



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
**PIRHUA**

# DISEÑO DE UN COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO COMPUESTO CON APLICACIÓN PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA

César Antonio Echevarría López

Piura, 02 de Septiembre de 2011

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área Departamental de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Septiembre 2011



Esta obra está bajo una [licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

**U N I V E R S I D A D D E P I U R A**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**“DISEÑO DE UN COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO COMPUESTO  
CON APLICACIÓN PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA”**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico – Eléctrico

**CESAR ANTONIO ECHEVARRIA LOPEZ**

Asesor: Dr. Ing. Daniel Marcelo Aldana

Piura, Agosto 2011

**A Dios,**  
por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para  
lograr mis objetivos, por poner en mi camino a personas maravillosas  
y por las bendiciones y regalos que recibo día tras día.

**A Ana,** mi madre  
por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores,  
por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien,  
porque todo lo que soy es gracias a ella, pero más que nada, por su amor.

**A Pedro,** mi padre  
por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan  
que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante  
y por su amor, y porque todo lo que soy es gracias a él.

**A Daniela, Nora y Silvia,** mis hermanas  
por su confianza, por su ejemplo de vida y por su apoyo incondicional.

**A Kristhel y Tito,**  
por sus corazones nobles y comprensivos y por  
el aliento que supieron darme en todo momento.

A todos ellos,  
muchas gracias de todo corazón.

## Prólogo

Las energías renovables en el país encuentran un potencial especial en el Perú por sus recursos naturales. El Perú cuenta con climas y zonas con enorme potencial para proyectos basados en energía renovable, tales como la energía solar en el norte del país, la energía eólica en la costa y sierra del Perú, y la energía que proviene de la biomasa en la Amazonía peruana.

El objetivo principal de este trabajo es la realización de un estudio teórico acerca del diseño y eficiencia de un colector cilindro parabólico compuesto como equipo principal en el funcionamiento de un sistema termosolar con la finalidad de elevar la temperatura de cierta cantidad de agua. Mediante este trabajo se trata de dar a conocer una de las distintas posibilidades para la explotación de la radiación solar, abundante y gratuita, mediante este tipo de colectores, basados en un sistema sencillo de calentamiento de agua, pero que con una mayor investigación podrá dar pie al empleo de este tipo de colectores en procesos industriales complejos de la pequeña y mediana empresa (PYME) en nuestro país.

Adicionalmente al estudio de los resultados de esta investigación, también se tiene el propósito de promover el uso de tecnologías limpias para el uso eficiente de la energía en las PYME con la finalidad de contribuir a abaratar sus costos de producción, mejorar sus índices de productividad y, asimismo, implementar procesos industriales que contengan menor emisión de carbono.

El uso de estas energías a mediano plazo será masivo, sin embargo, es difícil predecir en qué magnitud ocurrirá esto. Por esta razón urge la implementación de programas de capacitación, sea a nivel técnico (uso de equipos) o profesional (diseño de equipos).

Es propicio también agradecer a las personas que ayudaron en la realización del presente trabajo:

Al Dr. Ing. Daniel Marcelo, catedrático de la Universidad de Piura, por su asesoramiento durante el desarrollo del estudio así como la dedicación entregada en el proceso.

A los ingenieros del área de energía de la Universidad de Piura, por su apoyo y tiempo dedicado a responder interrogantes, corregirme y dirigirme para que el trabajo presentado sea correcto. Por último, a los amigos que siempre me apoyan y de los cuales, las palabras de aliento son infaltables.

## **Resumen**

El presente trabajo tiene como finalidad el estudio de un colector cilindro parabólico tipo compuesto, con un diseño óptimo en la geometría del colector, así como su posterior análisis térmico. Dicho estudio se ha realizado con las características que demanda un equipo de captación solar a instalarse en la ciudad de Piura, así como una elección adecuada en los materiales para la construcción de este tipo de colectores, añadiendo ésto a las características de radiación solar propias de esta parte del país, se quiere dar a conocer que la implementación de esta tecnología es viable. Si bien la implementación de un sistema termosolar demanda una gran inversión, éste motivo no es para alarmarse, ya que el tiempo de vida útil de un proyecto de energía renovable se estima entre los 20 a 30 años, y se estima una recuperación de inversión del sistema termosolar después de un período de tiempo aceptable. Los beneficios obtenidos no sólo serán en el aspecto económico, sino también se verán reflejados en la conservación del medio ambiente.

## Índice

Prólogo .....	ix
Resumen .....	xi
Índice .....	xiii
Introducción .....	1
Capítulo 1 .....	3
1 Marco teórico .....	3
1.1 Descripción general .....	3
1.1.1 Antecedentes .....	3
1.1.2 Justificación.....	4
1.1.3 Objetivos .....	5
1.1.4 Metodología .....	5
1.2 Energía solar .....	6
1.2.1 Historia de la energía solar en el mundo .....	6
1.2.2 El sol.....	10
1.2.3 La constante solar. ( $G_{sc}$ ).....	12
1.2.4 Tipos de radiación .....	13
1.2.5 Instrumentos de medición de la radiación.....	15
1.2.6 Relaciones tierra-sol.....	15
1.2.7 Radiación normal extraterrestre .....	19
1.2.8 Direccionamiento de la radiación solar y sus relaciones geométricas .....	21
Capítulo 2 .....	27
2 Colectores solares.....	27
2.1 Introducción.....	27
2.2 Historia de los colectores solares.....	28
2.3 Criterios de clasificación de colectores .....	30
2.3.1 Colectores sin concentración.....	32

2.3.2	Colectores con concentración.....	35
2.4	Colector cilindro parabólico compuesto (CPC).....	39
2.4.1	Optica sin imágenes (Nonimaging optics) .....	40
2.4.2	Angulo de aceptación de un CPC .....	43
2.4.3	Factor de concentración (C) .....	45
2.4.4	Formas del absorbedor .....	46
2.4.5	Conceptos geométricos .....	47
2.4.6	Desarrollo del CPC en coordenadas polares .....	49
2.4.7	Descripción del CPC en coordenadas cartesianas.....	56
2.4.8	Truncamiento de la parábola .....	65
Capítulo 3	.....	69
3	Prototipo CPC .....	69
3.1	Introducción.....	69
3.2	Parámetros iniciales para el dimensionamiento.....	69
3.3	Comparación de rendimientos teóricos .....	71
3.4	Dimensionamiento.....	72
3.4.1	Estructura .....	76
3.4.2	Superficie reflectante.....	78
3.4.3	Superficie absorbente .....	79
3.5	Análisis térmico de un colector cilindro parabólico compuesto .....	80
3.5.1	Radiación solar absorbida por el colector CPC (S).....	80
3.5.2	Factor de eliminación de calor del colector ( $F_R$ ) .....	84
Capítulo 4	.....	90
4	Resultados y consideraciones.....	90
4.1	Introducción.....	90
4.2	Descripción del sistema .....	90
4.3	Datos de partida .....	91
4.3.1	Consideraciones para el diseño .....	93
4.4	Resultados.....	99
4.4.1	Temperaturas .....	99
4.4.2	Diseño de parábola .....	99
4.4.3	Superficie del colector cilindro parabólico compuesto .....	101
4.4.4	Superficie reflectora .....	103
4.4.5	Superficie receptora.....	104
4.4.6	Otros componentes a considerar .....	105
4.5	Resultados de las pérdidas térmicas y eficiencia.....	109

4.5.1	Cálculo del consumo de agua caliente y del patrón de demanda .....	111
4.6	Mantenimiento del equipo .....	111
4.6.1	Mantenimiento predictivo .....	112
4.6.2	Mantenimiento preventivo .....	112
4.6.3	Mantenimiento correctivo .....	112
Capítulo 5	.....	113
5	Análisis económico y conclusiones.....	113
5.1	Introducción.....	113
5.2	Análisis económico.....	114
5.2.1	Inversión inicial fija y capital de trabajo.....	114
5.3	Conclusiones.....	119
5.3.1	Aprovechamiento del potencial solar de la ciudad de Piura .....	119
5.3.2	Realización de un diseño óptimo de un colector CPC de tipo estacionario.....	120
5.3.3	Concentración aceptable del colector diseñado .....	121
5.3.4	Un colector del tipo CPC posee ventajas frente a los colectores solares planos 121	
5.3.5	Construcción del sistema de colectores solares económicamente viable.....	122
5.3.6	Tecnología amigable con los aspectos medioambientales. ....	122
6	Bibliografía.....	124
Anexo A	.....	128
Anexo B	.....	129
Anexo C	.....	130
Anexo D	.....	132
Anexo E	.....	133
Anexo F	.....	139
Anexo G	.....	140
Anexo H	.....	141
Anexo I	.....	142
Anexo J	.....	143

## Introducción

La energía solar es el recurso energético con mayor disponibilidad en casi todo el territorio peruano. En la gran mayoría de localidades del Perú, la disponibilidad de la energía solar es bastante grande y bastante uniforme durante todo el año, comparado con otros países, lo que hace atractivo su uso. En términos generales, se dispone en promedio anual, de 4-5 kWh/m<sup>2</sup>día en la costa y selva, y de 5-6 kWh/m<sup>2</sup>día<sup>1</sup>, aumentando de norte a sur.

El interés de este trabajo es comprobar teóricamente las ventajas en el empleo de un colector cilindro parabólico compuesto de tipo estacionario, que junto con las características de la radiación solar propias de la ciudad de Piura, harán factible la implementación de sistemas termosolares. Con este trabajo se quiere fomentar una mayor investigación en el campo de la energía termosolar, y con esto, persuadir el desarrollo industrial a gran escala de esta tecnología limpia.

Esta tesis se divide en cinco partes. La primera parte es un estudio acerca de los conceptos de la radiación solar. Estos conceptos son necesarios para la comprensión de la magnitud de la radiación solar que se puede captar mediante un colector solar.

La segunda parte presenta una clasificación de los diferentes colectores que son empleados alrededor del mundo con sus respectivas características y aplicaciones. Debido a que esta tesis se ha centrado en el colector cilindro parabólico tipo compuesto, en este capítulo también se ha realizado un estudio sobre la óptica de este tipo de colector y una descripción detallada para obtener el perfil del colector cilindro parabólico compuesto, también llamado CPC.

En el capítulo tres se ha diseñado un prototipo de un CPC con las óptimas condiciones geométricas para ser instalado en la ciudad de Piura y con la condición adicional de que este prototipo sea de tipo estacionario, es decir se encuentre estático durante toda su vida útil. Las características de diseño se realizaron tanto para el CPC como para la superficie absorbadora. Asimismo se realizó el estudio del análisis térmico propio de este tipo de colectores.

En el capítulo cuatro se muestran los resultados obtenidos teóricamente de nuestro diseño del CPC. También se hace mención a las consideraciones que se deben tomar al momento de

---

<sup>1</sup> Información sustraída del artículo: “El estado actual del uso de la energía solar en el Perú”. *Perúeconómico*. Lima, Vol XXIX, Nr. 11, Nov.2006: *Los retos energéticos del Perú*, página 10-11.

instalar el colector, así como posibles implementaciones del colector que podrán mejorar su eficiencia. Se adiciona el tipo de mantenimiento que se le debe realizar, que como se puede observar no es muy complejo.

Finalmente, el quinto capítulo de esta tesis hace referencia a un estudio técnico-financiero para la construcción de un sistema termosolar empleando este tipo de colector, detallando los materiales y los métodos de conformación para la construcción de este CPC. De la misma manera se hace referencia a las conclusiones alcanzadas como consecuencia de este trabajo.

# Capítulo 1

## Marco teórico<sup>2</sup>

### 1.1 Descripción general

#### 1.1.1 Antecedentes

El sol es la fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la historia. Si se aprende cómo aprovechar de forma racional la luz que continuamente irradia sobre el planeta, puede satisfacer todas nuestras necesidades. Ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia.

La energía del sol en forma de radiación solar contribuye en casi toda la vida existente sobre la tierra vía fotosíntesis y maneja el clima y el tiempo del planeta.

Sería poco racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente, agotables.

Es preciso, no obstante, señalar que existen algunos problemas que debemos afrontar y superar. Aparte de las dificultades que una política energética solar avanzada conllevaría por sí misma, hay que tener en cuenta que esta energía está sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas. Así, por ejemplo, la radiación solar es menor en invierno, precisamente cuando más se suele necesitar.

El Perú es un país de topografía muy variada, de gran diversidad climática y condiciones excepcionales que confieren un elevado potencial de energías renovables. Sin embargo, para hacer posible el diseño de políticas y medidas para incentivar el mayor uso de estas energías limpias que promueven el desarrollo especialmente en zonas rurales, es necesario e indispensable cuantificar esta disponibilidad así como conocer su distribución temporal en el territorio.

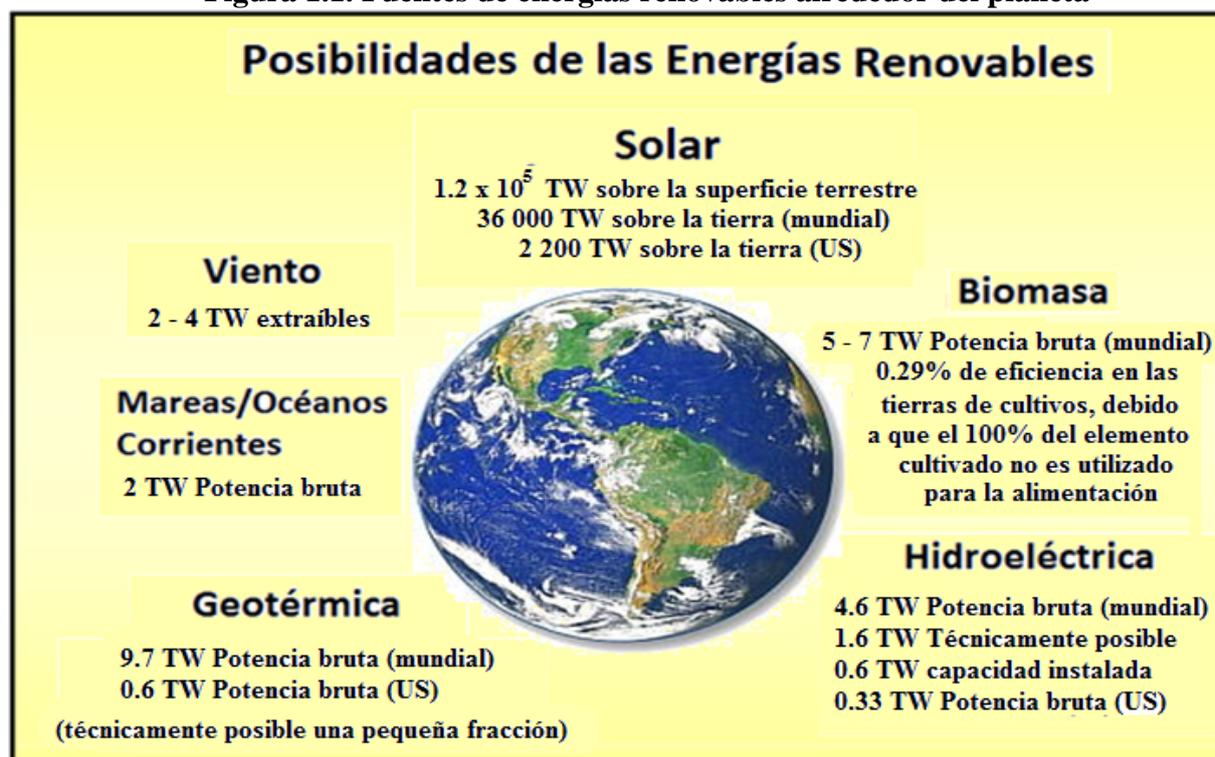
---

<sup>2</sup> Este capítulo ha sido elaborado con las referencias bibliográficas [4], [5], [6], [11], [13], [19], [22], [27], [28], [29], [30],[31], [32], [33], [35], [36], [37], [38], [39] como guías

### 1.1.2 Justificación

Las tecnologías de energías renovables producen energía comercial, convirtiendo un fenómeno natural en una forma de energía útil. Estas tecnologías usan la energía del sol y sus efectos directos e indirectos que tiene sobre la tierra (radiación solar, viento, caídas de agua, y la vegetación; biomasa), fuerzas gravitacionales (mareas), y el calor del núcleo de la tierra (geotérmica), como recursos para generar energía. La cantidad de energía solar incidente cada año es igual a 160 veces los recursos existentes en el planeta de combustibles fósiles y es igual a 1500 veces a la energía utilizada en un año en todo el planeta. En la figura 1.1 se representan las actuales fuentes de energías renovables.

**Figura 1.1. Fuentes de energías renovables alrededor del planeta**



Fuente: Benoit Cushman-Roisin. George Crabtree, División de Ciencia de los Materiales. Argonne National Laboratory. EEUU. Enero 2011.

Al final del 2001 la capacidad total instalada en sistemas de energías renovables fue equivalente al 9% del total de generación de energía eléctrica. De seguir esta tendencia, implementando sistemas de energías renovables, el consumo mundial de estas fuentes renovables para el año 2050 se espera alcancen los 318 EJ (1 Exajoule =  $10^{18}$  Joules. (1 EJ =  $10^{18}$  J)).<sup>3</sup>

Los beneficios derivados de la instalación y operación de sistemas de energías renovables pueden ser distinguidos en tres categorías: ahorro de energía, generación de nuevos puestos de trabajo, y la disminución de la contaminación ambiental.

La energía solar térmica aprovechando colectores de concentración solar fue la primera tecnología solar que demostró el potencial de las energías renovables. Un total de 354 MW en

<sup>3</sup> Este párrafo ha sido elaborado con información obtenida de la fuente bibliográfica [4]. Página 19.

plantas solares térmicas han sido operadas continuamente en California desde 1985. Los últimos 5 años se ha visto un crecimiento en el interés en esta área y un número de plantas solares térmicas están en construcción alrededor del mundo. El costo de energía generado por estas plantas, que se encuentran entre el rango de \$0.12 a \$0.16/kWh, tiene un gran potencial para disminuir a \$0.05/kWh con la ampliación y creación de un mercado en masa.<sup>4</sup>

Datos confiables de radiación directa normal y de radiación global son necesarios para el dimensionamiento de una gran cantidad de sistemas de energía solar así como para el estudio comparativo de sitios de ubicación de los sistemas. Estos datos de radiación solar deberán estar disponibles junto con otros parámetros meteorológicos como la temperatura ambiente y velocidad del viento, los cuales también pueden afectar el comportamiento de algunos tipos de sistemas solares.

Por las justificaciones anteriores, este trabajo se enfoca en el diseño óptimo de un concentrador cilindro parabólico compuesto con las características de la radiación solar propias de la ciudad de Piura.

### 1.1.3 Objetivos

- **General:**

El objetivo de esta tesis es el diseño óptimo de un colector cilindro parabólico compuesto del tipo estacionario que nos permita aprovechar la radiación solar para elevar la temperatura de un determinado volumen de agua.

- **Específicos:**

Diseñar un concentrador económicamente viable y con un rendimiento energético aceptable. Así como realizar una comparación con los colectores planos.

Fomentar la utilización de tecnologías amigables con el medio ambiente.

Crear un precedente para el diseño de este tipo de concentradores compuestos, ya sea para aplicaciones domésticas o industriales.

### 1.1.4 Metodología

En primer lugar se hace una descripción de las consideraciones a tomar en cuenta en la captación de la radiación solar por un colector. La información relevante sobre colectores cilindro parabólicos compuestos truncados, especialmente detalles de su diseño y descripción de su análisis térmico, ha sido redactada de manera didáctica y para un mejor entendimiento se han realizado los cálculos en un Anexo adjunto (archivo Excel).

Se han seleccionado los materiales adecuados para la construcción de un prototipo experimental.

Luego de haber culminado los estudios técnicos del colector compuesto, se realiza un análisis económico del mismo, con la finalidad de conocer la inversión que sería necesaria para la implementación de un sistema termosolar para el calentamiento de agua, que utilice como equipo colector el concentrador diseñado en este trabajo. Finalmente se han desarrollado las conclusiones del caso.

---

<sup>4</sup> Este párrafo ha sido elaborado con información obtenida de la fuente bibliográfica [4]. Página 22.

## **1.2 Energía solar**

El uso de la energía solar no es algo nuevo, desde hace varios siglos ya era utilizada para diferentes funciones, pero con la llegada de la Revolución Industrial fue sustituida por el petróleo.

En la actualidad debido a los altos costes del petróleo y por su gran impacto ambiental, se ha decidido regresar al uso de la energía solar. Si el petróleo no hubiera sustituido a la energía solar, seguramente ahora se tendría una tecnología más avanzada en energías renovables

Existen muchos tipos de energía solar, probablemente la más conocida es la energía fotovoltaica que es una forma de obtención de la energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos. Pero hay otras maneras de conseguir electricidad a partir de la energía solar y probablemente con mejores resultados.

Un ejemplo es la energía termosolar que transforma la energía solar en eléctrica. Las centrales termosolares funcionan a través de un ciclo termodinámico, que se compone de un conjunto de espejos (helióstatos), ubicados sobre un terreno y orientados adecuadamente para que reflejen la radiación solar que incide sobre ellos, toda esta radiación se concentra a un receptor, de manera que toda la energía se transporta al mismo tiempo.

### **1.2.1 Historia de la energía solar en el mundo**

#### **1.2.1.1 Principales hitos de la energía solar fotovoltaica**

En 1887, a través de varios experimentos Heinrich Hertz logró producir celdas fotovoltaicas que transformaban la luz en electricidad

En 1893, el físico francés Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, notó que algunos materiales transformaban la luz en corriente eléctrica.

No podía faltar Albert Einstein en la historia de la energía solar, pues en 1905 habló sobre el efecto fotoeléctrico, asociándolo con la generación de electricidad en las células solares.

El procedimiento de Czochralski (método para obtener cristales de silicio de alta pureza) hizo que la comercialización fotovoltaica aumentara de nivel. En 1954 los científicos de los Laboratorios Bell (Murray Hill, NJ D.M. Chapin, C.S. Fuller, y G.L) lograron fabricar la primera célula solar de silicón capaz de crear una corriente eléctrica regulable. Durante la guerra fría las células solares tuvieron su aplicación en aviones y satélites.

En 2002, en Japón se instalaron 25000 paneles solares en los techos de las viviendas expandidas por todo el país.

En 2003, las inversiones en energía solar y eólica superaron los 20 000 millones de dólares al año.

Para el año 2009 había más de 20000 MW fotovoltaicos instalados por todo el mundo (potencia teórica de 20 grupos de centrales nucleares)

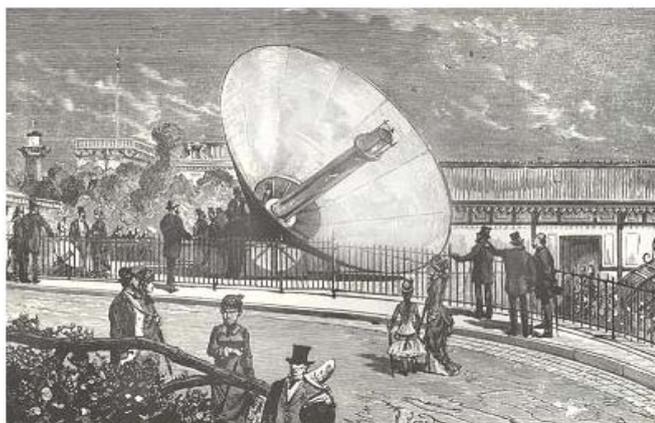
#### **1.2.1.2 Historia de la energía termosolar**

En China y en la antigua Grecia, la gente utilizaba los rayos solares con espejos o vidrios para encender fuegos. Durante épocas de guerra, esa misma técnica era utilizada para prender

fuego a los barcos enemigos. A principios del siglo XX ya se habían inventado máquinas simples que podían funcionar a partir de la concentración del calor del sol.

En 1878 Mouchot fue comisionado por el gobierno francés para la creación de una gran turbina alimentada por energía solar para la exposición internacional de París. Con ella obtuvo medalla de oro cuando mostró algo tan sorprendente como que podía obtener hielo a partir del calor concentrado del sol. En la figura 1.2 se muestra el captador solar utilizado por Mouchot, que consiste en un gran receptor parabólico recubierto de espejos que concentran la radiación del sol en un solo punto. El calor regenerado activaba un motor de vapor.<sup>5</sup>

**Figura 1.2. Turbina alimentada por energía solar de Mouchot.**



Fuente: Portal de energías renovables. Historia de la energía térmica. Parte I

En 1913, el norteamericano Frank Shuman, desarrolló la primera estación termosolar de bombeo en Meadi, Egipto. Este sistema funcionaba con 5 grandes reflectores, cada uno de 62 metros de largo y contenían espejos de vidrio formando así un cilindro con aspecto de parábola. Cada reflector centraba la luz solar en una tubería de su misma longitud, calentando el agua que se transportaba dentro de ellos. El vapor generado alimentaba un motor conectado a una bomba. Este sistema logró distribuir 6000 galones de agua por minuto desde el Río Nilo hasta lugares cercanos.

La historia moderna de la energía termosolar inició con la crisis del petróleo de los años 70. Jimmy Carter, en ese entonces presidente de los EEUU, impulsó las plantas de energía solar concentrada, llamadas SEGS, (SEGS: Solar Energy Generating System) y decidió instalar colectores solares térmicos en el tejado de la Casa Blanca para calentar el agua.

En 1984 en California, se construyó la primera planta SEGS-1. Este tipo de plantas funcionan con un sistema de captador cilindro parabólico. Las SEGS se componen de un campo solar compuesto por filas paralelas de colectores cilindro parabólicos conectados en serie para convertir la energía solar en energía térmica, calentando así el aceite que circula por las tuberías absorbentes de los colectores solares. El aceite caliente se envía a un intercambiador de calor donde se genera el vapor sobrecalentado, requerido para accionar un turbo-alternador, y así es como se produce la energía eléctrica.

---

<sup>5</sup> Bibliografía [35].

Actualmente varios países apuestan por la tecnología termosolar utilizando como dispositivos captadores de radiación a los colectores cilindro parabólicos. Estados Unidos es uno de ellos y en el Anexo A se presentan datos de las plantas de energía que tienen en funcionamiento o que se encontraban en construcción hasta el año 2010.

### 1.2.1.3 Tanques de almacenamiento térmico para centrales termosolares

Las plantas SEGS comenzaron con una potencia de 14 MW y terminaron con una potencia de 80 MW, con una capacidad instalada total de 354 MW. El récord con este tipo de plantas inspiró a España a continuar con sus investigaciones, inaugurando en 2009 la planta termosolar Andasol-1 en Aldeire, Granada.

El objetivo del proyecto Andasol-1 es convertir la energía solar en energía eléctrica a través de un campo solar de colectores cilindro parabólicos, un sistema de almacenamiento térmico de 7 horas y media de capacidad, a base de sales fundidas y con un ciclo de vapor de 49,9 MW de capacidad.

Su procedimiento es el siguiente: cuando el sol brilla los colectores del campo solar concentran la radiación sobre los tubos absorbentes y calientan el fluido hasta una temperatura de 393°C. En el fluido se encuentran sales inorgánicas como Nitrato de Sodio y Nitrato de Potasio, cuando alcanzan la mayor temperatura el fluido es transportado a un tanque caliente. Durante la noche, el tanque caliente traspasa el fluido al tanque frío, allí las sales calientes transfieren energía al fluido y generan el vapor.

El proyecto Andasol-1 que se muestra en la Figura 1.3, logra una eficiencia anual media del 16% de conversión de radiación solar a energía eléctrica.

Junto al proyecto Andasol-1 también opera el proyecto Andasol-2 y Andasol-3, ambos parques termosolares poseen las mismas características que el primero.<sup>6</sup>

**Figura 1.3. Almacenamiento solar en sales fundidas. Parque termosolar Andasol-1.**



Fuente: Scientific American Magazine. Artículo: How to use solar energy at night.

<sup>6</sup> Bibliografía [37]

También habría que destacar las centrales solares PS10 y PS20 construidas en Sevilla por el grupo Abengoa Solar.

La PS10 es mostrada en la Figura 1.4 y es la primera planta con tecnología de torre que produce la electricidad de una manera estable y comercial. Se compone por 624 helióstatos que concentran la radiación solar sobre el receptor que se encuentra en la parte superior de una torre de 115 metros de altura.

El receptor se encarga de generar el vapor saturado de manera directa, se compone de 4 paneles verticales de 5,5 m de anchura y 12 m de altura. La PS10 contiene 30 minutos de almacenamiento aún en condiciones de baja irradiación. La central solar produce 11 MW de potencia y es capaz de abastecer 5500 hogares y ahorrar 6700 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

**Figura 1.4. Torre PS10 y su campo de helióstatos.**



Fuente: Solarweb.Net.

