para comprobar su estabilidad y resistencia, todo con la ayuda de l S ” software SolidWorks versión 2016.

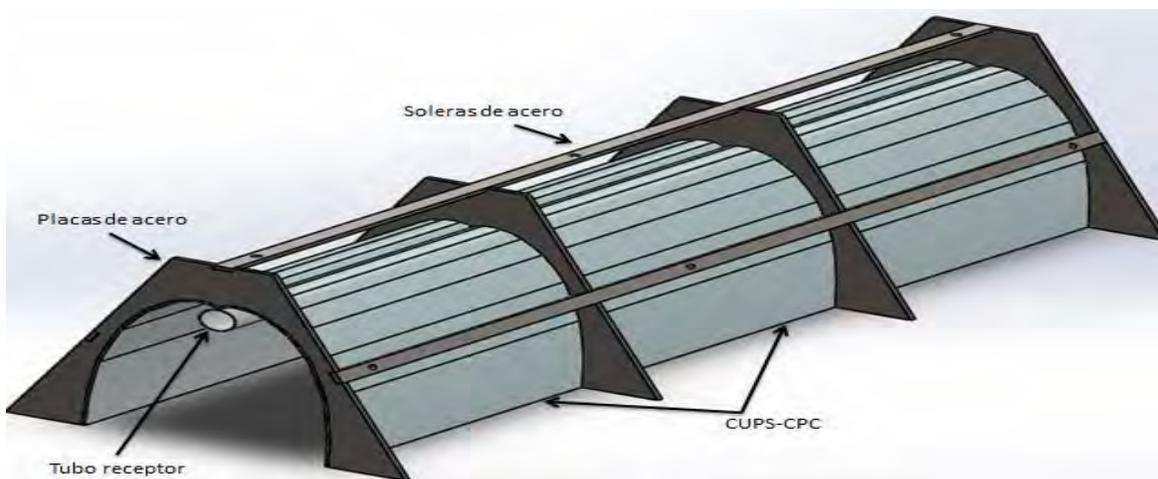


Figura 4.8. Diseño del solido con la descripción de los materiales del CPC.

En la figura 4.8 se muestra el diseño del tubo receptor y del sistema de concentración secundario tipo CPC. Como se puede ver, cuenta con una pequeña estructura a base de solera de acero para mantener la forma del CPC y para poder montarla y sujetarla a la estructura principal del sistema RFFL.

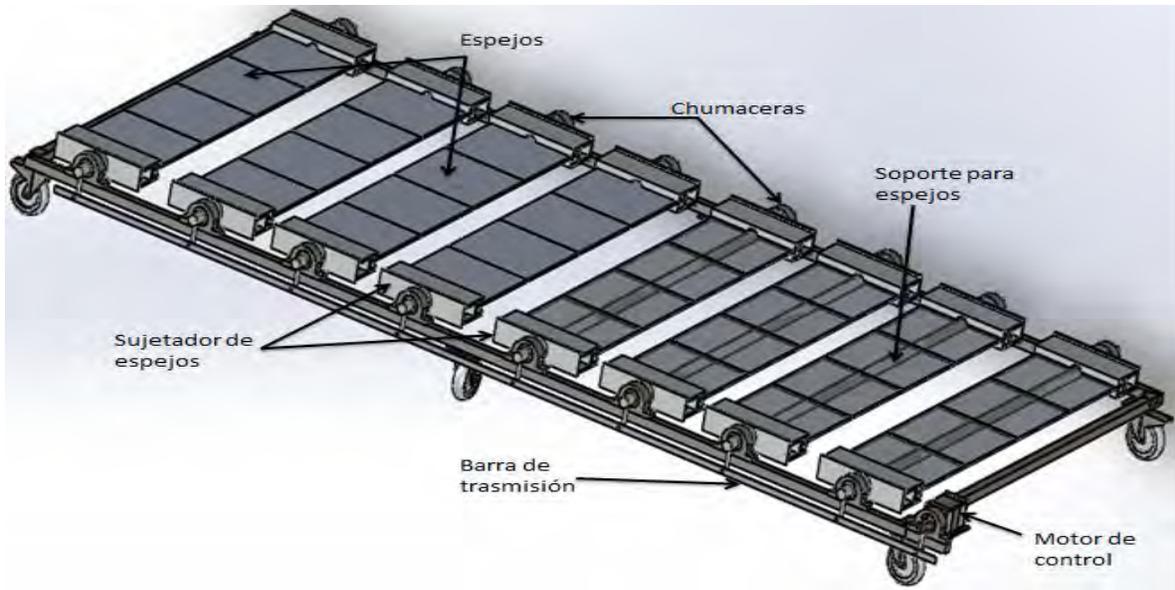


Figura 4.9. Ensamble y descripción de los componentes que integran el la base del sistema Fresnel de foco lineal.

En la figura 4.9 se muestra el montaje de los espejos sobre la base de la estructura así como el mecanismo de transmisión para el movimiento de los espejos respecto a la horizontal y poder reflejar los rayos solares (gracias a la solera de trasmisión).



Figura 4.10. Ensamble mecánico general todo el sistema Fresnel de foco lineal.

Para el análisis de elemento finito se consideró el peso ocasionado por el CPC, este peso fue obtenido del mismo SolidWorks al definir el material con el que se construye cada componente (opción: propiedades físicas del material). Para este caso, el peso del CPC junto con su estructura es de 27 kg. Para realizar el análisis de elemento finito de la estructura principal se consideró una fuerza de, $W = 264.87 \text{ N}$ redondeado a 265 N y de igual manera para los espejos (un peso total de los espejos de 51 kg) el cual tiene un valor equivalente a 500 N ($\text{N} = \text{Newton}$). Este análisis se realizó para dos casos, uno con 4 puntos fijos y otro con 6 puntos fijos.

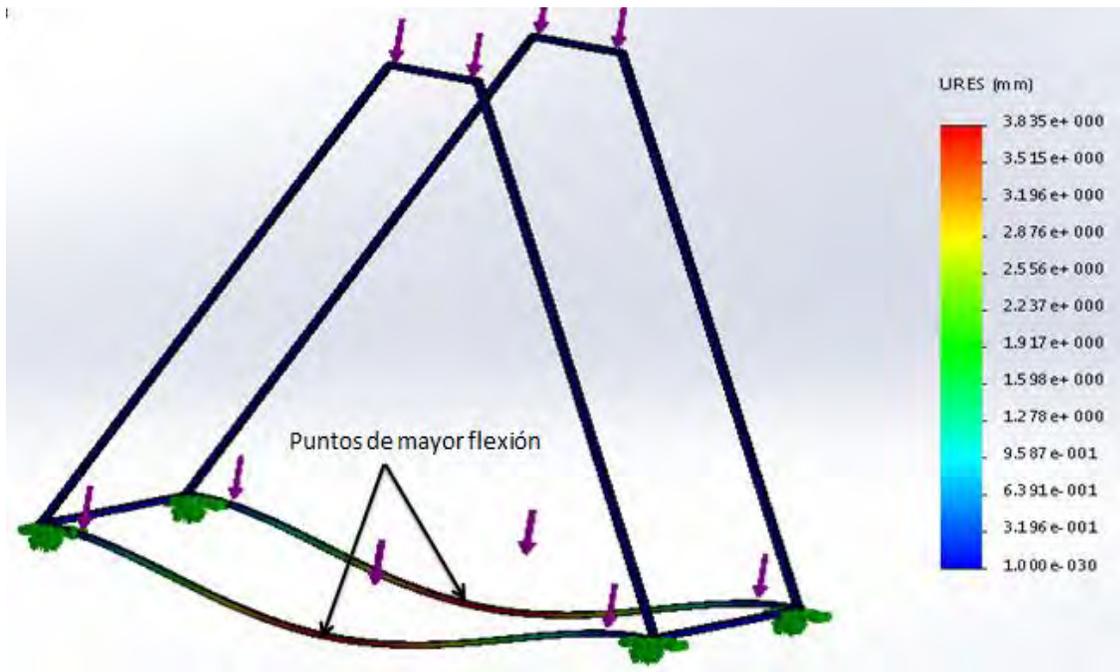


Figura 4.11. Análisis de elemento finito a la estructura del sistema Fresnel de foco lineal (4 puntos).

Para el análisis de elemento finito a la estructura del sistema en 4 puntos fijos se puede observar que, la flexión máxima que se obtendrá en los puntos de mayor flexión será de 3.84 mm , aproximadamente 4 mm lo que es un valor relativamente alto y por tal motivo no se pueden contemplar solo 4 puntos fijos al momento de una futura construcción de este sistema.

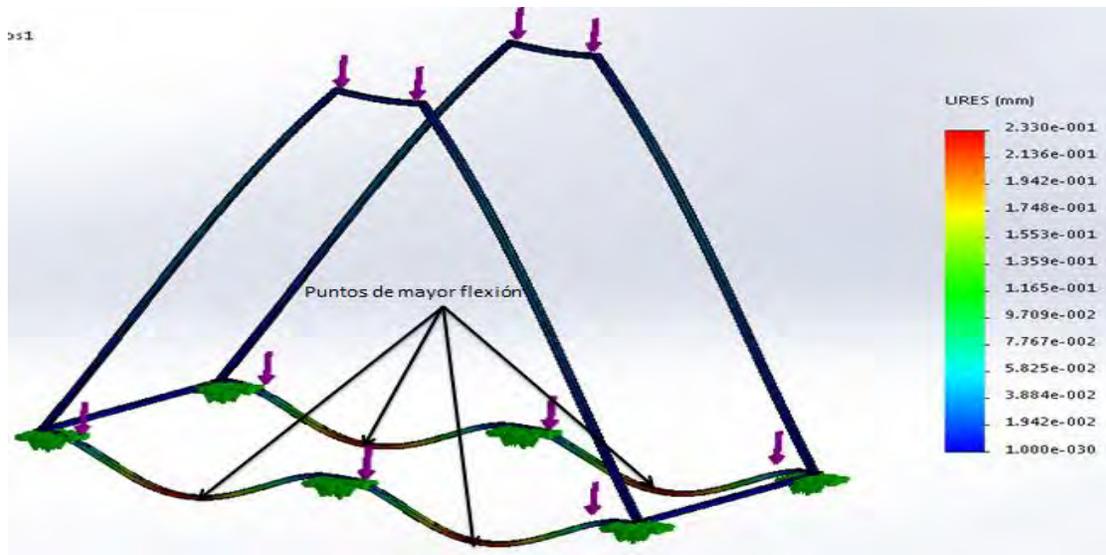


Figura 4.12. Análisis elemento finito a la estructura del sistema Fresnel de foco lineal (6 puntos).

