



---

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO DE UN CONCENTRADOR-STIRLING”

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

PRESENTA:

**Angel Alemao Ibañez Medina**

Director:

M. I. Antonio Zepeda Sánchez



México Ciudad Universitaria 2014

## *Agradecimientos*

*Mi entera gratitud y cariño a mis padres Miguel Angel y Ma. Elvia que con amor, paciencia y esfuerzo me han acompañado en este camino tan importante en mi vida.*

*A mi hermana Jazmín que siempre me ha apoyado y me ha demostrado que cuento con ella.*

*Al Dr. Armando Rojas Morín que me ayudó en el desarrollo del trabajo y sobre todo la confianza con la que me enseñó que el tiempo y la dedicación son las mejores herramientas de superación profesional.*

*Al M. I. Antonio Zepeda Sánchez por brindarme tiempo y consejo en este periodo de trabajo y nunca negar su atención.*

*Al Dr. Arturo Barba Pingarron por su interés, disposición y confianza que invirtió con fines de mi aprovechamiento académico.*

*Al Ing. Mariano García del Gallego por darme la entera confianza en el desarrollo del presente.*

*Al Dr. Adrián Espinosa Bautista por siempre tener las puertas abiertas ante cualquier eventualidad que presenté.*

# Índice

<b>Introducción</b>	<b>4</b>
<b>1.- Antecedentes y Planeación del Producto</b>	<b>7</b>
1.1.- Estado actual de los concentradores solares	7
1.2.- Identificación de Oportunidades y Declaración de la Misión	10
<b>2.- Especificaciones objetivo y generación de conceptos del sistema Concentrador-Stirling</b>	<b>13</b>
2.1 Especificaciones iniciales u objetivo	14
2.2 Revisión de conceptos “tipos de concentradores”	15
2.2.1 Concentrador Cilíndrico Parabólico	15
2.2.2 Sistema Concentrador Lineal Tipo Fresnel	15
2.2.3 Concentradores Parabólicos de Revolución	16
2.2.4 Concentradores Torre Central	17
2.3 Relación concepto-especificación	18
<b>3.- Selección y Justificación de Concepto</b>	<b>20</b>
3.1 Componentes del concepto seleccionado	21
3.1.1 Seguidor solar	21
3.1.2 Parábola de revolución	21
3.1.3 Receptor	27
<b>4.- Construcción del Modelo</b>	<b>29</b>
4.1 Modelo teórico	31
4.1.1 Definición de los parámetros geométricos del concentrador	32
4.1.2 Cantidad de energía que impacta al receptor	39
4.2 Calculo del área de la superficie del concentrador	42
4.3 Materiales Propuestos	43
4.2 Aplicación del modelo	44
4.3 Simulación	46
<b>Conclusiones</b>	<b>51</b>
Recomendaciones:	51
Trabajo a Futuro:	52
<b>Bibliografía</b>	<b>53</b>

## Introducción

El consumo nacional de energía se ve afectado significativamente por el aumento del precio en los hidrocarburos y a emisión de gases contaminantes. De acuerdo con la “LEY PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGIAS RENOVABLES Y EL FINANCIAMIENTO DE LA TRANSISICION ENERGETICA” publicada el 28 de noviembre de 2008 y aún vigente, en el artículo 2o, expresa que el Estado mexicano promoverá la eficiencia y sustentabilidad, así como la reducción de la dependencia de los hidrocarburos como fuente primaria de energía además en el artículo 3º-II de esta misma ley, se define como energías renovables “aquellas reguladas por esta ley, cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica”, en la cual se encuentra la radiación solar como uno de sus rubros a cubrir.

En materia de energía termosolar, el principal instrumento de política de la administración pasada lo constituye el Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México 2007-2012 (PROCALSOL), el cual tiene como objetivo impulsar el aprovechamiento de la energía solar en el país e impulsar el ahorro de energía en el calentamiento de agua de los sectores residencial, comercial, industrial y agrícola, sustituyendo los métodos tradicionales a base de combustibles fósiles (hidrocarburos) por la radiación solar.

Si observamos el objetivo del PROCALSOL, se puede hacer una adaptación para el trabajo que se realiza, esto es, por que se utiliza el mismo recurso renovable y además está enfocado a un producto que debe ser de fácil adquisición de uso doméstico para todo el público en general.

Para el proyecto en desarrollo, es indispensable la aplicación de la radiación solar como recurso primario, lo que hace que el dispositivo sea un mecanismo que utilice energía renovable y en su principio de funcionamiento no produzca gases contaminantes que provoquen el efecto invernadero y causen daño a los ecosistemas, además de beneficiar a las comunidades aisladas de la red eléctrica.

El objetivo principal es proponer el diseño de un producto que aproveche la energía solar para producir 1 [kW] de energía eléctrica, aplicando el método genérico del proceso del desarrollo del producto.

En un principio tenemos un esquema como el de la figura a) donde se sabe que se debe generar energía eléctrica aun sin saber el proceso físico que sucede en el sistema, entonces se inicia con el desarrollo de una metodología para diseñar dicho dispositivo, esta metodología está basada enteramente en el libro que lleva por nombre “Diseño y Desarrollo de Productos” de Karl T. Ulrich y Steven D. Epingner, debido a que el trabajo se encamina hacia el desarrollo y la producción.

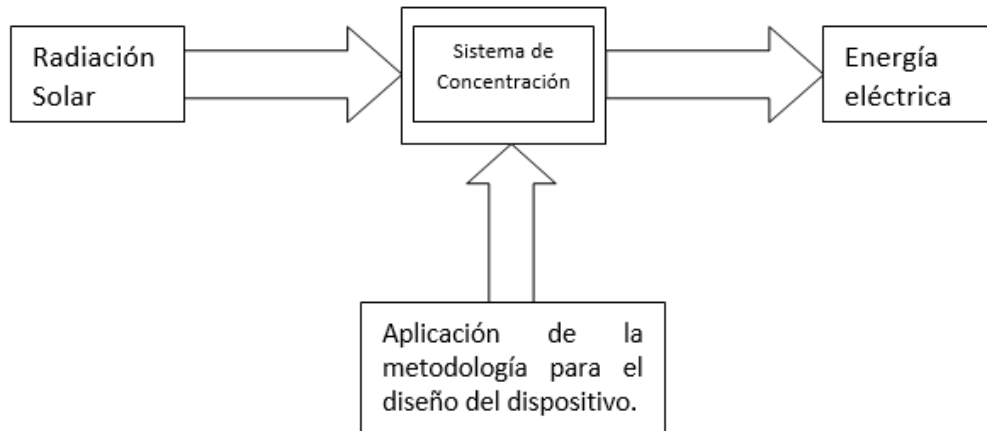


Figura a).- Primer idea contextual para aplicación de la metodología.

El presente desarrollo es parte de un proyecto a largo plazo, integrar un trabajo sobre diseño de productos utiliza muchos recursos, el objetivo general es crear un dispositivo integro que genere energía eléctrica, para ello es necesario plantear la metodología que se tiene que seguir, es importante mencionar que el dispositivo se divide en varios componentes, por lo tanto, se hace un diseño exclusivo a solo uno (disco parabólico de revolución), para el cual de forma generalizada se hace la adaptación del proceso del desarrollo del producto involucrando de manera indirecta a todos los componentes del dispositivo.

Como razón principal para iniciar el trabajo se cuenta con la hipótesis siguiente: “a una mejor aplicación y adaptación de la metodología del desarrollo del producto, habrá mejores resultados en el rendimiento de cada uno de los componentes, y en consecuencia de dispositivo”. Tomando en cuenta lo anterior se hace un desglose de cada una de las etapas o fases (figura b) que intervienen en el desarrollo del proyecto.

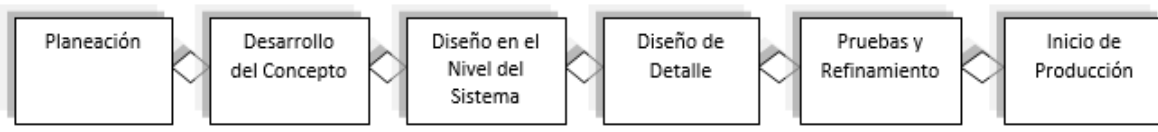


Figura b).- Fases o etapas de diseño y desarrollo del producto adaptado al proyecto.

De la figura anterior se destaca que no necesariamente las fases deben ser secuenciales pues siempre hay una traslape una con otra, con la información obtenida se puede hacer una retroalimentación para mejorar el rendimiento del sistema, específicamente esto sucede desde la segunda hasta la quinta fase.

En este trabajo se hace un enfoque en las dos primeras fases, con un vistazo en el diseño a nivel de sistema y detalle, definiendo algunas especificaciones geométricas del sistema y materiales disponibles (disco parabólico de revolución).

En el capítulo 1 **“Antecedentes y Planeación del Producto”** se describe la planeación en conjunto con los antecedentes históricos de los sistemas que aprovechan la radiación solar, haciendo énfasis a las ventajas en la producción eléctrica a nivel experimental y comercial. Prácticamente esta fase se concentra a la investigación que sirve para aprovechar la información sobre el rendimiento de los sistemas que se han construido a lo largo de los años a partir de año 1980 aproximadamente. La conclusión de este apartado se define con la declaración de la misión que da la pauta para emprender el proyecto cumpliendo con los requisitos mencionados en ese ejercicio.

En el capítulo 2 **“Especificaciones Objetivo y Generación de Conceptos del Sistema CPS-Stirling”** se aplica la primera parte de la primera fase, se definen las especificaciones iniciales propuestas, basándose en dimensiones geométricas, costos y facilidad de manejo, después se analizan los diferentes tipos de concentradores solares tomándolos como conceptos iniciales que servirían para generar energía eléctrica. La conclusión de este capítulo reside en adaptar lo mejor posible las especificaciones a cada uno de los conceptos y analizar cual concepto es la mejor opción para desarrollar.

En el capítulo 3 **“Selección y Justificación de Conceptos”**, se aplica la segunda parte de la primera fase, se selecciona el concepto basándose en la construcción de sistemas experimentales que existen y estudiando las tecnologías que se han desarrollado para beneficiar al sistema, también se describen los demás componentes que afectan el diseño que se realizara para el disco parabólico de revolución.

Para el capítulo 4 **“Construcción del Modelo”** se aplica la fase 2 y 3 donde se realiza el diseño teórico y la simulación experimental para un modelo analítico enfocado concluyendo con las especificaciones finales del disco parabólico de revolución.

En la parte de conclusiones se hace énfasis a las recomendaciones para realizar un modelo físico integral con el que se puedan realizar experimentaciones y medir los parámetros necesarios.

# Capítulo 1

## 1.- Antecedentes y Planeación del Producto

**Objetivo del capítulo 1: Investigar el estado del arte de los concentradores solares así como aplicar la fase 0.**

Para concebir un producto nuevo se necesita la integración de un grupo multidisciplinario que debe ser jerarquizado, el director de proyecto y desarrollo debe ser el líder que guíe a un conjunto pequeño de personas y bien definido, en cuanto a sus tareas sin obstaculizarse, además que tengan una buena comunicación para poder desempeñar las actividades que les correspondan. Este grupo de personas compuesto por ingenieros, administradores, diseñadores, economistas, etc. debe tener su equipo de trabajo ya sea desde una persona o hasta miles de ellas para lograr plasmar las ideas iniciales hasta los elementos físicos funcionales.

El proceso del desarrollo del producto tiene tres ramas importantes el diseño, la manufactura y la mercadotecnia, se hace un enfoque exclusivo al primero que se ha mencionado. Con la rama del diseño se determina la forma física que tendrá un nuevo producto, cabe destacar que existen dos tipos de diseño; el industrial y el mecánico. Se acota más y se propone utilizar solo el diseño mecánico desde la planificación y durante las subsecuentes fases.

La planificación o “fase 0” inicia con la identificación de oportunidades que abarca los avances de la tecnología y los objetivos de mercado.

Para diseñar un producto es necesario tener una consistente planificación, por lo que se considera a fondo la función que va a desempeñar, por lo tanto, a conveniencia es recomendable conocer la existencia de productos en el mercado con características similares, para analizar las tecnologías aplicadas que sirven para desarrollar un producto de calidad y que cumpla las expectativas, esto es parte esencial para el proceso de desarrollo de un producto. Entonces es pertinente realizar una investigación sobre sistemas que aprovechen la radiación solar y que la transformen en electricidad, para tener una visión sobre el mercado que se aborda, las oportunidades que se tienen y necesidades que se deben cubrir.

### 1.1.- Estado actual de los concentradores solares

Se han clasificado de distintas maneras los sistemas concentradores solares, entre las más importantes se encuentran la aplicación final a los que son destinados y también por el rango de temperatura de operación en el que se mantienen trabajando (Mulas: 2005).

Dentro de las aplicaciones a las que se destinan se consideran las siguientes tres categorías: generación termosolar de potencia, calor solar para procesos industriales y por último, el calentamiento de agua y acondicionamiento de espacios.

La generación termosolar de potencia ha sido aplicada exitosamente en la historia reciente y comienza a cobrar mayor importancia en términos de instalaciones comerciales, a través de marcos regulatorios adecuados que hacen posible alcanzar precios competitivos de la energía eléctrica generada.

En la tabla 1.1 se ejemplifican algunos sistemas instalados operados de forma experimental o ahora de manera comercial para la producción de electricidad en el mundo.

Nombre	Año	Lugar	Capacidad	Características
<b>SEGS</b>	1984- 1991	California, E.U.A	354 [MW]	Función híbrida (gas), 2 millones [m <sup>2</sup> ] de concentradores, 800 millones de [kWh] de generación eléctrica al año.
<b>Nevada Solar One</b>	2007	Nevada, E.U.A	64 [MW]	Con 1.4 millones de [m <sup>2</sup> ] de concentradores solares y 130 millones de [kWh] de generación eléctrica al año.
<b>Alvarado</b>	2009	Badajoz, España	50 [MW]	Produce 102 millones de [kWh] de electricidad al año y evita 98, 000 toneladas de CO <sub>2</sub> .
<b>Andasol</b>	2008	Granada, España	50 [MW]	510, 000 [m <sup>2</sup> ] de concentradores, sistema de almacenamiento térmico hasta 7.5 hrs, produce hasta 180 [GWh] al año.
<b>Iberdrola</b>	2009	Ciudad Real, España	50 [MW]	290, 000 [m <sup>2</sup> ] de concentradores con una producción eléctrica anual de 114. 2 [GWh].
<b>Extresol</b>	2010	Badajoz, España	50 [MW]	550, 000 [m <sup>2</sup> ] de concentradores y cuenta con un sistema de almacenamiento de aproximadamente 7.5 horas.
<b>Al-Kuraymat</b>	2010	Egipto	74 y 80 [MW]	1900 [m <sup>2</sup> ] de concentradores, función híbrida con una producción estimada de 85 [GWh].