La PS20 es la segunda planta del mundo con este sistema tecnológico. Genera 20 MW de potencia, el doble que la PS10 y está compuesta por 1255 helióstatos que reflejan la radiación solar que reciben sobre el receptor situado en la torre de 165 metros de altura generando el vapor que produce la electricidad en la turbina. La PS20 incorpora avances tecnológicos importantes, respecto a la primera torre, la PS10, ya que posee un receptor con mayor eficiencia, diversas mejoras en los sistemas de control, operación, y en el sistema de almacenamiento térmico de energía. La central puede alimentar a 10000 hogares y ahorrar 12000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

Actualmente continúan las investigaciones sobre la energía termosolar, es probable que una planta termosolar cueste el doble en su construcción que una planta térmica contaminante, pero a la larga será la única alternativa pues se está contaminando el planeta y se tiene que actuar rápido para revertir el efecto invernadero.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Bibliografía [38]

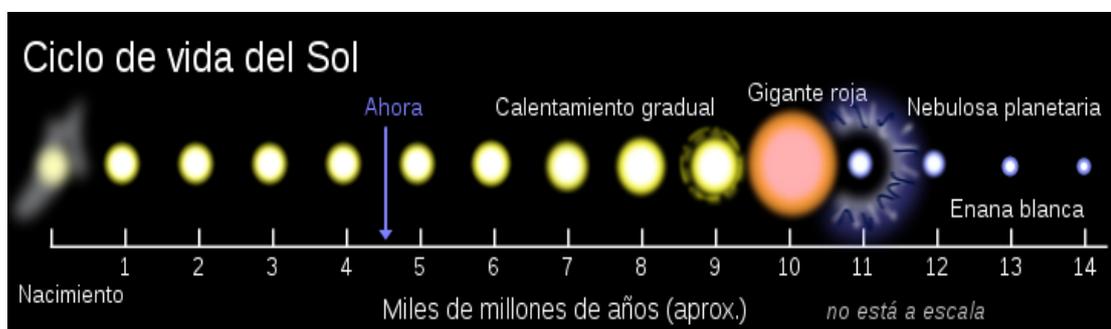
### 1.2.2 El sol

La radiación o energía solar, como su nombre indica tiene como su fuente primaria al sol y tiene su origen en su mismo interior. Es aquí donde la temperatura ( $15 \cdot 10^6$  °C;  $27 \cdot 10^6$  °F) y la presión ( $340 \cdot 10^9$  veces la presión del aire en la Tierra al nivel del mar) son tan intensas que se llevan a cabo las reacciones nucleares. Estas reacciones causan núcleos de cuatro protones o hidrógeno para fundirse juntos y formar una partícula alfa o núcleo de helio. La partícula alfa tiene cerca de 0.7 % menos masa que los cuatro protones. La diferencia en la masa es expulsada como energía y es llevada a la superficie del sol, a través de un proceso conocido como convección, donde se liberan luz y calor. La energía generada en el centro del sol tarda un millón de años para alcanzar la superficie solar. Cada segundo se convierten 700 millones de toneladas de hidrógeno en cenizas de helio. En el proceso se liberan 5 millones de toneladas de energía pura; por lo cual, el sol cada vez se vuelve más ligero. La generación de energía proviene, por tanto, de la pérdida de masa del sol, que se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein,  $E = mc^2$ , donde “E” es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa “m” y “c” es la velocidad de la luz.

El sol contiene más del 99% de toda la materia del sistema solar. Ejerce una fuerte atracción gravitatoria sobre los planetas y los hace girar a su alrededor.

Esta estrella se formó hace 4650 millones de años y tiene combustible para 5000 millones más. Después, comenzará a hacerse más y más grande, hasta convertirse en una gigante roja. Finalmente, se hundirá por su propio peso y se convertirá en una enana blanca, que puede tardar un trillón de años en enfriarse. Este ciclo de vida es representado en la figura 1.5

**Figura 1.5. Ciclo de vida del sol**



Fuente: Future Human. Artículo: La muerte del sol.

El núcleo solar es la región comprendida dentro del 23% de su radio, a partir del centro, que corresponde a tan sólo el 15% del volumen, pero en cambio contiene el 40% de la masa y ahí se genera el 90% de la energía. En esa región, la temperatura es del orden de aproximadamente  $10^7$  K y la densidad es del orden de  $10^5$  kg/m<sup>3</sup>. (Recordemos que la densidad del agua es  $10^3$  kg/m<sup>3</sup>).

A una distancia del 70% del radio solar, la temperatura es del orden de  $10^5$  K y la densidad es de unos 70 kg/m<sup>3</sup>. La zona que va del 70% al 100% del radio solar, se conoce como zona convectiva y su temperatura cae hasta el intervalo de 5000 a 6000 K, mientras que la densidad desciende a  $10^{-5}$  kg/m<sup>3</sup>. La capa externa de esta región recibe el nombre de fotosfera y es

considerada como la superficie del sol, por ser ésta una región opaca<sup>8</sup>, de donde se emite la gran mayoría de la radiación solar hacia el espacio.

La fotosfera es la superficie aparente del sol, que por ser opaca impide observar el interior del sol. Sin embargo, es claro que, como todo el sol, desde el núcleo hasta su superficie se encuentra en forma gaseosa, no hay una superficie física claramente definida, como la hay en la Tierra. Sobre la fotosfera existen también gases, en condiciones tales que son esencialmente transparentes, que se conocen como la corona solar, observable durante los eclipses totales de sol. La corona solar es la atmósfera del sol. De forma similar a como sucede en la Tierra, la corona es cada vez más tenue a medida que se está a mayor distancia del núcleo solar, hasta confundirse con el vacío relativo que existe en el espacio interestelar.

Algunos datos del sol se presentan en la tabla 1.1:

**Tabla 1.1. Características del sol**

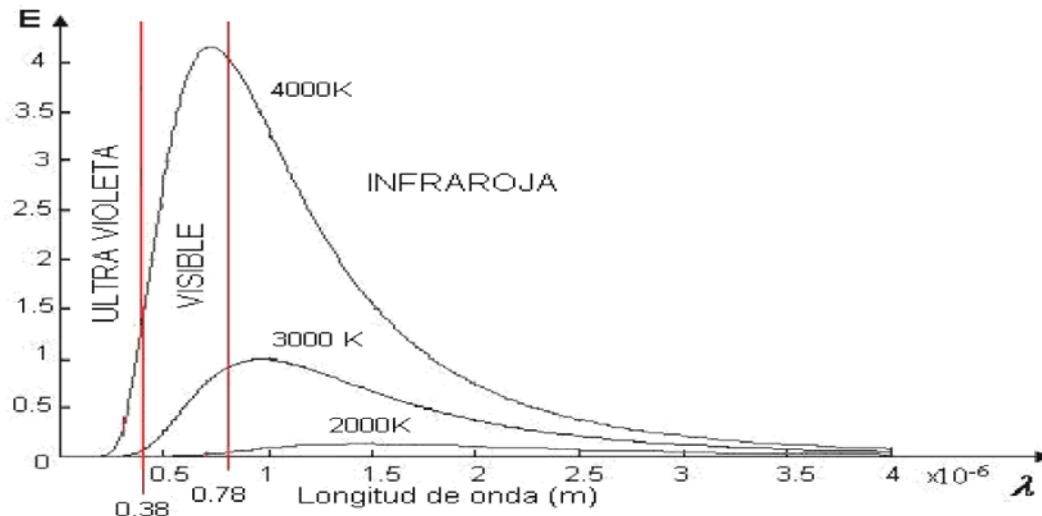
	Sistema Internacional	Sistema Americano
Temperatura superficial:	5 500 °C	9 900 °F
Temperatura interior:	$8 \times 10^6 - 40 \times 10^6$ °C	$14 \times 10^6 - 72 \times 10^6$ °F
Diámetro promedio:	$1.39 \times 10^9$ m.	863 750 millas
Distancia promedio a la tierra:	$1.495 \times 10^{11} \pm 1.7\%$ m.	93 millones millas
Constante solar	1 367 W/m <sup>2</sup>	7.23 BTU/min.ft <sup>2</sup>
Masa:	$2 \times 10^{30}$ kg.	$4.4 \times 10^{30}$ lb
Densidad media:	1.41 kg/m <sup>3</sup>	0.089 lb/ft <sup>3</sup>

Fuente: Bibliografía [29]

El sol es un cuerpo que emite energía con un espectro asociable a su temperatura superficial, de alrededor de 5500 K. Por lo tanto, la longitud de onda de máxima radiación se encuentra alrededor de los 491 nm. El término radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de cualquier cuerpo, esta energía se denomina radiante y es transportada por las ondas electromagnéticas que viajan en el vacío a la velocidad de  $3 \times 10^8$  m/s. Las ondas de radio, las radiaciones infrarrojas, la luz visible, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, constituyen las distintas regiones del espectro electromagnético. Dichas regiones son las presentadas en la figura 1.6.

<sup>8</sup> En óptica, significa que no deja pasar la radiación. Por ejemplo, un espejo es opaco. Una fuente luminosa puede ser opaca. Por ejemplo, una lámpara de neón, emite luz desde su superficie, pero no podemos ver su interior: es opaca. Por tanto, el significado técnico de esa palabra es diferente del que le damos en el lenguaje común. Técnicamente, lo opuesto a opaco es transparente.

**Figura 1.6. Espectro de la Radiación**



Fuente: Bibliografía [30]

### 1.2.3 La constante solar. ( $G_{sc}$ )

La combinación de tres factores: la distancia tierra-sol, el diámetro solar y la temperatura del sol, determinan un flujo luminoso, un flujo de energía que incide sobre la superficie de la Tierra.

La cantidad de energía disponible viene dada por la constante solar,  $G_{sc}$ , que vendría a ser el flujo de energía proveniente del sol que llega, por unidad de tiempo y área, a una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la tierra al sol, fuera de toda atmósfera. Las mediciones de la misma más actuales y aceptadas por el World Radiation Center (WRC) establecen el valor de la constante solar en  $1367 \text{ W/m}^2$ . En la tabla 1.2 se muestran las equivalencias para la constante solar aceptadas por el World Radiation Center (WRC). Este valor se obtiene teniendo en cuenta la potencia irradiada por el sol,  $P$ , y la superficie de la Tierra,  $S$ , de acuerdo con la siguiente definición:

$$I = \frac{P}{S} = \frac{4 \times 10^{26}}{4\pi(1.5 \times 10^{11})^2} = 1.4 \text{ kWm}^{-2}$$

, suponiendo una distancia media sol-tierra de  $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ . Esta cantidad varía a lo largo del año, debido a la variación en la distancia sol-tierra, al ser la órbita terrestre elíptica alrededor del sol.

Por otro lado el valor aceptado por la NASA (1971) y por la ASTM es de  $1353 \text{ W/m}^2$ , lo que en conclusión no representa una variación significativa entre ambos valores. De acuerdo a las estadísticas y mediciones realizadas, se ha podido determinar que existe una desviación estándar de  $1.6 \text{ W/m}^2$  y una desviación máxima de  $\pm 7 \text{ W/m}^2$ . La diferencia entre el valor dado por el WRC y el Standard NASA es de 1%. Sin embargo para los fines de este trabajo y para su aplicación en el campo de la ingeniería, la emisión de energía en el sol puede considerarse constante. El recurso energético solar está mucho más ligado, en la superficie terrestre, a las variaciones meteorológicas, que a las solares.

Es preciso, señalar que existen algunos problemas que se deberán afrontar y superar. Hay que tener en cuenta que esta energía está sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas. Así, por ejemplo, la radiación solar es menor en invierno

**Tabla 1.2. Equivalencias de la constante solar establecidas.<sup>9</sup>**

W/m <sup>2</sup>	Cal/ cm <sup>2</sup> . min	Langley/min	BTU/h.pie <sup>2</sup>	KJ/h.m <sup>2</sup>
1367	1.96	1.960	433.3	4921

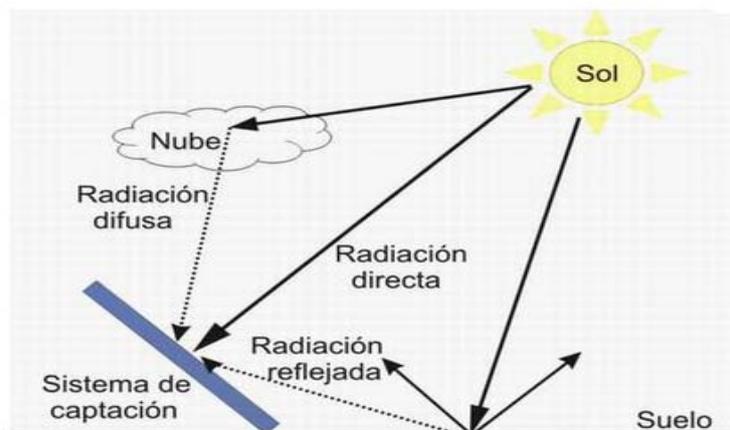
Fuente: Bibliografía [30]

#### 1.2.4 Tipos de radiación

- **Radiación directa:** es la que se recibe directamente desde el sol en línea recta, sin que se desvíe en su paso por la atmósfera.
- **Radiación difusa:** es la radiación que llega a la superficie de la tierra con un cambio de dirección al pasar por la atmósfera terrestre. Este desvío de los rayos solares, se produce por el choque directo con ciertas moléculas y partículas contenidas en el aire, por este motivo, los rayos solares no tienen una dirección directa. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro, aún de día, como sucede por ejemplo con la luna.
- **Radiación terrestre o reflejada o de “albedo”:** es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, etc.
- **Radiación total:** será la suma de todas las radiaciones, directa, difusa y “albedo”, en caso de que se trabaje cerca del mar o de otra superficie reflectante como nevados se considerará la radiación por “albedo” además de la radiación directa y difusa. Por ejemplo, sobre una pared o una ventana, incide la radiación directa del sol, la difundida por las nubes y por el cielo y, además, puede entrar la luz reflejada por algún otro objeto frente a la pared o ventana. Un caso particular, pero de mucho interés práctico en el estudio de la energía solar, es el medir la radiación total sobre una superficie horizontal “viendo” hacia arriba. En este caso puede considerarse que no existe radiación de “albedo” y se conoce también como radiación global. Por tanto, la radiación global es la suma de la directa más la difusa. Para un mejor entendimiento de la radiación total se puede ver el esquema de la figura 1.7.

<sup>9</sup> Equivalencias para el valor de la constante solar aceptado por la NASA y por la ASTM:  $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2 = 1940 \text{ cal/ cm}^2 \text{ min} = 428 \text{ BTU/ft}^2\text{hr} = 4871 \text{ MJ/ m}^2\text{h}$

**Figura 1.7: Componentes de la radiación solar terrestre total.**



Fuente: Monografías.com. Sistema híbrido eólico-fotovoltaico (SHEFV) de baja potencia.

Cuando se habla de energía solar fotovoltaica, se debe tener presente que la radiación que realmente nos importa es la directa, ya que es la que mayor potencial tiene.

Como información adicional, en caso se trabaje con radiación de albedo, se puede observar la tabla 1.3.

**Tabla 1.3. Factor de Albedo para algunas superficies.**

Tipo de superficies	Factor de albedo (%)
Nieve nueva	81
Nieve de algunos días	70
Suelo cultivable despejado	10-15
Hierba	19-26
Bosque verde	12
Pavimento de cemento	28
Pavimento de granito	19
Pavimento de piedra	10
Asfalto	14
Arena clara	25-40
Agua encalmada	5 en invierno y 18 en verano

Fuente: Energía Solar. Energías alternativas y medio ambiente. Lluís Jutglar.

#### 1.2.4.1 Irradiancia

Para expresar la potencia solar, y en general, de cualquier radiación, se utiliza el término irradiancia. La irradiancia,  $W/m^2$ , es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área. Generalmente se usa el símbolo “ $G$ ” para la irradiancia, junto con los subíndices: “ $G_o$ ”, “ $G_b$ ”, “ $G_d$ ”, para la irradiancia extraterrestre, directa y difusa, respectivamente. Nótese que la irradiancia tiene la virtud de indicar muy claramente que la radiación es un fenómeno que transcurre en el tiempo, que no es estático. Es energía que incide instantáneamente sobre una superficie.

### 1.2.4.2 Irradiación o Insolación

Cuando incide la radiación sobre un plano, durante un tiempo determinado, puede hablarse entonces de que incidió una cierta cantidad de energía. La cantidad de energía, por unidad de área, que incide durante un período de tiempo dado, recibe el nombre de irradiación<sup>10</sup>. Las unidades más utilizadas son el kW.h/m<sup>2</sup> ó, en algunos casos, el MJ/m<sup>2</sup>. Y no es otra cosa que la integral de la irradiancia durante el período en cuestión. Generalmente se usa el símbolo “I” para la insolación por hora, mientras que “H” se usa para la insolación en el período de un día. Se aplican los mismos subíndices, por ejemplo: H<sub>o</sub> simboliza la irradiación extraterrestre en un día; “I<sub>d</sub>” simboliza la irradiación difusa en una hora, etc.

De acuerdo con lo anterior, la relación entre la irradiación y la irradiancia está dada por la expresión:  $I = \int_{t_1}^{t_2} G(t)dt$ , en donde la irradiación se está calculando desde el tiempo t1 hasta el tiempo t2 y la irradiancia se considera función del tiempo.

### 1.2.5 Instrumentos de medición de la radiación

Para medir la radiación solar se utilizan radiómetros solares como los piranómetros o solarímetros y los pirheliómetros. Según las características pueden servir para medir la radiación solar global (directa más difusa), la directa (procedente del rayo solar), la difusa y el brillo solar. Ver tabla 1.4.

**Tabla 1.4. Instrumentos meteorológicos de medida de radiación**

Instrumentos meteorológicos de medida de la radiación	
Tipo de instrumento	Parámetro de medida
Piranómetro	Radiación directa, difusa, global
Piranómetro espectral	Radiación global en intervalos espectrales de banda ancha
Pirheliómetro absoluto	Radiación directa (usado como patrón nacional)
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación directa (usado como patrón secundario)
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación directa en bandas espectrales anchas
Actinógrafo	Radiación global
Heliógrafo	Brillo solar

Fuente: Bibliografía [29]

### 1.2.6 Relaciones tierra-sol

Más importante incluso que la cantidad absoluta de energía recibida en un área y período de tiempo determinados, es la intensidad con que dicha energía alcanza la superficie, es decir, la mayor o menor concentración del flujo energético, puesto que dicha intensidad es el factor que más influye en la capacidad de elevar la temperatura del cuerpo que recibe la radiación.

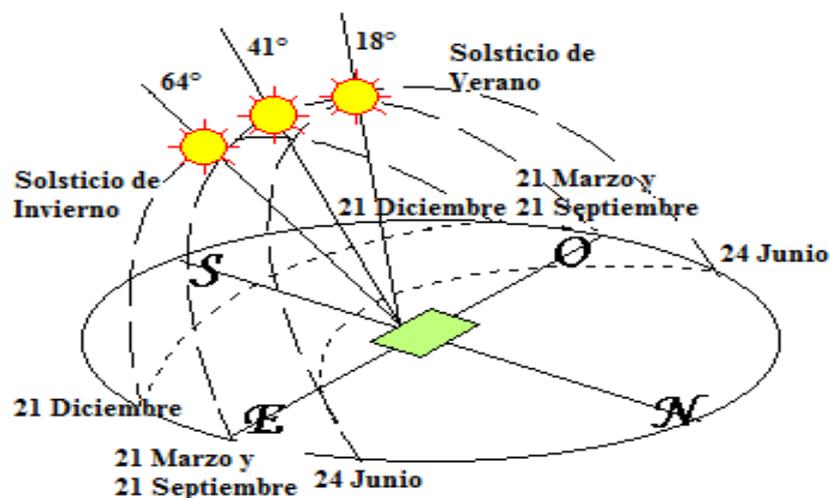
La inclinación con la que las ondas de radiación (rayos del sol) inciden sobre la superficie que deseamos calentar determinará asimismo la intensidad de la energía térmica recibida. Cuánto

<sup>10</sup> A lo largo de un día tendrá unidades de kWh/m<sup>2</sup>/día. Irradiación = Irradiancia x tiempo. Bibliografía [22]

más oblicuos sean los rayos con respecto a dicha superficie, la energía total que transporte un haz se repartirá sobre un área más extensa por tanto, la intensidad será más débil en cada punto de la misma.

Debido a la inclinación del eje de rotación de la tierra con respecto al plano sobre el cual se traslada alrededor del sol, los rayos solares inciden sobre la superficie con diferente ángulo según la época del año. En invierno, lo hacen con un ángulo más pequeño respecto a la horizontal, lo contrario que en verano, época en la que incluso llegan a alcanzar la vertical en las horas centrales del día y en las zonas cercanas al Ecuador. Tal concepto es graficado en la figura 1.8.

**Figura 1.8. Variación de la posición solar según la estación del año.**



Fuente: I.E.S. Alonso Quijano. Alcalá de Henares.

Debido a la mayor verticalidad de los rayos solares, si consideramos la energía incidente sobre una cierta superficie horizontal y durante un período de tiempo determinado, por ejemplo durante una o dos horas, resultará que ésta será mucho mayor en las horas centrales del día que en las horas inmediatamente posteriores al amanecer o anteriores a la puesta del sol.

Para aprovechar esta energía de manera óptima, se debe conocer a profundidad algunos parámetros de gran importancia, tales como: punto geográfico, horas de sol, trayectoria aparente del sol para el punto geográfico, cartas solares, cantidad de energía recibida por unidad de área y tiempo, energía recibida a lo largo del día, mes, año y factores micro climáticos.

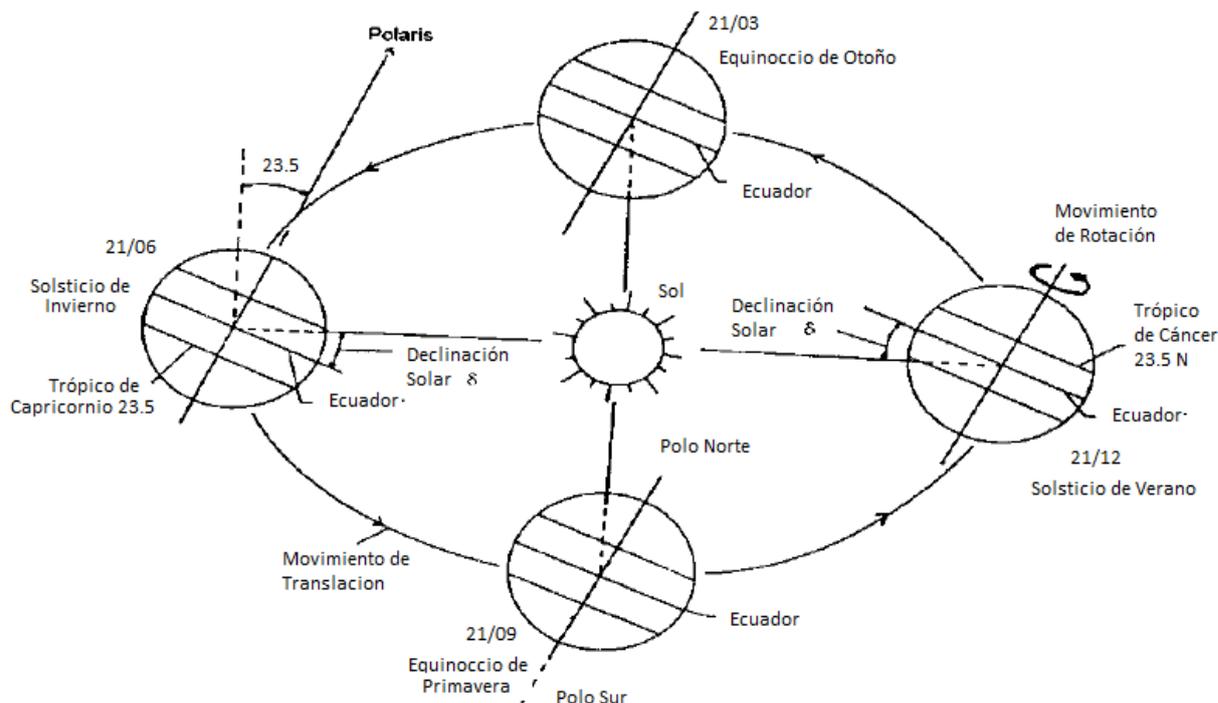
La literatura solar contiene una gran variedad de sistemas, métodos, consideraciones y ecuaciones para establecer las relaciones astronómicas tierra-sol y calcular la posición del sol en cualquier momento.

### 1.2.6.1 Órbita tierra-sol

Nuestro planeta en su movimiento anual entorno al sol, describe en trayectoria elíptica un plano que está inclinado aproximadamente  $23.5^\circ$  con relación al plano ecuatorial.

Esta inclinación es responsable por la variación de la elevación del sol en el horizonte con relación a la misma hora, a lo largo de los días, dando origen a las estaciones del año y dificultando los cálculos de la posición del sol para una determinada fecha, como se puede ver en la figura 1.9.

**Figura 1.9. Órbita de la tierra alrededor del sol, con su eje N-S inclinado un ángulo de  $23.5^\circ$**



Fuente: Ciencia Amateur. La esfera celeste y el movimiento de traslación terrestre.

La posición angular del sol, al medio día solar, con respecto al plano del Ecuador (norte positivo) se llama declinación solar,  $\delta$ , y se puede ver en la figura 1.9. La declinación solar varía de acuerdo con el día del año dentro de los límites siguientes:  $-23.5^\circ < \delta < 23.5^\circ$

La declinación solar es cero el día que comienza la primavera y el día que comienza el otoño (equinoccios) y la declinación es máxima en el solsticio de verano ( $23.5^\circ$ )

### 1.2.6.2 Distancia tierra-sol<sup>11</sup>

La tierra gira alrededor del sol en una órbita elíptica, con el sol ubicado en uno de sus focos. La cantidad de radiación solar que llega a la tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al sol, por lo cual un valor preciso de la distancia tierra-sol es importante. La distancia media tierra-sol " $r_o$ " se denomina unidad astronómica<sup>12</sup>(UA).

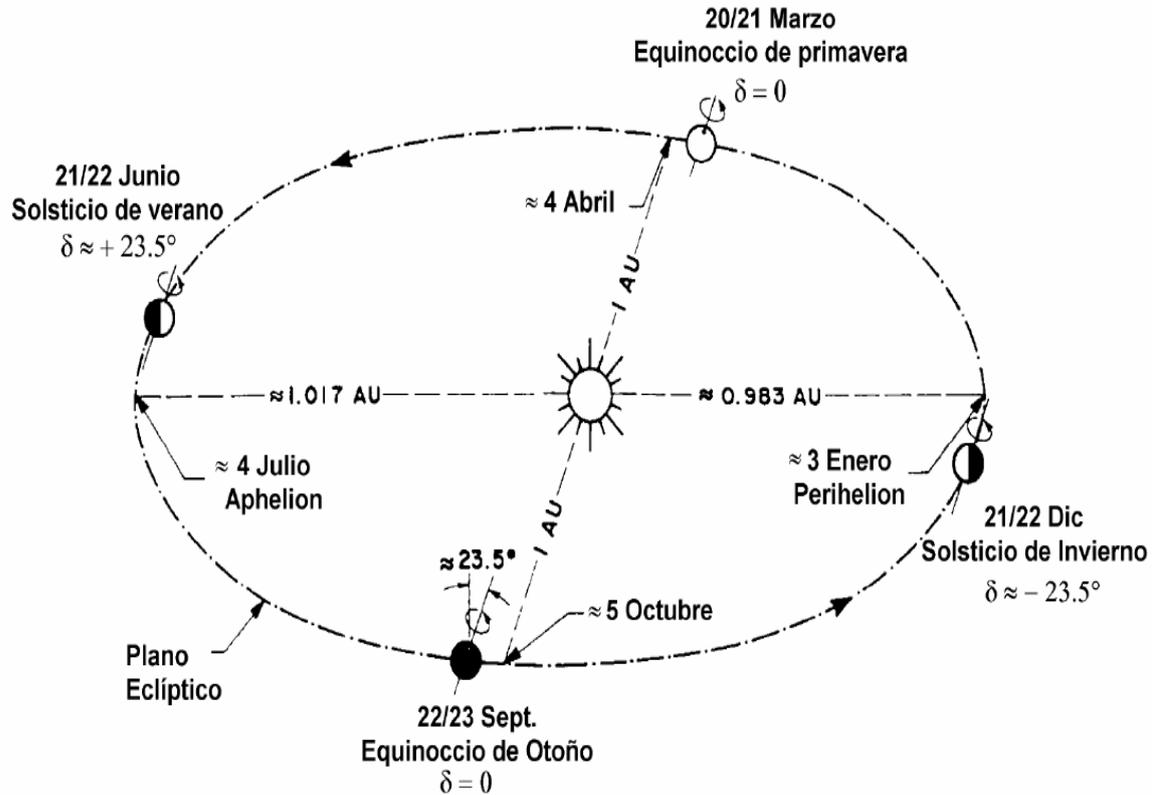
La distancia mínima tierra-sol es alrededor de 0.983 UA, mientras que la distancia máxima es aproximadamente 1.017 UA, como se puede ver en la figura 1.10. Tradicionalmente la

<sup>11</sup> Bibliografía [30]

<sup>12</sup> 1 Unidad astronómica = 1UA =  $1.496 \times 10^8$  km.

distancia “ $r_o$ ” se expresa mediante una expansión en términos de series de Fourier con un número determinado de coeficientes, con un error máximo de 0.0001.