Para el análisis de elemento finito a la estructura del sistema en 6 puntos fijos, se puede observar que, la flexión máxima que se obtendrá en los puntos de mayor flexión (vistos en la figura 4.12) será de 0.233 mm, lo que es un valor relativamente bajo y aceptable, de esta forma se estará soportando el peso con una mínima deformación la cual no afectará significativamente en la concentración de rayos solares.

El análisis de elemento finito fue realizado para los dos casos presentados anteriormente, porque al inicio solo se contempló 4 puntos fijos, pero solo se estimó el peso que se ejercería por parte de los espejos teniendo un resultado favorable, pero teniendo una estimación más real proporcionada por SolidWorks se obtuvo un resultado no favorable, el cual se presentó en el análisis de 4 puntos fijos.

4.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL

La parte electrónica del control automático del sistema considera que los sensores inicio y final de operación operan a 24VCD. Esto involucra el diseño electrónico para obtener esa señal y que se mantenga activada a un después de que se haya dejado de presionar cualquiera de los dos sensores, ya que estos actúan como un push button. Considerando que el ARDUINO solo recibe señales de 5VCD se debe realizar esta conversión en el momento en que se activan los sensores.

El circuito contempla dos relevadores para que, en el momento en el que se activa
 ” ñal y se mantenga activa hasta el momento en que
 el otro sensor es activado, cuando se queda activada la bobina del relevador esta simboliza
 la activación del sensor, esta señal mantendrá activado un transistor NPN (2N2222)
 switcheando 5 volts, los cuales son la señal que recibe el ARDUINO para contemplar que
 ha sido activado cualquier sensor.

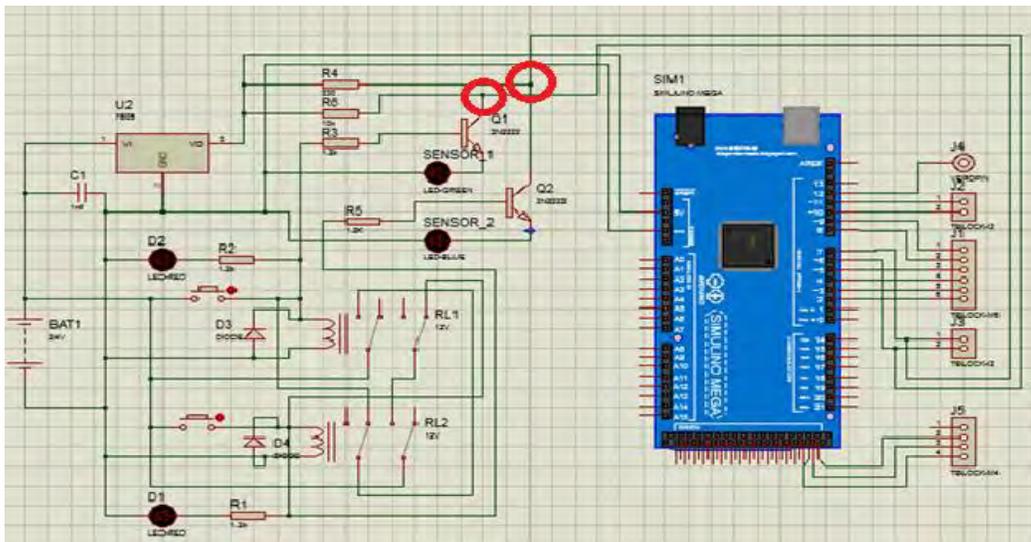


Figura 4.13. Ubicación de la señal emitida por lo sensores de inicio y final de carrera.

Los nodos que se encuentran en círculos rojos significan la señal de 5VCD que se activa cada vez que es activado algún sensor, ya sea el de inicio o el de final pero nunca ambos se activan al mismo tiempo. Los 5 volts se obtienen al conectar un LM7805 (regulador de voltaje a 5VCD) el cual alimenta al ARDUINO y emite los 5 volts cada vez que se activa algún sensor.

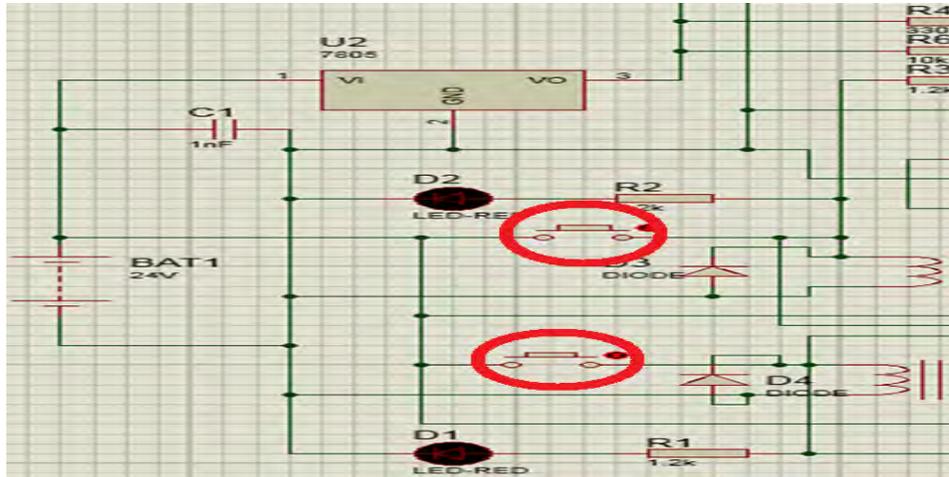


Figura 4.14. Pulsadores que simulan los sensores inicio y final de operación.

Los pulsadores mostrados en la figura 4.14 solo simulan el switcheo de los sensores inicio y final de carrera, por lo que en una futura construcción se tendrían que conectar en el lugar de estos (puede ser una conexión en paralelo con los push button), y las terminales del lado derecho del ARDUINO son para conectar el driver del motor, el GPS, el botón de activación de todo el sistema de control, y la señal de inicio y final de carrera.

Para realizar el control de la programación en ARDUINO, se debe traducir los siguientes diagramas de flujo para realizar la programación. La primera parte del diagrama visto en la figura 4.15 solo recomienda presionar el botón de inicio de todo el sistema de "start", ama que se ve en la figura 4.17. Esta parte se encarga de obtener los minutos que hay que sumar o restar a la hora reloj, gracias a la ecuación del tiempo y de las ecuaciones de las que depende, ya que el sistema estará operando con un reloj (dato del GPG) que marca la hora local, y hay que compensar los minutos para que los espejos siempre contemplen la máxima altura de elevación solar a medio día solar.

Teniendo la hora reloj a la que el sol está en su máxima altura también se pueden definir exactamente las horas de inicio y final de operación (restando y sumando 3 horas a la hora del $\frac{1}{2}$ día solar). Para hacer que el motor funcione se tiene que tener el sensor inicio de carrera activo y la hora que marca el reloj debe estar dentro del rango de hora inicio y final de operación, teniendo las horas exactas de inicio y final de operación solo se hace uso de la ecuación 3.17 para asignar los grados que el motor tiene que girar por minuto.

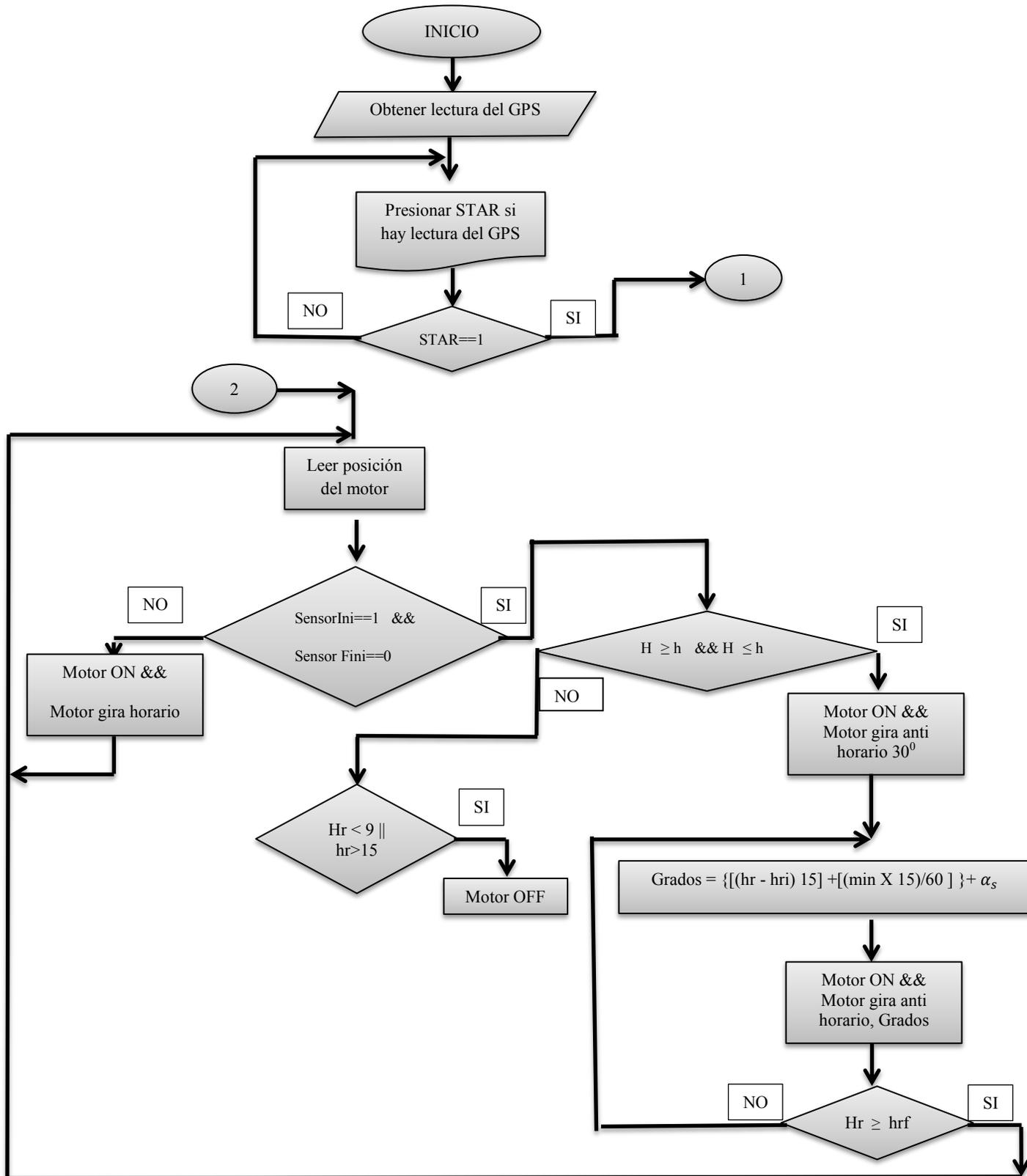


Figura 4.15. Diagrama de flujo para calcular la elevación del sol y posicionar el motor.