<b>Archimide</b>	2010	Sicilia, Italia	5 [MW]	30, 000 [m <sup>2</sup> ] de concentradores, evita 3250 toneladas de CO <sub>2</sub> , cuenta con sistema de almacenamiento.
<b>Fresnel</b>	2003-2007	Nueva Gales del Sur, Australia	38 [MW]	Proyecto que se realizó en varias fases, sustituyen a plantas alimentadas por calderas de carbón.
<b>Fresnel</b>	2008	California, E.U.A	5 [MW]	Primera experiencia piloto realizada en Norte América.
<b>Solar One y Solar Two</b>	1985-2009	California, E.U.A	10.5 [MW]	Se desarrolló tecnología para almacenamiento térmico (sales fundidas).
<b>PS10</b>	2007	Sevilla, España	11[MW]	Se estima una producción eléctrica anual de 24.3 [GWh].
<b>Sierra Sun Tower</b>	2009	California, E.U.A	5 [MW]	1 000 000 [m <sup>2</sup> ] de concentradores solares.
<b>Vanguard 1</b>	1984	California, E.U.A	25 [kW] por cada concentrador.	Un plato de vidrio y metal con 336 facetas y 86.7 [m <sup>2</sup> ] motor Stirling AB modelo 4-95 Mark-II, una presión de máxima de 20 [MPa] y una temperatura de 720 [°C].
<b>Solar 1 y 2</b>	1985	Texas, E.U.A	4.92 [MW]	700 concentradores de tipo Lec-400 ocupando una superficie total de 30, 590 [m <sup>2</sup> ], como fluidos de transferencia utilizan sales.
<b>Eurodish</b>	1986	Arabia Saudita	2 sistemas de 25 [kW] por cada concentrador.	Receptor es de 17 [m] de diámetro, con una superficie total de 227 [m <sup>2</sup> ]. El gas de trabajo para los cuatro cilindros del motor Stirling era hidrógeno.
	1992	Alemania	9 [kW]	El prototipo tenía de 7,5 [m] de diámetro con más de 44 [m <sup>2</sup> ] de superficie, disponía un motor 160 V SOLO con helio como gas de trabajo.

	2002 y 2004	Italia, Francia	10 [kW]	
<b>DISTAL 1 y 2</b>	1992	Almería, España	9 [kW]	3 unidades de disco parabólico de 7.5 [m] de diámetro con un motor Stirling SOLO V160.
	1996-1997		50 [kW]	
<b>Solar Generación 3</b>	1994	Australia	45 [kW]	El disco contiene 400 [m <sup>2</sup> ] de apertura.
<b>SES/Boeing</b>	2010	Arizona, E.U.A	25 [kW]	Consta de 60 unidades de disco parabólico, calienta hidrógeno para alimentar un motor Stirling de cuatro cilindros.
<b>Villarobledo</b>	2011	España	1 [MW]	333 discos parabólicos de 3 [kW] cada unidad, en cuyo foco se alcanzan temperaturas de 700 [°C].

Tabla 1.1 Sistemas desarrollados que aprovechan la radiación solar internacionalmente, elaboración propia con información de <http://www.slideshare.net/geopaloma/historia-de-la-energia-solar-iv>

En México en el año de 1976 el Instituto de Ingeniería de la UNAM inicia la construcción de un concentrador solar con geometría de canal parabólico, pero hasta la década de los 80's se construyó la planta solar del IUNAM con una superficie de 550 [m<sup>2</sup>] de concentradores de este mismo tipo. En un inicio contó con 16 concentradores y aceite como fluido de trabajo. En la década de los 90's esta planta se acondicionó con instrumentación diseñada para la generación de vapor.

## 1.2.- Identificación de Oportunidades y Declaración de la Misión

Con los sistemas que han sido creados, mostrados en la figura, se justifica el avance tecnológico, por lo tanto, es posible crear sistemas que aprovechen la radiación solar para generar electricidad pero con diferentes dimensiones para específicamente el uso doméstico, que aumente el ahorro económico y fomente la utilización de las energías renovables.

Al hacer un estudio sobre las necesidades generales que surgen para dar la pauta en el inicio del desarrollo del producto, la más importante es la obtención de energía a partir de fuentes renovables con la característica de no contaminar el medio ambiente, la siguiente necesidad es tener un sistema económico y fácil de operar (también que tenga un mantenimiento sencillo). La última y más

específica es la generación de  $1[kW]$  de energía para que se le pueda dar la aplicación correspondiente.

De acuerdo con las necesidades anteriores se analizan las oportunidades que existen para abrir un nuevo mercado, la ingeniería mecánica tiene la capacidad de transformar un contexto para beneficio humano, pensar en un producto nuevo conlleva forzosamente a la aplicación ingenieril. En este sentido una oportunidad se presenta cuando existe una necesidad y sus posibles soluciones.

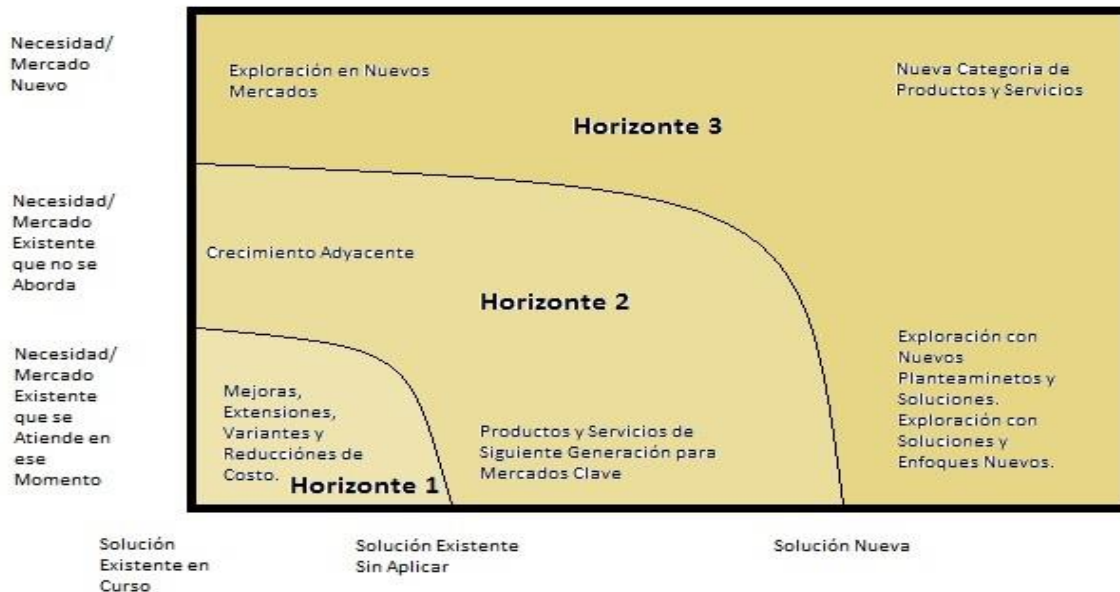


Figura 1.1 Grafico que describe el área de oportunidad con base en el tipo de solución y las necesidades del mercado (Ulrich, Eppinger 2012, pag 37).

Las oportunidades que se tienen para concebir y desarrollar el producto “Concentrador Solar-Stirling” como se muestra en la figura 1.1 son tres; la primera “Horizonte 1” que abarca la soluciones existentes a mercados existentes; la segunda “Horizonte 2” productos de siguientes generación que aplica a mercados existentes o que no se abordan y por último, “Horizonte 3”, son soluciones nuevas a cualquier tipo de mercado, para este caso, se observa que el nivel de incertidumbre no es alto, pues se han probado tecnologías que han funcionado con eficiencia aceptable, pero siempre a un nivel experimental o comercial, lo cual deja fuera el objetivo de un mercado dirigido hacia el público en general, es decir, sistemas muy complejos que generan electricidad para uso de más de un solo individuo. Por lo tanto se concluye que hay existencia de un mercado que no se aborda y que se tienen soluciones existentes para las necesidades, en otras palabras se tiene oportunidades “Horizonte 2”, con la que incertidumbre se adentra en dimensiones de mercado y tecnologías.

Para culminar la “fase 0” se hace la declaración de la misión donde se describe brevemente la características del producto sin entrar en detalles de tecnologías.

Con respecto a lo anterior, se hace la declaración de la visión:

***“Desarrollar un producto modular con la capacidad de concentrar los rayos solares en un zona para aprovechar el aumento de temperatura y convertirlo en energía eléctrica para uso doméstico.”***

**Declaración de la misión: Concentrador Solar**

<b>Descripción del producto</b>	Dispositivo para la generación de energía eléctrica para uso doméstico.
<b>Propuesta de valor</b>	Capta y aprovecha la energía solar sin hacer uso de combustibles.
<b>Objetivos claves del negocio</b>	Desarrollar un prototipo funcional para finales del año 2014.
<b>Mercado primario</b>	Constructoras de casa-habitación.
<b>Mercado secundario</b>	Público en general.
<b>Suposiciones y restricciones</b>	Manual, Autónomo y Electrónico.
<b>Involucrados</b>	Clientes, equipos de desarrollo, dirección, departamento, división e institución.

Tabla 1.2 Declaración de la misión para el producto, elaboración propia.

La actividad anterior (tabla 1.2) da como finalizada la etapa de planeación y por supuesto da el punto de partida para el inicio del desarrollo del producto con la información y suposiciones necesarias que tratan de disipar la incertidumbre y proyectar el posible éxito o fracaso del trabajo.

## Capítulo 2

### 2.- Especificaciones objetivo y generación de conceptos del sistema Concentrador-Stirling

**Objetivo del capítulo 2: Aplicar la primera parte de la fase 1, hacer análisis de las necesidades para establecer especificaciones objetivo con unidades coherentes con respecto al producto, estudiar los conceptos existentes y principio de funcionamiento.**

Después de realizar la declaración de la misión, es pertinente proseguir con la metodología y el apartado de desarrollo del concepto. Como inicio, se hace un enfoque a las necesidades del mercado primario, para este caso debe explicarse que es la infraestructura que necesita la aportación de energía renovable, que no contamine y que ahorre dinero. Por lo tanto se enuncian las necesidades con mayor detalle para tener una idea clara y específica de posibles soluciones que contengan parámetros manejables tanto para el diseñador como para el usuario final.

1. Obtener energía a partir de la radiación solar (energía renovable).
2. No producir contaminantes.
3. Tener un dispositivo que concentre y transforme la energía solar, para darle aplicaciones útiles.
4. Que intervenga directamente en el ahorro de combustibles o energía eléctrica.
5. El sistema debe producir 1 (*kW*).
6. Que sea de fácil operación.
7. Fácil mantenimiento.
8. Con un costo aceptable.
9. Que contenga un manual de uso simplificado para su operación y mantenimiento.
10. Que sea fácil de instalar.
11. Que no ocupe demasiado espacio.
12. Fácil de manipular.

## 2.1 Especificaciones iniciales u objetivo

Tomando en cuenta las necesidades más detalladas se tiene una idea sobre los parámetros y dimensiones, los cuales se deben transformar en especificaciones. Como se ha explicado en el apartado anterior, hay dos momentos para definir las especificaciones, para tal caso, ahora corresponde a las especificaciones objetivo realizadas con las necesidades descritas.

NÚM. DE NECESIDAD.	MÉTRICA	UNIDADES
1	Alta captación del nivel de insolación	$\left[\frac{kW}{m^2}\right]$
2	Cero emisiones	$\left[\frac{mg}{km}\right]$
3	Temperatura requerida >500	[°C]
4	Reducir gastos	$[MxN]$
5	Energía de salida	$[kW]$
6	Tiempo de activación	[s]
7	Tiempo de mantenimiento	[s]
8	Precio	$[MxN]$
9	Tiempo de consulta	[s]
10	Tiempo de instalación	[s]
11	Espacio $\leq 2$	$[m^2]$
12	Peso <50	$[kg]$

Tabla 2.1 Elaboración propia de la tabla de conversión necesidad-especificación con sus respectivas unidades.

La tabla anterior muestra una primera definición de las especificaciones para poder tener un punto de partida aunque posiblemente se modificaran por corrección en la parte del “diseño a nivel de detalle” una vez que se haya elegido el concepto.

Si bien en el capítulo anterior, se hace una recopilación de sistemas concentradores solares y alguna clasificación de ellos, no se explica la forma en la que trabajan, por lo tanto en esta primera parte de la fase 1 de la metodología analizaremos cual concepto conviene más utilizar basándose en las especificaciones que se han definido. Se explica que un concepto ya tiene una forma de realizar el proceso necesario para cumplir su cometido con el beneficio de ser adaptable a las necesidades y por consecuencia a las especificaciones iniciales.

Existen básicamente cuatro tipos de concentradores solares: concentrador canal parabólico o cilíndrico parabólico (CCP), sistemas concentradores lineales tipo Fresnel, concentradores parabólicos de revolución y los sistemas de torre central, los cuales fundamentalmente concentran los rayos solares incidentes en un área menor al área de captación para lograr obtener una elevada temperatura. A continuación se explica brevemente su principio de funcionamiento.

## 2.2 Revisión de conceptos “tipos de concentradores”

### 2.2.1 Concentrador Cilíndrico Parabólico

Este tipo de dispositivos también denominados CCP utiliza espejos en forma de parábola, los cuales enfocan la luz solar sobre receptores tubulares, por los cuales circula un fluido HTF (Heat Transfer Fluid) que absorbe el calor reflejado. Los valores usuales del flujo de radiación sobre el absorbedor de un CCP están entre  $40$  y  $60 \frac{KW}{m^2}$ . El fluido típicamente aceite sintético es calentado a una temperatura alrededor de los  $400^{\circ}C$  en promedio pero pueden llegar a los  $450^{\circ}C$ , para otros rangos de temperatura por ejemplo  $200^{\circ}C$  se puede utilizar agua desmineralizada ó Etilen Glicol como fluido.

Como cualquier otro captador de concentración solo se aprovecha la radiación solar directa, lo que exige que el colector vaya modificando su posición durante el día (gira sobre el eje de su receptor).

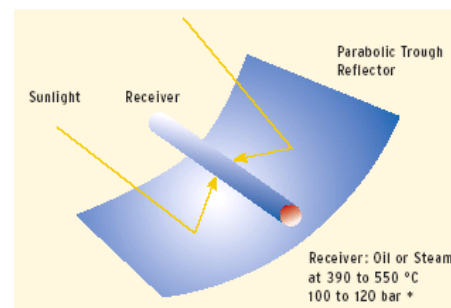


Figura 2.1 Boceto que muestra un sistema concentrador cilíndrico parabólico donde se aprecia el tubo receptor a lo largo del foco del concentrador donde los rayos incidentes son reflejados extraído de “Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de Energías Renovables en México: Energía Solar II”, pag 5.

### 2.2.2 Sistema Concentrador Lineal Tipo Fresnel

Está tecnología de un solo eje de seguimiento, que difiere de los sistemas concentradores de canal parabólico, porque el receptor está fijo en el espacio en la zona focal. El reflector está compuesto de muchos segmentos delgados y largos de espejos, los cuales giran sobre ejes paralelos simultáneamente para enfocar la radiación solar en el receptor.