**Figura 1.10. Distancia mínima y distancia máxima tierra-sol.**



Fuente: Bibliografía [30]

Spencer (1971) desarrolló la siguiente expresión, para el recíproco del cuadrado del radio vector de la tierra, denominado factor de corrección de la distancia tierra-sol, “ $\rho^2$ ”

$$\rho^2 = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 \quad (1.1)$$

Para muchas aplicaciones tanto en tecnología como en ingeniería se puede aplicar la siguiente expresión (Duffie y Beckman <sup>13</sup>)

$$\rho^2 = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot d_n\right)\right]^{-1} \quad (1.2)$$

Donde:

$d_n$  = corresponde al número del día juliano del año ( $1 \leq d_n \leq 365$ ), variando desde 1 para el 1 de enero, hasta 365 para el 31 de diciembre.

<sup>13</sup> Bibliografía [5]

### 1.2.7 Radiación normal extraterrestre

La radiación extraterrestre que incide sobre la tierra está sujeta a las variaciones geométricas y a las condiciones físicas del propio sol. La radiación solar extraterrestre es la radiación solar diaria que se recibe sobre una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera. El valor se define a partir del valor de la constante solar. En consecuencia, para calcular la radiación solar extraterrestre se debe corregir la constante solar considerando que la distancia tierra-sol varía a lo largo del año, y pasando también de una superficie perpendicular a los rayos solares, a una superficie horizontal a la Tierra.

La ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre, a lo largo del año es:

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad (1.3)$$

En donde “ $G_{on}$ ” es el flujo de la radiación extraterrestre (subíndice o), medida en un plano normal a la radiación (subíndice n), y está expresado en  $W/m^2$ ; y “ $n$ ” es el número del día del año. La tabla 1.5 contiene información para calcular el valor de “ $n$ ”.

En la ecuación anterior, así como en el resto de este capítulo, las normas para los subíndices serán como sigue: el subíndice “ $sc$ ” se usa para la constante solar (del inglés solar constant); el subíndice “ $o$ ” se usa para la radiación extraterrestre, esto es, fuera de la atmósfera. Por último, el subíndice “ $n$ ” se utiliza para la radiación medida en un plano normal a la dirección de propagación de la radiación. De esta forma, el subíndice “ $on$ ” se utiliza para la radiación extraterrestre observada en un plano normal a la radiación.

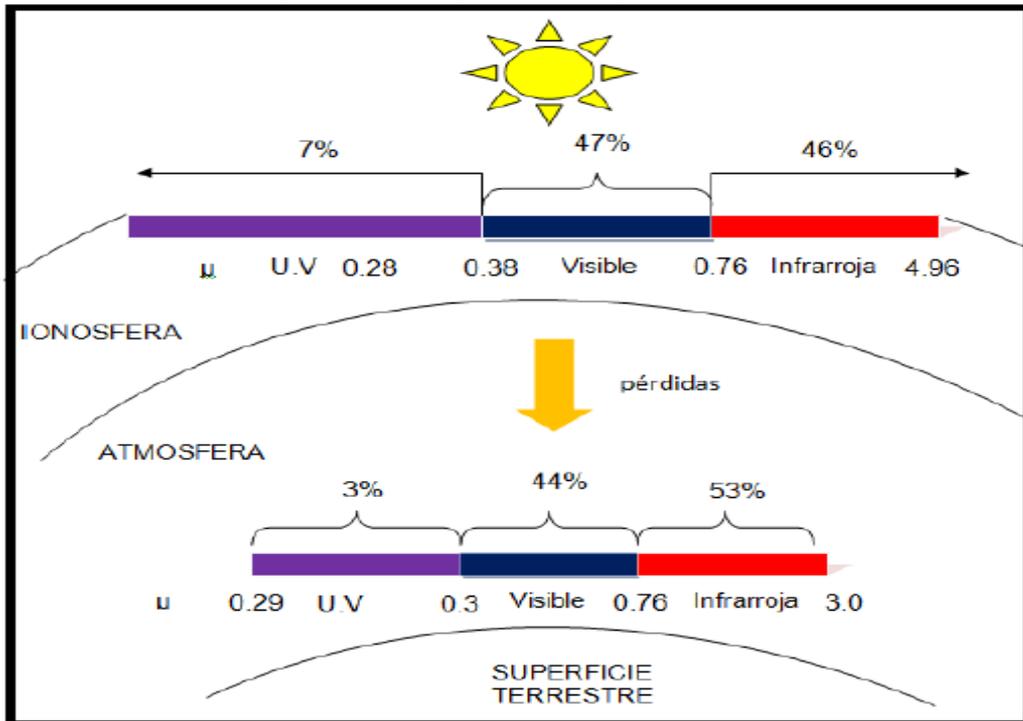
#### 1.2.7.1 Espectro energético del sol

La energía del sol se propaga hacia la capa más externa de la tierra mediante ondas electromagnéticas de varios tipos o específicamente de varias longitudes de onda. La longitud de onda determina la naturaleza de esta energía y, por lo tanto, determina también su efecto sobre la superficie en donde incide. Las longitudes de onda de la energía del sol en las capas externas atmosféricas de la tierra varían desde las longitudes de onda tipo rayo X de una centésima de micra<sup>14</sup> ( $\mu$ ), a ondas de radio de longitud de onda de alrededor de cien metros. Sin embargo, la energía calorífica está limitada en un espectro muy estrecho que varía desde 0.28 a 4.8 micras.

Cuando la energía proveniente del sol se propaga hacia la atmósfera terrestre, gran parte es rebotada o filtrada y otra parte absorbida, el 98% de la energía calorífica que alcanza la superficie terrestre está contenida en un espectro que varía desde 0.29 a  $0.38 \mu$ . El 3% de la energía está en la región ultravioleta cuyo rango varía entre 0.29 a  $0.38 \mu$ , y la mayoría de ello, el 53% faltante, está en el campo invisible, cerca de infrarroja o región calorífica que varía desde 0.76 a  $3.0 \mu$ . En la figura 1.11 se grafica lo anteriormente señalado.

<sup>14</sup> 1 micra [ $\mu$ ] =  $1 \times 10^{-6}$  metro ( $3.937 \times 10^{-5}$  pulgada)

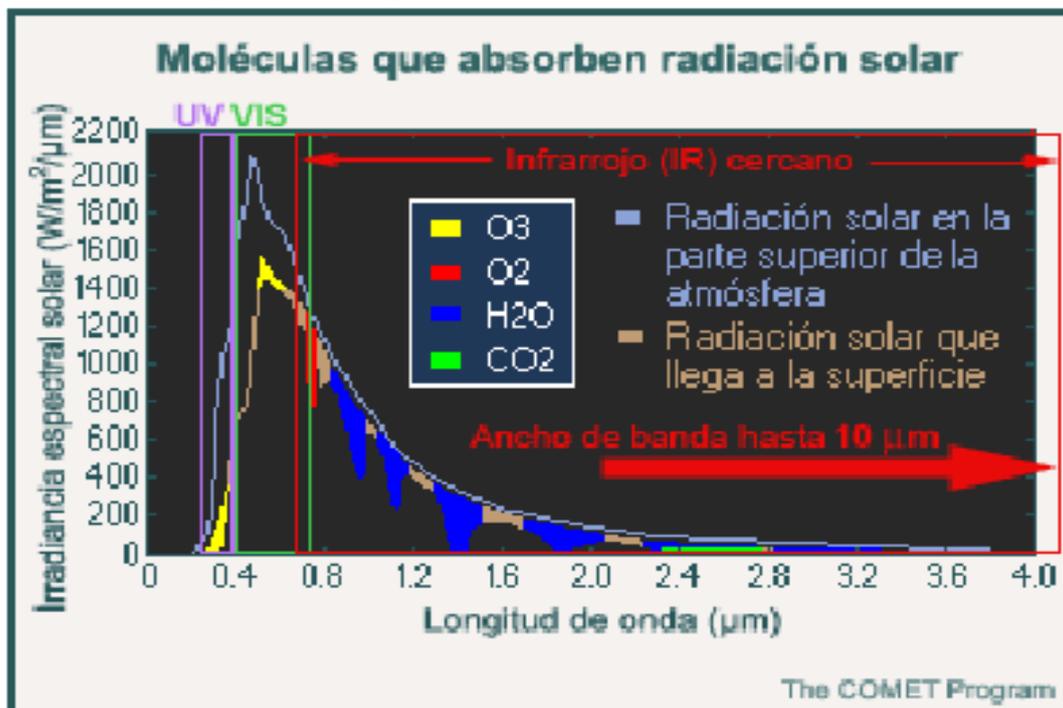
Figura 1.11. Espectro energético del sol



Fuente: Bibliografía [29]

Otro esquema para especificar el espectro de la irradiación solar se presenta en la figura 1.12:

Figura 1.12. Espectro de ondas de la radiación solar



Fuente: Bibliografía [29]

### 1.2.8 Direccionamiento de la radiación solar y sus relaciones geométricas<sup>15 16</sup>

El flujo de energía sobre una superficie determinada depende no sólo de la irradiancia que exista, sino también de la orientación que tenga la superficie en cuestión respecto de la dirección de propagación de la radiación. La irradiancia será máxima sobre un plano que esté en posición normal a la dirección de propagación de la radiación (es decir, “de frente” o “de cara”). En cambio, será mínima si el plano es paralelo a la radiación (es decir “de canto”). La intensidad de radiación sobre la superficie dependerá pues, del ángulo que forme la normal de la superficie, respecto de la dirección de propagación de la radiación. Este ángulo se conoce con el nombre de ángulo de incidencia “ $\theta$ ”. Entonces, la irradiancia extraterrestre incidente sobre la superficie será:

$$G_T = G_n \cos\theta \quad (1.4)$$

en donde “ $G_T$ ” se refiere a la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación y “ $G_n$ ” se refiere a la irradiancia medida sobre un plano normal a la dirección de propagación de la radiación.

Si se conoce la irradiancia normal, por ejemplo la constante solar  $G_{sc}$  es una irradiancia normal y se conoce el ángulo  $\theta$ , mediante la ecuación anterior se puede calcular la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación. Como el sol describe un movimiento aparente a lo largo del día (de oriente a poniente), y otro a lo largo del año (de sur a norte y viceversa), el valor del ángulo  $\theta$  varía con la fecha y la hora, además de hacerlo con la orientación del plano, su inclinación respecto a la horizontal y la latitud geográfica del lugar donde se encuentre el plano en cuestión.

El sistema más apropiado para definir cada una de estas posiciones es la de coordenadas polares. En este sistema el origen está situado en la posición del receptor. El plano fundamental es el horizontal, tangente a la superficie terrestre. La perpendicular a este plano en dirección a la semiesfera celeste superior define la posición del Zenit del lugar o Zenit local. En la dirección opuesta, a través de la Tierra, se sitúa el Nadir. Las direcciones principales sobre el plano horizontal son la Norte-Sur, intersección con el plano meridiano del lugar, y la perpendicular a ella Este-Oeste, intersección con el plano denominado primer vertical. Respecto al sistema anteriormente descrito, la posición del sol se define mediante los siguientes parámetros<sup>17</sup>: Véase figura 1.13 y figura 1.14.

$\phi$  = (phi) latitud geográfica, esto es, la posición angular del lugar en donde se encuentre el plano en cuestión, respecto del ecuador terrestre, positivo en el hemisferio norte, negativo en el hemisferio sur.  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

$\delta$  = (delta) declinación solar, por ejemplo el ángulo que forma la posición angular del sol al mediodía solar, respecto del plano del ecuador, positivo hacia el norte. La declinación solar es cero el día que comienza la primavera y el día que comienza el otoño (equinoccios). En estos días, el sol se encuentra en el ecuador celeste, que es la extrapolación del ecuador terrestre en la bóveda celeste. La declinación es máxima en el

<sup>15</sup> La nomenclatura utilizada, por ser la más entendible y más adecuada, corresponde a la notación introducida por la fuente bibliográfica [5]. Página 13.

<sup>16</sup> Datos complementarios sustraídos de la fuente bibliografía [30]. Página 21.

<sup>17</sup>

solsticio de verano ( $23.45^\circ$ ) y mínima en el solsticio de invierno ( $-23.45^\circ$ ).  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$

- $\beta$  = (beta) pendiente del plano de la superficie sobre el cual incide la radiación, esto es, su inclinación respecto de la horizontal. En el intervalo  $0 \leq \beta \leq 90^\circ$ , la superficie “ve” hacia arriba, mientras que en el intervalo  $90^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ , la superficie “ve” hacia abajo. Una azotea horizontal tendría  $\beta = 0$ , mientras que para una pared vertical,  $\beta = 90^\circ$
- $\gamma$  = (gamma) ángulo acimutal de la superficie, es el ángulo que forma la proyección de la normal a la superficie, respecto del meridiano local.  $\gamma = 0$  corresponde al sur. Hacia el este se consideran valores negativos y hacia el oeste se consideran valores positivos.  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$
- $\omega$  = (omega) ángulo horario, esto es, el desplazamiento angular del sol, al este o al oeste del meridiano local, debido a la rotación de la tierra a la velocidad angular de  $15^\circ$  por hora ( $360^\circ$  en 24 horas). Negativo por la mañana y positivo por la tarde. Por ejemplo, si el mediodía solar es a las 12 hrs., a las 10 hrs. corresponde  $\omega = -30^\circ$ , mientras que a las 16 hrs. corresponde  $\omega = 60^\circ$ . El mediodía solar es, por definición  $\omega = 0$ . Obsérvese que, debido a los movimientos del sol hacia el norte (primavera) y hacia el sur (otoño), la salida y la puesta del sol no corresponden, en general, a  $\omega = -90^\circ$  y  $\omega = 90^\circ$ , respectivamente. Esto sucede únicamente en los equinoccios, en cualquier latitud, o en el ecuador, en cualquier fecha.
- $\theta$  = (theta) el ángulo de incidencia es aquel ángulo entre los rayos solares que inciden sobre la superficie y la normal de la superficie.

$$\cos \theta = q - b + c + d + e \quad (1.5)$$

Donde:

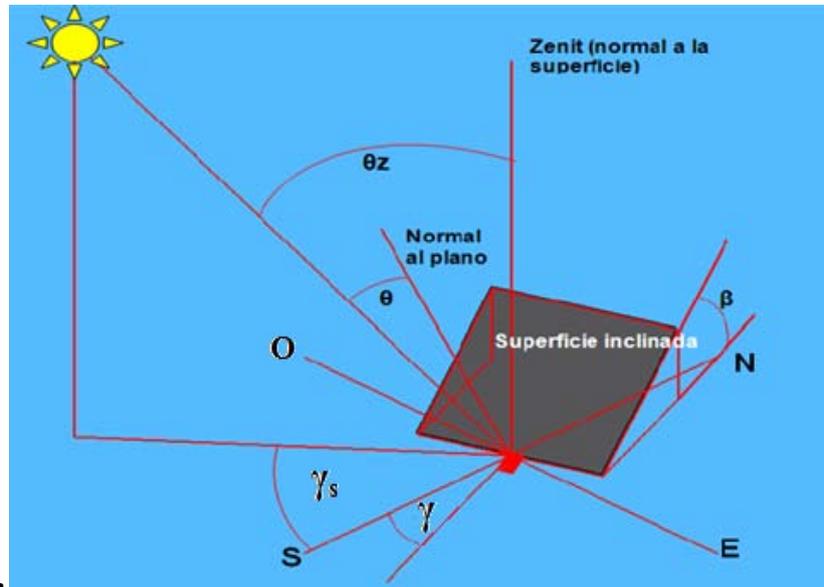
- $q = \sin \delta \sin \phi \cos \beta$
- $b = \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma_s$
- $c = \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma_s \cos \omega$
- $d = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma_s \sin \omega$
- $e = \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega$

Para una descripción más exacta de la posición del sol en el cielo, se definirán adicionalmente los siguientes ángulos:

- $\theta_z$  = ángulo zenital, es el ángulo entre la vertical y la línea solar, que vendría a ser el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie horizontal.  $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$
- $\alpha_s$  = ángulo de altitud solar, es el ángulo entre la horizontal y la línea solar, que es, el complemento del ángulo zenital
- $\gamma_s$  = ángulo acimutal solar, es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de los rayos solares en un plano horizontal, o también puede ser entendido como la desviación de la proyección de la radiación directa del meridiano local, mostrada en la figura 1.10. Desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos. De este modo varía entre  $0^\circ$  y  $\pm 180^\circ$ .

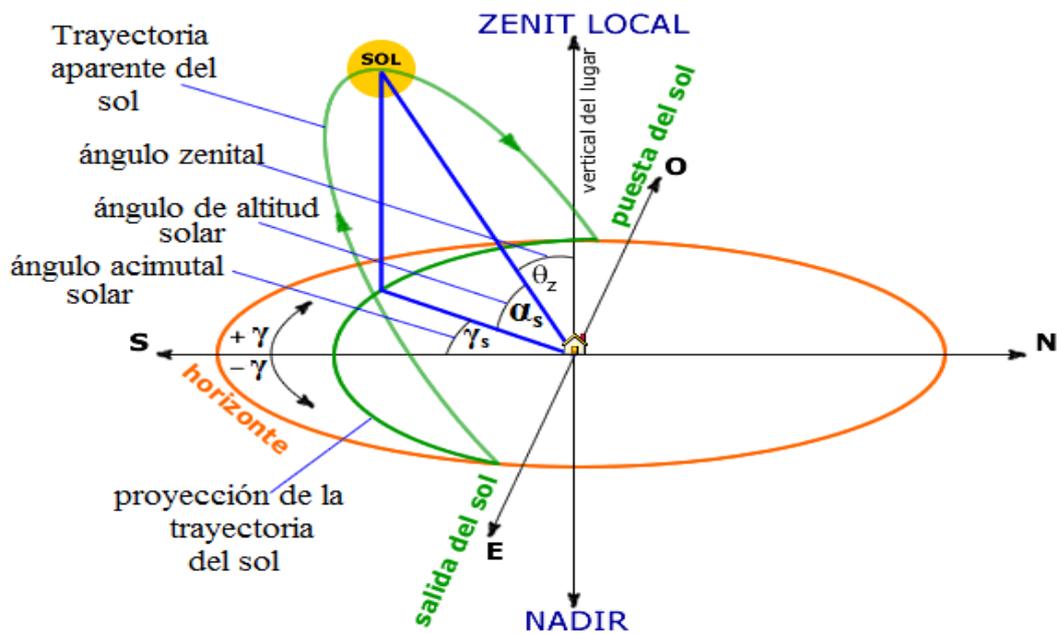
$$\text{sen } \gamma_s = \left( \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \alpha_s} \right) \quad (1.6)$$

**Figura 1.13.** Ángulo zenital  $\theta_z$ , ángulo de inclinación  $\beta$ , ángulo acimutal de la superficie  $\gamma$ , ángulo acimutal solar  $\gamma_s$ , y ángulo de incidencia de los rayos solares  $\theta$



Fuente: Fundamentals of Solar energy conversion for heating and cooling applications. Solar energy resource and availability. C. Cruickshank and S. Harrison.2008

**Figura 1.14.** Representación gráfica del ángulo cenital del sol, altura solar y azimut.



Fuente: Cursolar. Radiación Solar. Posición del Sol. Coordenadas Polares. Universidad de Jaén. España

Las definiciones y convenciones de signos de la figura 1.14, son resumidas a continuación:

$\theta_z$  = es el ángulo zenital, en grados

$\alpha_s$  = es el ángulo de altitud solar, también llamado elevación solar, en grados. ( $\alpha=90-\theta_z$ )

$\gamma_s$  = es el ángulo acimutal solar, en grados, sur cero, este positivo.

La declinación  $\delta$  puede ser encontrada aproximadamente desde la ecuación de Cooper (1969),

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left( 360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (1.7)$$

o si se requiere mayor exactitud, con la ecuación de Spencer (1971) (con un error  $< 0.035^\circ$ ), citada por Iqbal (1983)<sup>18</sup>:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cdot \cos B + 0.070257 \cdot \operatorname{sen} B - 0.006758 \cdot \cos 2B + 0.000907 \cdot \operatorname{sen} 2B - 0.002679 \cdot \cos 3B + 0.00148 \cdot \operatorname{sen} 3B \quad (1.8)$$

Donde  $B = (n - 1) \left( \frac{360}{365} \right)$ , y el día del año “ $n$ ” puede ser convenientemente obtenido con la ayuda de la siguiente tabla 1.5.

**Tabla 1.5. Promedio de días recomendados por meses y valores de  $n$  por meses. Klein (1977).<sup>19</sup>**

Meses	“ $n$ ” día del Mes	Para el día promedio del mes		
		Día	$n$	$\delta$
Enero	$i$	17	17	-20.9
Febrero	$31+i$	16	47	-13.0
Marzo	$59+i$	16	75	-2.4
Abril	$90+i$	15	105	9.4
Mayo	$120+i$	15	135	18.8
Junio	$151+i$	11	163	23.1
Julio	$181+i$	17	198	21.2
Agosto	$212+i$	16	228	13.5
Septiembre	$243+i$	15	258	2.2
Octubre	$273+i$	15	288	-9.6
Noviembre	$304+i$	14	318	-18.9
Diciembre	$334+i$	10	344	-23.0

Fuente: Bibliografía [29]

Hay una serie de relaciones útiles entre estos ángulos. La siguiente ecuación relaciona el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre una superficie, “ $\theta$ ”, con otros ángulos, siendo su aplicación bastante simple, como se verá posteriormente:

$$\operatorname{Cos} \theta = \operatorname{sen} \delta \cdot \operatorname{sen} \phi \cdot \operatorname{cos} \beta - \operatorname{sen} \delta \cdot \operatorname{cos} \phi \cdot \operatorname{sen} \beta \cdot \operatorname{cos} \gamma + \operatorname{cos} \delta \cdot \operatorname{cos} \phi \cdot \operatorname{cos} \beta \cdot \operatorname{cos} \omega + \operatorname{cos} \delta \cdot \operatorname{sen} \phi \cdot \operatorname{sen} \beta \cdot \operatorname{cos} \gamma \cdot \operatorname{cos} \omega + \operatorname{cos} \delta \cdot \operatorname{sen} \beta \cdot \operatorname{sen} \gamma \cdot \operatorname{sen} \omega \quad (1.9)$$

<sup>18</sup> Bibliografía [5]. Página 14.

<sup>19</sup> No usarse para  $|\phi| > 66.5^\circ$ . Fuente Bibliográfica [5]. Página 14.

En la mayoría de las aplicaciones de esta ecuación, la única variable a lo largo del día es el ángulo horario  $\omega$ . Todo lo demás suele ser constante en una fecha y lugar determinados. Debido a esto, la ecuación tiene un gran número de constantes que, al aplicarla, simplifican mucho la expresión.

Para una superficie horizontal,  $\beta = 0^\circ$ , lo cual implica que  $\text{sen } \beta = 0$  mientras que  $\text{cos } \beta = 1$ . En estas condiciones, desaparecen el segundo, cuarto y quinto término de la ecuación anterior, con lo que se obtiene:

$$\cos \theta_z = \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi + \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \phi \cdot \text{cos } \omega \quad (1.10)$$

En donde  $\theta_z$  representa el ángulo de la posición del sol respecto de la vertical (que es la normal al plano en cuestión), que se conoce con el nombre de ángulo zenital. Como  $\theta$  y  $\delta$  son constantes en una fecha y lugar determinados, la ecuación anterior puede expresarse en la forma más simplificada:

$$\cos \theta_z = A + B \cdot \text{cos } \omega \quad (1.11)$$

Donde:  $A = \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta$  y  $B = \text{cos } \phi \text{ cos } \delta$

Esta ecuación tiene varias aplicaciones. Puede usarse para calcular la irradiancia en función del tiempo, a lo largo de un día, sobre un plano horizontal: un terreno, un estado, un país, etc.

También puede usarse para calcular la hora de salida y puesta del sol, haciendo la siguiente consideración:

Al salir el sol, lo mismo que al ponerse, su ángulo zenital es de  $90^\circ$ , esto es, se encuentra a  $90^\circ$  de la vertical, no importa por dónde salga o se ponga; no importa si es invierno o verano.

En esas condiciones,  $\text{cos } \theta_z = 0$ . Por tanto, la ecuación anterior queda en la forma:

$$A + B \cdot \text{cos } \omega_s = 0 \quad (1.12)$$

que es una ecuación con una sola incógnita, donde  $\omega_s$  es el ángulo horario de salida y puesta del sol (la ecuación tiene dos soluciones, iguales en valor absoluto, pero con diferente signo). Despejando  $\omega_s$ ,

$$\omega_s = \cos^{-1} \left( \frac{-A}{B} \right) = \cos^{-1} (-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (1.13)$$

Estas ecuaciones son válidas sólo en forma aproximada. No representan el método astronómico para calcular la salida y puesta del sol. Además, el resultado se obtiene en términos del ángulo horario, y referido al mediodía solar.

De la ecuación precedente, puede ser calculada la duración del día. La duración del día expresada en horas tiene la siguiente forma:

$$N_d = \frac{2}{15} \cos^{-1} [-\tan \delta \tan \phi] \quad (1.14)$$

Otros casos útiles para el cálculo del  $\cos\theta$  se obtienen cuando se considera que el plano sobre el cual incide la radiación puede moverse. Tal es el caso de los colectores concentradores, que deben “seguir” el movimiento del sol. Algunos casos útiles son los siguientes<sup>20</sup> :

Para un plano que gira alrededor de un eje horizontal en la dirección este-oeste con ajuste continuo para minimizar el ángulo de incidencia:

$$\cos\theta = (1 - \cos^2\delta \cdot \text{sen}^2\omega)^{1/2} \quad (1.15)$$

La pendiente de esta superficie está dada por

$$\tan\beta = \tan\theta_z |\cos\gamma_s| \quad (1.16)$$

Para un plano que gira alrededor de un eje norte-sur paralelo al eje de la Tierra, por ejemplo con una inclinación respecto a la horizontal igual a la latitud geográfica, y con ajuste continuo para minimizar el ángulo de incidencia,

$$\cos\theta = \cos\delta \quad (1.17)$$

La pendiente de la superficie variará continuamente y será

$$\tan\beta = \frac{\tan\phi}{\cos\gamma} \quad (1.18)$$

Por último, para un plano que se orienta todo el tiempo hacia la dirección del sol, con un seguimiento en dos ejes:

$$\cos\theta = 1 \quad (1.19)$$

---

<sup>20</sup> Bibliografía [5] y [27]

## Capítulo 2

### Colectores solares<sup>21</sup>

#### 2.1 Introducción

El principal componente de cualquier sistema de energía solar es el colector o captador solar. Los colectores de energía solar son tipos especiales de intercambiadores de calor que transforman la energía captada de la radiación solar en energía interna y dicha energía la transfieren a un medio de transporte (por lo general agua, aceite o aire) que fluye a través del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0.29 y 2.5  $\mu\text{m}$ ) y es por naturaleza variable con la hora del día.

Captando de forma adecuada la radiación solar, se puede obtener calor y electricidad. El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados paneles fotovoltaicos.

Esta tecnología que parece nueva, no lo es, se remonta a muchos años atrás. El por qué no ha sido explotada y desarrollada hasta este momento, quizás haya sido un gran error basado en cuestiones puramente económicas, ya que por aquél entonces y hasta hace poco tiempo, los hidrocarburos se presentaban como una fuente inagotable de recursos y generadora de riqueza. Sea cual sea la causa, lo fundamental es que nuestro presente y futuro está en esta tecnología descubierta hace ya mucho tiempo y que nos permitirá obtener una energía limpia, inagotable y fundamentalmente respetuosa con nuestro medio ambiente.