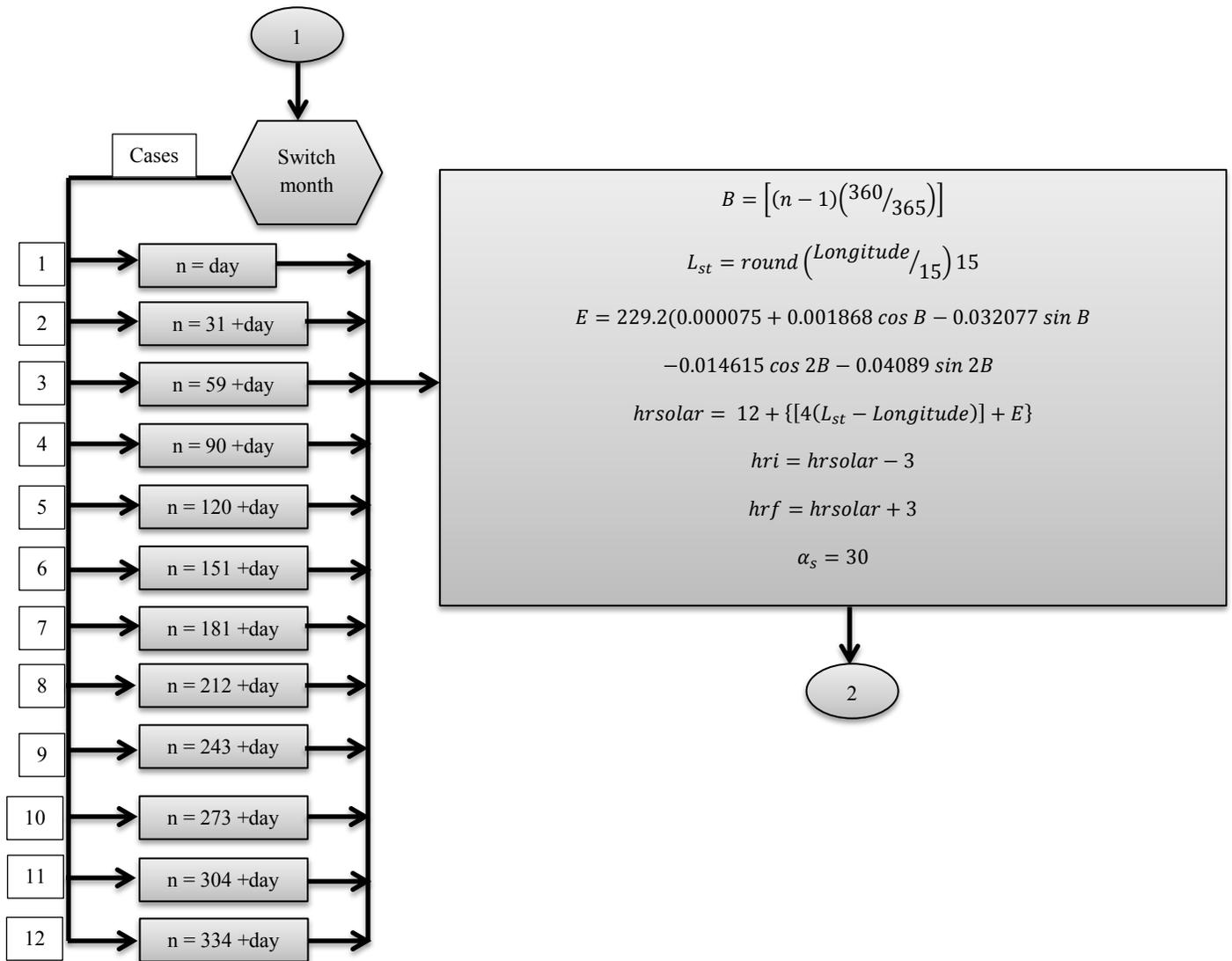


Figura 4.16. Diagrama de flujo para calcular la hora solar (1/2 día solar) y definir la hora de inicio y final de operación.

En el diagrama de flujo mostrado en la imagen 4.15 se pide primeramente presionar “STR” mencionando al usuario que presione el botón solo si se tiene lectura por parte del módulo GPS. En el diagrama de flujo de la imagen 4.16 se desarrollan las ecuaciones necesarias para calcular la hora solar y definir el horario reloj de operación del sistema. Este dato servirá para variar la cantidad de grados necesarios en los espejos con la ayuda de la ecuación 3.17 y realizar el proceso de la segunda parte del diagrama de flujo de la imagen 4.15.

Las simulaciones en Tonatiuh perfilan al sistema RFFL propuesto en este trabajo como una muy buena opción para obtener calor para procesos de mediana temperatura. El análisis de elemento finito estructural aplicado a la estructura de soporte para toda la integración de componentes, muestra una buena viabilidad en el diseño mecánico lo que, desde cierto punto, da el visto bueno para la construcción. Para la implementación del sistema de control se recomienda que se tenga mucho cuidado en las señales que se obtengan de los interruptores de 24 VCD porque el ARDUINO irremediablemente se dañaría.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIÓN

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar un sistema Reflector Fresnel de Foco Lineal (RFFL) para aplicaciones de calor solar para procesos industriales.

En este trabajo primero se dio un panorama de la demanda de combustibles derivados del petróleo para procesos cotidianos y necesarios en las actividades humanas diarias. Se mencionó una visión de sustituir el uso de estos combustibles con captación de energía solar. Los estudios de este trabajo se restringieron únicamente a México, por su potencial y áreas de oportunidad. Existen diferentes tecnologías para captar la energía solar, las cuales fueron mencionadas, sin embargo este trabajo se enfocó al estudio de un sistema RFFL. Buscando hacer énfasis en los conceptos y principios que envuelve la concentración de radiación solar, contemplando las consideraciones y requerimientos de un sistema RFFL.

En base a los requerimientos de energía térmica de un proceso industrial de mediana temperatura se estableció la metodología de diseño para dimensionar el sistema RFFL. Mediante las ecuaciones 3.9 a la 3.12 descritas en el capítulo 3 se logró obtener el perfil geométrico de un CUSP-CPC con especificaciones especiales de cada diseñador.

Con la descripción del modelo geométrico y las simulaciones en Tonatiuh se procedió al diseño mecánico de todo el sistema, para encontrar la configuración más sencilla y confiable. Para encontrar esta configuración se presentaron varias opciones con la ayuda de SolidWorks para finalmente obtener la mejor, y poder mostrarla en este trabajo, la cual cubre con todos los requisitos o exigencias que inicialmente se plantearon para este sistema. Este software de diseño CAD permitió simular cada componente que integra al sistema y contemplar que estos sean de fácil adquisición o de una relativa sencilla fabricación, para una futura construcción. Por último se contempló un sistema de seguimiento aparente del sol en un solo eje, para proponer una programación de control relativamente sencilla al igual que una futura automatización.

Para demostrar que la configuración seleccionada de todo el sistema Fresnel mantiene un buen desempeño, se realizaron varias simulaciones en Tonatiuh para demostrar que las ecuaciones descritas para este tipo de colector resultaran ser las adecuadas, así

mismo observando que los ángulos de incidencia solar en las horas de operación, los espejos no muestran sombreado entre ellos y mantienen una buena eficiencia óptica. También se realizaron simulaciones térmicas al receptor para corroborar que el diseño óptico es la mejor opción encontrada, simulando los equinoccios y solsticios a las 9 am, 12 pm y 3 pm (horario de operación) y observar la eficiencia térmica del receptor en esos días. Consiguiendo las gráficas de distribución térmica del receptor y poder decir que el sistema mantiene una buena eficiencia casi durante todo un año (esto por la excepción del 21 de Diciembre). Finalmente se realizó un análisis de elemento finito a la estructura, para validar y verificar si esta era una buena opción para soportar todos los componentes que ejercerían un determinado peso sobre la misma, obteniendo resultados favorables ya que las deformaciones máximas mantienen valores muy bajos los cuales no afectarían a la estructura. Por último, cabe mencionar que este proyecto tiene la autorización para ser construido gracias a los resultados mencionados y con la ayuda de los planos de construcción.

Este trabajo presenta la validación y verificación de diseño que servirán para una futura construcción de tecnologías de concentración solar, y en particular en el desarrollo de tecnología RFFL ya que es una de las menos estudiadas respecto a las demás tecnologías de concentración solar.

Este trabajo de tesis resulta ser pionero dentro de las instalaciones del CIO, por lo que los resultados presentados en este trabajo sean considerados en futuros diseños y/o desarrollos de sistemas RFFL u otros sistemas similares, ya que algunas de las actividades aquí reportadas pueden ayudar en otro tipo de colectores solares. El CIO comienza a realizar sus primeras investigaciones en colectores solares, teniendo un proyecto a corto plazo de la construcción de un hangar para la construcción y pruebas de tecnologías que usen la energía solar, es por ello la importancia de este trabajo de tesis.