Los reflectores se construyen con espejos de vidrios planos y por lo tanto su materia prima es muy barata. La forma curvada de los espejos cilindro-parabólicos hace que sean 15% más eficientes que los espejos Fresnel, pero con el ahorro de costo en materiales, junto con la simplicidad del funcionamiento hacen que la reducción de costo sea muy superior al rendimiento.

Las centrales basadas en esta tecnología consisten principalmente en un campo de espejos primarios, un tubo receptor y un espejo secundario. El campo primario está compuesto por una serie de filas de espejos planos a 1 metro de altura sobre el terreno: Cada fila tiene aproximadamente unos 60 cm de ancho y se extienden en líneas entre los 600 y 900 metros, los rayos reflejados en los lentes planos que simulan la lente curva reflejan los rayos del sol en el tubo receptor, colgado unos 8 metros por encima del nivel en que se encuentran los espejos reflectores, y que es el responsable de la transformación de la radiación en energía térmica. Por encima del receptor hay un espejo secundario cilíndrico que concentra la luz solar que ha desviado ligeramente de su trayectoria y por tanto no ha impactado en el tubo receptor lineal.

Las filas de espejos se controlan mediante motores eléctricos que realizan el seguimiento del movimiento del sol a lo largo del día en un solo eje. Por esta razón, la producción eléctrica varía a lo largo de las estaciones del año, al no poder tener movimiento sobre su ángulo acimutal.

El sistema es de fácil limpieza y el tubo receptor no tiene requerimientos tan exigentes como los de un CCP por tener una temperatura de salida de 270°C.

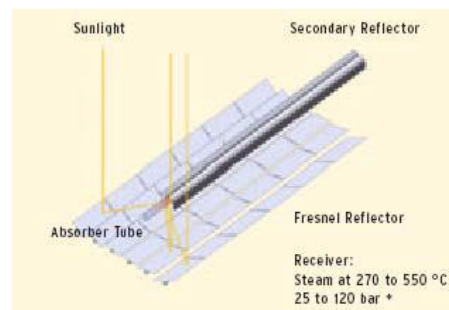


Figura 2.2 Boceto de un sistema concentrador lineal tipo Fresnel donde se observa un receptor fijo con espejos planos con seguimiento solar de un solo grado de libertad extraído de “Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de Energías Renovables en México: Energía Solar II”, pag 5.

### 2.2.3 Concentradores Parabólicos de Revolución

Consisten en un concentrador en forma de plato parabólico con un receptor en la zona focal la cual es puntual. Estos sistemas se montan sobre una estructura con seguimiento de 2 ejes. El calor colectado es utilizado por un motor térmico montado en el receptor que se mueve con la estructura del plato. “Los motores de ciclo Stirling y Brayton se utilizan actualmente para la conversión de energía térmica, a mecánica eléctrica” (VLPSUERM Energía Solar II, pag. 9). Aunque se considera una tecnología inmadura, es indudable que representa numerosas ventajas frente al resto de tecnologías de aprovechamiento solar por su simplicidad y modularidad



Este tipo de dispositivos ha demostrado la mayor eficiencia de conversión de radiación solar en energía eléctrica con valores máximos del 30% y hasta un 24% de promedio diario en unidades de entre 7 y 24KW. Debido a la curvatura parabólica del concentrador y a la baja relación distancia focal/diámetro igual a 0.6 se pueden conseguir altas relaciones de concentración por encima de los 3000.

Esto permite alcanzar altas temperaturas, dando lugar a eficiencias en el motor Stirling del orden del 30 y 40%. La superficie cóncava está cubierta por espejos de primera o segunda superficie, los receptores son de tipo cavidad, con una pequeña apertura y su correspondiente sistema de aislamiento.

Típicamente, se usan dos métodos para la transferencia de la radiación solar al gas de trabajo que se encuentra en el motor.

1. En el primero se iluminan directamente un panel de tubos por el interior de los cuales circula el gas que suele ser helio, hidrógeno o aire.
2. El segundo método, se utiliza el concepto tubo de calor (heat pipe), vaporizándose un metal líquido (normalmente sodio) que condensa en la superficie de los tubos por los que circula el gas de trabajo y regresa a la zona del receptor.

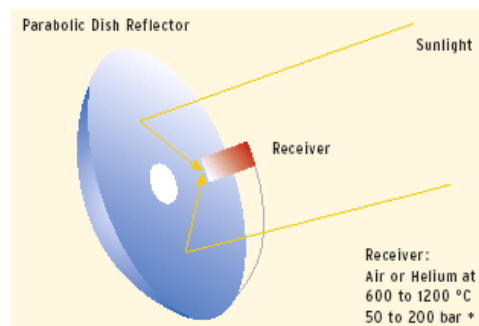


Figura 2.3 Boceto de un concentrador parabólico de revolución con foco puntual, para un funcionamiento óptimo necesita dos grados de libertad para el seguimiento solar extraído de "Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de Energías Renovables en México: Energía Solar II", pag 5.

## 2.2.4 Concentradores Torre Central

Este tipo de sistemas necesita un campo de espejos planos llamados heliostatos fijados en dirección de un receptor central montado a lo alto de una torre los cuales producen temperaturas aproximadas de entre 500 y 1500 °C.

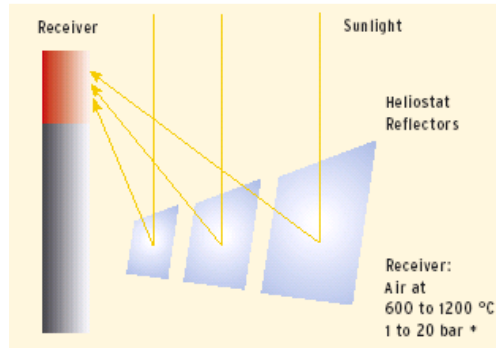


Figura 2.4 Boceto de un sistema torre central se aprecia que los heliostatos reflejan los rayos incidentes a un receptor fijo extraído de “Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de Energías Renovables en México: Energía Solar II”, pag 5.

### 2.3 Relación concepto-especificación

Al analizar cada uno de los tipos de concentradores se tiene completamente una idea clara en cuanto al sistema de concentración solar que se desea desarrollar. La siguiente tabla muestra las ventajas que se pueden aprovechar, las desventajas para eliminar y sobre todo el cumplimiento de las especificaciones iniciales.

Tipo de Concentrador	Cumple con las especificaciones	Ventajas	Desventajas
Cilíndrico Parabólico	1, 2	1 grado de libertad, parábola sencilla.	Temperaturas medias, mayor espacio, mayor costo.
Lineal Tipo Fresnel	1, 2	1 grado de libertad, espejos planos, tubo receptor fijo.	Temperaturas medias, mayor espacio, mayor costo.
Parabólico de Revolución	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	Mayor temperatura, menor espacio, reducción de costo, alta eficiencia.	Seguidor solar con alta precisión.
Torre Central	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	Receptor fijo, altas temperaturas.	Mayor espacio, mayor costo.

Tabla 2.2 Tipos de concentrador que cumple con la mayor parte de las especificaciones iniciales así como sus desventajas y ventajas.

Si se analiza la tabla 2.2 se observa que el mejor concepto para aprovechar la energía solar y transformarla en eléctrica es el concentrador parabólico de revolución además de cumplir con la mayoría de las especificaciones objetivo. El concentrador solar se descompone en sus partes fundamentales para observar aún más con detalle el principio de funcionamiento.

Para comprender un análisis de los diferentes conceptos que se presentan en el aprovechamiento de la radiación solar direccionado al desarrollo de un nuevo producto, siempre será de gran importancia estudiar las necesidades existentes en conjunto con el desarrollo de las primeras especificaciones llamadas “especificaciones objetivo” presentadas en la tabla 2.1, aunque es un primer vistazo, la idea queda completamente

definida con las ventajas y desventajas de cada uno de los conceptos. Para el caso, una muestra de los concentradores solares más utilizados hace que la elección sea tomada conociendo el proceso que manejan. Las decisiones tomadas para la elección del concepto fundamentan el proceso que se lleva a cabo para el desglose del sistema que se propone subsecuentemente en que se detalla cada uno de los componentes y como es que cumple con las especificaciones objetivo.

## Capítulo 3

### 3.- Selección y Justificación de Concepto

**Objetivo del capítulo 3: Aplicar de la segunda parte de la fase 1, seleccionar conceptos a conveniencia para suponer mejor desempeño.**

El desarrollo del capítulo involucra exclusivamente al sistema disco parabólico de revolución con dos componentes fundamentales (plato y receptor) que demuestra una gran factibilidad con el avance tecnológico para aplicarse directamente suponiendo los parámetros propuestos en la primera parte de la fase 1. La demostración del concepto es esencial con la flexibilidad que tengan las partes que se diseñan por lo tanto regresar a una investigación más detallada es de gran importancia. Con excepción de la búsqueda en cuanto a los avances tecnológicos sobre el motor Stirling por la existencia de una ficha técnica como propuesta a utilizar.

Los sistemas concentradores parabólicos de revolución han sido utilizados en medida comercial y por lo tanto experimental, resultando ser la mejor opción para el aprovechamiento de energía solar con el funcionamiento del motor Stirling, de igual manera para el desarrollo de un nuevo producto, en teoría el motor Stirling es el más eficiente en el mercado para convertir energía térmica en mecánica aunque una desventaja es requerir de altas temperaturas, se ha destacado el manejo de altas temperaturas producidas por el tipo de concentrador y la eficiencia del motor para la producción de electricidad.

Los motores Stirlings se han utilizado en los sistemas discos parabólicos de revolución sin excepción y forman un componente fundamental para identificar los parámetros de salida del sistema, por lo tanto la potencia de salida define el éxito o fracaso del diseño de todos los sistemas evaluados como conjunto único. Típicamente el rango de temperatura de operación de un motor Stirling oscila entre los 650°C y los 800°C resultando una eficiencia en la conversión alrededor del 30% y el 40%.

## 3.1 Componentes del concepto seleccionado

Un sistema concentrador solar parabólico de revolución se compone de las siguientes partes: plato parabólico, receptor, sistema de conversión (absorbedor y motor Stirling) y el seguidor solar.

### 3.1.1 Seguidor solar

Se utilizan dos métodos de seguidor solar, el primero es el ángulo elevación solar-azimutal el cual está constituido por un eje paralelo al terrestre y otro perpendicular que está programado por sensores para tener el sistema a su máximo rendimiento, el segundo es el método polar, el cual tiene una programación de  $15^\circ$  por hora en su elevación al día y su variación de  $\pm 23 \frac{1}{2}^\circ$  en sentido ecuatorial anualmente.

### 3.1.2 Parábola de revolución

La parábola de revolución es el componente del sistema que ocupa una superficie reflejante (espejos de primera o segunda superficie, laminas delgadas de aluminio y plásticos metalizados), que funciona para concentrar los rayos reflejados en una región de área llamada foco que idealmente debería ser puntual pero por efectos del ángulo solar incidente se forma una elipse reflejada en el receptor. Para su diseño geométrico se toma en cuenta la potencia de salida que se desea tener con la máxima insolación aplicada, para obtener  $5 [KW_e]$  se necesita aproximadamente de  $5.5 [m]$  de diámetro de apertura y para  $25 [KW_e]$  se necesita  $10 [m]$  (Stine and Diver, pag 6).

Este tipo de geometrías parabólicas logra concentrar los rayos solares en una región más pequeña, por lo tanto se pueden obtener altas temperaturas que oscilan en el rango de operación de los motores Stirling, con la ventaja de ser dimensionalmente flexibles para crear un diseño apto para satisfacer las necesidades iniciales.

Para los platos parabólicos o parábola de revolución, se pueden utilizar espejos facetados que tienen normalmente formas cuadrangulares, hexagonales y hasta triangulares, montados sobre la superficie curva del plato. Por una pequeña curvatura de los espejos se tiene una mayor precisión y por lo tanto una mayor razón de concentración, la desventaja es que tienden a ser pesados y costosos, cada parte debe estar pegada con mucha precisión y se debe tener un gran alineamiento en un gran número de espejos. La tabla 3.1 ejemplifica algunos platos parabólicos construidos que utilizan esta forma de cubrir la superficie con espejos facetados con alto porcentaje de reflectividad inicial que oscila entre el 91% y 95%:

Nombre	Diámetro de apertura	Numero de facetas	Dimension de cada faceta	Año
Banco de Pruebas Jet Propulsion Laboratory	10.7 [m]	220 facetas de espejos delgados adheridos a la estructura	610[mm]x 710[mm]x51[mm]	1979
Vanguard 1	10.57 [m]	336 facetas de espejos delgados adheridos a la estructura	451[mm]x 603[mm]x50[mm]	1984
Concentrador McDonell Douglas Corporation	10.57 [m]	81 facetas de espejos delgados de grado comercial unidas en una hoja de acero	910[mm]x 1220[mm]	1984

Tabla 3.1 Discos parabólicos de revolución con superficie reflejante facetada (con información Stine and Diver 1994, pag 46-50.



Imagen 3.1 Sistema Advanco/Vanguard 1 rescatado de <http://www.solarenergytopics.com/solar/advanco-vanguard-system.html>



Imagen 3.2 Sistema McDonnell-Douglas rescatado de <http://www.solarenergytopics.com/solar/mcdonnell-douglas-stirling-system.html>

La imagen 3.1 muestra el sistema fabricado en 1984, donde se ha utilizado una superficie reflejante facetada sobre la estructura metálica como soporte en forma parabólica, la 3.2 a diferencia tiene una estructura de soporte diferente con un seguidor solar parecido, pero igualmente con la superficie reflejante facetada.

También se han fabricado concentradores de platos parabólicos reflejantes con delgadas láminas de aluminio que adoptan la forma de un disco parabólico de revolución

Nombre	Diámetro de apertura	Diseño	Año
Concentrador General Electric PDC-1	12 [m]	Se utilizan hojas aluminizadas cubiertas por capas plásticas por ambos lados las cuales son sostenidas por costillas que provocan tensión.	1982
Concentrador Acurex	15 [m]	Se utilizan láminas de acrílico plateado donde los paneles reflectivos se integran con los de la estructura.	1986

Tabla 3.2 Discos parabólicos de revolución con superficie reflejante (con información Stine and Diver 1994, pag 52-54).

La tabla 3.2 ejemplifica algunos discos de revolución que se han desarrollado principalmente en E. U. A.