La energía solar puede ser perfectamente complementada con otras energías convencionales, para evitar la necesidad de grandes y costosos sistemas de acumulación. Así bajo condiciones ambientales específicas, una casa bien aislada puede disponer de agua caliente y calefacción solar, con el apoyo de un sistema convencional a gas o eléctrico que únicamente funcionaría en los períodos sin radiación. El costo de la energía sería sólo una fracción de la que alcanzaría sin la existencia de la instalación solar.

Si bien hay mucha experiencia y material publicado en lo que se refiere al uso de colectores solares para distintas aplicaciones, desde grandes centrales de generación hasta aplicaciones del orden de los kilowatts (kW), en este capítulo se explica los distintos tipos de colectores

---

<sup>21</sup> Este capítulo ha sido elaborado con las referencias bibliográficas [1], [2], [4], [5], [15], [19], [20], [23], [24], [30] como guías.

solares existentes en el mercado así como las características propias de cada uno, analizando con mayor profundidad el colector cilindro parabólico compuesto (CPC), equipo de especial interés debido a que este trabajo de tesis estudia este tipo de colector como elemento principal.

## 2.2 Historia de los colectores solares

Hace unos 2500 años la cultura griega comenzó a diseñar sus casas para captar la radiación solar durante el invierno. Con total seguridad no fue la primera cultura humana en hacerlo. Posteriormente otras personas creerían descubrir por vez primera las ventajas de abrirse (o cerrarse) al sol. De hecho, no son pocos los que hoy, en las postrimerías del siglo, consideran la energía solar como una extraña fuente energética necesitada aún de varios años de investigación y desarrollo antes de tornarse práctica.

Históricamente, la idea de concentrar la radiación solar para obtener más energía, fue anterior a la de los colectores planos.

Un relato muy famoso de la antigüedad nos cuenta cómo en el año 212 A.C. a petición del rey Herón, Arquímedes, quemó las naves romanas que sitiaban la ciudad de Siracusa, utilizando un gran espejo cóncavo.

En sus trabajos de óptica, Euclides menciona que es posible obtener temperaturas elevadas mediante un espejo cóncavo.

Durante el siglo 18, fueron construídos hornos solares capaces de fundir acero, cobre y otros metales. Su uso fue extendido en Europa y el Medio Oriente, destacándose un horno diseñado por el científico francés Antoine Lavoisier que alcanzó la temperatura de 1750°C.

En la década de 1870 el sueco americano John Ericsson hizo funcionar su máquina de aire caliente con un concentrador parabólico, este invento sumaba tres elementos fundamentales: un espejo concentrador, una caldera y una máquina de vapor. En 1872, Ericsson probó un método totalmente diferente: calentar el aire, en lugar de utilizar agua, contenido en un cilindro situado en el foco de un reflector curvo. Ericsson quedó sorprendido por el rendimiento de su motor. Pero tres años después, se enfriaron sus ánimos al darse cuenta que el aparato concentrador era tan grande y tan caro que los motores activados por energía solar resultaban en la práctica más costosos que sus análogos movidos por carbón. Quince años más tarde en 1885, el ingeniero francés Carles Tellier, sería una de las primeras personas en desarrollar colectores solares de baja temperatura para impulsar máquinas. Mientras que los motores convencionales empleaban vapor de agua a cierta presión, los desarrollos tecnológicos de Tellier utilizaban vapor presurizado de líquidos con unas temperaturas de ebullición muy por debajo de la del agua. Tellier instaló un colector solar (similar a los colectores planos domésticos de ahora) y en lugar de llenarlos con agua para producir vapor, el fluido de trabajo que escogió fue Amoniaco. Después de la exposición solar obtenía una razón de 300 galones por hora durante las horas más iluminadas del día. Pensaba que simplemente añadiendo colectores podría usarse como un sistema industrial.

En el año 1901, A.G. Eneas instaló un colector parabólico de 10 metros de diámetro, el cual generaba vapor en su foco y alimentaba un sistema de bombeo de agua en California.

En 1907 se patentó por primera vez en Alemania un diseño sobre colectores parabólicos (Parabolic trough collector, PTC), por Wilhelm Maier (en Aalen) y Adolf Remshardt (en Stuttgart).

En 1912, el ingeniero americano Frank Shuman, en colaboración con C.V. Boys, construyó el mayor sistema de bombeo solar en el mundo hasta el momento. El sistema fue puesto en operación en 1913 y se ocuparon colectores cilindro-parabólicos, los cuales focalizaban la energía del sol en un tubo de absorción. Cada colector medía 62 metros de largo y formaban un área total de colección de 1200 m<sup>2</sup>. Con este sistema se generaban 40 kW.

Un aparato construido más recientemente es el horno solar de Odeillo en 1969. Es uno de los dos mayores hornos solares del mundo, con una potencia térmica de 1000 kW.

Michael W. Edenburn (1976) investigó las diferentes posibles orientaciones del colector y realizó un análisis de rendimiento teórico de un CCP (colector cilindro parabólico) y lo comparó con resultados experimentales. Utilizó para ello un tubo absorbedor aislado por un tubo envolvente transparente para disminuir las pérdidas térmicas. El análisis consideraba las pérdidas por transferencia de calor y la transferencia de energía hacia el fluido de trabajo.

En estos últimos veinte años se han producido muchos avances y todos los estudios van encaminados a mejorar el rendimiento de los colectores evitando las pérdidas de calor, desde las primeras investigaciones sobre el flujo en colectores GDV (colector de generación directa de vapor) realizadas por parte de Müller (1991) y Dagan (1992) pero en las que no se hace referencia al rendimiento térmico para los sistemas concentradores parabólicos, hasta el colector de generación directa de vapor propuesto por Cohen y Kearney (1994), como un desarrollo futuro de los colectores en nuevas SEGS (Ver figura 2.1), cuya finalidad es eliminar el aceite sintético tan costoso, evitar el transporte de fluido intermediario con las pérdidas que esto ocasiona y suprimir el intercambiador de calor de aceite-vapor, sin olvidarnos del modelo óptico de colector parabólico propuesto por Heinzl en 1995 o el sistema de baja presión para generación de vapor analizado por Kalogirou (1995-1997), fundamentado en el calentamiento de agua en un colector parabólico, para después convertirla en vapor en un recipiente separado, para finalmente llegar al último avance en este tipo de tecnología, el colector parabólico conocido con el nombre EuroTrough, que ofrece numerosas ventajas con respecto a la mayoría de los sistemas actuales en concentración solar de canal parabólico.

Principalmente son dos los tipos de disposiciones de colectores mayormente difundidos en la actualidad. La primera posee un receptor central y es la llamada heliostato. En ésta un campo de espejos refleja la radiación solar a un receptor situado sobre una torre. La segunda ocupa concentradores distribuidos, cada concentrador tiene a su receptor en el foco. Entre estos se encuentran concentradores parabólicos, Fresnel y cilindro parabólicos.

**Figura 2.1. Estación solar de generación de energía eléctrica (SEGS IV) en el desierto de Mojave. Utilización de energía solar para el sobrecalentamiento y la generación de vapor.**



Fuente: Cortesía del Departamento de Energía de USA para Greenplaybook.com

### 2.3 Criterios de clasificación de colectores

Hay varias maneras de clasificar a los colectores en los sistemas solares térmicos: de acuerdo al tipo de colector solar empleado, de acuerdo a la temperatura de operación que puede alcanzar el colector o de acuerdo a la aplicación final de la energía térmica obtenida.

En cuanto a las aplicaciones de los colectores, son 3 los sistemas térmicos más desarrollados:

- Generación termosolar de potencia
- Calor solar para procesos industriales
- Calentamiento de agua y acondicionamiento de espacios.

De estas tres categorías, la de calentamiento solar de agua y acondicionamiento de espacios es la que ha alcanzado un grado mayor de madurez, con aplicación en una escala muy significativa en varios países del mundo. Asimismo de estas categorías la de calor solar para procesos industriales es la que está menos investigada. En algunos casos las tecnologías solares implicadas en la generación del calor de procesos son las mismas que para el calentamiento de agua, sin embargo, todavía es necesario trabajar en el desarrollo de colectores e investigación sobre la integración de sistemas para poder generalizar este tipo de aplicaciones en el caso de temperaturas superiores a los 120 °C. También existen los sistemas de cogeneración, donde se produce simultáneamente potencia eléctrica y calor para procesos industriales.

Por el lado de la concentración de la radiación solar existen básicamente dos tipos de colectores solares, los que no concentran una imagen y los que concentran una imagen.

- No forman imagen o no focalizantes (nonimaging collectors)

Un colector que no concentra imagen tiene usualmente un área de absorción (también llamada área de la imagen o área de zona focal) cercana al área de intercepción. Tienen la gran virtud de lograr la concentración de energía solar sin el uso de un sistema de seguimiento, disminuyendo el costo del sistema de concentración de energía solar, lo cual hace muy atractivos a estos equipos en diversas aplicaciones solares.

- Forma imagen o focalizantes (imaging collectors)

Un colector concentrador de imagen usualmente tiene una superficie reflectante cóncava y focaliza la radiación incidente en un área pequeña, incrementando el flujo radiactivo. Enfocan directamente al sol durante toda la trayectoria diaria. Por lo tanto, en la mayoría de las aplicaciones usan un sistema de seguimiento del disco solar.

En función al movimiento de rotación del colector se pueden clasificar en estacionarios, rastreo alrededor de un eje y rastreo alrededor de dos ejes.

Otra clasificación de los colectores es en cuanto al índice de concentración ( $C$ ), que es la razón entre el área de interceptación o entrada ( $A_{ent}$ ) y el área de absorción o salida ( $A_{sal}$ ) de un colector y es una propiedad relevante e intrínseca de cada uno de ellos. Puede ser definida como:

$$C = \frac{A_{ent}}{A_{sal}} = \frac{\text{Área de apertura o de entrada}}{\text{Área de absorción o de salida}} \quad (2.1)$$

Mientras mayor sea el factor de concentración solar de un colector, mayor es la temperatura alcanzable, pero a la vez más complicado el seguimiento del movimiento aparente del Sol. Esto obviamente encarece al sistema, por lo que es importante relacionar cada aplicación con el tipo de colector adecuado.

- Sin concentración ( $C = 1$ )

Dentro de este grupo se tienen: placa plana (flat plate collector) (FPC), colector de tubos al vacío (evacuated tube collector) (ETC) y algunos colectores cilindro parabólico compuestos (CPC).

- Con concentración ( $C > 1$ )

Dentro de este grupo se tienen: colectores cilindro parabólicos (parabolic trough collector. PTC), colector parabólico compuesto (compound parabolic collector) (CPC), reflector de Fresnel lineal (linear Fresnel reflector) (LFR), reflector de disco parabólico (parabolic dish reflector) (PDR) y colector de campo de helióstatos (heliostat field collector) (HFC).

Actualmente se pueden encontrar en el mercado los siguientes tipos de colectores, clasificados en la tabla 2.1 por el sistema de seguimiento que utilizan:

**Tabla 2.1. Clasificación de Colectores Solares y sus ratios de concentración<sup>22</sup>**

Seguimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbente	Ratio de concentración	Rango de temp. (°C)
Estacionario	Plano (FPC)	Plano	1	30-80
	Tubo Evacuado (ETC)	Plano	1	50-200
	Parabólico Compuesto (CPC)	Tubular	1-5	70-240
Un Eje	Parabólico Compuesto (CPC)	Tubular	5-15	70-290
	Reflectores Fresnel (LFR)	Tubular	10-40	60-250
	Cilindro Parabólico(PTC)	Tubular	15-45	70-290
	Cilíndrico(CTC)	Tubular	10-50	70-290
En Dos Ejes	Disco Parabólico(PDR)	Focal	100-1000	100-500
	Helióstato(HFC)	Focal	100-1500	150-2000
	Horno Solar	Focal	1500-5000	600-3000

Fuente: Bibliografía [23]

En muchas aplicaciones solares se requiere obtener mayores temperaturas que las logradas mediante colectores solares tipo placa plana. En algunos procesos industriales se necesitan temperaturas mayores a los 100°C.

Típicamente la generación termosolar de potencia es la que requiere los rangos de temperatura y concentración más elevados, llevándose a cabo con sistemas de canal parabólico, disco parabólico y torre central (helióstatos); mientras que el calentamiento solar de agua y acondicionamiento de espacios requiere colectores de baja concentración como los planos, tubos evacuados y colectores CPC de baja concentración.

### 2.3.1 Colectores sin concentración

#### 2.3.1.1 Colector de placa plana (Flat plate collector) (FPC)

Son los más extendidos comercialmente, además de ser el modelo más utilizado en la mayoría de las instalaciones solares térmicas. Su temperatura de trabajo se sitúa entre 50 y 70 °C, lo que los hace apropiados para la mayor parte de las aplicaciones. Son utilizados para producir agua caliente sanitaria (ACS), calefacción por suelo radiante, precalentamiento del fluido de entrada de una caldera, etc.<sup>23</sup>

Están compuestos por los siguientes elementos:

- Cubierta exterior: tiene como funciones permitir el paso de la radiación solar, disminuir las pérdidas de calor producidas por el viento y reducir las pérdidas de calor por

<sup>22</sup> La tabla se complementó con información de la siguiente fuente: “Visión a largo plazo sobre la utilización de las energías renovables en México” Energía Solar. Mayo 2005.

<sup>23</sup> Información sustraída de la siguiente fuente: “Integración de una instalación solar térmica con un sistema de calefacción existente”. Natalia Moreno Bruned. Zaragoza, Marzo 2010.

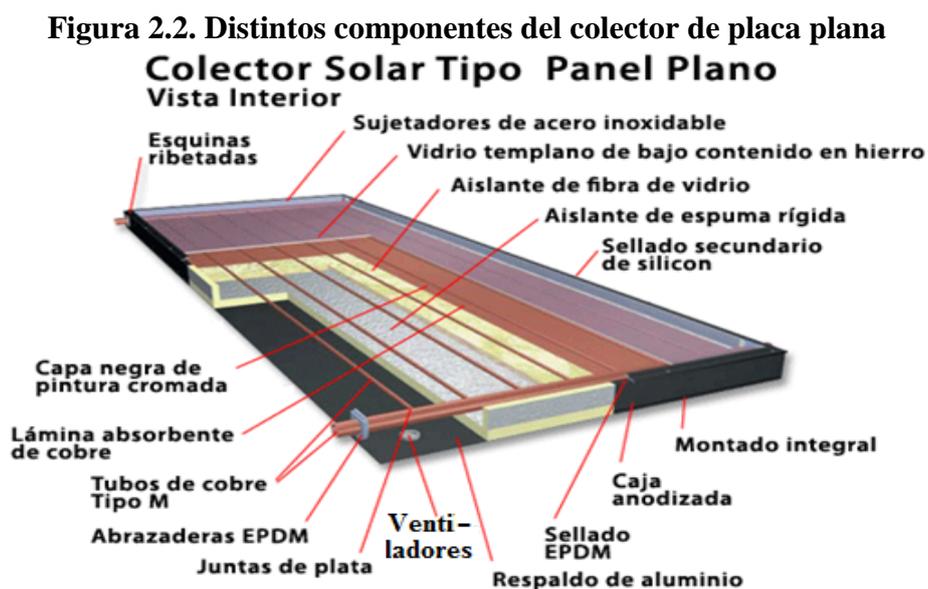
radiación del absorbedor (radiación infrarroja). También pueden encontrarse cubiertas dobles o incluso con materiales plásticos.

- Absorbedor: capta la radiación solar, la transforma en calor y transmite ésta en forma de energía a un fluido portador de calor.
- Aislante térmico: permite disminuir las pérdidas de calor debidas a la conducción de calor de la superficie absorbedora hacia el fondo y las partes laterales.
- Carcasa: caja exterior que alberca todos los componentes del colector, aportando rigidez y garantizando el sellado de su interior. Suele ser de aluminio por su peso mínimo y resistencia a la corrosión.

El funcionamiento de un colector de placa plana se basa en el principio del efecto invernadero. Cuando la radiación solar pasa a través del vidrio cobertor, se queda retenida en el interior, esta radiación incide sobre la superficie absorbente y una gran cantidad de esta energía es transferida directamente al líquido dentro de los tubos (comúnmente agua). Las zonas posteriores y laterales del colector deben estar muy bien aisladas del medio externo para reducir las pérdidas por conducción. Los tubos están unidos entre ellos en ambos extremos por tubos de mayor diámetro.

El vidrio cobertor es muy importante ya que aísla a la superficie de absorción del medio ambiente, reduciendo las pérdidas por convección. Este vidrio también es transparente a longitudes de onda corta provenientes desde el sol, pero es opaco a las longitudes de onda larga emitidas por la superficie de absorción; con lo cual disminuye al mínimo las pérdidas por radiación.

Este tipo de colectores está usualmente fijo y no necesita seguir al sol. Para obtener una mayor eficiencia, los colectores deben estar orientado hacia la línea ecuatorial, mirando hacia al sur en caso de instalarse en el hemisferio norte y mirando hacia al norte en caso de instalarse en el hemisferio sur. El ángulo de inclinación óptimo es igual a la latitud del lugar con un ángulo de variación entre 10-15° dependiendo de la aplicación (este ángulo también puede variarse según la estación del año).



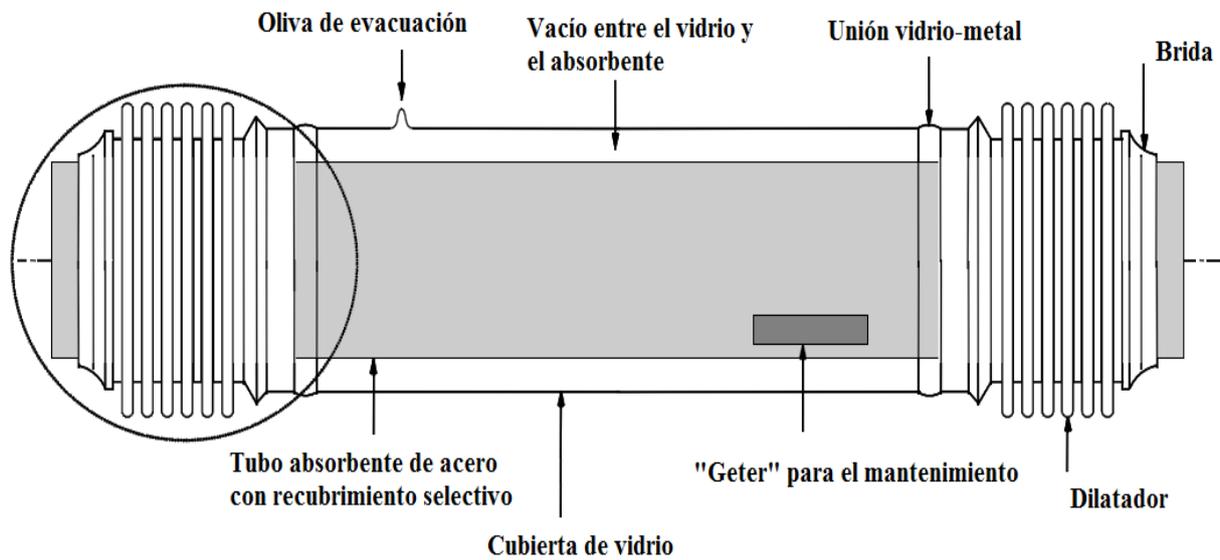
Fuente: Energía solar Co., Ltd de Changzhou Meirun

### 2.3.1.2 Colector de tubos al vacío (Evacuated Tube Collector) (ETC)

Los colectores de tubos de vacío alcanzan mayores temperaturas que los colectores de placa plana. Es habitual que lleguen a temperaturas de trabajo de más de  $100^{\circ}\text{C}$ . Son bastante más caros que los colectores de placa plana. El vidrio exterior del colector plano se sustituye por los propios tubos, en el interior de los cuales se ha hecho el vacío. La tubería que transporta el fluido se encuentra en el interior del tubo de vidrio. El vacío impide cualquier transmisión de calor al exterior, lo que explica las altas temperaturas que pueden alcanzar este tipo de instalaciones.

Los tubos al vacío se utilizan también en colectores con concentración como el colector cilindro parabólico (PTC, por sus siglas en inglés) y en el concentrador parabólico compuesto (CPC). En la figura 2.3 se muestra el esquema de las partes principales de un tubo absorbente en vacío.

**Figura 2.3. Esquema de un tubo absorbente en vacío típico de un colector cilindro parabólico**

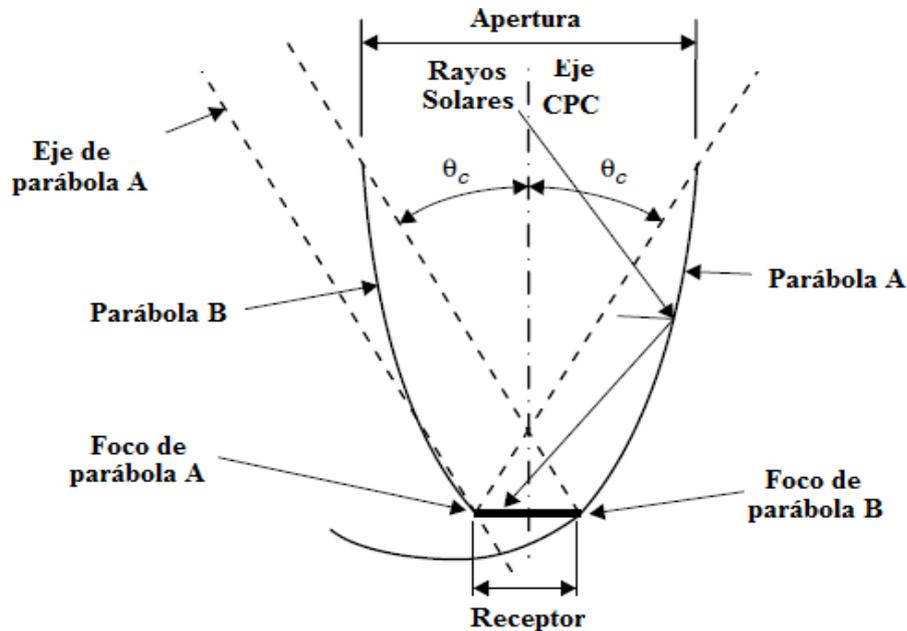


Fuente: Bibliografía [20]

### 2.3.1.3 Colectores parabólicos compuestos (CPC)

Estos colectores tienen la capacidad de reflejar al foco lineal toda la radiación incidente que captan. Usando múltiples reflexiones internas, cualquier radiación solar que entre al colector dentro de su ángulo de aceptación ( $2\theta_c$ ), llega a la superficie absorbente que está en el fondo del colector. En la figura 2.4 se observa como los rayos solares son reflejados, por la superficie reflectora del CPC, hacia el absorbedor. El ángulo de aceptación es elegido de acuerdo al tipo de aplicación del colector.

Figura 2.4. Estructura de un CPC



Fuente: Bibliografía [4]. Pábina 190.

### 2.3.2 Colectores con concentración<sup>24</sup>

Existen muchas aplicaciones, sobre todo a nivel industrial, donde se necesita que la energía sea liberada a altas temperaturas. Para obtener esto (temperaturas mayores que los 100°C), se hace necesario incrementar la intensidad de energía solar. Esto se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (sol) y la superficie absorbidora, que debe ser pequeña comparada con la del dispositivo óptico. Esta es precisamente la función que desempeñan los colectores concentradores. De esta manera, en el absorbedor, podemos tener densidades de energía que van desde 1.5 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico.

Con los colectores concentradores de energía solar, se pueden obtener temperaturas entre 100 y 500°C si el sistema óptico de los colectores tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500°C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

Aunque con este tipo de colectores se pueden obtener altas temperaturas de operación, éstos presentan varios problemas técnicos desde el punto de vista ingenieril comparados con los colectores solares de placa plana. Deben orientarse continuamente al sol de manera precisa mediante un mecanismo apropiado debido a que este tipo de colectores utilizan de primera instancia la energía solar directa. Por otra parte, el acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico no sólo debe ser de buena calidad, sino que debe mantener sus propiedades por largos períodos de tiempo sin ser deterioradas por el polvo, lluvia y medio ambiente, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos. También la demanda de los materiales utilizados en el receptor (aislante térmico, fluido de trabajo, tubos absorbedores y cubiertas) son mayores en este tipo de colectores, debido a que es ahí donde se obtienen las altas temperaturas.

<sup>24</sup> Bibliografía [4]

Los problemas de operación mencionados, junto con los costos elevados de los materiales utilizados en este tipo de colectores focales, ha hecho que su uso no sea muy generalizado. Esto ha dado cabida a que se trabaje en los colectores concentradores estacionarios. Éstos no tienen las desventajas de los de enfoque, aunque sólo permiten incrementos moderados de la intensidad de la radiación solar.<sup>25</sup>

Los colectores concentradores presentan ciertas ventajas con respecto a los concentradores planos convencionales. Las principales son:

- El fluido de trabajo llega a temperaturas mayores en un colector concentrador, tomando la misma superficie de colector en ambos. Esto significa que se puede lograr una mayor eficiencia termodinámica.
- Dado que la superficie absorbente es pequeña (con respecto al área total del colector), ocupar superficies de absorción selectivas y ocupar zonas de vacío en ésta para disminuir pérdidas son alternativas económicamente viables.
- Los colectores concentradores utilizan la radiación directa y dependiendo de su área de entrada, la radiación difusa.

También ofrecen desventajas comparativas. Las principales son:

- Es necesario implementar un sistema de seguimiento solar con los colectores para su mejor eficiencia, lo que encarecería el sistema.
- La superficie reflectora del colector puede perder sus propiedades con el tiempo y requiere mantenimiento periódico.

### **2.3.2.1 Disco parabólico (Parabolic Dish Reflector) (PDR)**

La radiación incidente en este colector se concentra en un punto focal como se muestra en la figura 2.5. Por lo tanto debe seguir al sol en sus dos grados de libertad (altura y azimut)

El receptor colocado en el foco, absorbe la radiación solar y la traspassa en forma de calor a un fluido circulante. La energía calórica presente en un fluido puede ser convertida a electricidad mediante el uso de un motor-generador acoplado directamente al receptor en el foco o puede ser transportada a través de tuberías a un receptor central y servir para diversos propósitos.

Los discos parabólicos tienen ventajas importantes con respecto a otros colectores:

- Debido a que siempre están apuntando al sol, representan el sistema de concentración solar más eficiente
- Típicamente alcanzan concentraciones entre 600 a 2000, siendo además muy eficientes en la absorción de energía térmica y sistemas de conversión de energía
- El colector como módulo se puede ocupar de manera independiente o ser parte de un campo de colectores.

---

<sup>25</sup> ..Bibliografía [19]

**Figura 2.5. Reflector disco parabólico**



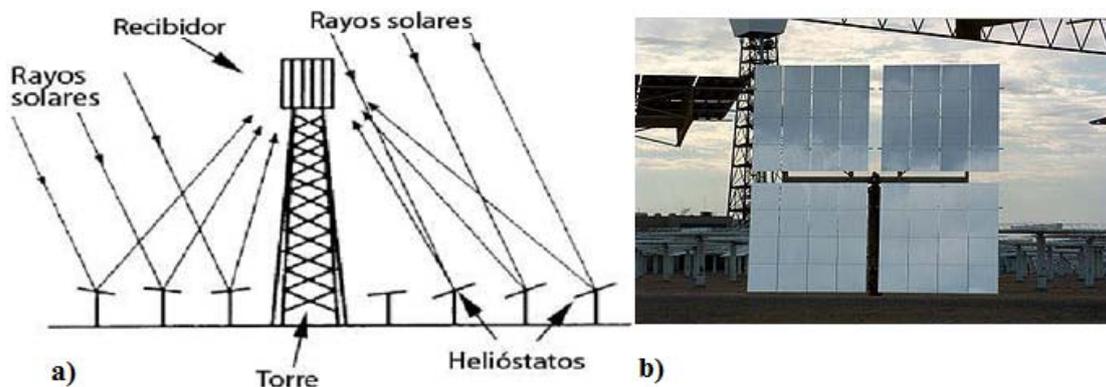
Fuente: Bibliografía [4].