Encontrar alternativas de nuevas tecnologías que mantengan la misma e inclusive mejor eficiencia del uso de energía y que a su vez provoquen el más mínimo impacto al medioambiente. Presentando las simulaciones necesarias para apreciar que este tipo de concentrador es una buena opción tanto en aspectos ambientales como económicos. Las pruebas hechas en distintos Software muestran que es una buena opción para generar calor

en procesos industriales, y de esta manera se contribuye con diseños para un futuro prototipo concentrador solar RFFL propiciando el desarrollo de este tipo de tecnologías.

Sin duda el desarrollo de este tipo de tecnologías representa una gran ayuda para futuras investigaciones, y la construcción de este prototipo nos dará una clara perspectiva en la rentabilidad del mismo y demostrar que las energías limpias en especial la solar, son una de las mejores opciones para continuar con el desarrollo de nuestras sociedades sin afectar el medio ambiente como lo hemos hecho hasta ahora.

REFERENCIAS

- [1] Duffie J.A. and Beckman W.A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition. Wiley Interscience, New York, USA.
- [2] Hecht. (2000). Óptica Tercera Edición. Madrid: Ribera de Loria.
- [3] S.A Kalogirou. (2016). Solar Energy Engineering Processes and Systems, Second Edition. San Diego: Academic Press.
- [4] Negi B S, Mathur S S, et Kandpal T C. Optical and thermal performance evaluation of linear Fresnel reflector solar concentrator. Solar and Wind Technology; 1989.
- [5] Bliss R and. Whillier The derivation of several, plate efficiency factors, useful in the design of the flat plat solar heat collector. Solar Energy; 1959.
- [6] Keith Lovegrove and Wes Stein. (2012). Concentrating Solar Power Technology. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited.
- [7] ARI RABL. (1985). Active Solar Collectors and Their Applications. New York : Oxford University Press.
- [8] C.J Winter, R.L Sizmann and L.L Vant-Hull (2016). Solar Power Plants. Lexington: KY.
- [9] W.T Welford and R. Winston. (1989). High Collection Nonimaging Optics. San Diego, California: Academic Press.
- [10] HoSung Lee. (2010). Thermal Design. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [11] Robert H. Bishop. (2008). Mechatronic system control, logic and data acquisition. Texas U.S.A: Taylor & Francis Group.
- [12] http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000100013
- [13] https://guzlop-editoras.com/web_des/ener01/enersolar/pld0206.pdf
- [14] http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-3532010000300014

- [15] Desideri U, Campana PE. Analysis and comparison between a concentrating solar and a photovoltaic power plant. *Appl Energy* 2013;113:422–33.
- [16] Price H, et al. Advances in parabolic trough solar power technology. *J SolEnergy Eng* 2002;124(2):109–25.
- [17] Kousksou T, et al. Energy storage: applications and challenges. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2014;120:59–80.
- [18] Pitz-Paal R. Chapter 19 - solar energy - concentrating solar power. *Future Energy* 2014:405-31. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-099424-6.00019-3>.
- [19] Janet L. Sawin, Kristin Seyboth, Freyr Sverrisson FA, Adam Brown, Bärbel Epp, Anna Leidreiter, Christine Lins, Hannah E. Murdock, et al. *Renewables 2016 global status report*. Paris; 2016. [doi: ISBN 978-3-9818107-0-7].
- [20] Jones GG, Bouamane L. *Power from sunshine: a business history of solar energy*. Harvard Bus Sch Work Pap;No. 12-105; 2012.
- [21] Mehos M, et al. An assessment of the net value of CSP systems integrated with thermal energy storage. *Energy Proc* 2014;69:2060–71.
- [22] Rovira A, et al. Analysis and comparison of integrated solar combined cycles using parabolic troughs and linear fresnel reflectors as concentrating systems. *Appl Energy* 2016;162:990–1220.
- [23] Qiu Y, et al. Study on optical and thermal performance of a linear fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods. *Appl Energy* 2015;146:162–73.
- [24] Morin G, et al. Comparison of linear fresnel and parabolic trough collector power plants. *Sol Energy* 2012;86.
- [25] Reddy KS, Prasad GSC, Sundararajan T. Optimization of solar linear fresnel reflectors system with secondary concentrator for uniform flux distribution over absorber tube. *Indian Institute of Technology Madras: Solar Energy*; 2016.

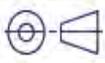
- [26] Mathur SS, Kandpal TC, Negi BS. Optical design and concentration characteristics of linear Fresnel reflector solar concentrators – I mirror elements of varying width. *Energy Convers Manage* 1991;31(3):205–19.
- [27] Zhu G. Development of an analytical optical method for linear Fresnel collectors. *Sol Energy* 2013;94.
- [28] Shukla R, Sumathy K, Erickson P, Gong J. Recent advances in the solar water heating systems_a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;19:173–90.
- [29] Souliotis M, Tripanagnostopoulos Y. Study of the distribution of the absorbed solar radiation on the performance of a CPC type IC SWater heater. *Renew Energy* 2008;33:846–58.
- [30] S. Flores Larsen, M. Altamirano, A. Hernández. Heat loss of a trapezoidal cavity absorber for a linear Fresnel reflecting solar concentrator; 2011. P.198 -206.
- [31] ousazadeh H, Keyhani A, Javadi A, Mobli H, Abrinia K, Sharifi A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13:1800–18.
- [32] R. Leutz, A. Suzuki. (2001). *Nonimaging Fresnel Lenses*. Germany: Springer-Verlag.

ANEXOS

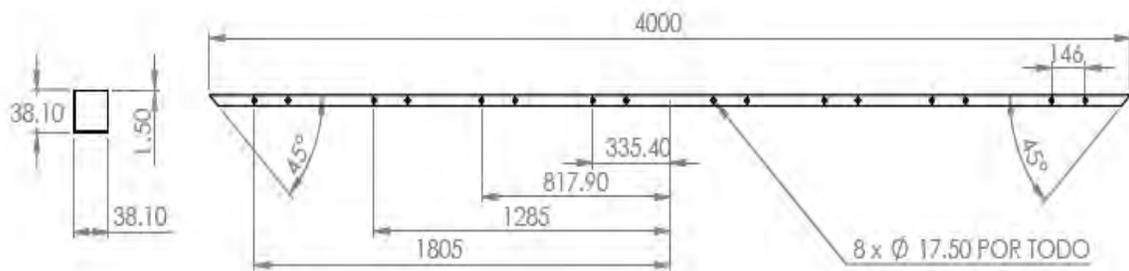
ANEXO A

A continuación se presentan los planos de los elementos más relevantes para la construcción estructural del sistema RFFL. Cabe mencionar que en el ensamble general del sistema se contempla un supuesto motor a utilizar, y supuesto ya que este puede cambiar según los desarrolladores del control automático.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Perfiles		2
2	Perfiles		2
3	Perfiles		4
4	Perfiles		2
5	Perfiles		1
6	Angulo		4
7	Pieza?		1
8	CPC_ENSAM		1
9	Agarre_de_espejos		16
10	Ensamble_Motor_apasos		1
12	Soporte_para_espejos		8
11	Espejo		32
13	Solera_trasmision		1

Indicaciones generales		Indicaciones individuales		Fecha de creación:		Diseño: German Godinez		 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.
Material:		Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario		22/02/2018		Dibujo: German Godinez		
Acabado:		Tolerancia : ± 0.04				Maquinado:		
						Aprobación:		Escala 1:32

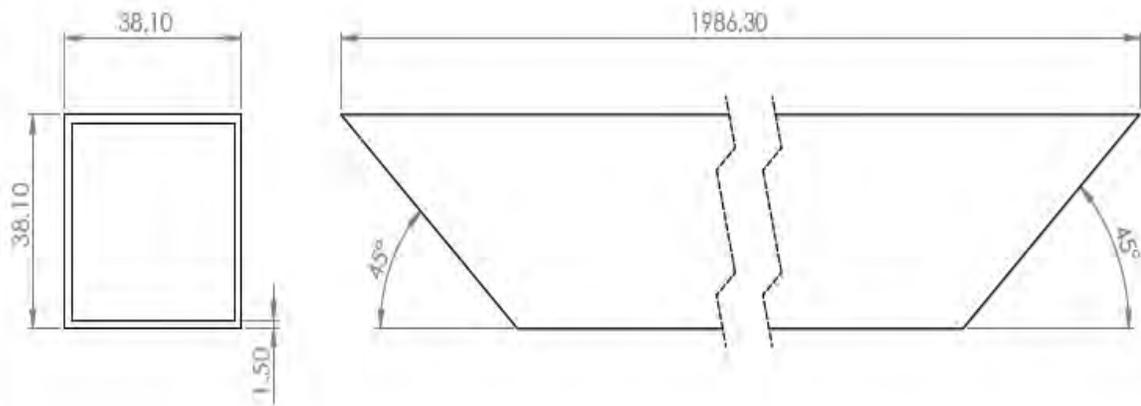
Proyecto : RFFL PROYECTO_TESIS	
Número de pieza : Ensamble General	
Página : 1/14	