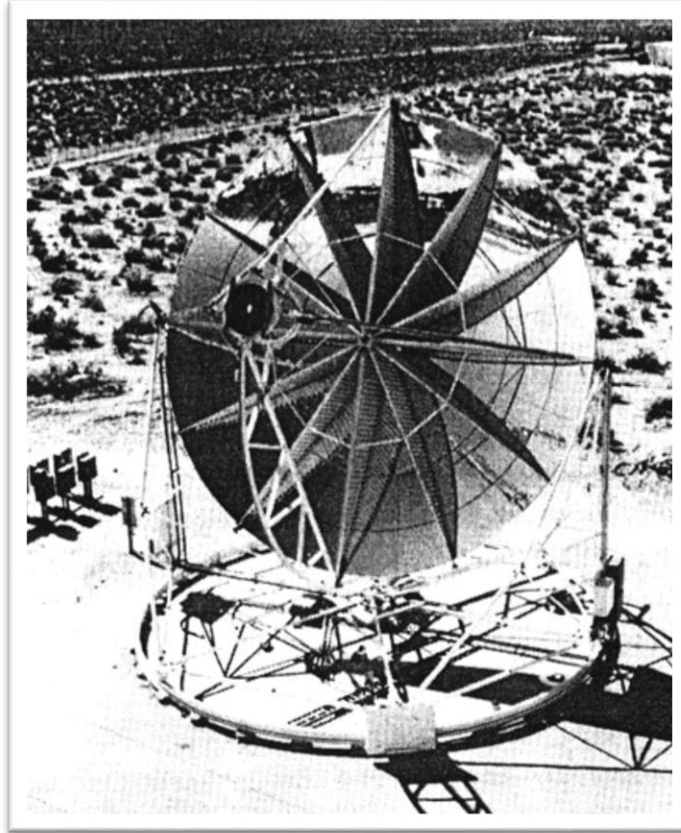


Imagen 3.3 Concentrador G. E. PDC-1 con la superficie adoptada rescatado de <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter09/chapter09.html>

La imagen 3.3 hace referencia a los concentradores que ocupan una superficie reflejante completa adoptando la forma de una parábola, para este caso se utilizan láminas plásticas aluminizadas radiales triangulares usadas como paneles reflectivos, sobre ellas se colocan costillas para mantener una forma parabólica y no sufra deformación con el paso del tiempo y así tener mejor precisión con una distancia focal  $\frac{f}{d}$ .

Para reducir los costos se desarrollaron membranas que se estiran por ambos lados de un anillo adoptando la forma de un concentrador solar parabólico de revolución, estas membranas son de una capa de metal fino reflejante con una de plástico, existe un ligero espacio entre las capas que puede ser presurizada para deformar la concavidad de la parábola. Hay problemas de diseño, pues al crear membranas con una pequeña relación  $f/d$  (distancia focal/diámetro de apertura) el vacío aplicado no genera la suficiente precisión de acuerdo con los rayos incidentes al receptor por que no adopta totalmente una forma de disco de revolución. Por este motivo se desarrollan técnicas que ayuden a disminuir los errores en cuanto a la forma deseada. Se utilizan facetas de membrana tensionada sobre una estructura de que sirve de soporte y existen dos opciones de esta alternativa:



La primera es el concentrador facetado simple de membrana tensionada, algunos ejemplos se encuentran en la tabla 3.3:

Nombre	Diámetro de apertura	Diseño de faceta	Año
Schlaich, Bergermann and Partner	17[m]	Dos hojas de acero como membranas a través de un anillo, se deforma plásticamente aplicando presión con aire para obtener la forma deseada y se mantiene parcialmente con una presión de vacío. Se utiliza espejo plateado de segunda superficie unido a la hoja de acero.	1984
Schlaich, Bergermann and Partner	7.5[m]	Se utiliza la misma técnica al igual que en la de 17 [m] a diferencia que la presión es invertida.	1989
Solar Kinetics	7[m]	Una membrana de acero a través de una anillo se mantiene presurizada para mantener la forma deseada, se utiliza un prototipo de polímero aluminizado	1990

Tabla 3.3 Concentradores fabricados con técnicas de membranas tensionadas de una sola faceta (con información Stine and Diver 1994, pag 56-60).



Imagen 3.4 Concentrador Schlaich, Bergermann and Partner de membrana tensionada facetada, extraída de <http://www.solarenergytopics.com/solar/schlaich-bergermann-50kW.html>

Los concentradores Schlaich Bergermann and Partner utilizan la alternativa de membrana tensionada, pero se necesita tener una manufactura más cuidadosa para deformar las membranas con presión de aire como se muestran en la imagen 3.4 con la parábola de 17 [m] de diámetro de apertura.

La segunda alternativa son los concentradores de membranas tensionadas multifacetadas, que tienen como ventaja requerir menor curvatura por que la distancia focal  $\frac{f}{d}$  es mayor.

La tabla 3.3 ejemplifica algunos discos parabólicos desarrollados con esta técnica para cubrir la superficie con material reflejante, aunque al observar a simple vista claramente no se identifica una parábola aunque aplica el mismo principio:

Nombre	Diámetro de apertura	Diseño	Año
Cummins Power Generation CPG-460	9.6 [m]	14 facetas cada una tiene por diámetro 1.524 [m], se utilizan dos membranas de polímero tensionadas a través de un anillo, la forma se mantiene parcialmente con presión de vacío, el material reflejante es una película de polímero aluminizado.	1990
Department Of Energy E.U.A.	10.4 [m]	12 facetas de 3 [m], se utilizan membranas de acero inoxidable a través de un anillo con una forma previa ó elásticamente hecha. La superficie reflejante es una película de acrílico plateada.	1991

Tabla 3.4 Concentradores multifacetados con membranas tensionadas (con información Stine and Diver, 1994, pag 62-65).



Imagen 3.5 Concentrador Cummins Power Generation CPG-460 con multifacetadas de membranas tensionadas, (obtenido Lovegrove and Staine, 2012, pag 319).

Los concentradores del tipo multifacetado de membranas tensionadas es algo fuera de lo visto con respecto a las parábolas de revolución pero con el mismo principio de funcionamiento, la imagen 5.4 hace referencia a un ejemplo de este tipo de concentradores donde se observa claramente cada una de la facetas montadas sobre una estructura de tal forma que se logre concentrar la mayor cantidad de rayos solares incidentes.

Reiteradamente, todos los tipos de concentradores parabólicos con foco “puntual” habilita flexiblemente propuestas en cuanto a las dimensiones importantes, como el diámetro de apertura  $D_a$ , la distancia focal  $f$ , los materiales reflejantes y la forma de ser montados sobre alguna estructura.

### 3.1.3 Receptor

Los receptores tienen un funcionamiento ligado con el absorbedor, reciben los rayos reflejados por el concentrador y transfieren la energía en forma de calor al gas de trabajo del motor Stirling, los que se han desarrollado para los sistemas parabólicos de revolución deben tener una apertura en el centro que permita la entrada de los rayos reflejados donde estos incidan en el absorbedor, el cual se encuentra en la parte de atrás del espacio mencionado, la cavidad que hay hace que se disminuya la pérdida de calor, la eficiencia de los receptores se puede ver afectada por el tipo de seguidor solar que contenga el sistema.

Existen algunos tipos de receptores, uno de ellos son los que contienen tubos iluminados directamente, los cuales absorben el flujo de calor del sol que inciden del disco parabólico de revolución al receptor en pequeños tubos donde fluye el gas de trabajo, el problema de estos es que no existe uniformidad en la temperatura del mismo y genera problemas de eficiencia en cuanto al concentrador y al motor. Para el sistema Vanguard 1 y McDouglas Corporation se utilizaron este tipo de receptores, una aproximación del diseño se muestra en la figura 3.6.

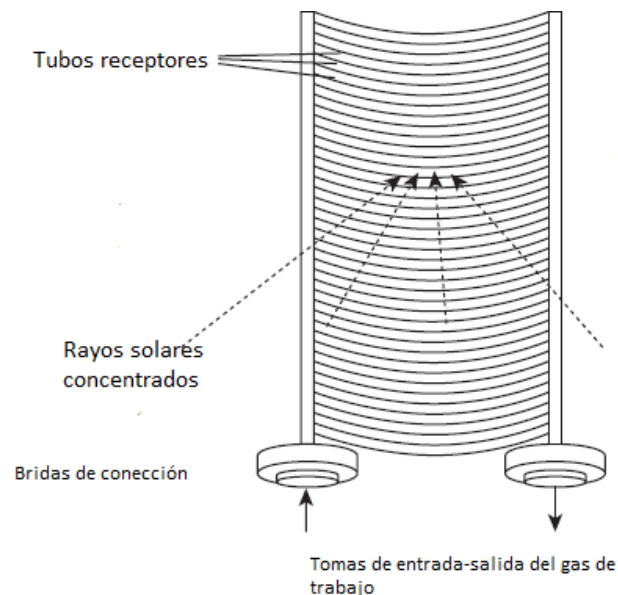


Imagen 3.6 Boceto de un receptor de tubos directamente iluminados (obtenido de *Lovegrove and Staine*, 2012, pag 304).

Otros tipos de receptores se le conoce como de reflujo que utilizan un fluido como medio de transferencia de calor, específicamente un metal-liquido (generalmente sodio), el cual se vaporiza en la superficie absorbente del receptor y condensa en los tubos que calientan al motor Stirling generando una temperatura uniforme y constante, el fluido regresa por efecto de la gravedad para repetir el proceso. De acuerdo con lo anterior se utilizan dos conceptos básicos para el transporte del metal-liquido: “pool boiler” y “heat pipe”.

El tipo más viable es el “heat pipe” (Imagen 3.7) porque responde más rápidamente y por lo tanto se pueden usar los dos tipos de seguidores solares ya sea el polar o el ángulo elevación solar-azimutal sin afectar el rendimiento del sistema.

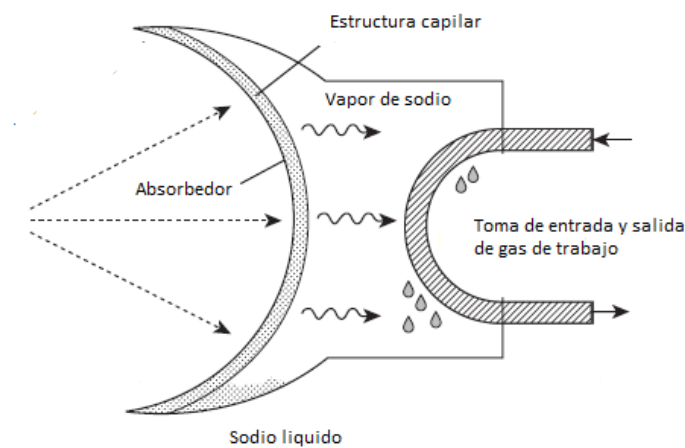


Imagen 3.7 Boceto de un receptor “Heat Pipe”, (obtenido de *Lovegrove and Staine*, 2012, pag 304).

Las ventajas de usar estos tipos de receptores son el aprovechamiento del calor con un flujo de  $800 \left[ \frac{W}{cm^2} \right]$  lo cual permite tener receptores más pequeños, aún sin tener un flujo uniforme del concentrador al receptor.

Por lo tanto con un buen diseño en el receptor hay una mejor entrega de potencia del motor por que el flujo de calor se aprovecha a plenitud, desafortunadamente el funcionamiento de este componente se ve afectado por el tipo de seguidor solar y la precisión que tenga.

Los componentes del sistema disco parabólico de revolución descritos son partes importantes en los que se han probado los avances tecnológicos y se han desarrollado técnicas para mejorar la eficiencia global del sistema, por lo tanto diseñar un sistema basado en las necesidades descritas en el capítulo 2, tienen un alta probabilidad de éxito en cuanto a un mercado que no se aborda.

Ya justificado el concepto seleccionado dentro del ámbito del proceso y desarrollo del producto, es imperativo realizar diseños y pruebas con simulaciones para concluir la fase del desarrollo del concepto en donde se resuelve las especificaciones finales.

## Capítulo 4

### 4.- Construcción del Modelo

**Objetivo del capítulo 4: Construir un modelo enfocado analítico que define la arquitectura (fase 2) del producto para encaminar la construcción de futuros prototipos con los materiales y tolerancias pertinentes (fase 3).**

En el avance del actual capítulo se hace referencia al diseño exclusivo del disco parabólico de revolución aplicando los parámetros pertinentes que se definieron en las especificaciones iniciales, al final del diseño enfocado analítico como se expresa en la figura 4.0, por primera vez se hace mostrar las especificaciones finales, con las cuales se puede proceder a un modelo integral físico que determine una idea clara en el funcionamiento del dispositivo completo.

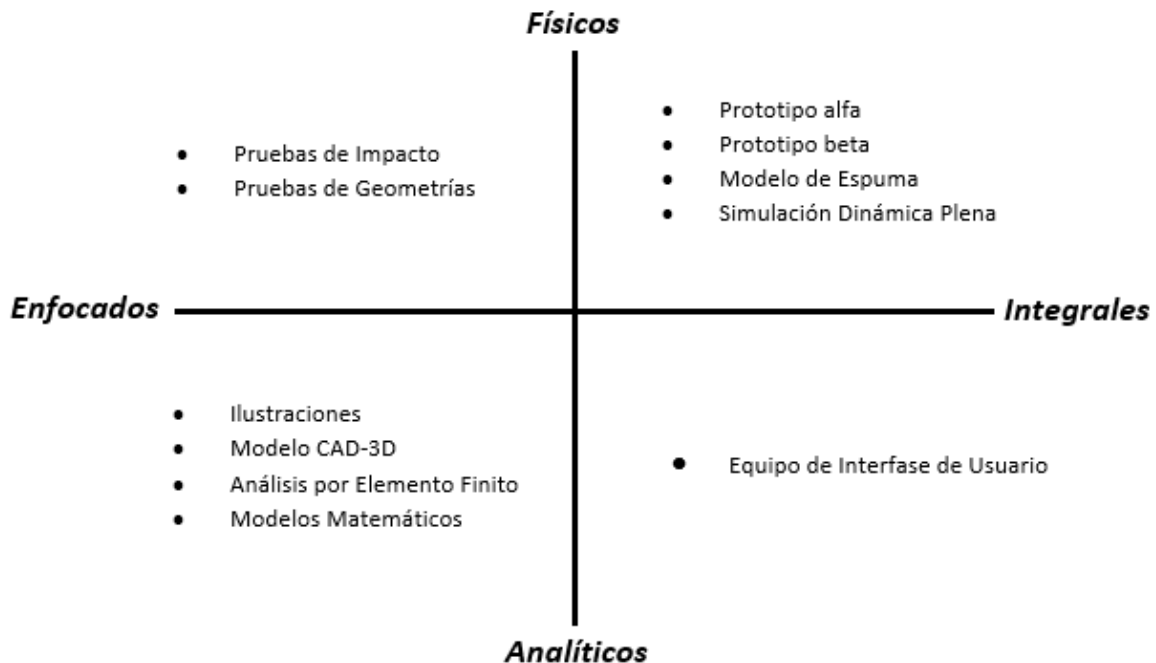


Figura 4.0 Tipos de modelos y prototipos que se clasifican de acuerdo con el grado con el que se aplican sus atributos, elaboración propia basado en (Ulrich, Eppinger 2012, pag 289).