### 2.3.2.2 Helióstato (Heliostat Field Collectors) (HFCs)

Los helióstatos son espejos planos que forman parte de un colector de concentración de gran tamaño. El campo de helióstatos es similar a un campo de colectores. Cada helióstato consta de varios espejos planos sujetos a un soporte. Ver figura 2.6b). Los helióstatos han de orientarse al sol mediante un movimiento en dos direcciones, de forma que los rayos solares reflejados en el helióstato incidan en un receptor.

Debido a que los diversos helióstatos estarán situados en posiciones diferentes del terreno, el ángulo con que deben orientarse es distinto para cada uno de ellos. No obstante a esto, como cada helióstato ocupa una posición fija, mediante un computador, se puede controlar fácilmente el correcto posicionamiento de todos los helióstatos, en base a consideraciones geométricas. De esta forma, todos los helióstatos dirigirán sus rayos hacia una pequeña zona donde debido a la suma de irradiaciones se obtendrá un factor de concentración muy elevado. Así, la energía térmica del campo de helióstatos será dirigida hacia la cavidad de un generador de vapor para producir vapor a alta temperatura y presión, tal como se puede observar en la figura 2.6a).

**Figura 2.6. Helióstato**



Fuente: Wikipedia (<http://es.wikipedia.org/wiki/Heliostato>)

Los heliostatos presentan las siguientes ventajas:

- La energía solar captada por el campo de heliostatos es transferida a un único receptor, minimizando así la necesidad de algún sistema de transporte para la energía térmica.
- Típicamente alcanzan concentraciones entre 300-1500 y son altamente eficientes, tanto como para captar energía como para la generación de energía eléctrica.

### **2.3.2.3 Colector cilindro parabólico (Parabolic Trough Collector) (PTC) <sup>26</sup>**

Su aplicación principal es la producción de vapor en una central térmica, pertenecen al rango de aprovechamiento térmico denominado de media temperatura (entre 125°C y 450°C). Tienen aplicaciones tanto en generación de energía eléctrica como en calentamiento de agua, pudiendo para esta última aplicación ser construídos con materiales ligeros y baratos, lo cual disminuye el costo de inversión inicial y facilita el seguimiento solar.

Se construyen en forma de sectores cilíndricos, en cuyo foco lineal se coloca la tubería que contiene el fluido a calentar. El seguimiento del sol sólo debe hacerse en una sola dirección.

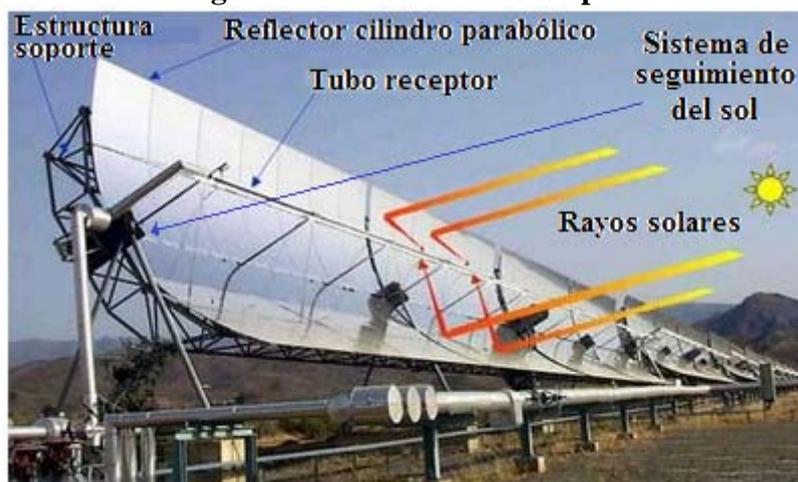
Un típico colector cilíndrico parabólico consta de los siguientes elementos: (Ver figura 2.7)

- El reflector cilindro parabólico: es un espejo curvado en una de sus dimensiones con forma de parábola, que concentra sobre su línea focal toda la radiación solar que atraviesa su plano. La superficie especular se consigue a base de películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da rigidez. Entre los diferentes tipos de soporte para la película se tiene láminas de aluminio, vidrio e incluso el plástico.
- Absorbedor o tubo receptor: en este elemento recae el rendimiento global del colector, puede constar de un tubo o de dos tubos concéntricos; en el caso de tubos concéntricos, el tubo interior es de material metálico y es por el cual circula el fluido que se calienta, y el tubo exterior es de cristal. El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorbancia mayor al 90% y una baja emisividad, por el interior de este tubo va a pasar el fluido de trabajo, pudiendo ser agua o aire. El tubo de cristal que rodea al tubo interior metálico tiene la doble misión de reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo metálico y de proteger de las inclemencias del clima debido a su recubrimiento selectivo, este tubo de cristal suele llevar también un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmisividad a la radiación solar y, consiguientemente, el rendimiento óptico del colector.
- El sistema de seguimiento del sol: el sistema del concentrador cilindro-parabólico aprovecha la radiación solar directa al máximo si existe un mecanismo de seguimiento solar automatizado que siga la trayectoria del sol a lo largo del día. El sistema de seguimiento solar consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del colector alrededor de un eje de seguimiento.
- La estructura metálica: es la encargada de dar rigidez al conjunto de elementos que lo componen.

---

<sup>26</sup> Bibliografía [30]

**Figura 2.7. Colector cilindro parabólico**



Fuente: <http://smienergias.wordpress.com/2011/05/21/tecnologia-generadora-de-energia-termosolar/>

Cuando la parábola es orientada hacia el sol, los rayos paralelos incidentes en el colector son reflejados hacia el foco lineal. Este tipo de tecnología es la más avanzada dentro de las tecnologías solares, debido a la gran experimentación que se ha realizado con ellos y a la existencia de un número significativo de empresas que construyen y venden estos colectores.

Dentro de este tipo de concentrador existen variantes de acuerdo al diseño geométrico, entre los cuales se tiene el concentrador cilindro parabólico compuesto (compound parabolic concentrator) (CPC), este concentrador no necesita un sistema de seguimiento del sol preciso y no forma imágenes. Se explicará con mayor detalle las características de este diseño en particular en la subsección 2.4, ya que será objeto de nuestro estudio.

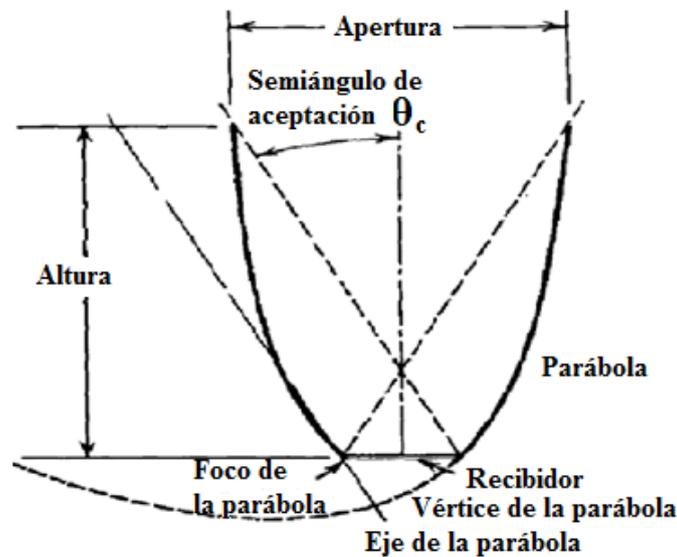
## 2.4 Colector cilindro parabólico compuesto (CPC)

Dentro de los usos de la energía solar los sistemas de concentración son una de las tecnologías más usadas y el concentrador parabólico compuesto (CPC) es una posibilidad muy prometedora. Por esta razón, el entendimiento de los principios ópticos y geométricos detrás del CPC es importante para los físicos e ingenieros.

La idea del CPC tiene un poco más de 40 años, fue concebido simultáneamente en 1966 en EEUU por Hinterberger y Winston (es por este motivo que a este tipo de concentradores también se le conoce como colector de *Winston*), en Alemania en 1966 por Ploke, y en la URSS por Baranov y Melnikov. En 1974 Winston mostró las ventajas de este tipo de concentrador, como un concentrador de no imagen, para ser usado en dispositivos solares, y además mostrando que el CPC tiene la máxima concentración teórica posible.

La necesidad de movimiento del concentrador para cambiar su orientación de acuerdo a la posición del sol puede ser reducida usando una superficie cilíndrica de tal manera que su perfil sean dos secciones de una parábola, una frente a la otra, como se puede ver en la figura 2.8.

Figura 2.8. Esquema de un CPC con semiángulo de aceptación  $\theta_c$ .



Fuente: Bibliografía [5]

#### 2.4.1 Óptica sin imágenes (Nonimaging optics)<sup>27</sup>

La óptica sin imágenes es una disciplina científica nacida a mediados de los años 60 a raíz de los estudios realizados independientemente de tres científicos, V. K. Baranov, Maring Ploke y Roland Winston. Ésta es la forma óptima de transferir una radiación luminosa de una fuente a un receptor y encuentra su aplicación en física de altas energías, en astrofísica y en el sector de energía solar.

En 1965, en la Universidad de Chicago, Roland Winston consiguió, en el curso de los experimentos de física de altas energías, el primer "concentrador sin imágenes" para medir la difícil radiación nuclear asociada al efecto *Cerenkov*. Hoy este tipo de concentrador es comúnmente llamado *concentrador compuesto* o incluso *concentrador no focalizante*.

Se trata de un componente que, en sus diferentes versiones, es diseñado e implementado en los sistemas solares de concentración, sean térmicos o fotovoltaicos. Los concentradores realizados en base a los principios de la óptica sin imágenes concentran la luz de manera mucho más eficiente que los espejos normales que forman imágenes. En efecto, un concentrador no focalizante es como un embudo: la luz entrará en el concentrador mediante una amplia sección, y es reflejada de tal manera que atravesará una sección mucho más reducida. Este proceso destruye la imagen de la fuente, pero para el objetivo a alcanzar, no interesa obtener una imagen sino concentrar al máximo la intensidad de la radiación solar por unidad de superficie.

Paradójicamente, para los rayos extremos, el CPC se comporta como un concentrador de imagen, con lo que todos los puntos procedentes de una dirección convergen en un punto único y en el receptor se forma la imagen del perfil extremo de la fuente. Pero esto ocurre sólo para los rayos extremos, mientras que para los otros rayos no existe una correspondiente transposición entre la dirección de procedencia de los rayos y el punto sobre la apertura de salida, es decir, no se forma una imagen.

<sup>27</sup> Bibliografía [2]

Los concentradores basados en la "óptica sin imagen" con respecto a los concentradores que forman imagen, están diseñados con los siguientes criterios en particular: optimización de la aceptación angular (y por lo tanto optimización de la eficiencia óptica), o recoger todos los rayos incidentes dentro de un ángulo máximo determinado, igualando así los valores teóricos de concentración.

El principio base de la óptica sin imagen es el principio "*edge ray*" (borde de rayos), que se define como un sistema ideal en el que todos los rayos de entrada hasta un valor extremo con ángulo  $\theta_{max}$  atraviesan la apertura de salida del concentrador. En estas condiciones, no existe una correspondencia entre las direcciones de procedencia de los haces y la apertura de salida.

El CPC (Compound Parabolic Concentrator) puede ser del tipo 2D, es decir "trough" (cilíndrico), o del tipo 3D, es decir "point-focus" (con un solo punto de enfoque o de revolución).

La concentración máxima a la que se puede llegar, es función sólo de la divergencia de rayos de entrada al concentrador,  $\theta_{ent}$ , sin existir alguna limitación óptica por parte del dispositivo, y una divergencia angular de salida de  $90^\circ$ , que corresponde a la relación entre las zonas de entrada y de salida. La siguiente ecuación es válida para un concentrador 3D o de revolución con eficiencia óptica igual a la unidad:

$$C = \frac{A_{ent}}{A_{sal}} = \frac{1}{(\text{sen}\theta_{ent})^2} \quad (2.2)$$

Donde:

$A_{ent}$  = es el área de entrada o área de apertura

$A_{sal}$  = es el área de salida del concentrador

$\theta_{ent}$  = ángulo de entrada de los rayos al concentrador

Mientras que la siguiente ecuación, en cambio, define la concentración para un concentrador ideal, en el que la divergencia del haz de salida,  $\theta_{sal}$ , es un ángulo genérico:

$$C = \left( \frac{\text{sen}\theta_{sal}}{\text{sen}\theta_{ent}} \right)^2 \quad (2.3)$$

Los concentradores CPC cilíndricos son ideales, mientras que los concentradores CPC de revolución no lo son. Un concentrador se caracteriza por una relación de concentración geométrica,  $C_{geo}$ , y una relación de concentración óptica,  $C_{opt}$ , vinculadas entre su eficiencia óptica,  $E_{opt}$ , según la siguiente relación:

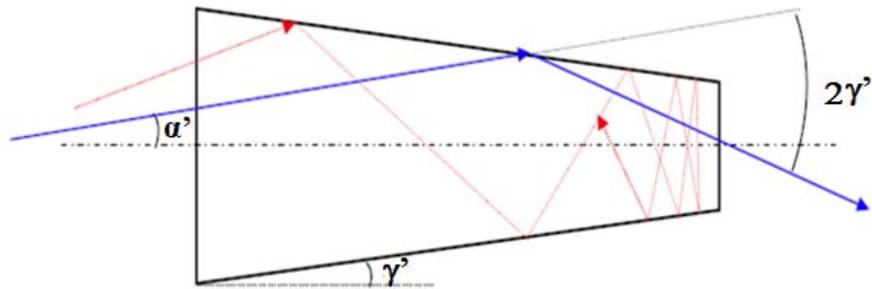
$$C_{opt} = C_{geo} \cdot E_{opt} \quad (2.4)$$

El concentrador ideal transmitirá todos los rayos incidentes de entrada dentro del ángulo de aceptación, mientras que el concentrador no ideal refleja una parte hacia el exterior sin aprovecharla. El cono de luz es el más simple concentrador de revolución, producto de la "*óptica sin imagen*" y es el precursor de todos los "*concentradores sin imagen*".

El cono de luz es construido con un simple tronco de cono cuya generatriz es inclinada un ángulo  $\gamma$  respecto al eje óptico. El cono de luz concentra la luz orientándola, o encaminándola,

hacia un extremo. Un rayo de ingreso inclinado respecto al eje óptico, después de una reflexión resulta girado un ángulo  $2\gamma'$ , como se puede observar en la figura 2.9. El cono de luz deja pasar ciertos rayos mientras éstos hayan realizado un número limitado de reflexiones, restringiendo a aquellos rayos que debido a sus sucesivas rotaciones con ángulo de  $2\gamma'$ , producto de sus continuas reflexiones, provocaron su reorientación hacia la entrada del cono.

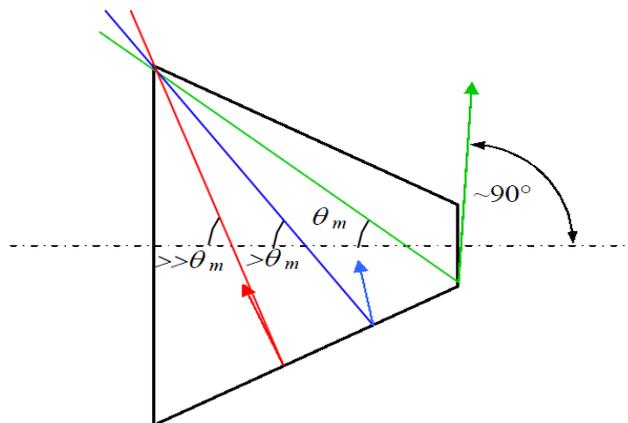
**Figura 2.9. Cono de Luz**



Fuente: Bibliografía [2]

Trabajar con los rayos de luz que tengan como condición una única reflexión, nos dará la oportunidad de seleccionar los rayos de admisión en base a su ángulo de inclinación respecto al eje óptico. Como se muestra en la figura 2.10, se puede plantear un ángulo de captación máximo igual a  $\theta_m$ , que corresponda a un ángulo de salida igual a  $90^\circ$ . De este modo, todos los rayos de entrada, inclinados hasta  $\theta_m$ , y que no hayan sufrido más de una reflexión, seguramente serán recogidos.

**Figura 2.10. Cono de luz con ángulo de recepción máximo  $\theta_m$**



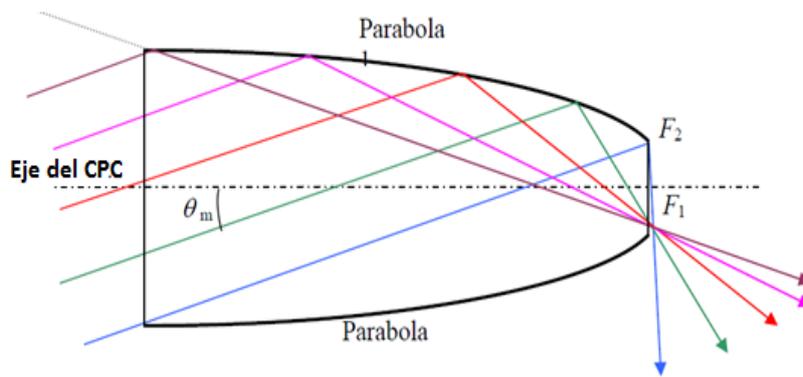
Fuente: Bibliografía [2]

El cono de luz está lejos de ser un concentrador ideal. Esto se demuestra de manera simple reiterando el principio “*edge ray*”, que establece como ideal un concentrador que obtenga con eficiencia unitaria todos los rayos de entrada hasta un ángulo límite preestablecido. En el caso

del cono de luz, y como se puede ver en la figura 2.10, se observa que rayos incidentes con ángulo mayor a  $\theta_m$ , en puntos alejados de la salida, no son aprovechados.

En aplicación práctica para su uso en el marco del aprovechamiento de la energía solar, el concentrador cilíndrico es el más utilizado. Construido con dos secciones de parábola, cuyos segmentos concentran la radiación solar reflejada sobre un absorbedor horizontal, esta configuración consigue, con pequeños desplazamientos, la recepción de todos los rayos que inciden en el CPC con un ángulo menor o igual a  $\theta_m$ . Ver figura 2.11.

**Figura 2.11. Sección de un colector CPC cilíndrico con absorbedor plano**



Fuente: Bibliografía [2]

Esta particularidad del CPC hará factible la omisión de un sistema de seguimiento solar preciso y constante, que sí hace muy complejos los sistemas formadores de imagen.

El diseño de un CPC, es tal que es posible realizar concentradores estacionarios, en el que no son necesarios incluir ningún dispositivo de seguimiento. Un concentrador podrá estar orientado con su eje mayor de norte-sur u orientado de otra manera de este-oeste, mientras que su apertura estará inclinada hacia el Ecuador un ángulo igual a la latitud del lugar de instalación. Cuando el CPC sea situado a lo largo del eje norte-sur será necesario prever una manipulación que pueda seguir el sol continuamente. Considerando que el ángulo de aceptación de la parábola a lo largo del eje mayor es grande, no será necesario ningún ajuste estacional en esta posición. Con este acondicionamiento el concentrador podría permanecer firme, pero perdería energía irradiada por el sol durante el día y el crepúsculo, debido a que estos rayos solares quedarían fuera del ángulo de aceptación. Sin embargo, colocando el colector a lo largo del eje este-oeste, no será necesario seguir el sol constantemente durante el período de una jornada, pero bastará aportar los pequeños ajustes estacionales.

#### 2.4.2 Ángulo de aceptación de un CPC <sup>28</sup>

En este tipo de colectores tenemos que cada lado del CPC es una parábola, en la parábola del lado derecho se encuentra el foco y su eje. Cada parábola se extiende hasta que su superficie sea paralela con el eje del CPC. El ángulo entre el eje del CPC y la línea que conecta el foco de una de las parábolas con la orilla opuesta de la apertura es el “*ángulo medio de*

<sup>28</sup> Bibliografía [19]

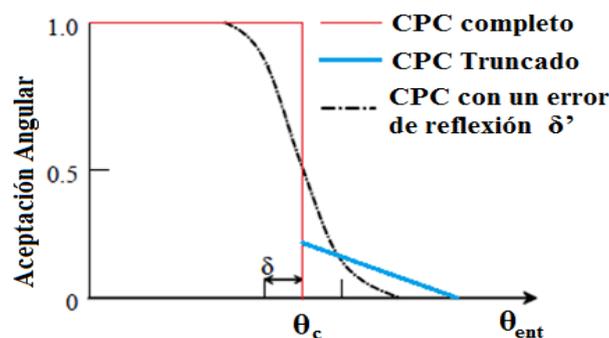
**aceptación**”, “ $\theta_c$ ”. Si el reflector es perfecto, cualquier radiación que entre a la apertura entre  $\pm \theta_c$ , será reflejado hacia el receptor ubicado en la base del concentrador por reflexiones entre las dos secciones parabólicas.

El CPC tiene un **ángulo de aceptación** característico, donde todos los rayos incidentes en la apertura que llegan con un ángulo  $\theta < \theta_c$ , serán reflejados hacia el absorbedor, mientras que aquellos rayos con ángulo  $\theta > \theta_c$ , serán reflejados entre las paredes del reflector de manera tal que serán eventualmente rechazados hacia la apertura.

La figura 2.12 nos muestra la aceptación angular en función de un CPC ideal completo y un CPC ideal truncado, ambos con superficies reflectoras perfectas, también se representa un CPC completo ideal con un **error de reflexión “ $\delta$ ”**. La aceptación angular es la fracción de radiación incidente en la apertura con un ángulo  $\theta$  que es concentrado en el absorbedor por un CPC con un semiángulo de apertura  $\theta_c$ , asumiendo un coeficiente de reflectividad igual a 1.

Si el CPC es truncado, algunos rayos fuera del ángulo de aceptación, con ángulo  $\theta > \theta_c$ , podrán ser concentrados en el absorbedor, mientras que por otro lado ningún rayo con ángulo  $\theta < \theta_c$  será rechazado.<sup>29</sup>

**Figura 2.12. Ángulo de aceptación en función de un CPC completo, CPC truncado y un CPC con error de reflexión  $\delta$ '.**



Fuente: Bibliografía [24]

Por otro lado, el hecho que el ángulo de aceptación sea grande, ofrece ventajas importantes<sup>30</sup>:

- Permite la operación del concentrador por períodos de tiempo extensos sin necesidad de ajustar su orientación.
- Permite el empleo de superficies reflejantes no muy precisas.
- Permite la captación y concentración de una porción de la radiación difusa.

Para colectores CPC estacionarios, el ángulo de aceptación mínimo deberá ser igual a  $47^\circ$ . Este ángulo será capaz de cubrir la declinación del sol desde el solsticio de verano hasta el solsticio de invierno ( $2 \times 23.5^\circ$ ).<sup>31</sup>

Este tipo de colectores estacionarios con grandes ángulos de aceptación se utilizan incluso en aplicaciones en áreas nubladas, pero como consecuencia, se tendrán relaciones de

<sup>29</sup> Bibliografía [24]

<sup>30</sup> Bibliografía [19]

<sup>31</sup> La información de este párrafo ha sido sustraída de la fuente bibliografía [2]. Página 45.

concentración muy bajas. Factores de concentración bajos (menores que 3) de los CPCs son de gran interés práctico.

### 2.4.3 Factor de concentración (C)

En estos colectores concentradores (sistema de dos dimensiones), la razón de concentración queda en función del ángulo de aceptación, y está dada por:

$$C = \frac{1}{\text{sen } \theta_c} \quad (2.5)$$

Donde:

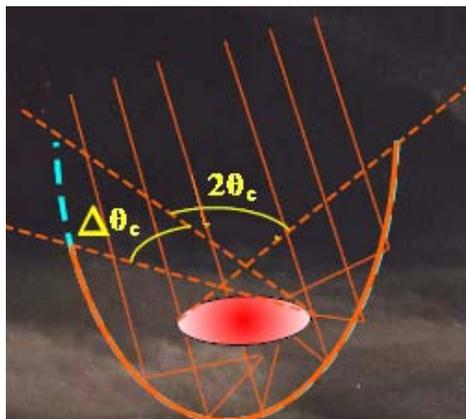
C = factor de concentración

$\theta_c$  = semiángulo de aceptación ( $^\circ$ )

La ecuación nos indica que entre más pequeño sea el semiángulo de aceptación, mayor será la concentración y viceversa. En caso se quiera diseñar un concentrador de tipo estacionario, por razones de diseño propias de este tipo de colectores fijos, los ángulos de aceptación en la práctica deben ser amplios, para cubrir así el desplazamiento del sol desde el solsticio de invierno hasta el solsticio de verano. A medida que el ángulo de aceptación se va haciendo pequeño, se hace necesario darle orientación al CPC, ya que por la razón explicada anteriormente con ángulos pequeños no cubriría el desplazamiento del sol a lo largo del año, además de que la altura que debería tener sería demasiado grande y por lo tanto impráctica.

Es frecuente truncar las hojas reflectoras del CPC a la mitad, para que ocupen menos espacio y reducir el costo del material reflector. El truncamiento reduce el factor de concentración C, pero la pérdida de eficiencia de captación que resulta de la operación en general es pequeña debido a que la parte superior de la parábola no intercepta mucha radiación<sup>32</sup>. Además, de que justamente en la región truncada es donde ocurre el mayor número de reflexiones de la radiación, y al eliminarla, se reduce considerablemente el número de reflexiones de la radiación solar incidente en el colector<sup>33</sup>. Ver figura 2.13.

**Figura 2.13. Truncamiento del colector**



Fuente: Bibliografía [39]. Página 22.

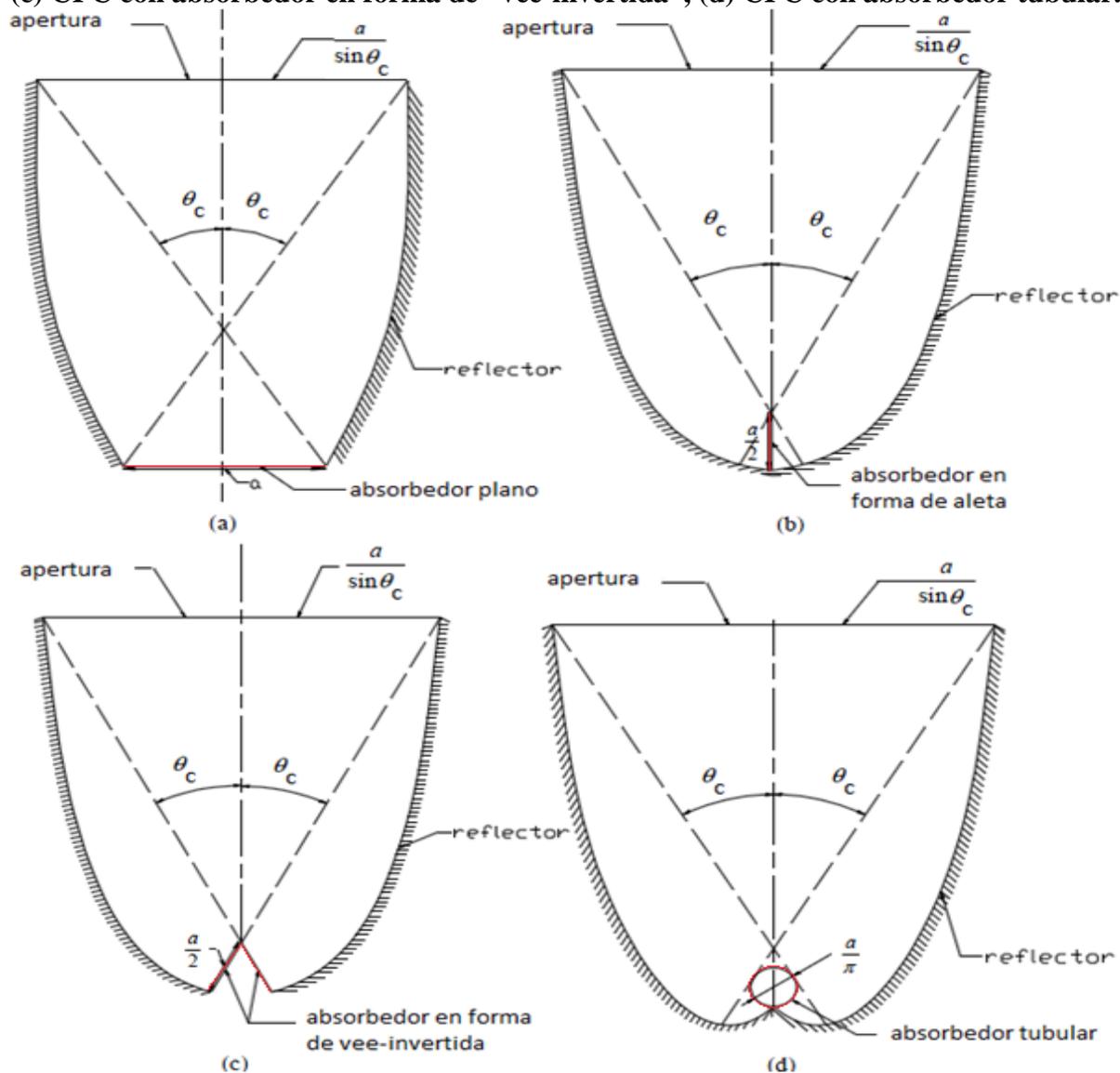
<sup>32</sup> Bibliografía [15]

<sup>33</sup> Bibliografía [19]

### 2.4.4 Formas del absorbedor

Un colector CPC puede ser diseñado para diferentes formas de absorbedor, dando lugar a una serie de diferentes diseños. La configuración de CPC más usada es basada en un absorbedor plano con dos reflectores parabólicos, uno a cada lado. Cuatro diferentes formas de absorbedores para CPC con sus respectivos reflectores son mostrados en la figura 2.14. En dicha figura los 4 absorbedores tienen el mismo perímetro “ $a$ ” y el mismo semiángulo de aceptación  $\theta_c$

**Figura 2.14.** (a) CPC con absorbedor plano, (b) CPC con absorbedor en forma de aleta, (c) CPC con absorbedor en forma de “vee-invertida”, (d) CPC con absorbedor tubular.