Proyecto : PROYECTO_TESIS

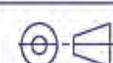
Número de pieza : Perfil_1

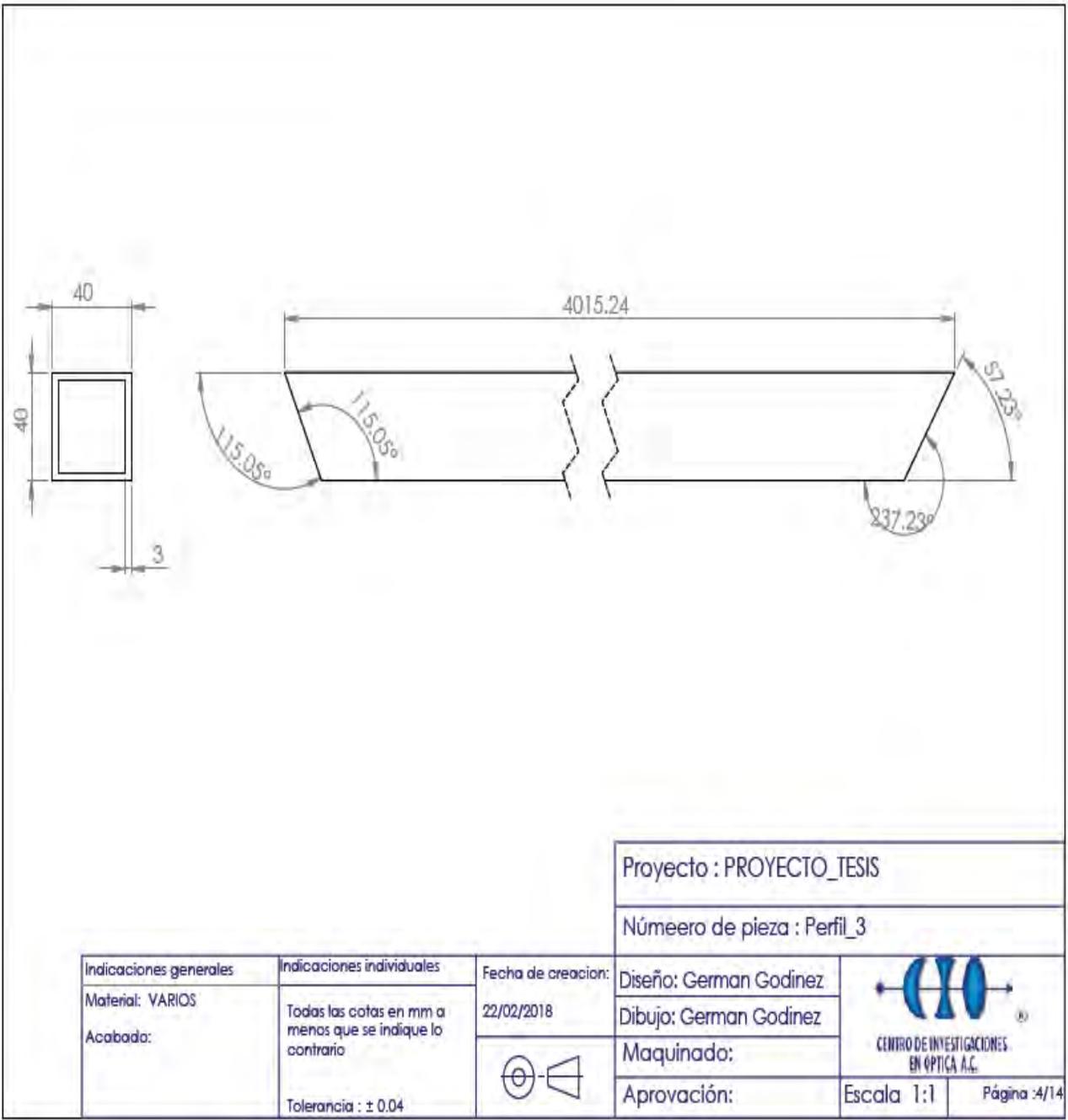
Indicaciones generales Material: VARIOS Acabado:	Indicaciones individuales Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario Tolerancia : ± 0.04	Fecha de creación:	Diseño: German Godínez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.
		22/02/2018	Dibujo: German Godínez	
			Maquinado:	Escala 1:1
			Aprobación:	



Proyecto :PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Perfil_2

Indicaciones generales	Indicaciones individuales	Fecha de creación:	Diseño: German Godínez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.
		Material: VARIOS	22/02/2018	
Acabado:	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario		Maquinado:	Escala 1:1
	Tolerancia : ± 0.04		Aprovación:	

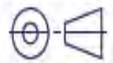


Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Perfil_3

Indicaciones generales	Indicaciones individuales
Material: VARIOS	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario
Acabado:	Tolerancia : ± 0.04

Fecha de creacion:
22/02/2018

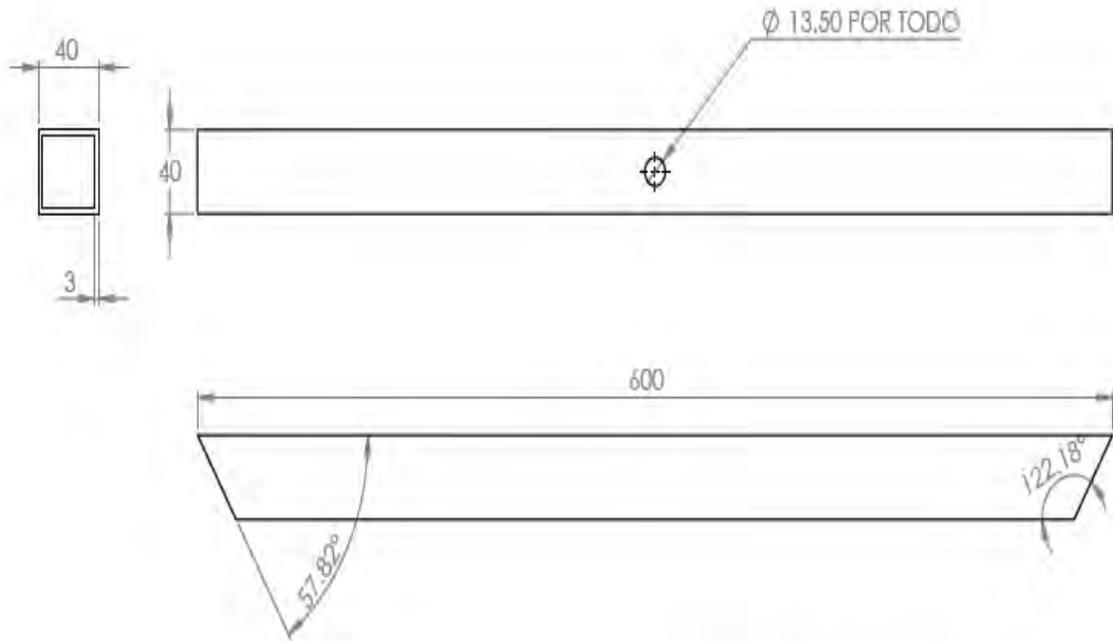


Diseño: German Godinez
Dibujo: German Godinez
Maquinado:
Aprovación:



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA A.G.

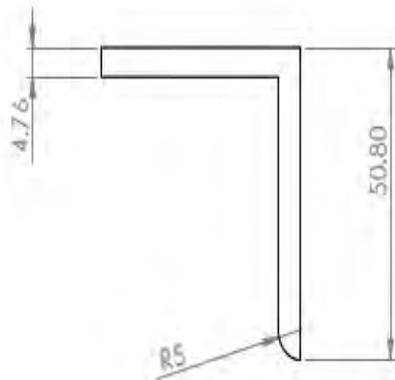
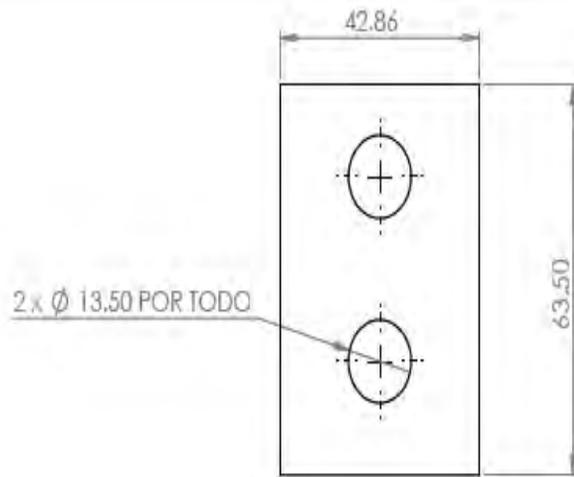
Escala 1:1 Página 4/14



Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Perfil_4

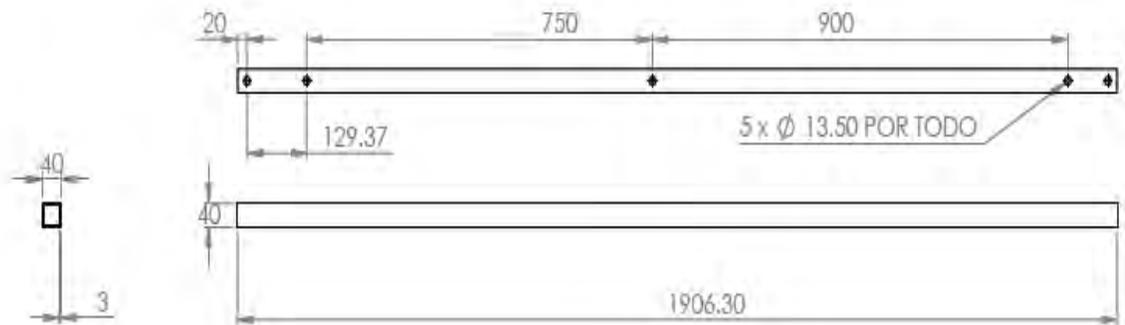
Indicaciones generales Material: VARIOS Acabado:	Indicaciones individuales Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario Tolerancia : ± 0.04	Fecha de creación: 22/02/2018	Diseño: German Godínez Dibujo: German Godínez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.
			Maquinado: Aprobación:	



Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Angulo

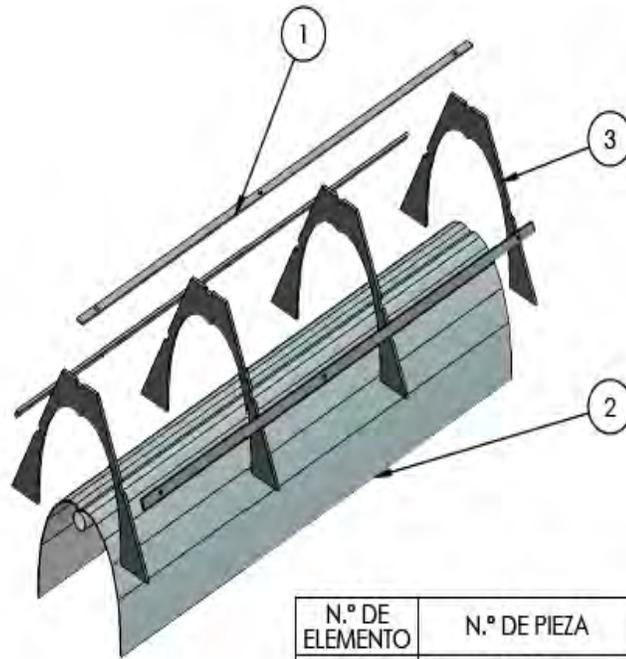
Indicaciones generales	Indicaciones individuales	Fecha de creación:	Diseño: German Godínez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.
Materia:	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario	22/02/2018	Dibujo: German Godínez	
Acabado:			Maquinado:	
	Tolerancia : ± 0.04		Aprobación:	Escala 1:1 Página :6/14



Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Soporte_CPC

Indicaciones generales Material: VARIOS Acabado:	Indicaciones individuales Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario Tolerancia : ± 0.04	Fecha de creación: 22/02/2018	Diseño: German Godínez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.
			Dibujo: German Godínez	
			Maquinado:	
			Aprobación:	Escala 1:20 Página :7/14

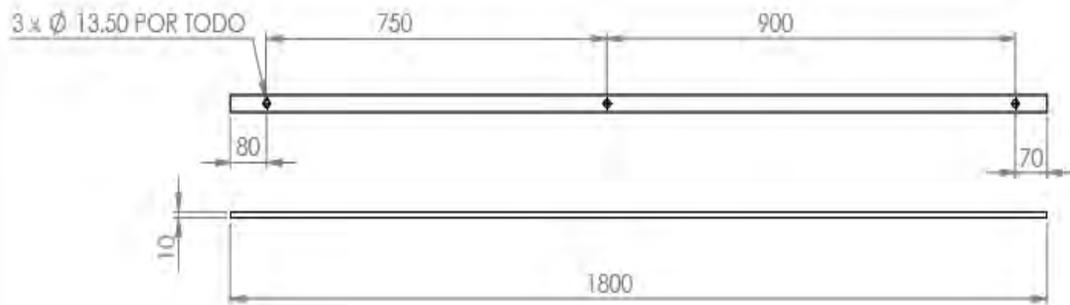


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Agarre_moldura_cpc		3
2	CPC		1
3	Sopote_moldura_cpc		8

Proyecto : PROYECTO_TESIS

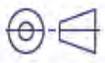
Número de pieza : Ensamble_CPC

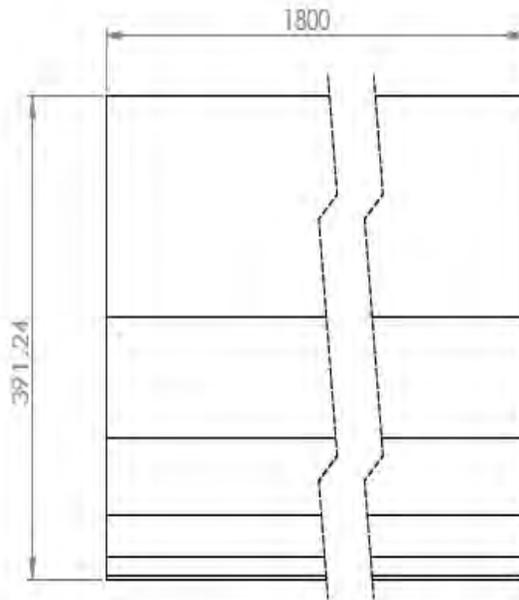
Indicaciones generales	Indicaciones individuales	Fecha de creación:	Diseño: German Godínez		 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.
Material:	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario	22/02/2018	Dibujo: German Godínez		
Acabado:			Maquinado:		
	Tolerancia : ± 0.04		Aprobación:		Escala 1:1
					Página :8/14



Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Solera_CPC

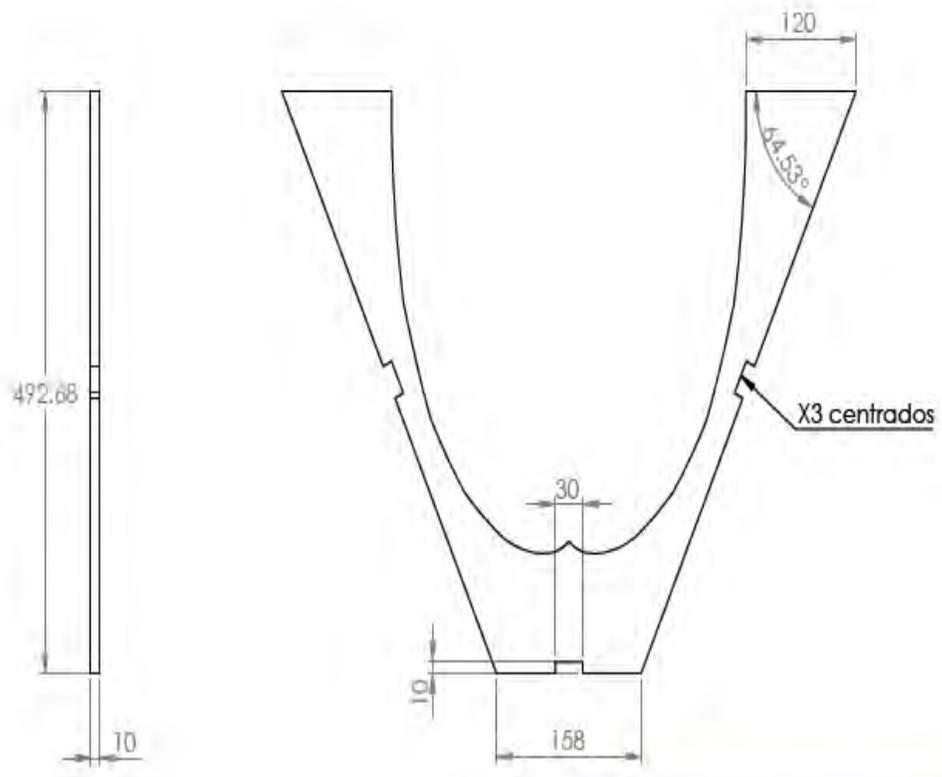
Indicaciones generales	Indicaciones individuales	Fecha de creación:	Diseño: German Godínez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.
Material: Acabado:	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario	22/02/2018	Dibujo: German Godínez	
	Tolerancia : ± 0.04		Maquinado:	
			Aprobación:	Escala 1:20



Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : CPC

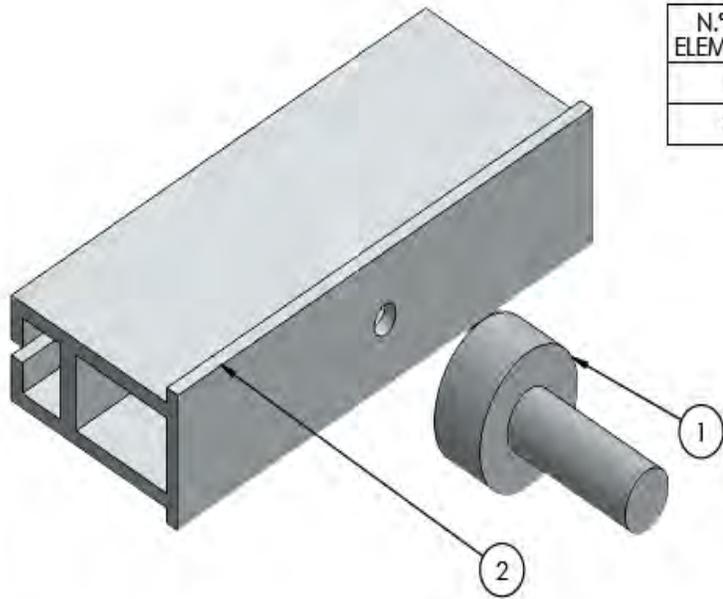
Indicaciones generales Material: Acabado:	Indicaciones individuales	Fecha de creación:	Diseño: German Godínez	
	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario	22/02/2018	Dibujo: German Godínez	
Tolerancia : ± 0.04			Maquinado:	
			Aprobación:	Escala 1:1 Página :10/14



Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Moldura_CPC

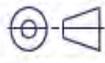
Indicaciones generales	Indicaciones individuales	Fecha de creación:	Diseño: German Godínez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.G.
		22/02/2018	Dibujo: German Godínez	
Material:	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario		Maquinado:	Escala 1:5
Acabado:			Aprobación:	
Tolerancia : ± 0.04				