En el capítulo anterior “Selección y Justificación de Conceptos” se detalla la tecnología que se usa para el desarrollo de este tipo de concentradores y las alternativas que se adoptan para aumentar la eficiencia y disminuir los costos, a partir del conocimiento anterior es necesario definir los parámetros geométricos teniendo como suposición las propiedades reflectivas y radiación solar directa, sobre todo pensando que se tiene una superficie

completamente regular, esto como primera aproximación de diseño. También se hace una introducción de especificaciones del motor Stirling que se ha diseñado en el trabajo “Diseño y construcción de un motor Stirling tipo alfa de alfa presión de trabajo”, con los datos de este trabajo se parte para el diseño del disco parabólico de revolución.

Especificaciones del motor Stirling.

Temperatura máxima $T_{max}$	500 [°C]
Temperatura mínima $T_{min}$	100 [°C]
Presión inicial $P$	10 [bar]
RPM propuesto	500 [RPM]
Trabajo neto $W_n$	0.1635 [KJ]
Eficiencia térmica $\mu_{ter}$	51%
Potencia Motor $P_m$	1.361 [KW]

Tabla 4.1 Datos de especificaciones del diseño motor Stirling de *Rosales Villanueva Francisco*, tesis de ingeniero mecánico, 2013.

Con estos datos es suficiente realizar el modelo teórico del diseño del disco parabólico de revolución para calcular los parámetros geométricos necesarios que definan un tamaño coherente en cuanto a las especificaciones iniciales. Se destaca que esencialmente se requiere 1 [KW<sub>e</sub>] como propuesta inicial.

En general, la eficiencia depende de los parámetros de diseño del sistema, es decir, la eficiencia del motor, así como el rendimiento óptico del concentrador (reflectividad de los espejos, la precisión del contorno del reflector, la rigidez de la estructura de soporte, etc) y la insolación solar disponible.

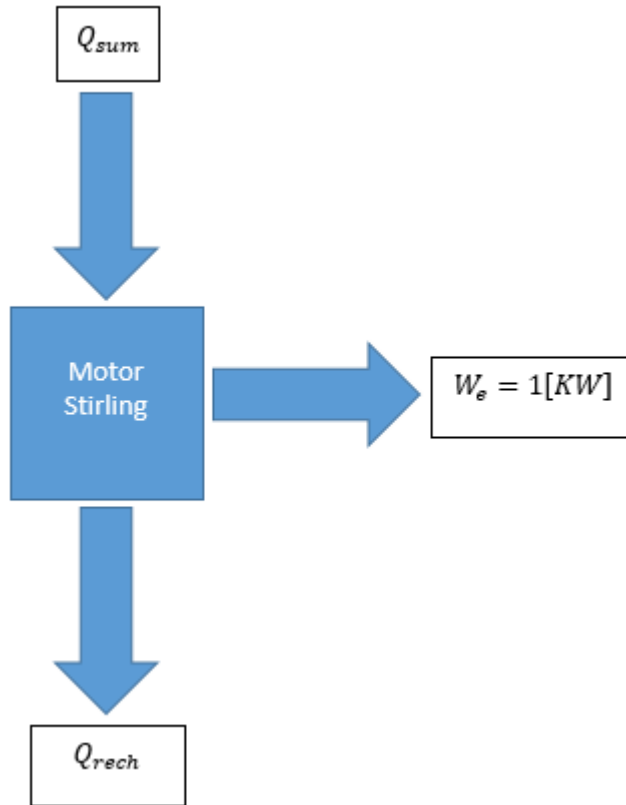


Figura 4.1 Esquema que hace referencia a la potencia de salida del motor Stirling y los factores que intervienen, (elaboración propia).

#### 4.1 Modelo teórico

Tomamos como dato principal la generación de 1 [KWe], y una eficiencia térmica de  $\eta_{term} = 51\%$ , entonces a partir de la expresión:

$$\eta_{term} = \frac{W_e}{Q_{sum}} \dots (4.1)$$

donde;

$$Q_{sum} = \frac{W_e}{\eta_{term}} \dots 4.2$$

$$\frac{1[KW]}{0.51} = 1.96[KW]$$

El resultado anterior es necesario para poder generar 1 [KWe].

Ahora utilizando la siguiente expresión:

$$Q_{sum} = I_b A_c \rho_c \dots (4.3)$$

Y suponiendo un valor de la radiación directa  $I_b = 900 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  y una reflectividad de la superficie del concentrador  $\rho_c = 0.9$ , entonces:

$$A_c = \frac{Q_{sum}}{\rho_c I_b} \dots (4.4)$$

$$\frac{1.96 [KW]}{0.92 \times 900 \left[ \frac{W}{m^2} \right]} = 2.419 [m^2]$$

$A_c$  es el área necesaria para el concentrador del cual se puede obtener el diámetro de apertura:

$$D_a = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_c} \dots (4.5)$$

$$\sqrt{2.419 \times \frac{4}{\pi}} = 1.74 [m]$$

Después de obtener  $D_a$  es necesario tener algunas relaciones geométricas que involucren el ángulo de apertura y la distancia focal, ya que la primera es necesaria para truncar la parábola de revolución y la segunda nos ubica el punto donde se encuentra el foco y donde debe estar el plano requerido para tener el receptor.

#### 4.1.1 Definición de los parámetros geométricos del concentrador

Primero comenzamos con la ecuación que describe un paraboloides:

$$x^2 + y^2 = 4fz \dots (4.6)$$

Como se observa en la expresión anterior se tiene una distancia focal  $f$ , pero no está restringida por el ángulo de borde  $\phi_r$  que trunca al paraboloides requiriendo también un diámetro de apertura  $D_a$ .

Se tiene que para dos dimensiones:

$$y = +\sqrt{4fz} \dots (4.7)$$



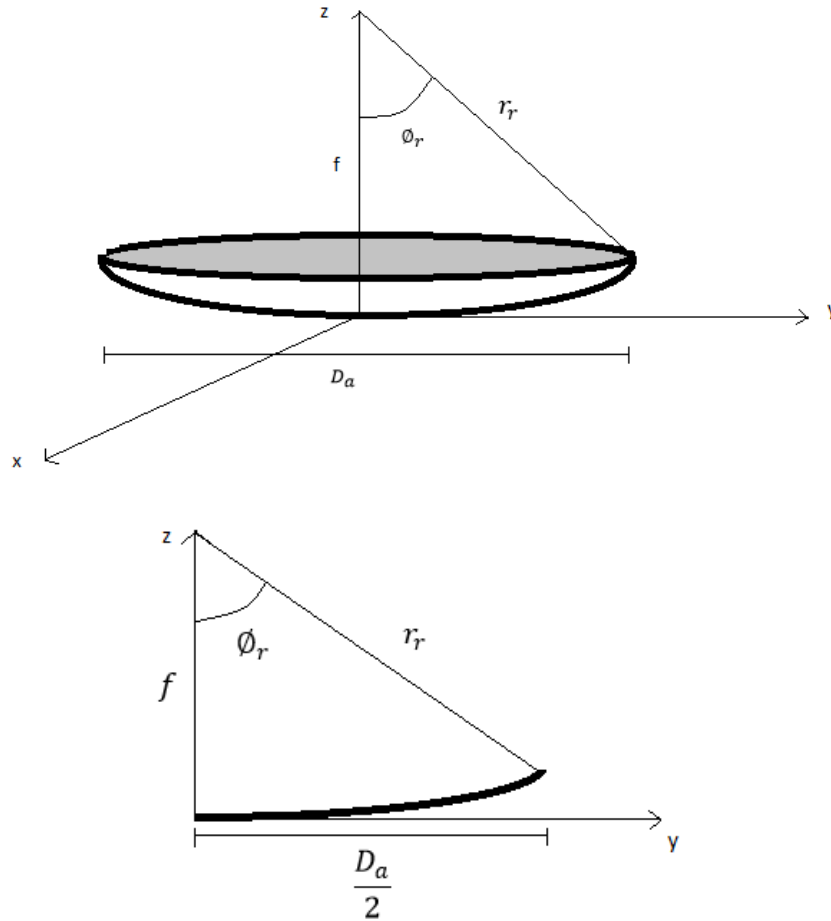


Figura 4.2 Esquema del disco parabólico de revolución parte superior, sección transversal en dos dimensiones parte inferior (elaboración propia basado en *Duffie and Beckman*, 1991, pag 359).

A continuación se deduce la relación que hay entre el diámetro de apertura  $D_a$ , el ángulo de borde  $\phi_r$  y la distancia focal (distancia medida desde el vértice de la parábola hasta el plano focal donde se pondrá el receptor).

Partiendo de la ecuación 4.7 se tiene que:

$$y^2 = 4fz \dots (4.8)$$

Y las relaciones tomadas de la figura 4.2, obtenemos las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\tan \phi_r = \frac{y}{f-z} \dots (4.9)$$

$$\sin \phi_r = \frac{y}{r_r} \dots (4.10)$$

De la relación 4.9 se obtiene una expresión despejando  $z$  como se expresa a continuación:

$$z = f - \frac{y}{\tan \phi_r} \dots (4.11)$$

Al sustituir la relación 4.11 en la expresión 4.8 se obtiene lo siguiente:

$$y^2 = 4f \left[ f - \frac{y}{\tan \phi_r} \right]$$

O bien,

$$y^2 = 4f^2 - \frac{4fy}{\tan \phi_r} \dots (4.12)$$

Al sustituir la expresión 4.10 en la expresión 4.12 se obtiene:

$$r_r^2 (\sin \phi_r)^2 = 4f^2 - \frac{4f(r_r \sin \phi_r)}{\frac{\sin \phi_r}{\cos \phi_r}} \dots (4.13)$$

Y al sustituir la identidad trigonométrica  $(\sin \phi_r)^2 + (\cos \phi_r)^2 = 1$ , la relación 4.13 ahora es:

$$r_r^2 (1 - (\cos \phi_r)^2) = 4f^2 - 4f r_r \cos \phi_r$$

O bien agrupando en su forma de binomio cuadrado perfecto:

$$r_r^2 = (2f - r_r \cos \phi_r)^2 \dots (4.14)$$

Al tomar la raíz cuadrada a cada miembro de la relación 4.14, se obtiene la siguiente expresión:

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos \phi_r} \dots (4.15)$$

La relación anterior permite determinar el valor  $r_r$  que la medida entre el foco de la parábola y la superficie de la misma a un determinado ángulo de borde  $\phi_r$ , si se menosprecia  $r$ , entonces se tiene la distancia del foco a cualquier punto de la superficie.

Por otro lado, si se sustituye en la relación 4.10 el valor de  $y = \frac{D_a}{2}$ , que corresponde a la mitad del diámetro de apertura, por lo tanto se obtiene:

$$r_r = \frac{D_a}{2 \sin \phi_r} \dots (4.16)$$

Al igualar las expresiones 4.15 y 4.16 se tiene que:

$$\frac{2f}{1 + \cos \phi_r} = \frac{D_a}{2 \sin \phi_r}$$

De tal manera que al agrupar términos:

$$\frac{\sin \phi_r}{1 + \cos \phi_r} = \frac{D_a}{4f} \dots (4.17)$$

Al sustituir la igualdad trigonométrica:

$$\frac{\sin \phi_r}{1 + \cos \phi_r} = \tan \frac{\phi_r}{2} \dots (4.18)$$

En la relación 4.17 resulta en:

$$\tan \frac{\phi_r}{2} = \frac{D_a}{4f}$$

Ahora tenemos la relación que existe entre el diámetro de apertura  $D_a$ , el ángulo de borde  $\phi_r$  y la distancia focal  $f$ :

$$f = \frac{D_a}{4 \tan \frac{\phi_r}{2}} \dots (4.19)$$

Por otra parte, se puede determinar una relación para el ángulo de borde  $\phi_r$  en función del diámetro de apertura  $D_a$  y la distancia focal  $f$ .

Retomando la relación 4.12 y multiplicándola por  $\frac{1}{y^2}$  ambos miembros:

$$1 = \frac{4f^2}{y^2} - \frac{4f}{y \tan \phi_r}$$

Por lo que:

$$\frac{4f^2}{y^2} - 1 = \frac{\frac{4f}{y}}{\tan \phi_r} \dots (4.20)$$

Y al despejar  $\tan \phi_r$  de la relación anterior del cual se obtiene:

$$\tan \phi_r = \frac{\frac{4f}{y}}{\frac{4f^2}{y^2} - 1} \dots (4.21)$$

Arreglando los términos de tal manera que, la expresión 4.21 aparezca el factor  $2y$  que corresponde al valor del diámetro de apertura  $D_a = 2y$ :

$$\tan \phi_r = \frac{\frac{8f}{2y}}{16 \left( \frac{f}{2y} \right)^2 - 1}$$

Así la relación 4.21 es ahora de la siguiente forma:

$$\tan \phi_r = \frac{\frac{8f}{D_a}}{16 \left( \frac{f}{D_a} \right)^2 - 1} \dots (4.22)$$

En forma resumida la expresión 4.19 vincula la distancia focal  $f$ , y el diámetro de apertura  $D_a$  con el ángulo de borde  $\phi_r$ :

$$\frac{f}{D_a} = \frac{1}{4 \tan \frac{\phi_r}{2}} \dots (4.23)$$

El ángulo de borde  $\phi_r$  descrito por los segmentos de la figura 4.2, se puede obtener mediante:

$$\phi_r = \tan^{-1} \left[ \frac{8 \frac{f}{D_a}}{16 \frac{f}{D_a} - 1} \right] = \sin^{-1} \frac{D_a}{2r_r} \dots (4.24)$$

Ya establecidas las relaciones geométricas existentes de los parámetros mostrados en la figura 4.2, se pueden establecer las relaciones que definen el factor de concentración que puede alcanzar a partir de la radiación solar disponible. Este factor de concentración está en función de la geometría del receptor.

En la figura 4.3, se esquematiza la radiación solar directa incidente en el concentrador parabólico de revolución y como es reflejada en un plano receptor con origen en su foco suponiendo un alto nivel de specularidad. También se establece que la radiación solar directa se encuentra en un cono angular de  $\alpha = 0.53^\circ$  (ángulo que sustenta el Sol a la distancia Tierra-Sol) y que la radiación entrante es normal a la apertura del concentrador.

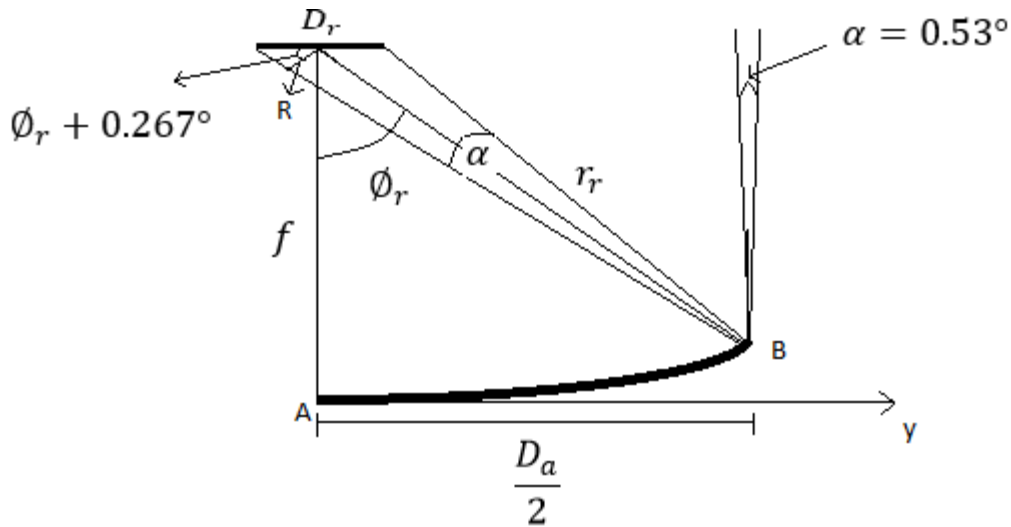


Figura 4.3 Dimensión de la imagen que se forma en el plano focal receptor a partir de los rayos reflejados por el concentrador (elaboración propia basado en *Duffie and Beckman*, 1991, pag 360).