Fuente: Active Solar Collectors and their applications, Oxford University Press, EEUU. A. Rabl.1985.

Las pérdidas térmicas de la parte posterior del absorbedor son minimizadas usando un absorbedor tubular.

### 2.4.5 Conceptos geométricos<sup>34</sup>

Definiremos la concentración geométrica solar del concentrador parabólico compuesto de la siguiente manera<sup>35</sup>:

$$C_{\text{geom}} = \frac{A}{A'} \quad (2.6)$$

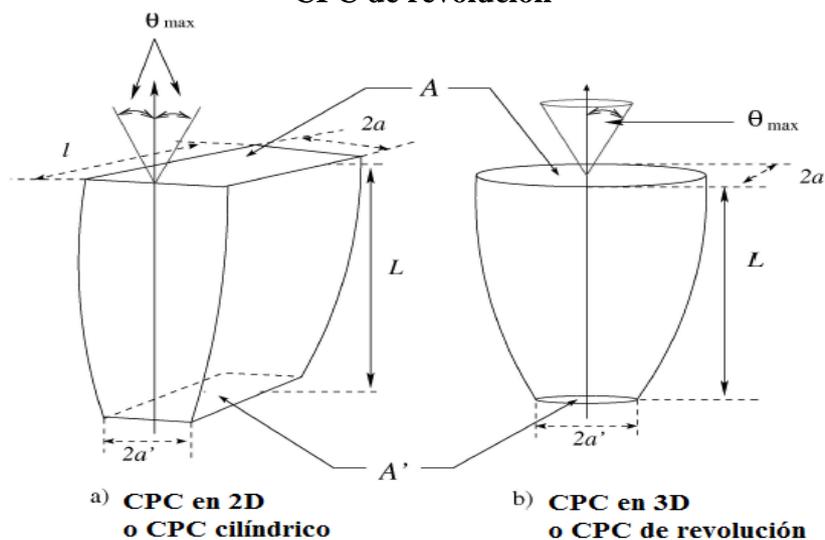
Donde:

A = Área de incidencia de rayos o área superior o de apertura

A' = Área de salida de los rayos

El aspecto físico del CPC se muestra en la figura 2.15. En el inciso a), se presenta al CPC cilíndrico, y se puede ver que está formado por un perfil extruído, el perfil se integra por dos segmentos de parábola, los cuales son espejo uno del otro, y se ubican de forma simétrica con respecto a un eje vertical en el centro de ambos; en la misma figura en el inciso b), se puede observar al CPC de revolución, este dispositivo es una superficie formada por la rotación del perfil del CPC cilíndrico con respecto a su eje vertical central. Los parámetros geométricos de ambos CPC's, también se pueden observar en la misma figura.

**Figura 2.15. Aspecto físico del CPC y sus parámetros geométricos: a) CPC cilíndrico; b) CPC de revolución**



Fuente: Bibliografía [1]. Página 2.

Donde:

a = longitud de semi apertura de entrada

a' = longitud de semi apertura de salida

L = longitud de la altura del CPC

l = profundidad del dispositivo CPC cilíndrico

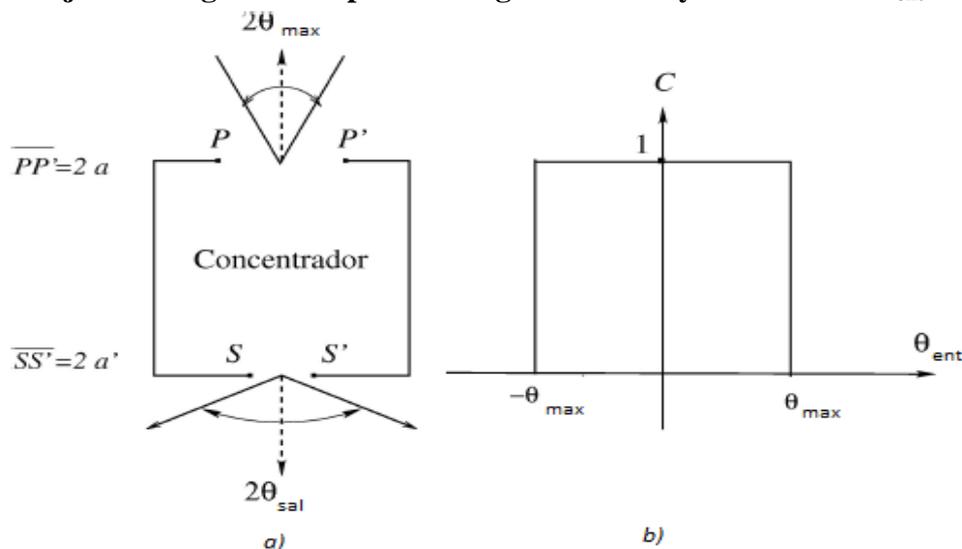
<sup>34</sup> Bibliografía [1]

<sup>35</sup> Bibliografía [24]

En la figura 2.16a), se muestra la “caja negra” del CPC cilíndrico, y las propiedades ópticas del concentrador que se pueden inferir de la figura, son:

- Que todo rayo que incida entre  $PP' = 2a$ , con un ángulo entre  $\pm\theta_{m\acute{a}x}$  será concentrado en el área de salida  $SS' = 2a'$ , con un ángulo de salida entre  $\pm\theta_{sal}$ .
- En la figura 2.16b), se presenta la gráfica de concentración ideal del flujo de energía del CPC cilíndrico con respecto al ángulo de incidencia de los rayos  $\theta_{ent}$ , y claramente se observa de la gráfica que si el flujo de rayos incide en el área superior  $A$  con un ángulo  $\theta_{ent}$  entre  $\pm\theta_{m\acute{a}x}$ , la concentración del flujo de energía del CPC será igual a la unidad. Y que todo rayo fuera del intervalo de aceptación será rechazado, es decir, no aportará energía en el área de concentración  $A'$ .

**Figura 2.16. a) El concentrador CPC visto como caja negra; b) La concentración del flujo de energía con respecto al ángulo de los rayos incidentes  $\theta_{ent}$ .**



Fuente: Bibliografía [1]. Página 2.

Por lo tanto se dice que el CPC es el concentrador más eficiente, ya que toda la radiación que entra al CPC en un cono de luz de apertura  $\pm\theta_{m\acute{a}x}$  con respecto a la vertical, será concentrada.

Al usar la definición de concentración geométrica aplicada al CPC cilíndrico, y al observar los parámetros en la figura 2.15a), se deduce:

$$C_{\text{Cilíndrico}} = \frac{A}{A'} = \frac{a * l}{a' * l} = \frac{a}{a'} \quad (2.7)$$

Y para la concentración geométrica del CPC de revolución, en la figura 2.15b), se obtiene:

$$C_{\text{Revolución}} = \frac{A}{A'} = \frac{\pi a^2}{\pi (a')^2} = \frac{a^2}{(a')^2} \quad (2.8)$$

Con el objetivo de hacer un estudio detallado de la construcción geométrica del dispositivo, se realizará en este trabajo sobre el CPC, un análisis optogeométrico y su descripción paramétrica en coordenadas polares.

### 2.4.6 Desarrollo del CPC en coordenadas polares<sup>36</sup>

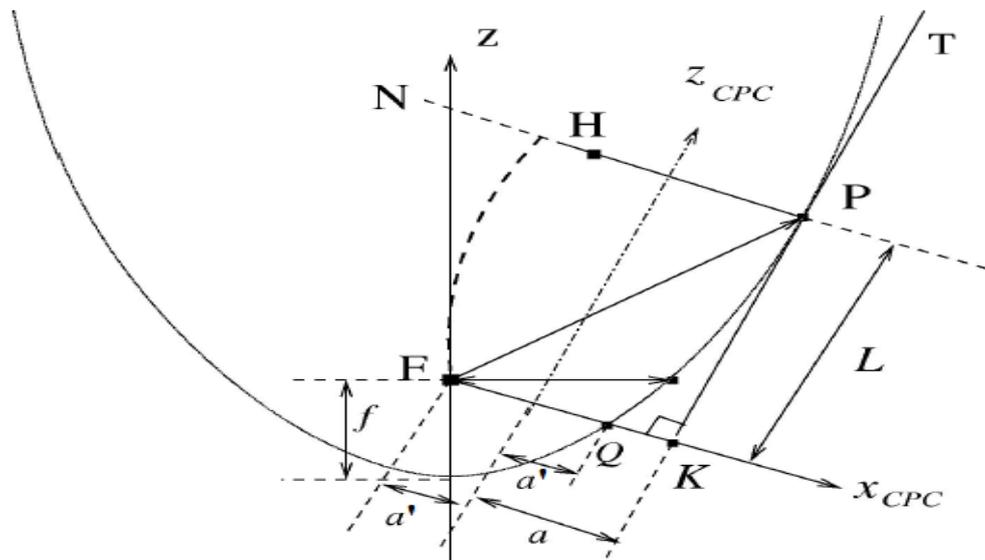
El concepto del dispositivo concentrador CPC (es independiente del sistema de coordenadas en que se describa) se construye a partir de un segmento de parábola. Como se puede ver en la figura 2.17, el segmento inicia en el punto Q de la parábola. El punto final del CPC está en el punto de la parábola donde la normal N con el segmento FQ son paralelos. El eje del CPC, como se puede observar es paralelo a la tangente T, e intercepta el punto medio del segmento FQ. También se puede ver que la reflexión en espejo, del segmento de parábola PQ con respecto al eje del CPC, genera el CPC cilíndrico. La rotación del segmento de parábola PQ con respecto al eje del CPC, genera el CPC de revolución.

La descripción geométrica y la representación paramétrica del CPC serán establecidas en coordenadas polares, pero luego en coordenadas cartesianas que son más naturales, se realizará una descripción geométrica hasta obtener la representación analítica del CPC.

En coordenadas polares el desarrollo será presentado en las siguientes etapas:

1. *Descripción de la reflexión de rayos sobre la parábola.*
2. *Construcción del CPC cilíndrico*
3. *Expresiones de los parámetros geométricos  $a$ ,  $a'$  y  $L$  del CPC*
4. *Expresión paramétrica del CPC en coordenadas polares.*

**Figura 2.17. Propiedades Geométricas del CPC**



Fuente: Bibliografía [1]. Página 3.

#### 2.4.6.1 Reflexión de rayos luminosos sobre la parábola

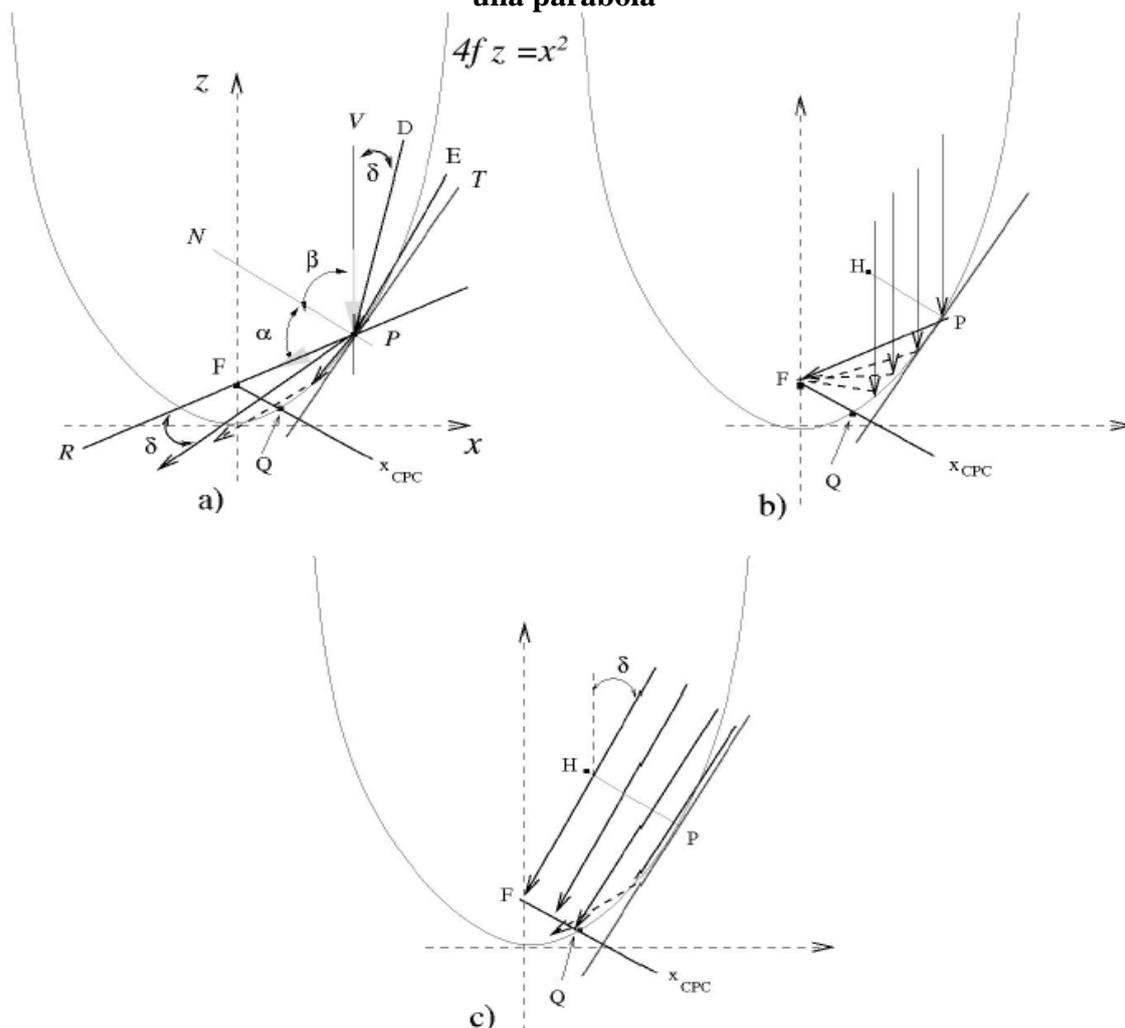
Como la curva geométrica que da origen al CPC es la parábola, debemos hacer un análisis del comportamiento de la reflexión de rayos luminosos sobre la parte interna del segmento de la parábola para conocer el modo en que se logra la concentración de rayos luminosos en el CPC. En este análisis se considera la descripción geométrica en una parábola vertical que abre

<sup>36</sup> Bibliografía [1]

hacia el lado positivo del eje Z, como se puede ver en la figura 2.18. En esta parábola consideraremos la tangente T en el punto  $P(x_1, z_1)$ ; en este punto P se traza la recta normal N, luego se genera una recta paralela a la normal N; a esta recta paralela le llamamos  $x_{CPC}$ , que tiene la propiedad de pasar por el foco F y de interceptar el punto Q de la parábola. Es conveniente aclarar que el punto Q se debe encontrar entre el vértice y el lado recto de la parábola, en el primer cuadrante en la figura 2.18. De toda la curva de la parábola sólo el segmento PQ se utiliza para formar el CPC.

Se estudia la ley de reflexión de rayos, con el fin de analizar el comportamiento de los rayos que inciden y se reflejan en el segmento PQ. Esta ley se puede aplicar a nuestro sistema de concentración, debido a que el análisis de reflexión de rayos luminosos sobre las superficies especulares se describe adecuadamente mediante la óptica geométrica. La ley de reflexión de rayos dice: “En un mismo medio, si un rayo de luz incide sobre una superficie plana reflectora especular, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, ambos ángulos medidos con respecto a la normal de la superficie y, donde además, los rayos y la normal deberán estar en el mismo plano”.

**Figura 2.18. Esquema de la reflexión de rayos luminosos sobre la superficie interna de una parábola**



Fuente: Bibliografía [1]. Página 4.

En este análisis se aplicará la ley de reflexión, pero en lugar de incidir el rayo en un plano, se supondrá que incide en el plano tangente, del CPC cilíndrico de la figura 2.15, que equivale a pensar que los rayos incidan sobre la tangente T en la figura 2.18.

Entonces, si en la figura 2.18 se considera un rayo luminoso que sigue la trayectoria sobre la recta V, e intercepta con el punto P, el rayo reflejado deberá (de acuerdo con la ley de reflexión) seguir la trayectoria de la recta R, que tiene la propiedad de interceptar a la parábola en el punto P y al foco F. Asimismo, en la figura 2.18 se puede ver que la recta R y la recta N forman un ángulo “ $\alpha$ ”; la recta V con la recta N forman un ángulo “ $\beta$ ”. Al usar estas consideraciones geométricas, además que la reflectividad de la superficie representa el perfil de reflexión aplicada a los rayos incidentes que interceptan a la parábola en el segmento PQ, se puede afirmar que:

- Los ángulos “ $\alpha$ ” y “ $\beta$ ” son iguales, como se ilustra en el inciso a) de la figura 2.18.
- Dado que la curva PQ es parte de una parábola y que F es su foco, todos los rayos verticales paralelos a la recta V, que incidan en algún punto del segmento PQ de la parábola, son reflejados con direcciones de rectas que pasan por el foco F y el punto de incidencia, como se puede ver en el inciso b) de la figura 2.18.
- Cualquier rayo que siga una trayectoria entre las rectas V y T, con un ángulo “ $\delta$ ”, menor a la inclinación de la tangente T y que incida en cualquier punto del segmento PQ, será reflejado en una trayectoria que intercepte al segmento FQ, con una o más reflexiones, como se muestra con los rayos que siguen las trayectorias de las rectas D y E en el inciso a) de la figura 2.18, o las rectas inclinadas del inciso c) de la misma figura.

Como se pudo ver la idea física de la reflexión de rayos en el segmento de parábola es muy sencilla. En la figura 2.18 inciso c), se puede ver que el dispositivo reflector es diseñado para concentrar todos los rayos que entran en el segmento HP sobre el segmento FQ, siempre y cuando, los rayos luminosos que inciden en el segmento PQ, tengan un ángulo “ $\delta$ ” mayor que cero y menor al ángulo que tiene la tangente T, ambos ángulos con respecto a la vertical V.

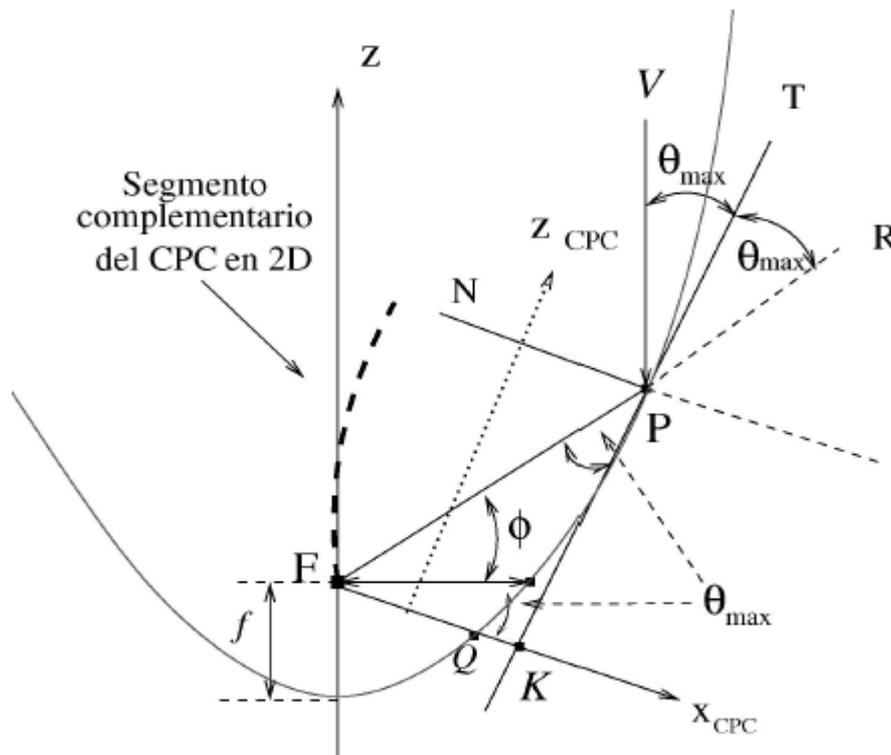
Un aspecto importante es que dado que el número de reflexiones es diferente en cada caso, y que no preserva el ordenamiento espacial, el concentrador no preserva la imagen de los rayos concentrados con respecto a los rayos incidentes. Al utilizar estas características ópticas del segmento PQ de la parábola, se podrá desarrollar el CPC, tanto el cilíndrico como el de revolución.

Una vez que se ha visto la intencionalidad del CPC se realizará una descripción geométrica del CPC.

#### 2.4.6.2 Descripción geométrica del CPC

Como se ha visto en la subsección anterior, el segmento de parábola PQ puede ser usado como concentrador de flujo luminoso, con un intervalo en el ángulo  $\theta_{ent}$  de  $0 \leq \theta_{ent} \leq \theta_{max}$ , siempre que se busque que los rayos entren en un segmento sobre la recta normal N a la izquierda del punto P, y que el segmento tenga una longitud igual a  $|FP| \cos(\alpha)$ . Claramente se necesita otra rama reflectora del lado izquierdo para construir un dispositivo que sea útil en las aplicaciones de concentración solar, y al dispositivo que se compone de los dos segmentos simétricos de parábola que puede observarse en la figura 2.19, se le ha llamado concentrador parabólico compuesto o de forma abreviada CPC.

**Figura 2.19. Esquema para definir geoméricamente el CPC**



Fuente: Bibliografía [1]. Página 5.

Para desarrollar el CPC, desde el punto de vista geométrico se requiere:

- Generar un eje  $z_{CPC}$  perpendicular a  $x_{CPC}$ , que tenga el origen  $(0,0)$ , en el punto medio del segmento FQ.
- Realizar una curva simétrica del segmento de parábola PQ, con respecto al eje  $z_{CPC}$ , que generará el CPC como se muestra en las figuras 2.17 y 2.19.
- En la figura 2.19 se puede observar que la tangente T es paralela al eje  $z_{CPC}$ , y la recta normal N es paralela al eje  $x_{CPC}$ , con lo cual  $\theta_{max}$  es el mismo entre:
  1. El eje  $x_{CPC}$  con respecto al lado recto de la parábola.
  2. La recta vertical V con respecto a la recta tangente T.
  3. La recta tangente T con respecto a la recta R.
- Los parámetros geométricos del CPC que se pueden observar en la figura 2.17 son:
  1. Longitud de apertura de salida del flujo luminoso “ $a'$ ”, que corresponde a la mitad de la longitud del segmento FQ sobre el eje  $x_{CPC}$ .
  2. Longitud de apertura de entrada del flujo luminoso “ $a$ ”, que corresponde a la longitud entre el origen de los ejes del CPC y la proyección del punto P sobre el eje  $x_{CPC}$ , punto que se indica como K en la figura 2.17.
  3. Longitud de la altura L del CPC que corresponde a la distancia entre el origen de los ejes de CPC hasta la proyección del punto P sobre el eje  $z_{CPC}$ .

Una vez que se ha conceptualizado el CPC a partir de una parábola, se puede encontrar la descripción geométrica del dispositivo CPC.

### 2.4.6.3 Descripción de la parábola en coordenadas polares

Para describir la parábola en coordenadas polares  $(r, \phi)$ , es común hacerlo desde el foco F como origen, además utilizar la convención para el ángulo  $\phi$ , de tener el valor  $\phi = \theta^\circ$  en el lado recto de la parábola, y considerar valores positivos en el sentido contrario al giro de las manecillas del reloj. Si se considera una parábola que abre hacia las  $z$ 's positivas, y si se le denomina  $f$  a la distancia focal, entonces la parábola en coordenadas polares se puede describir por medio de la relación

$$r = \frac{2f}{1 - \text{sen}(\phi)} \quad (2.9)$$

Con la ecuación (2.9) se puede encontrar los valores de los parámetros geométricos del CPC

### 2.4.6.4 Parámetros geométricos del CPC

Se empieza con la evaluación del valor de  $a'$ , al observar en la figura 2.20 que  $r = 2a'$ , se alcanza cuando  $\phi = -\theta_{\max}$ , y si se considera esto en la Ecuación (2.9) se obtendrá:

$$2a' = \frac{2f}{1 - \text{sen}(-\theta_{\max})} = \frac{2f}{1 + \text{sen}(\theta_{\max})} \quad (2.10)$$

De aquí se infiere que dado  $a'$  y  $\theta_{\max}$ , la distancia focal puede expresarse por

$$f = a'(1 + \text{sen}(\theta_{\max})) \quad (2.11)$$

Ahora se evaluará el valor máximo de  $r$  en el CPC, el cual denominaremos  $r_m$ , éste se obtiene al evaluar la Ecuación (2.9) para el ángulo  $\phi_m$ , en la figura 2.20 se puede observar entre las rectas V y S que  $\phi_m = (\pi/2) - 2\theta_{\max}$ , por tanto  $r_m$  se encuentra como

$$\begin{aligned} r_m &= \frac{2f}{1 - \text{sen}(\phi_m)} = \frac{2f}{1 - \text{sen}\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) - 2\theta_{\max}\right)} \\ &= \frac{a'(1 + \text{sen}(\theta_{\max}))}{\text{sen}^2(\theta_{\max})} \end{aligned} \quad (2.12)$$

La concentración del CPC cilíndrico, se encuentra al evaluar  $a + a'$ , como

$$a + a' = r_m \text{sen}(\theta_{\max}) = a' \left( \frac{1 + \text{sen}(\theta_{\max})}{\text{sen}(\theta_{\max})} \right) \quad (2.13)$$

Y al simplificar se llega a

$$\frac{a}{a'} = \frac{1}{\text{sen}(\theta_{\max})} = C_{2D} = C_{\text{cilíndrico}} \quad (2.14)$$

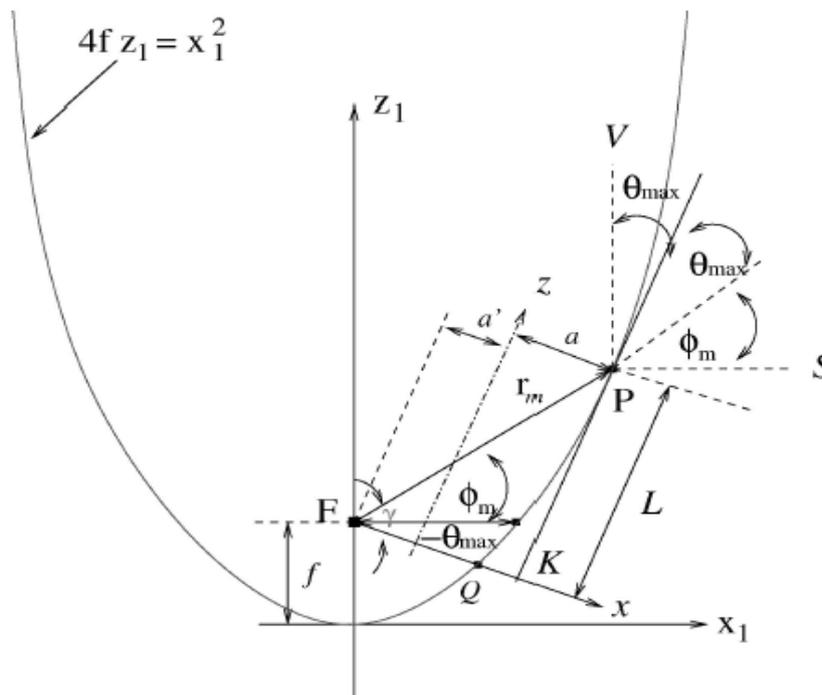
Que es la relación para la concentración en el CPC cilíndrico obtenida por Winston. Sólo faltará encontrar la relación para evaluar la longitud  $L$  del CPC, lo cual se puede hacer al observar el triángulo PFK en la figura 2.20, donde se puede ver que se cumple la relación

$$\tan(\gamma) = \frac{L}{a + a'} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\max}\right) = \frac{1}{\tan(\theta_{\max})} \quad (2.15)$$

Donde  $L$  es la altura del CPC. Al usar la relación (2.15), se puede escribir la relación para  $L$  como:

$$L = (a + a') \cot(\theta_{\max}) \quad (2.16)$$

**Figura 2.20. Esquema para evaluación de los parámetros del CPC en coordenadas polares**



Fuente: Bibliografía [1]. Página 5.