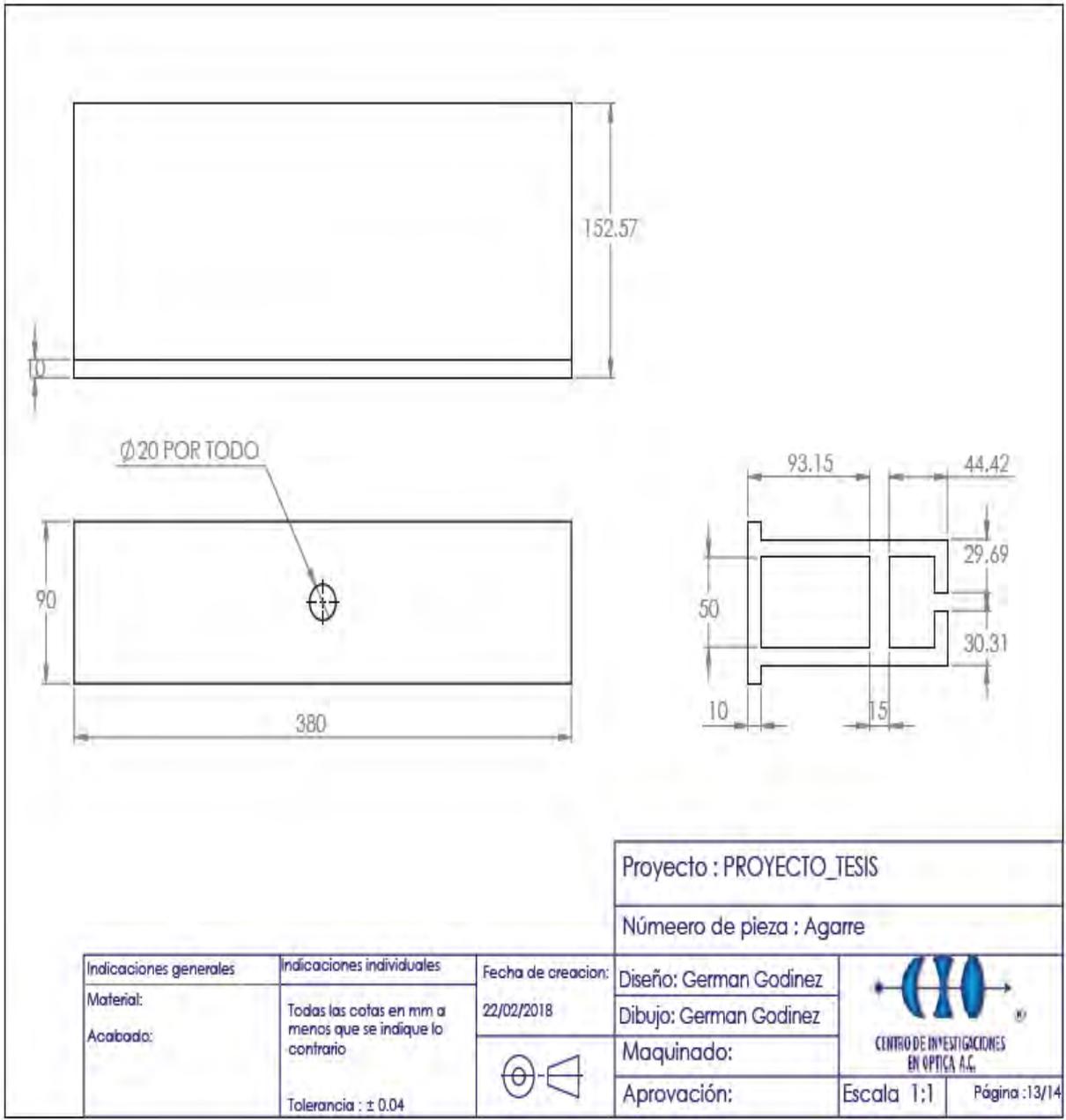


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Mango		1
2	Agarre		1

Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Agarre_de_espejos

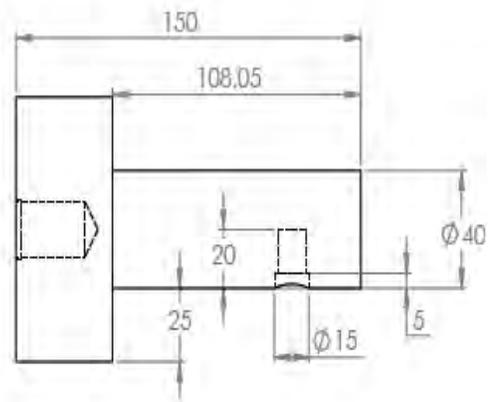
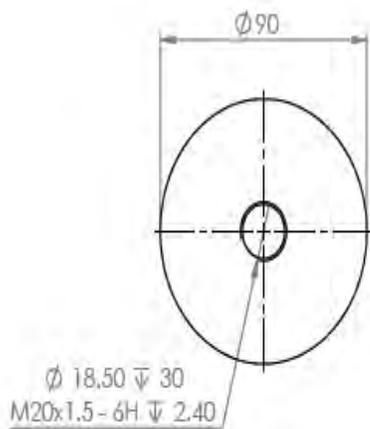
Indicaciones generales	Indicaciones individuales	Fecha de creación: 22/02/2018	Diseño: German Godinez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA A.C.
			Dibujo: German Godinez	
Material:	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario		Maquinado:	Escala 1:1
Acabado:	Tolerancia : ± 0.04		Aprobación:	



Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Agarre

Indicaciones generales	Indicaciones individuales	Fecha de creación:	Diseño: German Godínez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.	
Material:	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario	22/02/2018	Dibujo: German Godínez		
Acabado:			Maquinado:		
			Aprobación:	Escala 1:1	Página :13/14



Proyecto : PROYECTO_TESIS

Número de pieza : Mango

Indicaciones generales	Indicaciones individuales	Fecha de creacion:	Diseño: German Godínez	 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA A.C.
Material:	Todas las cotas en mm a menos que se indique lo contrario	22/02/2018	Dibujo: German Godínez	
Acabado:	Tolerancia : ± 0.04		Maquinado:	Escala 1:2
			Aprobación:	Página :14/14

ANEXO B

En este anexo se presenta el código realizado en Matlab para obtener el perfil del CPC, aplicando las ecuaciones vistas en el capítulo 3 para el dimensionamiento de este tipo de concentrador, solo se tiene que proporcionar los parámetros que el mismo código solicita.. Mencionando que este código sirve para obtener el perfil de cualquier CPC con parámetros diferentes.

```
%% CÓDIGO PARA DIMENCIONAR EL PERFIL DE CUALQUIER CPC
clc; clear all; close all;

r=input('ingrese el diámetro del receptor (en cm): ');    %diámetro del
circulo
a0=input('ingrese el valor del factor de concentracion deseado: ');
%Concentración geométrica
r=r/2;                %Se divide entre 2 el diámetro ya que se
utiliza el radio en las ecuaciones
a0=a0/1.1;            %factor de truncamiento de casi un 50%
a1=asind(1/a0);      %Semiángulo de aceptación mínimo (grados)
a=(a1*pi)/180;       %Semiángulo de aceptación mínimo (radianes)

% PARTE PARA REALIZAR EL CIRCULO DEL RECEPTOR
t1=0:pi/30:2*pi;    %Solo de define de 0 a
360 grados
x2=r*cos(t1); y2=r*sin(t1);    %Conversión a coordenadas
cartecianas
plot(x2,y2,'k','linewidth',2.2);axis 'square'    %Ploteo del circulo
receptor
hold on

%grid on            %Si se decea visualizar en cuadrícula

% PARTE PARA GRAFICAR LA INVOLUTA
te=0:0.001:(a+(pi/2));    %Variación de teta, tetac <= a + pi/2
```

```

P=(r.*te); %Ecuación para la involuta
x=(r.*sin(te)-P.*cos(te)); %Ecuación para encontrar lo puntos en
X
y=-r.*cos(te)-P.*sin(te); %Ecuación para encontrar lo puntos en
Y
plot(x,y,'k','linewidth',2.2); %Ploteo de la primera involuta
hold on
plot(-x,y,'k','linewidth',2.2); %Ploteo de la segunda involuta
hold on

% PARTE PARA GRAFICAR LA SEGUNDA PARTE DE LA PARÁBOLA
t1=(a+(pi/2)):0.001:(((3*pi)/2)-a); %Variación de teta,
a+pi/2 <= teta <= 3pi/2-a
P1=r*((t1+a+(pi/2)-cos(t1-a))./(1+sin(t1-a))); %Ecuación para la
parabola
x1=(r.*sin(t1)-P1.*cos(t1)); %Ecuación para encontrar
lo puntos en X
y1=-r.*cos(t1)-P1.*sin(t1); %Ecuación para encontrar
lo puntos en Y
plot(x1,y1,'k','linewidth',2.2); %Plteo de la primera
parabola
hold on
plot(-x1,y1,'k','linewidth',2.2); %Ploteo de la segunda
parabola

axis([-max(x1)-3 max(x1)+3 (min(y))-3 max(y1)+3]) %Margenes en X,Y
que dependen del tamaño del CPC

```

ANEXO C

En este anexo se muestra el primer código de control realizado en la plataforma de R U INO. E ”, modificado acorde a las eventualidades que puedan surgir.

```
#include <SoftwareSerial.h> //incluimos SoftwareSerial

#include <TinyGPS.h> //incluimos TinyGPS (librería para GPS)

#include <LiquidCrystal.h> //Librería para la LCD (16X2)

LiquidCrystal lcd(9, 8, 5, 4, 3, 2);

int hr;

int Vel = 150; //Velocidad en microsegundos para el motor a pasos

int i = 30; //Variable para el incremento de paso por paso del motor

int Pull = 24; //Salida al Pull del driver

int Dir = 23; //Salida al Dir del driver

int Enbl = 22; //Salida al Enbl del driver

int w=0; //Variable para cálculo de la hora con signo positivo o negativo

float S=0.0; //Variable para la declinación del sol

float Oz=0.0; //Variable para el ángulo zenit

float as=0.0; //variable para el ángulo de elevación (complemento del ángulo zenit)

int w2=0;

float S2=0.0; //Variable para la declinación del sol a 1// día solar

float Oz2=0.0; //Variable para el ángulo zenit a 1/2 día solar

float as2=0.0; //variable para el ángulo de elevación (complemento del ángulo zenit) a 1/2 día solar

int Lst=0; //Variable para calcular la longitud standar
```

```

int n=0;          //Variable para los días julianos

float B=0.0;     //Variable para B para calcular la declinación solar

float Et=0.0;    //Variable para la ecuación del tiempo

float error=0.0; //Error para restar a la hora reloj

float hsolar=0.0; //Variable para obtener la hora solar

float hrinicio=0.0; //Hora reloj de inicio compensada con la hora solar

float hrfinal=0.0; //Hora reloj de final compensada con la hora solar

float hrelojini=0.0; //Variable para tener la hora reloj con decimas de minutos al inicio

float hrelojfini=0.0; //Variable para tener la hora reloj con decimas de minutos al final

int inicio = 6; // Sensor inicio de carrera

int final = 7; // Sensor final de carrera

int star = 12; // Botón en la entrada digital 12 para iniciar

int estadostar = 0; // estado del botón de inicio del programa

int encoder = A0; // Entada analog 0 para encoder

int encodervalue = 0; // Leer la posición del ecoder

int posicion = 0; // Variable para asignar número de pasos

int inicio1 = 0; // Variable para ver si sensor inicio de carrera esta o no activado

int final1 = 0; // Variable para ver si sensor final de carrera esta o no activado

float grados = 0.0; // Variabel para mover x número de grados

TinyGPS gps;//Declaramos el objeto gps

SoftwareSerial serialgps(11,10);//Declaramos el pin 11 Tx y 10 Rx

//Declaramos la variables para la obtención de datos

int year;

byte month, day, hour, minute, second, hundredths;