Se determinan algunas relaciones útiles con los parámetros geométricos utilizados para el disco parabólico de revolución como se muestra a continuación:

$$D_a = 2r_r \sin \phi_r \dots (4.25)$$

Y para el área de apertura:

$$A_a = \frac{\pi}{4} D_a^2 \dots (4.26)$$

De la figura 4.3 se deduce que:

$$\frac{D_r}{2} = \frac{R}{\cos(\phi_r + 0.267^\circ)} \dots (4.27)$$

Donde R es:

$$R = r_r \sin 0.267^\circ \dots (4.28)$$

Al sustituir la expresión 4.28 en la 4.27 se obtiene  $D_r$ , tal que:

$$D_r = \frac{2r_r \sin 0.267^\circ}{\cos(\phi_r + 0.267^\circ)} \dots (4.29)$$

O bien, al sustituir  $2r_r$  de la expresión 4.25 en la relación 4.29, se obtiene:

$$D_r = \frac{D_a \sin 0.267^\circ}{\sin \phi_r \cos(\phi_r + 0.267^\circ)} \dots (4.30)$$

Ahora bien la concentración máxima  $C_{max}$  se define como la relación que existe entre el área de apertura de captación del disco parabólico de revolución y el área mínima de captura para la radiación que se encuentra en la imagen solar formada en el receptor, de tal forma que:

$$C_{max} = \frac{A_a}{A_r} \dots (4.31)$$

En donde  $A_a$  es el área de apertura del concentrador y  $A_r$  es el área del receptor en el plano focal.

Para determinar la concentración máxima  $C_{max}$  para un receptor plano de diámetro  $D_r$  en un disco parabólico de revolución de diámetro  $D_a$ , se tiene que:

$$C_{max} = \frac{A_a}{A_r} = \frac{D_a^2 \frac{\pi}{4}}{D_r^2 \frac{\pi}{4}} = \frac{D_a^2}{D_r^2} \dots (4.32)$$

Donde al sustituir las expresiones 4.25 y 4.29 se obtiene:

$$C_{max} = \left(\frac{D_a}{D_r}\right)^2 = \left(\frac{\sin \phi_r \cos(\phi_r + 0.267^\circ)}{\sin 0.267^\circ}\right)^2 \dots (4.33)$$

La expresión anterior muestra la concentración máxima que se puede obtener en un concentrador disco parabólico de revolución con un receptor plano y que depende solamente del ángulo de borde  $\phi_r$ , sin embargo, no se contempla la dispersión angular en el receptor, la cual se puede deber a tres causas; un seguimiento solar inapropiado, mala calidad en el material reflectivo y por mal conformado en la superficie de la curvatura.

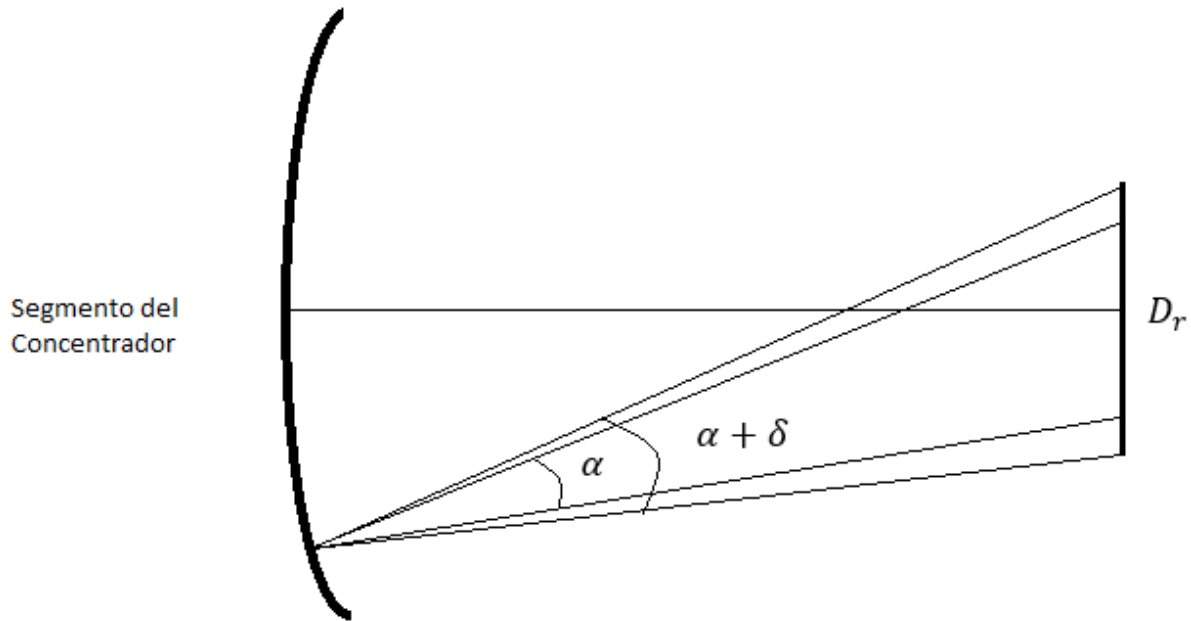


Figura 4.4 Factor  $\delta$  que afecta el diámetro de la imagen que se forma en el receptor (elaboración propia basada en *Duffie and Beckman, 1991, pag 369*).

Por lo tanto, se debe tomar en cuenta el ángulo de dispersión en el diseño del receptor. De no ser así, una fracción de la energía concentrada se encontraría fuera del área de absorción lo que puede causar problemas en los componentes.

Al considerar que toda la intercepción de toda la radiación especular es reflejada se encuentra en un cono angular de  $(0.53^\circ + \delta)$ , la expresión 4.33 se convierte ahora en:

$$C_{max} = \left( \frac{\sin \phi_r \cos(\phi_r + 0.267^\circ + \frac{\delta}{2})}{\sin 0.267^\circ + \frac{\delta}{2}} \right)^2 \dots (4.34)$$

Donde el ángulo de borde  $\phi_r$  es el único parámetro geométrico del concentrador que se encuentra involucrado.

En la figura 4.5 se muestra la concentración máxima sin dispersión ( $\delta = 0$ ), para un receptor plano, se supone que la radiación solar ha sido concentrada por un disco parabólico perfecto, en donde la superficie reflectiva es completamente especular y el eje óptico de la parábola apunta en dirección de la radiación solar directa.

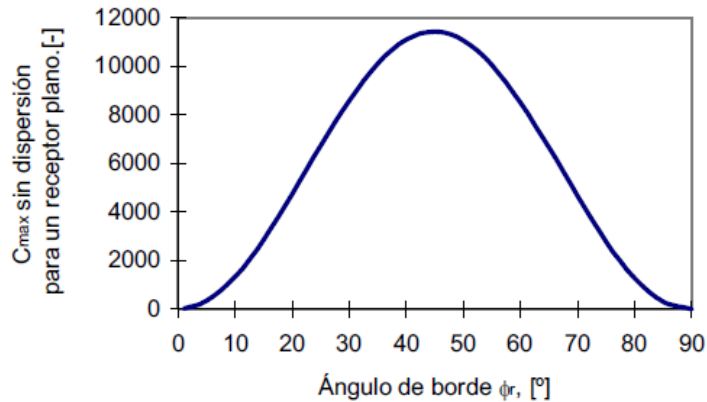


Figura 4.5 Concentración máxima sin dispersión a diferentes grados (extraído de *Jaramillo Oscar*, tesis de maestría, 1998, pag 60).

Por otra parte, existe la distancia focal óptima  $f_0$  para lograr una concentración tan alta como sea posible, al proponer un receptor plano virtual de diámetro  $D_r$  y un ángulo de borde  $\phi_r$  que trunque a la parábola, puede ser obtenido al relacionar las expresiones 4.33 y 4.23 del cual se obtiene:

$$f_0 = \frac{D_r}{\tan \frac{\phi_r}{2}} C_{max}^{\frac{1}{2}} \dots (4.35)$$

Así los parámetros geométricos de diseño del concentrador quedan definidos.

#### 4.1.2 Cantidad de energía que impacta al receptor

Si se realiza un balance de energía en el plano receptor, se puede determinar de manera teórica el calor útil  $Q_u$  que está dado por la energía absorbida  $Q_{abs}$  menos las pérdidas de calor al medio ambiente  $Q_{per}$ , por lo tanto:

$$Q_u = Q_{abs} - Q_{perd} = Q_{abs} - U(T_{abs} - T_a)A_r \dots (4.36)$$

De la expresión 4.36 se observa que  $U$  (referido a diferencia de la temperatura entre el plano y el medio ambiente), depende fundamentalmente de los mecanismos de transferencia de calor, del conjunto de materiales y su configuración geométrica.

La energía que se dispone en el plano receptor se determina mediante la siguiente relación:

$$Q_{abs} = \eta_0 A_a G_b \dots (4.37)$$

Donde  $\eta_0$  es la eficiencia óptica del colector,  $A_a$  es el área del concentrador y  $G_b$  es la irradiancia solar directa que incide sobre el concentrador.

La eficiencia óptica  $\eta_0$  se define de con la expresión 4.38 que se expresa a continuación:

$$\eta_0 = f_t \rho_R \tau_{abs} \alpha_{abs} \gamma F \dots (4.38)$$

En donde  $f_t$  es la fracción que no está sombreada por soportes y receptor en el sistema,  $\rho_R$  es la reflectancia del material,  $\tau_{abs}$  y  $\alpha_{abs}$  son la transmitancia y absortancia del material receptor,  $\gamma$  es el factor de configuración geométrico (depende de la distancia focal  $f$  y el ángulo de borde  $\phi_r$ ), y por último  $F$  que es el error de dispersión que (depende de la dispersión angular).

La eficiencia instantánea del colector  $\eta_c$  está dada por:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_b A_a} \dots (4.39)$$

Por lo tanto de la expresión 4.36 se obtiene:

$$\eta_c = \frac{Q_{abs}}{A_a G_b} - \frac{A_r}{A_a} \frac{U(T_{abs} - T_a)}{G_b} = \eta_o - \frac{U(T_{abs} - T_a)}{G_b} \frac{1}{c} \dots (4.40)$$

Con las expresiones anteriores se concluye que un concentrador parabólico de revolución es altamente sensible a las propiedades ópticas del sistema.

A continuación se determina el calor  $Q_r$  que llega al receptor (potencia calorífica) antes de ser absorbida.

Si se propone que no hay errores en las propiedades ópticas del material reflectivo, ni en el seguimiento solar se supone un  $F = 1$ , o en otras palabras un ángulo de dispersión  $\delta = 0$  se puede escribir de nuevo la energía  $Q_{abs}$  como:

$$Q_{abs} = \tau_{abs} \alpha_{abs} (f_t \gamma \rho_R A_a G_b) = \tau_{abs} \alpha_{abs} Q_r \dots (4.41)$$

La energía recibida en un elemento de área  $dA$  de la superficie del concentrador se define como  $G_b dA \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)$ . Si se toma como  $\rho_R$  como la reflectancia del material, la potencia calorífica  $Q_r$  incidente en el plano focal y dentro de la imagen solar es:

$$dQ_r = G_b dA \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \rho_R \left(\frac{f}{r}\right)^2 \cos(\phi) \dots (4.42)$$

Donde  $\left(\frac{f}{r}\right)^2 \cos(\phi)$  es la relación entre el área de la imagen solar y el área de la elipse que se forma al proyectar sobre el receptor del área de la imagen solar formada en la sección transversal de un cono de luz originado a un ángulo  $\phi$  y una distancia  $r$ .

El elemento  $dA$  se puede expresar como:

$$dA = 2\pi r \sin(\phi) d\phi [(dr)^2 + (rd\phi)^2]^{\frac{1}{2}} = 2\pi r \sin(\phi) r d\phi \left[ \left(\frac{dr}{rd\phi}\right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \dots (4.43)$$

Como se muestra en la relación 4.15 los parámetros  $r$ ,  $f$  y  $\phi$  están relacionados, lo que conduce a  $\left(\frac{1}{r}\right) \left(\frac{dr}{d\phi}\right) = \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)$ , por lo que al sustituir la relación 4.43 se tiene:



$$dA = 2\pi r^2 \sin(\phi) d\phi \left[ \left( \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} = 2\pi r^2 \sin(\phi) d\phi \sec\left(\frac{\phi}{2}\right) \dots (4.44)$$

Al sustituir la relación 4.44 en la 4.42 se obtiene:

$$dQ_r = 2\pi f^2 \rho_R G_b \sin(\phi) \cos(\phi) d\phi \dots (4.45)$$

Para determinar la potencia calorífica  $Q_r$  que llega al receptor basta con integrar la expresión anterior desde  $\phi_{min}$  (ángulo provocado por la sombra del receptor proyectada en el concentrador), hasta el ángulo de borde  $\phi_r$ .

De esta manera  $Q_r$  se determina por:

$$\int dQ_r = 2\pi f^2 \rho_R G_b \int_{\phi_{min}}^{\phi_r} \sin(\phi) \cos(\phi) d\phi \dots (4.46)$$

$$Q_r = \pi f^2 G_b \rho_R ((\sin(\phi_r))^2 - (\sin(\phi_{min}))^2) \dots (4.47)$$

Si utilizamos la relación 4.19 para determinar  $f^2$  en función del área de apertura  $A_a$  y el ángulo de borde  $\phi_r$ , se obtiene:

$$f^2 = \frac{A_a}{4\pi \left( \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \right)^2} \dots (4.48)$$

Si se sustituye la relación anterior se tiene:

$$Q_r = \frac{((\sin(\phi_r))^2 - (\sin(\phi_{min}))^2)}{4 \left( \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \right)^2} A_a \rho_R G_b \dots (4.49)$$

La potencia calorífica  $Q_r$  depende de los parámetros óptico-geométricos del concentrador y el receptor. Así, el factor  $f_t \gamma$  se obtiene de comparar los términos de la expresión 4.41 y 4.49, lo que expresa la siguiente relación:

$$f_t \gamma = \frac{((\sin(\phi_r))^2 - (\sin(\phi_{min}))^2)}{4 \left( \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \right)^2} \dots (4.50)$$

Por otra parte, al sustituir la distancia focal óptima  $f_0$  (relación 4.35) en la expresión 4.44 se obtiene la máxima potencia disponible en el plano receptor del disco parabólico de revolución:

$$Q_{rmax} = \pi \frac{D_r^2}{16 \left( \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \right)^2} (C_{max}) \rho_R G_b ((\sin(\phi_r))^2 - (\sin(\phi_{min}))^2) \dots (4.51)$$

La expresión 4.51 presenta los factores óptico-geométricos del concentrador, está ecuación evalúa la potencia calorífica que se obtiene de un diseño adecuado basado en el diámetro del receptor  $D_r$  y el ángulo de borde  $\phi_r$ , la cual se puede escribir por simplicidad como:

$$Q_{rmax} = \pi f_0^2 \rho_R G_b ((\sin(\phi_r))^2 - (\sin(\phi_{min}))^2) \dots (4.52)$$

Por lo tanto;

$$Q_{rmax} = A_r \rho_R G_b (f_t \gamma C_{max}) \dots (4.53)$$

## 4.2 Calculo del área de la superficie del concentrador

Para saber cuánto material es necesario se calcula la superficie del disco parabólico de revolución, con ayuda del software Inventor 2014 como se muestra en la figura 4.12.