Con la relación (2.16) para  $L$  y las relaciones (2.11) y (2.14), se han completado las relaciones para evaluar los parámetros geométricos del CPC. Cabe mencionar que, si se toma al conjunto de parámetros geométricos  $PG = \{f, \theta, a, a', L\}$  y se elige dos parámetros de los cinco, los tres restantes se encuentran como función de los parámetros seleccionados. Sin embargo, se pueden obtener de forma más simple si se selecciona los pares de parámetros independientes  $(f, \theta)$ ,  $(a, \theta)$  y  $(a', \theta)$ , y así obtener los parámetros restantes a través de las relaciones (2.11), (2.14) y (2.16).

Ya con estos alcances, se continuará con la determinación de las ecuaciones paramétricas del CPC cilíndrico en coordenadas polares.

### 2.4.6.5 Ecuaciones paramétricas del CPC en coordenadas polares

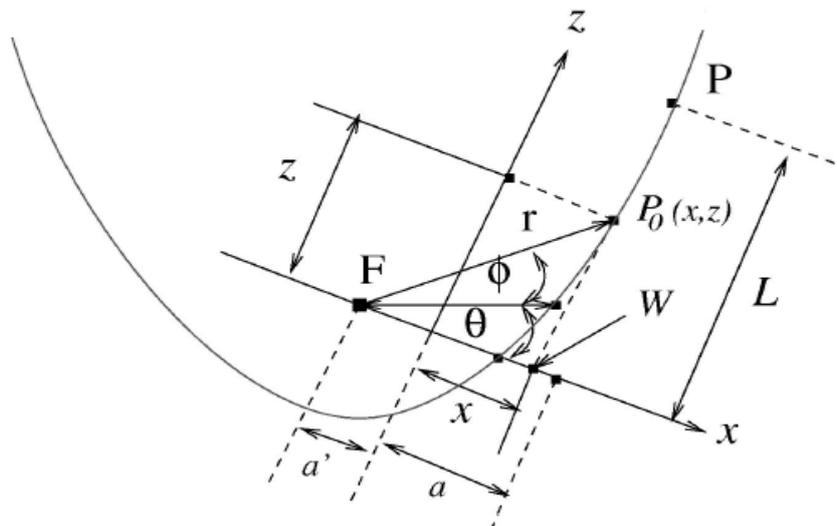
Se puede observar en la figura 2.21 los ejes del CPC,  $x$  y  $z$ , con la aclaración de que  $x = x_{CPC}$  y  $z = z_{CPC}$ , y el origen de este sistema de coordenadas está en el punto medio del segmento FQ, además, también se considerará que  $\theta_{max} = \theta$ , lo cual simplificará la expresión de las ecuaciones. En coordenadas polares la descripción que se obtiene para  $x$  y  $z$  es en forma paramétrica. Para obtener la relación correspondiente a cada variable se hará uso de la ecuación de la parábola en coordenadas polares y alguna relación trigonométrica.

En la figura 2.21 se observa en el triángulo FWP<sub>o</sub>, que el valor de  $z$ , se puede obtener como

$$z = r \sin(\phi + \theta) = \left( \frac{2a'(1 + \sin(\theta))}{1 - \sin(\phi)} \right) \sin(\phi + \theta) \quad (2.17)$$

Donde se utilizó las relaciones (2.9) y (2.11) para considerar  $r$ .

**Figura 2.21. Parametrización del CPC en coordenadas polares**



Fuente: Bibliografía [1]. Página 7.

Utilizando el mismo triángulo FWP<sub>o</sub> en la figura 2.21, para  $x$  se tiene

$$x = r \cos(\phi + \theta) - a' = \left( \frac{2a'(1 + \sin \theta)}{1 - \sin \phi} \right) \cos(\phi + \theta) - a' \quad (2.18)$$

Las ecuaciones paramétricas (2.17) y (2.18) tienen un intervalo de aplicación para  $\phi$  en  $(-\theta, (\pi/2 - 2\theta))$ . El ángulo de aceptación del CPC es  $\pm\theta$ , se puede observar en  $x = x(\phi, \theta, a')$  y  $z = z(\phi, \theta, a')$ , que tanto  $\theta$  como  $a'$  son parámetros que determinan el CPC específico, y que  $\phi$  es una variable para construir la curva geométrica del segmento de parábola que genera el CPC. Éstas son las ecuaciones paramétricas del CPC cilíndrico, y con esto se concluye el desarrollo en coordenadas polares.

Aunque las expresiones de las ecuaciones paramétricas del CPC cilíndrico en coordenadas polares se obtienen de forma simple, las coordenadas cartesianas son más usadas en la

descripción geométrica y analítica de las curvas; motivados por todo esto, en la subsección que prosigue se presentará el desarrollo del CPC en coordenadas cartesianas.

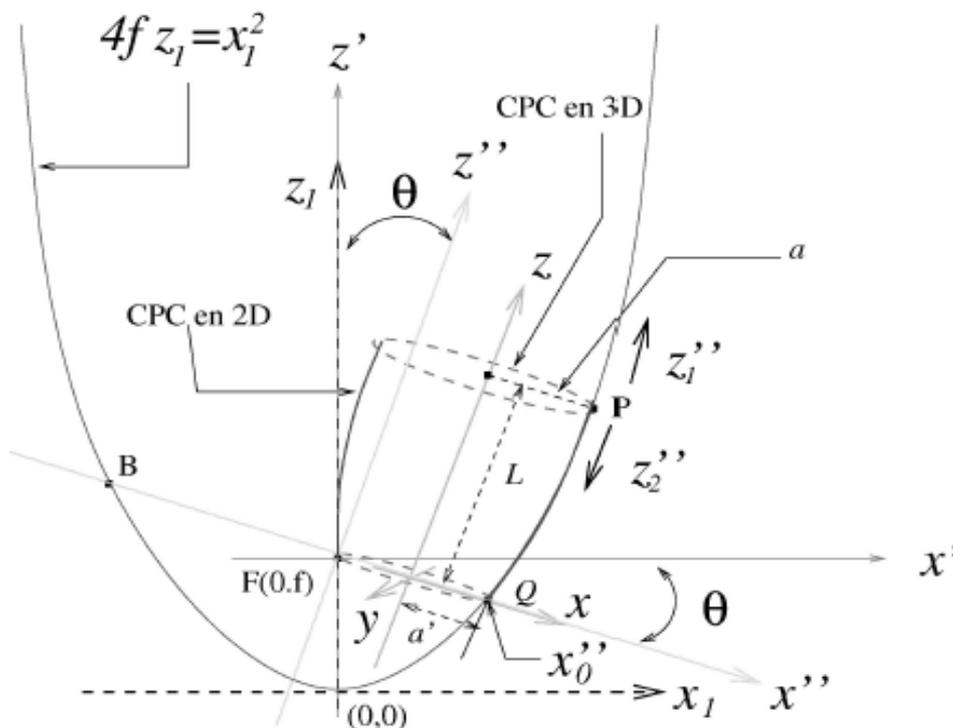
### 2.4.7 Descripción del CPC en coordenadas cartesianas

Con el análisis en coordenadas polares del comportamiento del flujo luminoso que llega al CPC, y la forma en que este flujo es concentrado por el CPC, se podrá conocer las propiedades y características importantes del dispositivo. Sin embargo, las relaciones (2.17) y (2.18) sólo describen geoméricamente el segmento de parábola PQ y no el complemento del CPC cilíndrico, marcado con una línea punteada en la figura 2.19. Lo deseable para hacer el diseño de un dispositivo CPC, es saber la descripción analítica de la curva completa, lo cual, sí es posible en coordenadas cartesianas. Se procederá a desarrollar las expresiones analíticas del CPC cilíndrico en coordenadas cartesianas y se obtendrán los parámetros geométricos en este sistema coordenado

#### 2.4.7.1 Relaciones del CPC cilíndrico

Para desarrollar el CPC se iniciará tomando una parábola vertical con origen ubicado en su vértice, sobre los ejes  $x_I$  y  $z_I$  (en líneas punteadas), como se muestra en la figura 2.22. Luego por medio de tres transformaciones de coordenadas se obtendrá una expresión de la parábola en los ejes finales  $x$  y  $z$ , después se hará dos aplicaciones de la función composición para obtener el CPC cilíndrico.

**Figura 2.22. Ejes de referencia de la parábola en las transformaciones de coordenadas y generación del CPC cilíndrico**



Fuente: Bibliografía [1]. Página 7.

Los pasos específicos para el desarrollo hasta obtener las expresiones analíticas del CPC cilíndrico serán las siguientes:

1. Se considera una parábola vertical, como se muestra en el inciso a) de la figura 2.23
2. Se describe la parábola desde los ejes  $x'$  y  $z'$  que tienen origen en el foco de la parábola; para hacer esto, se utilizan las relaciones de transformación de los ejes  $x'$  y  $z'$  con respecto a los ejes  $x_I$  y  $z_I$ , y se sustituye los valores  $x_I$  y  $z_I$  para encontrar la expresión analítica de la parábola en los ejes primados  $(x, z')$ , lo cual se puede ver en el inciso a) de la figura 2.23
3. Después en el sistema coordenado con ejes  $x''$  y  $z''$ , se describirá la parábola, para ello, se utilizará las relaciones de transformación de los ejes  $x'$  y  $z'$  con respecto a los ejes  $x''$  y  $z''$  que tienen una rotación de un ángulo  $\theta$ , posteriormente se sustituirán los valores de  $x'$  y  $z'$  en la ecuación analítica de la parábola expresada en los ejes  $(x', z')$ , para obtener así la expresión de la parábola expresada en coordenadas de  $x''$  y  $z''$ . En el inciso b) de la figura 2.23 se puede observar la transformación.
4. Luego, se encontrará el valor del punto que se denominará  $x_o''$ , de cruce por cero de la ecuación de la parábola en los ejes  $x''$  y  $z''$ , indicado en el inciso c) de la figura 2.23, y una vez obtenido el valor de  $x_o''$  se fijará el origen de los ejes  $x$  y  $z$  en el punto  $(x_o''/2, 0)$  de los ejes biprimados.
5. Con lo anteriormente realizado se obtendrá la descripción de la parábola dentro del sistema de coordenadas  $x$  y  $z$ , usando para esto, las relaciones de transformación de la traslación de los ejes biprimados  $x$  y  $z$  con respecto a  $x''$  y  $z''$ . Luego se sustituirá los valores de  $x''$  y  $z''$  en la relación de la parábola, para obtener finalmente la expresión de la parábola en el sistema de coordenadas de los ejes  $x$  y  $z$ , esto se puede observar en el inciso c) de la figura 2.23.
6. Se encontrará en los ejes  $x$  y  $z$ , la función que describe el CPC cilíndrico, como se muestra en el inciso d) y e) de la figura 2.23.
7. De esta manera, finalmente se encontrará la función que describe el CPC cilíndrico.

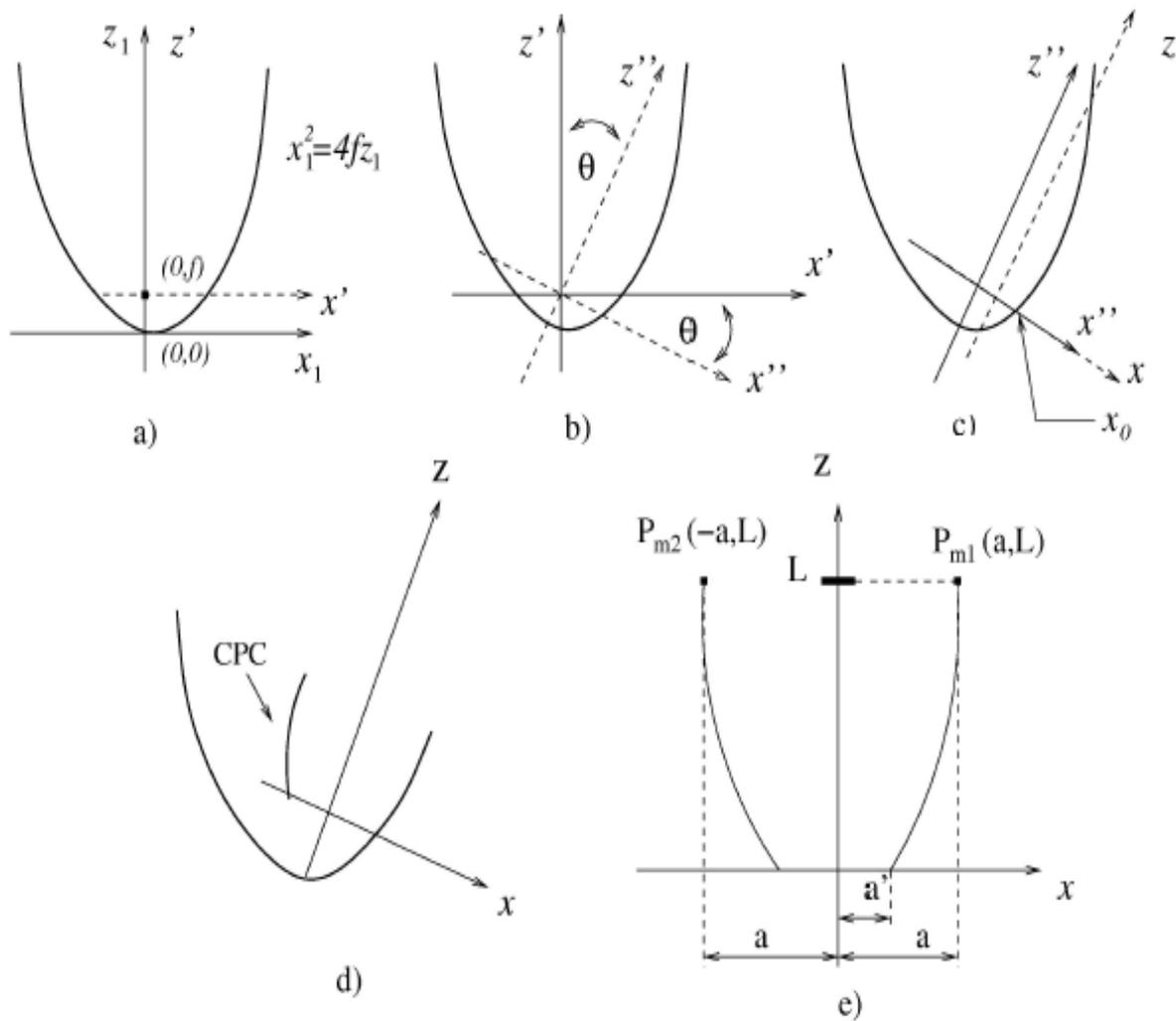
Cabe mencionar que en caso se requiera un CPC en revolución, sería necesario rotar alrededor del eje  $z$ , el perfil del CPC cilíndrico<sup>37</sup>.

---

<sup>37</sup> Para mayor información sobre las ecuaciones del CPC en revolución, ver fuente bibliográfica [1]

**Figura 2.23. a) Traslación al foco  $f$ , b) Rotación de los ejes primados un ángulo  $\theta$ , c) Traslación de los ejes biprimados al punto  $x_0/2$ , d) Desarrollo del CPC en los ejes finales, e) Representación geométrica del CPC cilíndrico**

S. TAPIA S. Y J.A. DEL RIO P.



Fuente: Bibliografía [1]. Página 8.

Con respecto al ángulo de rotación  $\theta$ , se debe recordar que  $|\theta| = \theta_{max}$ , ya que  $\theta$  toma valores negativos, en el sistema de referencia del que se ha hecho uso.

Como se muestra en la figura 2.23, los ejes cartesianos  $x_1$  y  $z_1$  se ubican en el vértice de la parábola, y como la parábola abre hacia el lado positivo del eje  $z_1$ , puede ser descrita por la expresión:

$$4fz_1 = x_1^2 \quad (2.19)$$

Donde:

$f$  = es la distancia focal de la parábola.

Ahora al seguir con el paso dos, se describirá la parábola desde los ejes  $x'$  y  $z'$ , con el origen en el punto  $(0, f)$ . Por tanto se hará una traslación de los ejes  $x_1$  y  $z_1$  hasta el nuevo origen  $(0, f)$ , esto se puede ver en el inciso a) de la figura 2.23.

Al ser una traslación de coordenadas, las relaciones de transformación entre  $x'$  y  $z'$  con los ejes  $x_1$  y  $z_1$  serán las relaciones

$$x_1 = x', \quad z_1 = z' + f \quad (2.20)$$

Para obtener la relación que describe la parábola en el sistema cartesiano primado, se sustituirá las relaciones de transformación (2.20) en la relación (2.19), y al hacer esto se obtendrá

$$4fz' = (x')^2 - 4f^2 \quad (2.21)$$

De acuerdo al paso tres se describirá el CPC desde los ejes de referencia que tienen un ángulo  $-\theta$ , se rotará un ángulo  $\theta$  a los ejes cartesianos  $x'$  y  $z'$ , hasta obtener los nuevos ejes coordenados que se les denominará  $x''$  y  $z''$ , ambos sistemas cartesianos se pueden ver en el inciso c) de la figura 2.23 y, la rotación es descrita por las relaciones.

$$\begin{aligned} x' &= x'' \cos(\theta) - z'' \operatorname{sen}(\theta) \\ z' &= z'' \operatorname{sen}(\theta) + x'' \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Donde

$\theta$  = es el ángulo formado por los ejes coordenados primados con respecto a los ejes cartesianos biprimados.

Para obtener la representación analítica de la parábola en el sistema cartesiano formado por los ejes  $x''$  y  $z''$ , se debe sustituir la relación (2.22) en la relación (2.21), y al hacer esto se obtendrá:

$$4f(x'' \operatorname{sen}(\theta) + z'' \cos(\theta)) = (x'' \cos(\theta) - z'' \operatorname{sen}(\theta))^2 - 4f^2 \quad (2.23)$$

Si se desarrolla y simplifica la relación (2.23) se encontrará que la representación analítica de la parábola es

$$\operatorname{sen}^2(\theta)(z'')^2 - [\operatorname{sen}(2\theta)x'' + 4f \cos(\theta)]z'' + [\cos^2\theta(x'')^2 - 4f \operatorname{sen}(\theta)x'' - 4f^2] = 0 \quad (2.24)$$

La relación (2.24) es una expresión analítica implícita cuadrática con un término lineal con coeficiente distinto a cero, lo cual implica que en el sistema cartesiano formado por los ejes biprimados, la parábola está inclinada.

Pero las funciones en el plano sólo se pueden representar como una función de uno a uno, es decir,  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , entonces el lugar geométrico de la parábola, en el sistema de ejes coordenados biprimados deberá expresarse por dos funciones  $z_1''(x)$  y  $z_2''(x)$ , para lo cual se debe resolver la relación (2.24) y obtener las dos relaciones para representar la parábola. Al resolver la ecuación (2.24) se encuentra que

$$z_1''(x'') = \frac{(\text{sen}2\theta)(x'') + 4f\cos(\theta) + 4f\sqrt{\frac{(\text{sen}\theta)x''}{f} + 1}}{2\text{sen}^2\theta} \quad (2.25)$$

$$z_2''(x'') = \frac{(\text{sen}2\theta)(x'') + 4f\cos(\theta) - 4f\sqrt{\frac{(\text{sen}\theta)x''}{f} + 1}}{2\text{sen}^2\theta} \quad (2.26)$$

Las Ecuaciones (2.25) y (2.26) describen el lugar geométrico de una parábola inclinada, en los ejes  $x''$  y  $z''$ , como se muestra en la figura 2.22.

La relación (2.25) describe la parte superior de la parábola que no intercepta el eje  $x''$ , y en la figura 2.23 se muestra el lugar geométrico del segmento de parábola arriba del punto P, y que crece con valores de  $z''$  y decrece con valores de  $x''$ . La relación (2.26) es la expresión analítica de la parábola que cruza el eje  $x''$  en los puntos B y Q; el lugar geométrico de esta relación se muestra en la figura 2.22 por debajo del punto P. Para este trabajo la relación (2.26) es la adecuada para la descripción geométrica del CPC, por tanto, ésta será considerada la solución  $z'' = z''(x'')$ .

Una vez que ya se cuenta con la ecuación de la parábola expresada en los ejes biprimados, se debe realizar una traslación sobre el eje  $x''$ , hasta el punto medio entre el origen biprimado y el punto  $x_o''$ , como lo indica el paso cuatro.

Como se puede ver en la figura 2.22, el eje  $z$  del CPC intercepta el punto medio entre el origen y el punto  $x_o''$  del eje  $x''$ , en el sistema de coordenadas biprimadas, entonces, para localizar el origen del sistema de coordenadas  $x$  y  $z$ , debemos saber explícitamente cual es la expresión de  $x_o''$ . En la figura 2.22 se puede observar que el punto  $x_o''$  tiene las coordenadas  $(x_o'', z'' = 0)$  en el sistema biprimado, por tanto, para obtener el valor de  $x_o''$  en este sistema, se considerará  $z'' = 0$  en la relación (2.24), y al hacer esto se obtendrá

$$\cos^2(\theta)(x'')^2 - 4f\text{sen}(\theta)x'' - 4f^2 = 0 \quad (2.27)$$

Se puede observar que la relación (2.27) es cuadrática, entonces, al resolver ésta se obtienen dos valores que pertenecen a la curva de la parábola y que cruzan el eje  $x''$ , estos puntos son denominados B y Q en la figura 2.22. Al resolver la relación (2.27) se obtiene

$$x_0'' = \frac{2f(\text{sen}\theta + 1)}{\cos^2(\theta)} = \frac{2f(1 + \text{sen}\theta)}{(1 - \text{sen}\theta)(1 + \text{sen}\theta)} = \frac{2f}{1 - \text{sen}\theta} \quad (2.28)$$

$$x_1'' = \frac{2f(\text{sen}\theta - 1)}{\cos^2\theta} = \frac{-2f(1 - \text{sen}\theta)}{(1 - \text{sen}\theta)(1 + \text{sen}\theta)} = \frac{-2f}{1 + \text{sen}\theta} \quad (2.29)$$

La relación (2.28) corresponde a  $x_0''$ , también ha sido llamado Q, y éste tiene un valor positivo, el otro punto  $x_1''$  corresponde al punto B de la figura 2.22, y este punto no es de utilidad para nuestro caso. Puede observarse en la figura 2.22, que el sistema de coordenadas formado por los ejes  $x$  y  $z$ , es una traslación de este sistema, sobre el eje  $x''$  del sistema de coordenadas biprimados por una distancia  $a'$ , por tanto, debemos saber el valor de  $a'$ , el cual se puede conocer, si se observa en la figura 2.18 que  $2a' = x_0''$ , de lo cual se infiere que

$$a' = \frac{x_0''}{2} = \frac{f}{1 - \text{sen}(\theta)} \quad (2.30)$$

Si se asigna el valor negativo de  $\theta$  en la relación (2.30), como corresponde a la rotación del sistema de referencia  $(x', y')$ , por lo tanto,  $\theta = -\theta_{\max}$ , con lo cual la relación (2.30) es la misma, al reacomodar términos, a la relación (2.11) que se obtuvo en coordenadas polares y, por lo tanto, también es igual a la relación obtenida por Winston para este parámetro.

Una vez que se determinó el valor de  $a'$ , se proseguirá con el paso cinco al hacer la traslación de ejes cartesianos biprimados hasta el sistema de coordenadas final con ejes  $x$  y  $z$ , y como entre los dos sistemas de coordenadas se tiene una traslación sobre el eje  $x''$ , entonces las relaciones de transformación de coordenadas son

$$x'' = x + a', \quad z'' = z, \quad (2.31)$$

Y si se hace uso de las relaciones de transformación (2.31), sustituyendo éstas en la relación (2.26) se obtendrá:

$$z(x) = \frac{(\text{sen}2\theta)(x + a') + 4f\cos(\theta) - 4f\sqrt{\frac{(\text{sen}\theta)(x + a')}{f} + 1}}{2\text{sen}^2\theta} \quad (2.32)$$

La relación (2.32) describe la parábola en los ejes  $x$  y  $z$ , esta relación será útil para desarrollar el CPC cilíndrico.

#### 2.4.7.2 Expresión analítica para un CPC cilíndrico

Se puede observar en el inciso d) de la figura 2.23, que en el CPC cilíndrico, el segmento PQ de la parábola tiene una curva simétrica con respecto al eje del CPC, y el eje del CPC está sobre el eje  $z$ , también se puede observar en las mismas figuras que el intervalo del lugar geométrico es

$$\begin{aligned} -x_{\max} = -a \leq x \leq -a' & \quad , & \quad a' \leq x \leq x_{\max} = a & \quad , \\ 0 \leq z \leq z_{\max} = L & \quad , & & \quad (2.33) \end{aligned}$$

Y si se observa en el inciso d) de la figura 2.23 sólo el lugar geométrico del primer cuadrante de la parábola, es aprovechado en la generación del CPC, por tanto, a la relación (2.32) se le asignará sólo el intervalo de las relaciones (2.33). Para completar la curva del CPC del segundo cuadrante mostrada en la figura 2.22 y en el inciso d) de la figura 2.23, se formará una función compuesta de la relación (2.32) con la función valor absoluto  $|x|$ . Acto seguido se desarrollará el paso seis, mencionado en la subsección 2.4.7.1, al hacer la sustitución de  $|x|$  en lugar de  $x$  en la relación (2.32) para obtener así la relación del CPC cilíndrico como

$$z(x) = \frac{(\text{sen}2\theta)(|x| + a') + 4f\cos(\theta) - 4f\sqrt{\frac{(\text{sen}\theta)(|x| + a')}{f} + 1}}{2\text{sen}^2\theta} \quad (2.34)$$

Donde

$x$  = es la variable independiente

$\theta, f$  = son parámetros geométricos que determinan un CPC particular.

El lugar geométrico del CPC cilíndrico se muestra en el inciso e) de la figura 2.23.

Una vez que se conoce una función  $z = z(x, \theta, f)$  para representar al CPC cilíndrico, se considera conveniente expresar la relación (2.34) como función de dos parámetros geométricos del CPC, para esto, se debe conocer las relaciones para evaluar  $L, a$  y  $a'$ , que ya han sido desarrollados en coordenadas polares, pero para mayor detalle, también se obtendrán en coordenadas cartesianas.

Para obtener los valores de los parámetros geométricos  $L$  y  $a$ , se observarán los dos puntos máximos,  $P = P_{m1}(a, z_{max} = L)$  y  $P_{m2}(-a, z_{max} = L)$  que se muestran en el inciso e) de la figura 2.23, con la aclaración que el punto  $P_{m1}$  es el mismo punto  $P$  de la figura 2.22. De la construcción del CPC se sabe que en los puntos  $P_{m1}$  y  $P_{m2}$  la tangente es paralela al eje  $z$  del CPC, por tanto, en estos dos puntos se tiene la condición

$$\frac{dz}{dx}|_{x=\pm a} = \infty \quad (2.35)$$

O de manera equivalente se puede decir que

$$\frac{1}{\frac{dz}{dx}|_{x=\pm a}} = 0 \quad (2.36)$$

La relación (2.36) es válida sólo en los puntos  $P_{m1}$  y  $P_{m2}$ , por tanto, si encontramos  $1/(dz/dx)=0$ , se localizarán los valores de  $|x_{max}| = \pm a$ . De la relación (2.34) se evalúa  $dz/dx$ , luego, se encontrará el recíproco de la derivada evaluada y se iguala a cero, lo que analíticamente se expresa como

$$\frac{1}{\frac{dz}{dx}} = \frac{\sqrt{\frac{\sin(\theta)}{f}(|x| + a') + 1}}{\operatorname{sgn}(x) \left[ \cot(\theta) \sqrt{\frac{\sin(\theta)}{f}(|x| + a') + 1} - \csc(\theta) \right]} = 0, \quad (2.37)$$

Donde  $\operatorname{sgn}(x)$  es la función signo la cual no está definida en  $x=0$ , pero este punto no está incluido en el dominio del CPC. Si se desarrolla la relación (2.37) se puede llegar a

$$\sqrt{\frac{\sin(\theta)}{f}(|x| + a') + 1} = 0, \quad (2.38)$$

Como los valores de  $x$  que se obtendrán de la relación (2.38), son los valores extremos, se puede considerar que  $|x| = |x_{max}|$ , por tanto, al desarrollar la relación (2.38) se encuentra que

$$|x_{\max}| = -a' - \frac{f}{\text{sen}(\theta)} = -\frac{f}{(1 - \text{sen}(\theta))} - \frac{f}{\text{sen}(\theta)} = \frac{-a'}{\text{sen}(\theta)}, \quad (2.39)$$

Con lo cual, los valores extremos en el eje  $x$ , corresponden a las relaciones

$$x_{1,\max} = a = -\frac{a'}{\text{sen}(\theta)} \quad (2.40)$$

$$x_{2,\max} = -a = \frac{a'}{\text{sen}(\theta)} \quad (2.41)$$

Que nos muestran los valores extremos positivo y negativo en la coordenada  $x$  del CPC cilíndrico, y debido a que en coordenadas polares el valor negativo no tiene sentido, sólo el valor positivo ha sido reportado.