```

```

unsigned long chars;

unsigned short sentences, failed_checksum;

void setup()

{

pinMode(Pull,OUTPUT); //Se declara Pull como salida (pulsos para el driver para mover el motor)

pinMode(Dir,OUTPUT); //Se declara el Dir como salida (dirección)

pinMode(Enbl,OUTPUT); //Se declara el Enbl con salida (ensendido del dirver desde Arduino)

digitalWrite(Pull, HIGH); // para generar los pulsos

//digitalWrite(Dir, LOW); // invierte la direccion

//digitalWrite(Enbl, LOW); //high = apagado, Low = funciona

pinMode(inicio,INPUT); //Se declara el sensor inicio de carrera como entrada (pin 6)

pinMode(final,INPUT); //Se declara el sensor final de carrera como entrada (pin 7)

pinMode(star,INPUT); //Se declara el botón star como entrada para que se ejecute todo el control (pin 12)

lcd.begin(16, 2);

Serial.begin(115200);//Iniciamos el puerto serie

serialgps.begin(9600);//Iniciamos el puerto serie del gps

//Imprimimos:

Serial.println("");

Serial.println("GPS GY-GPS6MV2 Leantec");

Serial.println(" ---Buscando senal--- ");

Serial.println("");

}

void loop()

```

```

{

while(serialgps.available())

{

int c = serialgps.read();

if(gps.encode(c))

{

float latitude, longitude;

gps.f_get_position(&latitude, &longitude);

Serial.print("Latitud/Longitud: ");

Serial.print(latitude,5);

Serial.print(", ");

Serial.println(longitude,5);

gps.crack_datetime(&year,&month,&day,&hour,&minute,&second,&hundredths);

Serial.print("Fecha: "); Serial.print(day, DEC); Serial.print("/");

Serial.print(month, DEC); Serial.print("/"); Serial.print(year);

Serial.print(" Hora: "); Serial.print(hour, DEC); Serial.print(":");

Serial.print(minute, DEC); Serial.print(":"); Serial.print(second, DEC);

Serial.print("."); Serial.println(hundredths, DEC);

Serial.print("Altitud (metros): "); Serial.println(gps.f_altitude());

Serial.print("Rumbo (grados): "); Serial.println(gps.f_course());

Serial.print("Velocidad(kmph): "); Serial.println(gps.f_speed_kmph());

Serial.print("Satelites: "); Serial.println(gps.satellites());

Serial.println();

hr=hour-5; //Se restan 5hrs a la hora que arroja el GPS ya que este marca la UTC (Universal Time Center)

lcd.setCursor(0,0);

lcd.print("hora "); //Se muestra la hr reloj en la LCD

```

```
lcd.setCursor(5,0);
```

```
lcd.print(hr);
```

```
lcd.print(":");
```

```
lcd.setCursor(8,0);
```

```
lcd.print(minute);
```

```
lcd.print(":");
```

```
lcd.setCursor(11,0);
```

```
lcd.print(second);
```

```
////////////////// CALCULAR EL MEDIODÍA SOLAR ////////////////////
```

```
switch (month) /////Se determina el día juliano /////
```

```
{
```

```
case 1:
```

```
    n=day;
```

```
    break;
```

```
case 2:
```

```
    n=31+day;
```

```
    break;
```

```
case 3:
```

```
    n=59+day;
```

```
    break;
```

```
case 4:
```

```
    n=90+day;
```

```
    break;
```

```
case 5:
```

```
    n=120+day;
```

```
    break;
```

case 6:

n=151+day;

break;

case 7:

n=181+day;

break;

case 8:

n=212+day;

break;

case 9:

n=243+day;

break;

case 10:

n=273+day;

break;

case 11:

n=304+day;

break;

case 12:

n=334+day;

break;

}

delay(1);

Lst = round(longitude/15)*15; //Longitud standar calculada

B = (n-1)*(360/365);

B = B*(3.1416/180);

Et = 229.2*(0.000075+(0.001868*cos(B))-(0.032077*sin(B))-(0.0146115*cos(2*B))-(0.04089*sin(2*B))); //ecuación del tiempo

error =(4*(Lst-longitude))+Et; //Error en minutos a restar o sumar a la hora reloj

error=error*0.01; //Error calculado en decimas para sumar o restar a la hora reloj

hsolar=12+(-1*error); //Hora solar calculada (1/2 día solar)

hsolar=round(hsolar*100)/100; //Hora solar calculada en decimas para su tratamiento matematico

hrinicio = hsolar - 3; //Corrección para la hora reloj de inicio de trabajo (9am solar)

hrfinal = hsolar + 3; //Corrección para la hora reloj final de trabajo (3pm solar)

hrelojini = hr + (minute*0.01); //Hora reloj de inicio de operación con decimas de minutos como un solo valor

hrelojfini = hr + (minute*0.01); //Hora reloj final de operación con decimas de minutos como un solo valor

//// CALCULO DE LA ELEVACIÓN A 9AM SOLAR DE CUALQUIER DÍA DEL AÑO //////////////////////////////////////

//w = 15*(9-12);

w = 15*(hrelojini-12); //Calculo de 15 grados por hora con signo - antes de las 12pm y signo + después de las 12pm

S = 23.45*sin((360*((284+n)/365))*(3.1416/180)); //Declinación solar

Oz =
acos(cos((latitude)*3.1416/180)*cos(S*(3.1416/180))*cos(w*(3.1416/180))+sin(latitude*(3.1416/180))*sin(S*(3.1416/180)))*(180/3.1416);
//Ángulo zenit

as = 90 - Oz; //Ángulo de elevación del sol

////////////////////////////////////

//// CALCULO DE LA ELEVACIÓN A 1/2 día SOLAR DE CUALQUIER DÍA DEL AÑO //////////////////////////////////////

//w = 15*(9-12);

w2 = 0; //Calculo de 15 grados por hora con signo - antes de las 12pm y signo + después de las 12pm

S2 = 23.45*sin((360*((284+n)/365))*(3.1416/180)); //Declinación solar

```

Oz2
acos(cos((latitude)*3.1416/180)*cos(S2*(3.1416/180))*cos(w2*(3.1416/180))+sin(latitude*(3.1416/180))*sin(S2*(3.1416/180)))*(180/3
.1416); //Ángulo zenit

as2 = 90 - Oz2; //Ángulo de elevación del sol

////////////////////////////////////

////////////////////////////////////

estadostar = digitalRead(star); //pregunta si se presionó el botón para iniciar

if(estadostar == HIGH)

{

encodervalue = analogRead(encoder);

posicion = map(encodervalue, 0,1023, 0, 400); //se define el número de pasos en este caso 400

inicio1 = digitalRead(inicio); //leer el estado del botón inicio de carrera

final1 = digitalRead(final); //leer el estado del botón final de carrera

////////////////////////////////// CONDICIONES PARA EL MOTOR CON SENSORES DE INICIO Y FINAL DE CARRERA //////////////////////////////////

if ((inicio1==LOW) && (final1==LOW)) //sensor inicio y final están el bajo

{

//El motor gira en sentido anti horario

digitalWrite(Dir, HIGH); //Dirección anti-horario

digitalWrite(Enbl, LOW); //high = apagado, Low = funciona

digitalWrite(Pull,HIGH);

delayMicroseconds(Vel);

digitalWrite(Pull,LOW);

delayMicroseconds(Vel);

i = i - 1;

}

```

```

if ((inicio1==HIGH) && (final1==LOW)) //sensor inicio esta en alto y sensor final esta en bajo

{

//El motor gira en sentido horario dependiendo de la hora

if ((hrelojini>=hrinicio) && (hrelojfini<=hrfinal))

{

as = 30; //Valor asignado para que al 1/2 día solar los espejos apunte a 90grados de elevación

grados = (((hrelojini-hrinicio)*15)+((minute*15)/60))+as; //Calculo de grados por hora después de las 8am solar

if (i <= grados)

{

digitalWrite(Dir, LOW); //Dirección horario

digitalWrite(Enbl, LOW); //high = apagado, Low = funciona

digitalWrite(Pull,HIGH);

delayMicroseconds(Vel);

digitalWrite(Pull,LOW);

delayMicroseconds(Vel);

i = i + 1; //Pasos que dará el motor (0.9 es para una configuración de 400pasos=360grados), 1paso=0.9grados

}

if (i >= grados)

{

digitalWrite(Enbl, HIGH); //high = apagado, Low = funciona

delay(60000*4); //Retardo de 4 minutos (máximo tiempo para que el motor este en OFF y siga concentrando
radiación)

}

}

else //((hrelojini>=hrinicio) && (hrelojfini<=hrfinal))

{

//MOTOR APAGADO

```

```

i = 30;

digitalWrite(Enbl, HIGH); //high = apagado, Low = funciona

}

}

if ((inicio1==LOW) && (final1==HIGH)) //sensor inicio y final estan el alto

{

//i = 400; //Este valor hay que designarlo a la cantidad máxima de grados que se obtiene al tocar el sensor final de carrera

//El motor gira en sentido antihorario

digitalWrite(Dir, HIGH); //Dirección anti-horario

digitalWrite(Enbl, LOW); //high = apagado, Low = funciona

digitalWrite(Pull,HIGH);

delayMicroseconds(Vel);

digitalWrite(Pull,LOW);

delayMicroseconds(Vel);

i = i - 1;

}

}

if(posicion > 0) //if para mandar a la posición a 0 en caso de que se haya suspendido el programa en algun momento

{

//Motor gira a la derecha hasta que sea 0 la posicion inicial

}

}

gps.stats(&chars, &sentences, &failed_checksum);

}

}

}

```