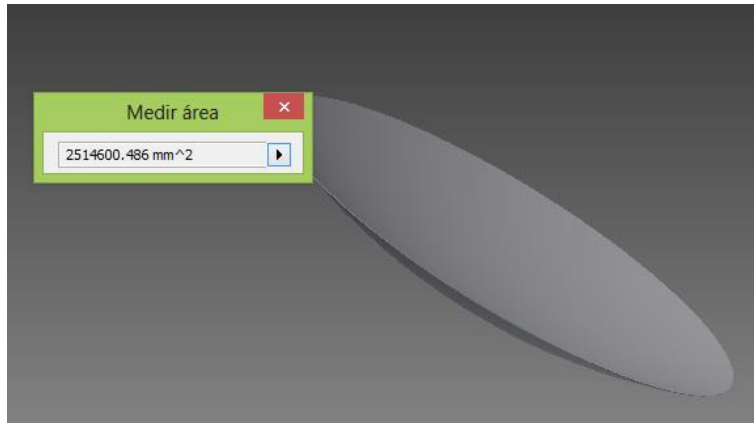


Figura 4.6 Calculo de la superficie del disco parabólico de revolución.

También se puede calcular el área de la superficie con la siguiente expresión:

$$A_{sup} = (h^2 + \frac{D_a^2}{2}) \pi \dots (4.54)$$

Donde  $h$  se puede deducir de la figura 4.13:

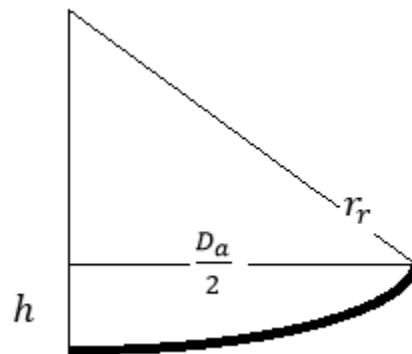


Figura 4.7 Parámetros para el cálculo de la superficie del disco parabólico de revolución.

### 4.3 Materiales Propuestos

Para la subsecuente aplicación del modelo se tiene que definir algunas propuestas sobre los materiales reflectantes que contendrá el diseño del concentrador, pues como se observa en los modelos teóricos la propiedad óptica es inherente en el desarrollo del diseño aunque solo es una suposición esto es válido para tener primeras aproximaciones en base a cuestiones del diseño y desarrollo de productos.

Si se conoce a área de la superficie del concentrador se hace una lista de materiales con las propiedades ópticas necesarias para poder tener distintas opciones verificando las especificaciones y costos que se generan al suponer la adquisición de los mismos haciendo una comparación sobre cuál es más conveniente para la aplicación requerida.

El primer material considerado lleva por nombre ProtectAl (996LB/BF) de la empresa Spec Importaciones, la cual es un vidrio de alta reflectividad anclada a una capa de aluminio. Las principales características que brinda el proveedor son; la resistencia a la corrosión y al clima. Con una reflectancia total del 86% con disponibilidad de espesores desde 0.4 hasta 1.6 [mm] con una capa anódica de 1.8 [ $\mu m$ ].



Figura 4.8 Presentación comercial de láminas electropulidas de Spec Importaciones.

El segundo material lleva por nombre Reflectech de la empresa Reflectech.Mirror, la cual se usa para adherirse a una lámina de aluminio que sirve como estructura del tipo de concentrador que se desea desarrollar, con una reflectancia del 94% tiene un espesor nominal de 0.1 [mm].

Aunque estudios recientes (Gonzalez, G., R.M, 2014), se informa que en realidad la reflectancia de este material es tan solo del 92%.



Figura 4.9 Presentación comercial del material reflejante Reflectech.

## 4.2 Aplicación del modelo

Los parámetros que consideramos constantes se muestran en la tabla 4.2 con los cuales es posible obtener resultados haciendo variaciones a los parámetros descritos anteriormente.

Potencia Eléctrica[W]	1000
Eficiencia de Motor	0.51
Calor Suministrado al Motor[W]	1960.78
Reflectividad	0.92
Radiación Solar Directa $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	900
Cono de la Imagen Solar	0.00466
Área del Concentrador[m <sup>2</sup> ]	2.37
Diámetro de Apertura[m]	1.74

Tabla 4.2 Parámetros que se suponen constantes para el desarrollo del diseño del concentrador disco parabólico de revolución.

La siguiente tabla muestra los valores obtenidos utilizando la relación 4.19 para calcular la distancia del vértice de la parábola hasta el foco  $f$  y la relación 4.30 para obtener el diámetro de la imagen formada en el plano focal receptor  $D_r$ , también se incluye el valor de concentración máxima  $C_{max}$  para cada ángulo de borde  $\theta_r$ .

Angulo de Borde	Angulo de Borde	Distancia Focal [m]	Diametro del Receptor[m]	Cmax
30	0.5236	1.6201	0.0187	8587.72
35	0.6109	1.3768	0.0173	10099.25
40	0.6981	1.1927	0.0165	11077.87
45	0.7854	1.0480	0.0163	11405.11
50	0.8727	0.9309	0.0165	11041.35
55	0.9599	0.8339	0.0173	10030.63
60	1.0472	0.7519	0.0188	8495.30
65	1.1345	0.6814	0.0213	6621.26
70	1.2217	0.6200	0.0255	4635.52
75	1.3090	0.5657	0.0329	2778.80
80	1.3963	0.5173	0.0486	1276.43
85	1.4835	0.4737	0.0984	311.14
90	1.5708	0.4341	-1.7364	1.00

Tabla 4.3 Valores obtenidos a partir del diámetro de apertura  $D_a$  que permanece constante variando el ángulo de borde  $\phi_r$ .

Analizando la tabla 4.3 se observa que efectivamente un disco parabólico de revolución con un diámetro de apertura  $D_a$  truncado con un ángulo de borde  $\phi_r = 45^\circ$  obtiene un factor de concentración mayor para este caso de  $C_{max} = 11405.1059$ , con la cual se hace referencia explícita a una ventaja de tener posiblemente un mayor flujo de radiación en el plano del receptor, la desventaja evidente es que a comparación de un ángulo de borde mayor la distancia focal crece, por lo tanto se tiene que tener una mayor precisión en el montaje del receptor y también un sistema de seguimiento solar con bajo nivel de error, con adición de un buen acabado en la superficie reflejante.

Con un ángulo de borde de  $\phi_r = 90^\circ$  se obtiene un resultado incoherente para el diámetro del receptor  $D_r$ , lo cual se debe a que la parábola tiene un desplazamiento completo, como una semiesfera, por lo tanto los rayos que inciden llegan de diferente forma y para el cual será necesario un receptor esférico, cónico o cilíndrico y no plano, con este parámetro no es factible manejar la aplicación que se tiene para el diseño del concentrador.

Para extender una posible solución de diseño se toman en cuenta las opciones con ángulos de apertura entre  $\phi_r = 40^\circ$  y  $\phi_r = 50^\circ$ , basados en la figura 4.5 y en la tabla 4.3 se obtiene la potencia calorífica y flujo máximo.

Angulo de Borde	Potencia max. [W]	Flujo max. $\left[\frac{KW}{m^2}\right]$
40	1500.98	9970.08
41	1482.94	10078.10
42	1464.31	10161.91
43	1445.69	10221.10
44	1426.67	10255.39
45	1406.86	10264.60
46	1387.25	10248.68
47	1367.45	10207.73
48	1347.06	10141.93
49	1326.67	10051.61
50	1285.29	9937.21

Tabla 4.4 Potencia y Flujo máximo obtenidos a partir del modelo teórico utilizando los parámetros óptico-geométricos.

De la tabla 4.4 observamos que efectivamente para un ángulo de borde  $\phi_r = 45^\circ$  obtenemos el mayor resultado en cuanto al flujo máximo de calor, cabe mencionar que el resultado mostrado no toma en cuenta las variables que penalizan la concentración en el plano receptor, suponiendo una dispersión solar  $\delta = 0$  (referido a los errores superficiales, de reflexión especular del material reflejante y de seguimiento solar), por otra parte el calor que impacta el plano receptor o potencia calorífica tenemos que el producto  $f_t \gamma$  es importante pues afecta directamente la recolección de calor en el foco, la conclusión de la aplicación del modelo es que para ángulos de borde grandes hay una disminución en la recolección de calor.

### 4.3 Simulación

Para aclarar las anteriores suposiciones, se hace el manejo de un simulador de sistemas de concentración solar llamado "Soltrace" desarrollado por la National Renewable Energy Laboratories de los E. U. A.

La metodología de este simulador es sencilla de acuerdo con la interfaz de usuario que se describe exclusivamente para el desarrollo del disco parabólico de revolución, la cual se toma como recomendación del archivo incluido dentro del mismo software.

- 1.- Se define la posición del sol, ya sea en coordenadas globales ( $x, y, z$ ) o de acuerdo al horario solar (Latitud, día, hora). En el desarrollo de la simulación se toma coordenadas globales para situar la posición del sol.
- 2.- Se hace referencia al parámetro del perfil de la forma solar, existen tres opciones, la primera es Gaussian, que es utilizado para este caso, la segunda es Pillbox y la tercera que

debe ser definida por el usuario con datos de entrada del ángulo del cono solar y la intensidad de radiación directa.

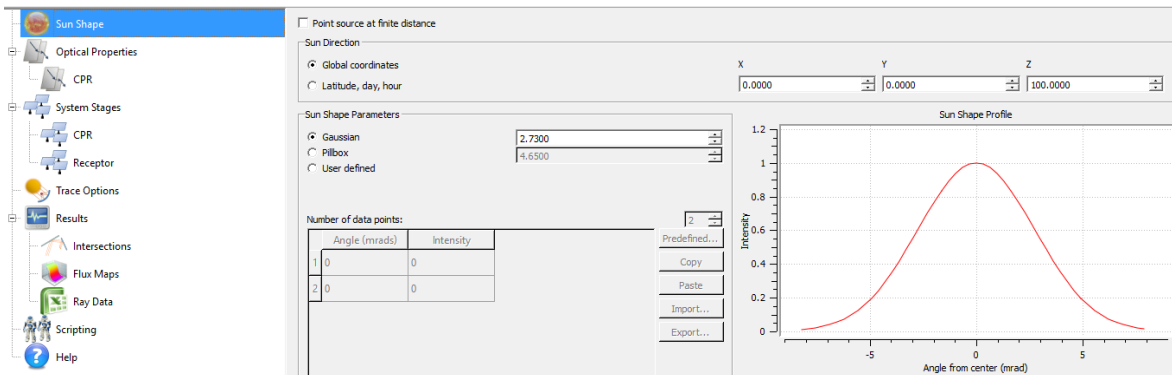


Figura 4.6 El paso 1 y 2 se encuentran ejemplificados con los datos de entrada mostrados para el desarrollo de la simulación del disco parabólico de revolución.

3.-Para este paso se hace la definición de las propiedades ópticas del material, la ventaja del software es que incluye la interacción fundamental entre los rayos incidentes que serán reflejados hacia el receptor y la física que conlleva este tipo de fenómenos. Para la simulación, los datos de entrada muestran en la figura 4.7.

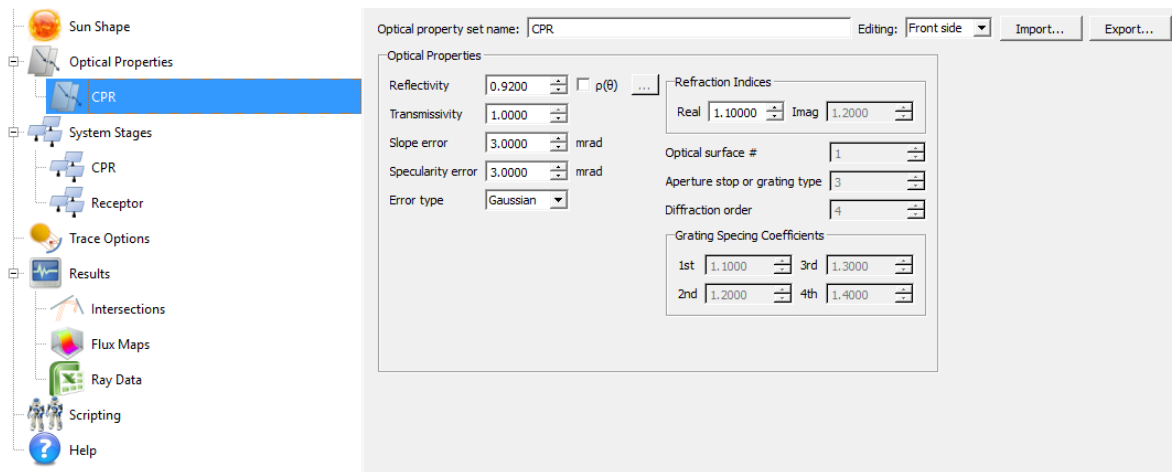


Figura 4.7 Principales datos de entrada para las propiedades ópticas del material reflejante con los tipos de errores que se presentan.

En las propiedades ópticas se toma en cuenta que el material tiene un espesor y los datos de entrada para la parte frontal son diferentes que para la parte posterior en donde no existe la propiedad de reflectividad.

4.- Ahora se tiene que hacer una descripción de las etapas que contiene la simulación, se destaca que cada etapa es secuencial y no hay vuelta atrás, es decir, los rayos reflejados por el concentrador inciden en el plano receptor y no de manera contraria, además que todas las etapas se encuentran dentro de un sistema global de coordenadas cartesianas, se tiene

también que cada etapa tiene un sistema coordinado local o particular que ayuda a definir la posición del sistema en el espacio y la dirección en que los rayos son reflejados.

Para el caso del concentrador de disco parabólico de revolución a diseñar se cuenta con dos etapas evidentes, la primera es la geometría del concentrador, en donde se usan los parámetros calculados como son  $D_a$  y  $f$ , con una superficie parabólica y un área de apertura circular, para la etapa dos se define una interacción virtual situada en el plano focal del receptor, en otras palabras, no hay una interacción física sobre el receptor, pues el objetivo es observar el flujo de radiación incidente sobre el mismo.

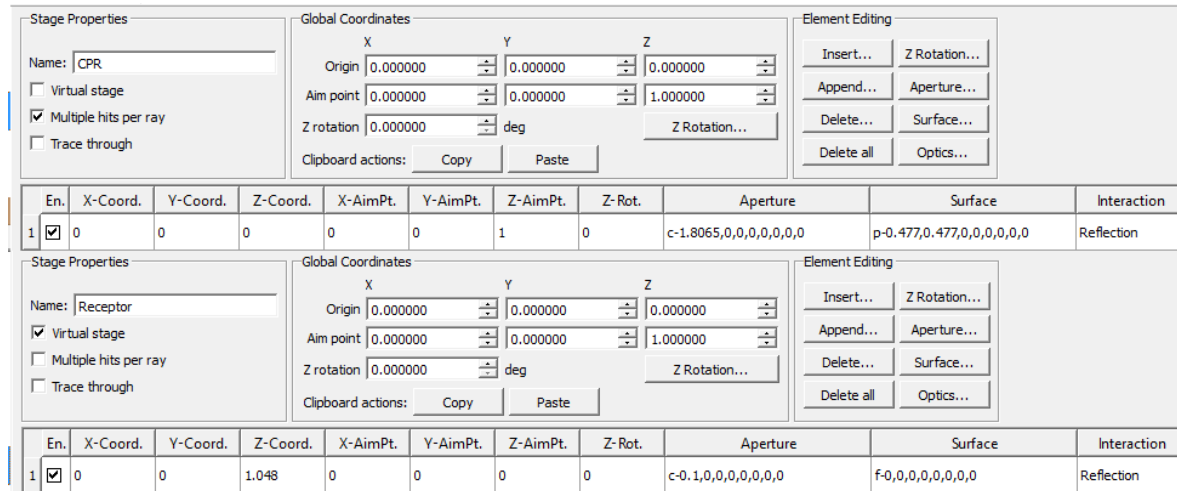


Figura 4.8 Datos de entrada para las etapas 1 y 2 respectivamente partiendo del origen del sistema global coordinado.

La ventaja de la simulación de este tipo de concentrador es que cada etapa cuenta con un solo elemento que hace más sencilla la disposición en el espacio como se observa en la figura 4.8.

5.- A continuación se procede al trazado de los rayos y reproducción de la simulación, los resultados se muestran en la figura 4.9.

Diseño con 45°	Origen (X,Y,Z) Global	Referencia (X, Y, Z, Rot Z)
	(0,0,0)	(0,0,1,0)
	Elemento 1 Concentrador	Elemento 2 Receptor
Local (X, Y, Z) Origen	(0,0,0)	(0,0,1.0480[m])
Local (X, Y, Z, Rot Z) Referencia	((0,0,1,0)	(0,0,0)
Tipo de apertura	Circular; Diámetro 1.74 [m]	Rectangular; 0.1X0.1[m <sup>2</sup> ]
Tipo de superficie	Parabólica	Plana
Tipo de óptica	Reflexión	Reflexión
Reflectancia	0.92	0
Transmitancia	1	1
Error de superficie	3 mrad	-
Error especular	3 mrad	-

Tabla 4.5 datos de entrada que se utilizaron para la reproducción de la simulación con un ángulo  $\phi_r = 45^\circ$



Con los datos de la tabla 4.5 se realiza la simulación en Soltarce, se hace también con los mismos datos un desfase de  $\pm 0.01[m]$  que sirve para observar lo que ocurre cuando movemos el plano del receptor y como afecta el flujo máximo obtenido.

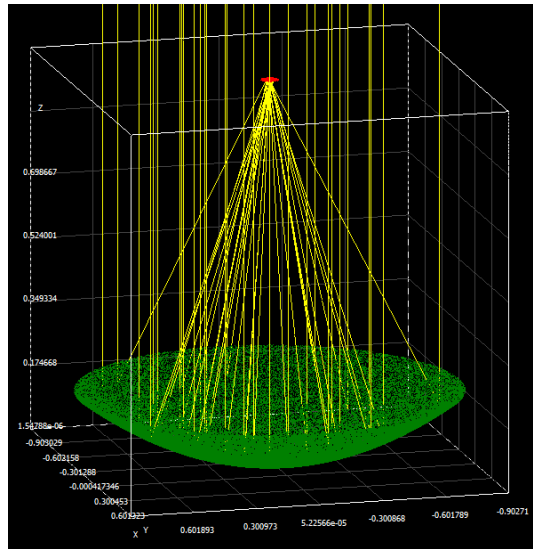


Figura 4.9 Simulación del disco parabólico de revolución con los datos propuestos  $D_a = 1.74[m]$  [m] y  $\phi_r = 45^\circ$  con trazado de algunos de los rayos incidentes.

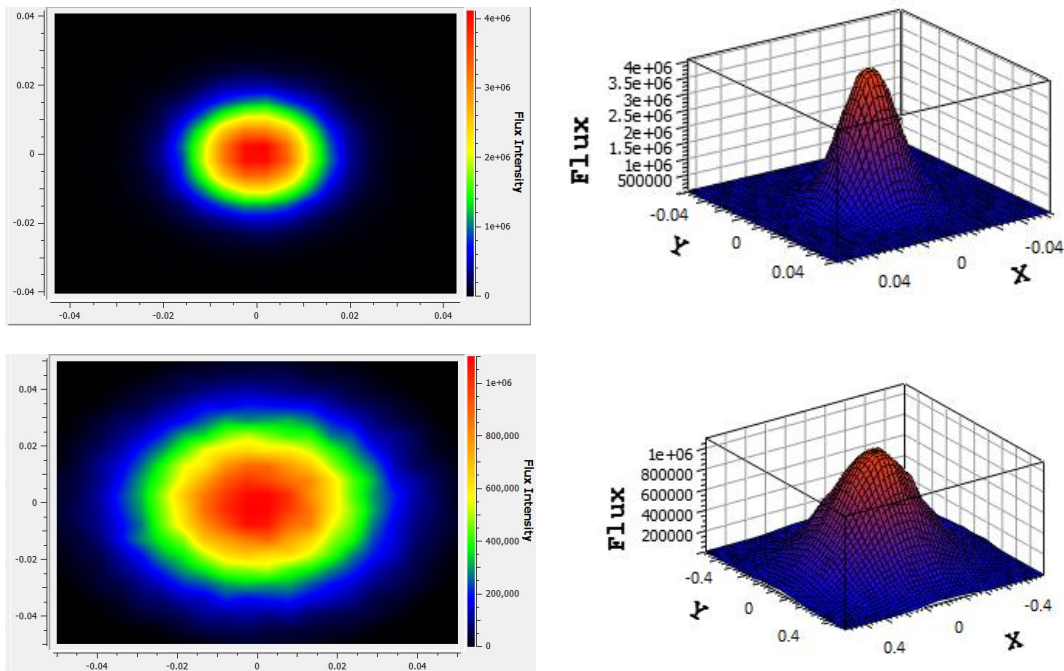


Figura 4.10 Resultados (arriba) de la intensidad de flujo en el plano virtual del receptor en 2D y 3D respectivamente, las unidades son  $\frac{W}{m^2}$ , desfase (abajo) de  $-0.03[m]$  que muestra el cambio de flujo pico o máximo realizado en la simulación.

La figura 4.10 es de gran importancia a nivel cualitativo y cuantitativo, pues observamos la imagen solar definida en el plano receptor además de obtener un valor con unidades coherentes para su registro en el proceso de diseño del producto, donde es la primera aproximación al acercarnos a un modelo enfocado analítico cubriendo los rasgos del diseño del producto en la fase 2.

Flujo Pico $\left[\frac{KW}{m^2}\right]$	$f [m]$
1100.81	1.018
2050.60	1.028
3529.27	1.038
4574.16	1.048
3356.10	1.058
2126.72	1.068
1156.46	1.078

Tabla 4.6 Resultados de las simulaciones en Soltrace realizando un defase de  $\pm 0.01$  aplicado en la distancia focal  $f$ .

En la tabla 4.6 se puede observar que disminuye considerablemente el flujo pico o máximo si no hay precisión en el hecho de tomar en cuenta los parámetros óptico-geométricos. Para una distancia  $f = 1.048$  obtenemos el máximo flujo incidente sobre el plano receptor, aunque si se hace un análisis de los demás resultados, se obtiene un mayor flujo radiativo si el defase es por encima del parámetro original en comparación de uno menor.

Por primera vez se toma en cuenta las posibles especificaciones finales para la construcción de un modelo integral físico y para el concentrador el diámetro apertura que se ha obtenido es de  $D_a = 1.74[m]$  pero el recomendado es de  $2[m]$  para superar los posibles errores en la propiedades ópticas en el material, al igual que asegurar el máximo flujo radiativo que incidirá en el receptor.

Con la aplicación del desarrollo teórico que contiene la fase 2 del diseño y desarrollo de productos y también un vistazo a la fase 3 donde se proponen materiales y hasta se prevén tolerancias para superar los contratiempos del diseño, se tiene un panorama general del modelo enfocado analítico que por supuesto sirve para la subsecuente realización de un modelo físico integral.

## Conclusiones

El objetivo principal sobre el diseño del concentrador ha resultado en gran medida apto y resuelto, basándonos en la literatura existente y por supuesto las herramientas que existen para facilitar la obtención del alcance.

Al tener el modelo enfocado analítico ideal basándose en el proceso del desarrollo del producto, se tiene que la hipótesis expresada al principio del presente trabajo se cumple a grandes rasgos, pues mientras exista una buena aplicación del método para el desarrollo del producto habrá mejores resultados a cualquier nivel de diseño. Ciertamente se cumple con una parte del proyecto a realizar que consta de diferentes etapas, pero se debe mejorar esta metodología para posteriormente tener un modelo genérico exclusivo para el diseño de los concentradores parabólicos de revolución sin importar las especificaciones que se requieran, además de explorar nuevas tecnologías que beneficien el rendimiento del sistema en conjunto.

### Recomendaciones:

Para construir el modelo integral físico se han expuesto dos opciones en cuanto al material reflejante, como recomendación para el primer modelo el material a utilizar es el ProtectAl de la empresa Spec Importaciones pues puede conseguirse de manera libre y sin restricciones en el pedido, la láminas de 16[mm] de espesor con dimensiones de  $3 \times 3[m]$  alcanza perfectamente para construir un concentrador y su costo es de 115 dólares por unidad.

Para la construcción de la parábola se recomienda buscar un taller especializado, como sugerencia se encuentra la empresa Mayortec que se dedica a la venta de antenas parabólicas satelitales en la cual se puede hacer un pedido especial, por razones evidentes, la construcción será con material reflejante de forma facetada, pues se toma en cuenta que la lámina es difícil de manejar y amoldar como una superficie completa (full surface) a la forma parabólica del concentrador.

Originalmente en los cálculos para obtener el área de apertura de la parábola se tiene  $D_a = 1.754[m]$ , se recomienda aumentar este parámetro para superar los errores ópticos y superficiales del material que se presentaran con lo que significa no tener pérdidas en el flujo de radiación incidente compensado de esta manera, se recomienda seguir las especificaciones descritas inicialmente con un  $D_a = 2[m]$ .

## Trabajo a Futuro:

En la actualidad existe un sistema fotográfico llamado “femto-photography” en el que se puede ver una imagen hasta en un trillón de cuadros por segundo, la aplicación actual analiza un haz de luz en su trayectoria hasta su colisión y consecuente dispersión, para efectos del presente trabajo un sistema de visualización de imagen es esencial para la experimentación, pues se pueden hacer incidir los rayos luminosos en el dispositivo y con la cámara estudiar la trayectoria desde el concentrador hasta el receptor, observando las variaciones de los rayos que no lleguen al receptor indagando más a detalle el rendimiento del concentrador de disco parabólico de revolución, errores de superficie y propiedades ópticas del material.

## Bibliografía

*B. Stine, William and B. Driver, Richard, 1994,*

“A Compendium A Solar Dish/Stirling Technology”.

*Duffie, John. A. and Beckman, William A,*

“Solar Engineering of Themal Processes”.

*Jaramillo Salgado, Oscar, 1998,*

“Transporte de Energía Solar a Través de Fibras Ópticas: Acoplamiento de Fibra-Concentrador y Estudio Térmico”, tesis de maestría, UNAM.

*González García, Rosa M. 2014,*

“Diseño Mecánico del Disco Parabólico de un Concentrador Solar y la Caracterización Térmica del Receptor”, tesis de licenciatura, UNAM.

*Lovegrove, Keith and Staine, Wes, 2012,*

“Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments And Applications”.

*Coord. Dr. Mulas del Pozo, Pablo, Mayo 2005,*

“Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de Energías Renovables en México: Energía Solar II”, artículo de investigación.

*M. C. Rojas Morín, Armando, 2006,*

“Diseño Mecánico de una Estructura Tipo Ecuatorial y Caracterización Térmica del Receptor de un Concentrador Solar de Foco Puntual Con Ángulo de apertura de 90°”, tesis doctorado, Facultad de Ingeniería UNAM.

*Rojas Morín, Armando, Fernandez-Reche, Jesús,*

“Metodología de la Realización del Estudio Teórico del Trazado de Rayos del Concentrador Solar Distal I”, artículo de investigación, Facultad de Ingeniería UNAM, Plataforma Solar de Almería-CIEMAT.

*Román Gómez, Paloma,*

“Historia de la Energía Solar Térmica IV” documento disponible en <http://www.slideshare.net/geopaloma/historia-de-la-energa-solar-iv> el día 27 de noviembre 2013 12:00 horas.

*Rosales Villanueva, Francisco, 2013,*

“Diseño y Construcción de un Prototipo de Motor Stirling Tipo Alfa de Alta Presión”, tesis de licenciatura, UNAM.

*Wendelin, Tim and Dobos Aaron, Lewandowski, Allan, 2013,*

“SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems”, guía de usuario, National Renewable Energy Laboratories.

*T. Ulrich, Karl, D. Epingen, Steven, 2012*

“Diseño y Desarrollo de Productos”.

“Solar Energy Topics” sitio disponible en <http://www.solarenergytopics.com/solar/advanco-vanguard-system.html> el día 7 de enero de 2014 a las 19:50 hrs.

“Concentrating Collectors”, documento disponible en <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter09/chapter09.html> el día 8 de enero de 2014 a las 11:50 hrs.

“Reflectech.Mirror Film” sitio oficial disponible en <http://www.reflectechsolar.com/> el día 16 de febrero de 2014 a las 12:00 hrs.

“Spec: Solar Collector, Lighting Sheet Architecture” sitio oficial disponible en <http://www.specimportaciones.com/> el 17 de Febrero de 2014 a las 13:00 hrs.