Si se observa en las relaciones (2.39) y (2.41) la expresión del parámetro  $a$ , y se compara esta expresión con la definición de concentración del CPC cilíndrico, mostrada en la relación (2.7), se observa que es la misma, lo que muestra que también se encontró en coordenadas cartesianas la relación para evaluar la concentración máxima del CPC cilíndrico.

Para obtener el valor del parámetro  $L$ , se debe observar que en los dos puntos máximos  $P_{m1}$  y  $P_{m2}$ , como se expresa en el álgebra de la relación (2.39), se cumple la igualdad

$$|x_{\max}| + a' = \frac{-f}{\text{sen}(\theta)} \quad (2.42)$$

Por otro lado si se simplifica la relación (2.34) se puede obtener:

$$z(x) = \frac{(\cos \theta)(|x| + a')}{\text{sen}(\theta)} + \frac{2f \cos(\theta)}{\text{sen}^2(\theta)} - \frac{2f}{\text{sen}^2(\theta)} \sqrt{\frac{\text{sen}(\theta)}{f} (|x| + a') + 1} \quad (2.43)$$

Para encontrar el valor que tiene  $z(x)$  en el punto  $x=x_{\max}$ , en la relación (2.43) se debe sustituir el valor  $x=x_{\max}$ , y al hacerlo se obtiene

$$z(x_{\max}) = L = \frac{(\cos \theta)(|x_{\max}| + a')}{\text{sen}(\theta)} + \frac{2f \cos(\theta)}{\text{sen}^2(\theta)} - \frac{2f}{\text{sen}^2(\theta)} \sqrt{\frac{\text{sen}(\theta)}{f} (|x_{\max}| + a') + 1} \quad (2.44)$$

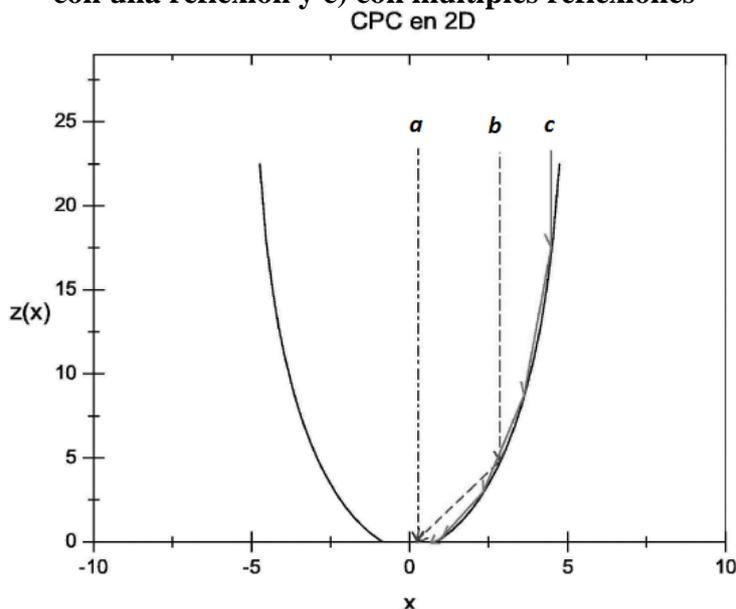
Con el fin de simplificar la relación (2.44), y sabiendo que en los extremos se cumple la relación (2.42), al hacer uso de esta última ecuación dentro de la relación (2.44) se obtiene:

$$z_{\max} = L = \frac{(\cos \theta) \left( \frac{-f}{\text{sen}(\theta)} \right)}{\text{sen}(\theta)} + \frac{2f \cos(\theta)}{\text{sen}^2(\theta)} - \frac{2f}{\text{sen}^2(\theta)} \sqrt{\frac{\text{sen}(\theta)}{f} \left( \frac{-f}{\text{sen}(\theta)} \right) + 1}$$

$$z_{\max} = \frac{f(\cos \theta)}{(\text{sen}^2 \theta)} = \frac{a'(1 - \text{sen}(\theta)) \cot(\theta)}{\text{sen}(\theta)} = (a + a') \cot(\theta_{\max}) \quad (2.45)$$

Una vez más el valor de  $L$  que se ha obtenido, es el valor ya reportado en la literatura, el cual también fue obtenido en nuestro desarrollo en coordenadas polares, como se puede observar en la relación (2.16).

**Figura 2.24. Gráfica del CPC cilíndrico con los parámetros  $\theta = -10^\circ$  y  $f = 1$ . Se muestran tres formas en que los rayos del sol inciden en el área de concentración a) directos, b) con una reflexión y c) con múltiples reflexiones**



Fuente: Bibliografía [1]. Página 11.

En coordenadas cartesianas ya se obtuvo una expresión analítica para describir el CPC cilíndrico, ésta se expresa como  $z = z(x, f, \theta)$ , donde los parámetros  $f$  y  $\theta$  determinan el dispositivo en particular, pero en aplicaciones solares no es común utilizar  $f$  como parámetro de diseño en la determinación del CPC, y con mayor frecuencia se consideran primero los parámetros  $a$ ,  $a'$  y  $L$ , y después se realiza el diseño del CPC en particular. Por lo tanto, una expresión del CPC donde estos últimos parámetros estén involucrados facilitará la aplicación en el diseño de cualquier dispositivo CPC.

### 2.4.7.3 Relación del CPC cilíndrico considerando los parámetros geométricos

Para encontrar una relación del CPC en coordenadas cartesianas que involucren a los parámetros  $a$ ,  $a'$  y  $L$ , se debe primero observar que dentro del desarrollo de las relaciones (2.39) y (2.45) se encuentran las siguientes igualdades

$$\frac{-1}{\text{sen}(\theta)} = \frac{a}{a'} \quad (2.46)$$

$$\frac{-f}{\text{sen}(\theta)} = (a + a') \quad (2.47)$$

$$\frac{f \cos(\theta)}{\text{sen}^2 \theta} = L \quad (2.48)$$

$$\cot(\theta) = \frac{-L}{a + a'} \quad (2.49)$$

y si se sustituye las relaciones (2.46), (2.47), (2.48) y (2.49) en la relación (2.43) se obtiene

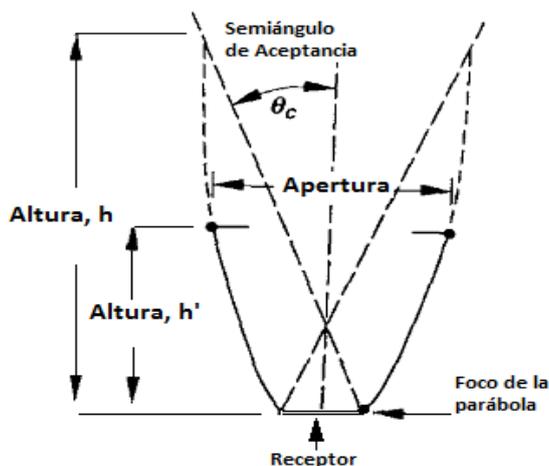
$$z = 2L - \left[ \left( \frac{L}{a + a'} \right) (|x| + a') \right] - 2 \frac{a(a + a')}{a'} \sqrt{1 - \left[ \frac{|x| + a'}{a + a'} \right]} \quad (2.50)$$

Se puede observar que la relación (2.50) también es una expresión que describe el CPC cilíndrico en coordenadas cartesianas, y ésta sólo contiene la variable independiente  $x$  y los parámetros del CPC:  $a$ ,  $a'$  y  $L$ . Aunque es conveniente aclarar que de los parámetros geométricos  $a$ ,  $a'$  y  $L$ , más  $\theta$  y  $f$ , sólo dos son independientes y cualquiera de los tres restantes se obtienen por medio de las relaciones (2.30), (2.46), (2.47), (2.48) y (2.49), o al resolver estas ecuaciones en forma simultánea. Así el desarrollo del CPC cilíndrico se ha completado.

### 2.4.8 Truncamiento de la parábola<sup>38</sup>

En los extremos superiores de las parábolas en un CPC, las superficies son paralelas al plano central de simetría del concentrador. Los extremos superiores de los reflectores por lo tanto contribuyen poco a la radiación que llega al absorbedor, y el CPC se puede truncar para reducir su altura desde una altura original  $h$  a una altura media de  $h'$  con un consiguiente ahorro en el área del reflector y poco sacrificio de la eficiencia del colector.

**Figura 2.25. CPC truncado con un ratio de altura-apertura aproximadamente la mitad de la totalidad del CPC**



Fuente: Bibliografía [5]. Página 342.

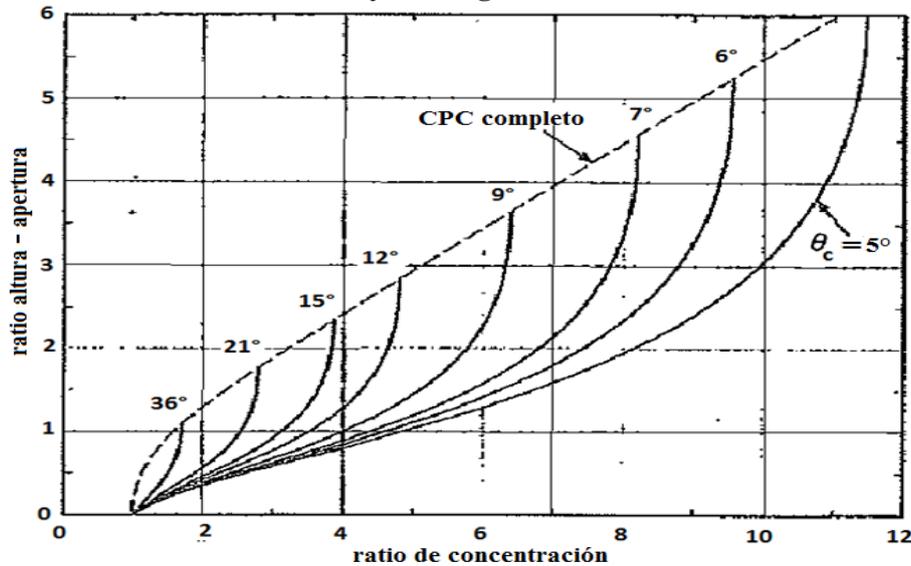
El truncamiento del CPC no afecta el ángulo de aceptación<sup>39</sup>, sin embargo cambia la relación entre la altura y la apertura, el coeficiente de concentración, y el número medio de reflexiones que sufre la radiación antes de llegar a la superficie absorbente. Los valores de los efectos del truncamiento del CPC y de un CPC ideal son mostrados en las siguientes figuras. En la figura

<sup>38</sup> Esta subsección se fundamenta en la información abstraída de la fuente bibliográfica [5]

<sup>39</sup> Dato basado en la información de la fuente bibliográfica [10]. Página 77.

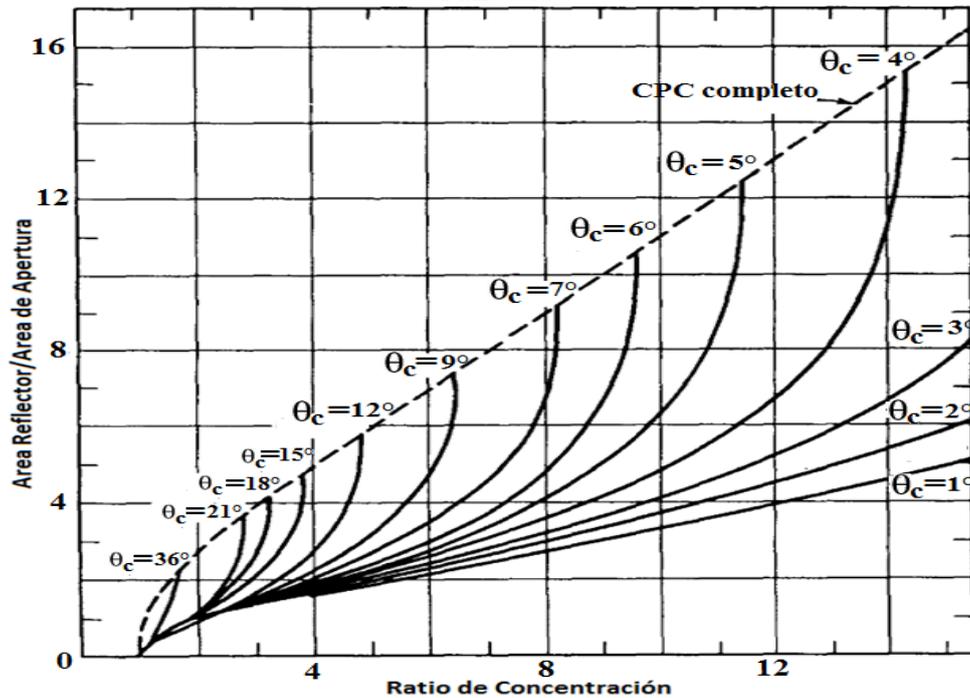
2.26 se muestra el ratio de altura-apertura, en la figura 2.27 se muestra el ratio del área del reflector con el área de apertura, y en la figura 2.28 se muestra el número promedio de reflexiones producidas por los rayos solares que ingresan por la apertura del colector antes de ser captados por el absorbedor. Si el truncamiento es tal que el número promedio de reflexiones está por debajo de la curva  $N_{\min}$ , el número promedio de reflexiones será al menos  $(1 - 1/C)$ .

**Figura 2.26. Ratio de Altura-apertura para un CPC completo y truncado en función de  $C$  y del ángulo  $\theta_c$ .**



Fuente: Bibliografía [5]. Página 343.

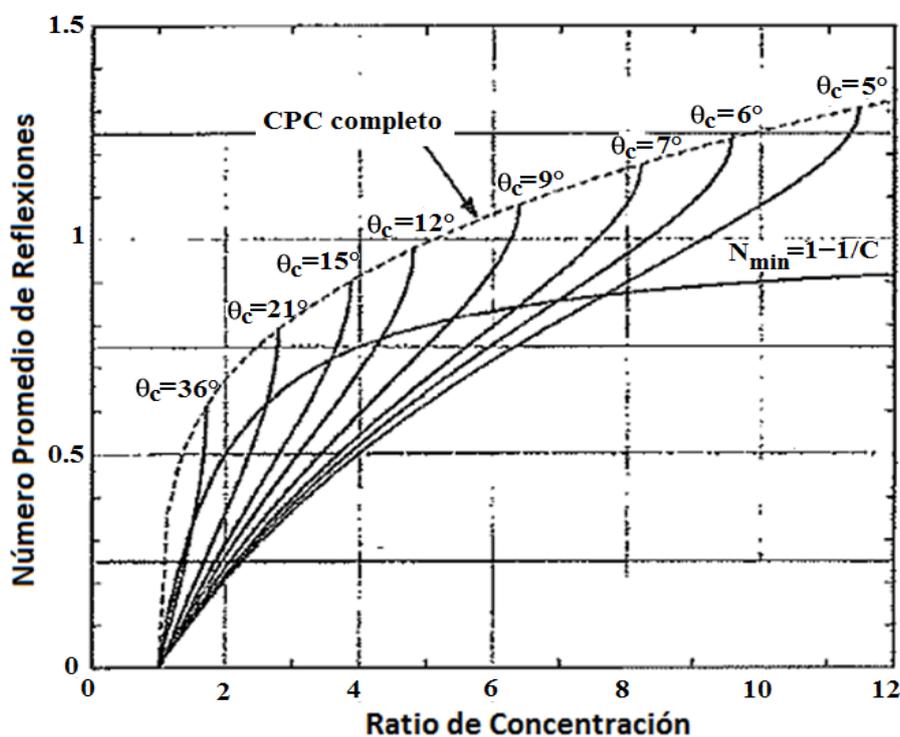
**Figura 2.27. Ratio del área del reflector con el área de apertura para un CPC completo y truncado**



Fuente: Bibliografía [5]. Página 343.

El uso de estos argumentos podrá ser ilustrados de la siguiente manera. Se quiere diseñar un CPC completo ideal con un semiángulo de aceptación  $\theta_c$  de  $12^\circ$ . De la figura 2.26 el ratio de altura-apertura es 2.8 y el coeficiente de concentración es 4.8. De la figura 2.27, el área del reflector requerida es 5.6 veces el área de la apertura. De la figura 2.28, se obtiene que el número promedio de reflexiones captadas de radiación antes de alcanzar la superficie receptora es 0.97. Si el CPC fuera truncado, de la figura 2.26 observamos que el ratio de altura-apertura sería 1.4, el coeficiente de concentración se reduciría a 4.2. De la figura 2.27, la relación del área del reflector con el área de la apertura sería de 3.0, y de la figura 2.28 el número promedio de reflexiones sería al menos  $1 - 1/4.2 = 0.76$ .

**Figura 2.28. Número promedio de reflexiones de la radiación captada dentro del ángulo de aceptación que alcanza al receptor para un CPC completo y truncado.**



Fuente: Bibliografía [5]. Página 344.

Los colectores CPC's con absorbedores planos tendrían una brecha entre el receptor y el reflector con la finalidad de evitar que el reflector actúe como un tipo de elemento conductor de calor proveniente del receptor. Como consecuencia de la brecha el área del reflector se reduce y la eficiencia del colector disminuye, por lo que debería ser pequeña

En nuestro caso se ha utilizado un CPC con absorbedor tubular, sin cobertura de vidrio. Estos CPC's son usados comúnmente con receptores de tubos evacuados, lo que los haría más caros. Además también pueden ser truncados de la misma manera que otros CPC's, por ser los receptores de forma tubular no condicionan en ningún aspecto el truncamiento del dispositivo.

Así un conjunto de concentradores CPC puede ser diseñados de tal manera que permitan una amplia gama de opciones para las formas del receptor. Los CPC's también pueden ser usados en serie.

## Capítulo 3

# Prototipo CPC

### 3.1 Introducción

En este capítulo se detalla el diseño del colector CPC, que permitirá elevar la temperatura del agua a una temperatura de 50°C, este equipo ha sido diseñado de tal manera que no necesite un sistema de seguimiento solar, es decir, que sea estático, consiguiendo ésto con un diseño geométrico en particular que se explicará más adelante. Con este colector CPC no tendremos la necesidad de calentadores eléctricos, produciendo un ahorro de dinero importante en forma permanente, mejorando así la calidad de vida de las personas y contribuyendo con la conservación del medio ambiente.

Por el particular diseño, que se desprende de los conceptos geométricos tratados en el capítulo anterior (que nos permite obtener los detalles de diseño del colector), no necesita ningún tipo de tecnología compleja y requiere de cuidados mínimos para su óptimo mantenimiento.

Cabe mencionar que el dispositivo solar que vamos a tratar es de construcción sencilla y rápida, lo que hace posible su instalación en cualquier lugar donde sea necesaria agua caliente. Adjuntamos tablas realizadas en el programa Excel que nos han permitido esquematizar el perfil de nuestro colector. Además de detallar el modo de construcción y los materiales necesarios, se adjuntarán tablas y anexos de vital interés para su materialización.

Asimismo es de interés práctico y experimental, aunque no se realice en este trabajo, la construcción de este proyecto, tomándose siempre en cuenta las condiciones de radiación solar en la zona de trabajo del colector, así como la elección de los materiales adecuados para su construcción, llevando siempre una relación costo-beneficio adecuada de acuerdo con la aplicación del colector.

### 3.2 Parámetros iniciales para el dimensionamiento<sup>40</sup>

Usando las relaciones estudiadas en el capítulo 2, se podrá calcular las dimensiones del colector y de un eventual prototipo en escala. En este tipo de diseños no se tienen limitaciones

---

<sup>40</sup> En la subsección 3.2 se utilizó de guía principal la información expuesta en la bibliografía [2]

físicas, el único criterio que se aplicará será el hecho de no diseñar algo de dimensiones excesivas.

Se tratará de realizar el procedimiento del dimensionamiento del colector de la manera más didáctica posible con la finalidad de que sirva como una guía básica para futuros trabajos, tomando en cuenta que el diseño del colector dependerá de la aplicación en particular.

En primera instancia se supondrá las dimensiones de la zona de entrada y zona de salida del concentrador, se indica con “ $a$ ” la semiapertura de entrada (zona de entrada de los rayos solares) y con “ $a'$ ” la semiapertura de salida (zona de concentración de rayos solares).

**Tabla 3.1. Alternativas para el dimensionamiento del colector CPC**

$a'$ [m]	$a$ [m]	Sen. $\theta_c$ [rad]	$\theta_c$ [Grados]	Foco [m]	$L$ [m]	$L/2$ [m]	$C_{geoL}$	Profundidad : 1 [m]	Area de salida [m <sup>2</sup> ]	Relación de 2: 1 en $A_{sal}$ [m <sup>2</sup> ].
0.22	0.54	0.41	24	0.31	1.71	0.85	2.46	3.6	1.58	
0.11	0.27	0.41	24	0.15	0.85	0.43	2.46	1.8	0.40	4
0.26	0.64	0.41	24	0.37	2.02	1.01	2.46	4	2.08	
0.13	0.32	0.41	24	0.18	1.01	0.50	2.46	2	0.52	4
0.3	0.74	0.41	24	0.42	2.33	1.17	2.46	3.6	2.16	
0.15	0.37	0.41	24	0.21	1.17	0.58	2.46	1.8	0.54	4

Cómo se puede observar en la tabla 3.1, tenemos 3 pares de configuraciones, cada configuración con su respectivo modelo numérico a escala 2:1.

Una vez fijados los valores de la semiapertura de entrada,  $a$ , la semiapertura de salida  $a'$  y el semiángulo de aceptación  $\theta_c$ , se podrá calcular las dimensiones características de las dos parábolas que formarán el colector. También se ha calculado la altura  $L$  del colector, que como se ve en la tabla 3.1 y de las ecuaciones del capítulo anterior, se puede deducir con los valores de  $a$ ,  $a'$  y  $\theta_c$ .

La configuración a usar será el par intermedio ya que nos sugiere en su modelo a escala de 2:1 un prototipo realizable sin excederse en sus dimensiones.

Se analizará la opción elegida de la tabla 3.1 con sus valores calculados

- Se eligieron dichos valores de  $a$  y  $a'$  ya que representan en el modelo a escala 2:1, dimensiones aceptables para su construcción.
- El semiángulo de aceptación  $\theta_c$  fue elegido con la condición de cubrir la declinación del sol desde el solsticio de verano hasta el solsticio de invierno ( $47^\circ$ ) y lo suficientemente grande como para no necesitar un sistema de seguimiento del sol. Si bien el semiángulo de aceptación escogido en la tabla 3.1, es de  $24^\circ$ , ligeramente mayor al ángulo aconsejado de  $23.5^\circ$ <sup>41</sup>, se verá en un archivo Excel adjunto que al truncar la parábola dicho ángulo aumenta a un valor de  $39.71^\circ$ , con lo que se puede pensar que el ángulo de aceptación varió a  $2 \times \theta_c' = 2 \times 39.71^\circ = 79.42^\circ$ , no siendo éste el concepto correcto, ni significando

<sup>41</sup> Para colectores CPC estacionarios, el mínimo ángulo de aceptación es igual a  $47^\circ$ . Este ángulo cubre la declinación del sol desde el solsticio de verano al solsticio de invierno ( $2 \times 23.5^\circ$ ). Fuente: Bibliografía [4]. Página 191.

tampoco que el rango del ángulo de los rayos solares que inciden en el concentrador haya aumentado. La ventaja que ofrece este aumento en el semiángulo de aceptación es en cuanto a la captación de la radiación difusa. Los conceptos en cuanto a las ventajas que ofrece el proceso de truncamiento de las hojas de un colector CPC se vieron en la subsección 2.4.2, específicamente en los detalles mostrados por la figura 2.12.

- Si bien la altura del colector en escala 2:1 es 1.01 m. al proseguir con el procedimiento de truncamiento de parábola, se podrá ver que esta altura se reduce (como se ha fundamentado anteriormente la altura del colector puede recortarse a  $L/2$  sin sufrir cambios significativos en la eficiencia del sistema) y representa una altura aceptable.
- La relación de concentración es la misma para los tres casos pero en la alternativa elegida se puede ver que el área de salida es casi igual al área de salida de las otras dos con la diferencia que en la configuración optada existe un ahorro de material en la altura del colector, haciendo de este parámetro el más viable.
- Al rediseñar los parámetros iniciales para el dimensionamiento en la escala de 2:1, la relación del área de salida del colector para los tres casos será de 4, si bien la altura se trunca a la mitad, por la escala 2:1, el área de salida se reducirá a 1/4 al redimensionar los parámetros geométricos, lo que conllevará a la reducción en la captación de radiación en la misma proporción.

Se debe señalar que los valores de  $a$ ,  $a'$  y  $\theta$ , propuestos en la tabla 3.1, fueron obtenidos después de haberse realizado varias iteraciones junto con el dimensionamiento de los receptores con la condición de obtener la mejor eficiencia.

Lo principal a tener en cuenta al momento de realizar el dimensionamiento de un colector CPC con truncamiento es la influencia de este último procedimiento en los parámetros geométricos del colector, como es lógico el truncamiento de la parábola, modificará a los parámetros  $a$ ,  $\theta$ ,  $C$  y  $L$ . En el caso de la semiapertura de entrada " $a$ " al ser truncada la parábola, ésta disminuirá con respecto a la semiapertura de entrada inicial. Por otro lado, el semiángulo de aceptación  $\theta_c$  aumentará al ser truncada la parábola, con respecto al semiángulo de aceptación inicial. Como era de esperarse por definición, la concentración y altura se verán reducidas.

### 3.3 Comparación de rendimientos teóricos

Un colector solar se comporta como cualquier máquina térmica al retornar de forma útil sólo una parte de la energía que recibe.

La temperatura del aire, la temperatura del fluido que recorre al receptor interiormente y la radiación proveniente del sol en un momento determinado, son los tres factores externos que determinan el rendimiento teórico de una superficie receptora.

Se someterá a comparación una superficie receptora plana y una superficie receptora de tubo en vacío, con la finalidad de obtener una idea general de ambos rendimientos propios de la particularidad del receptor.

Para dicho cálculo se utilizará la siguiente definición:

$$\eta = \eta_o - a_1 \Delta t^* - a_2 \Delta t^{*2} G_k \quad (3.1)$$

donde: 
$$\Delta t^* = \frac{T_{fm} - T_a}{G_k} \quad (3.2)$$

- $\eta_o$  = eficiencia óptica de la superficie receptora, es decir, la máxima energía captada por placa;  
 $a_1$  = coeficiente lineal de pérdida global ( $W/m^2 K$ );  
 $a_2$  = coeficiente cuadrático de pérdida global ( $W/m^2 K^2$ );  
 $G_k$  = radiación solar ( $W/m^2$ ) = 1163.3  $W/m^2$ ;  
 $T_{fm}$  = temperatura media del fluido en el colector = 310.5 K;  
 $T_a$  = temperatura del aire = 298 K.

Los datos numéricos dados para la radiación solar, la temperatura media del fluido en el colector y la temperatura del aire, son datos reales con los que se trabajará para el análisis térmico del colector que se realizará mas adelante.

En la tabla 3.2 se muestran los valores para la eficiencia óptica, el coeficiente de pérdida lineal y el coeficiente de pérdida cuadrático suministrados por una empresa constructora para una superficie receptora plana y para un receptor de tubos en vacío.

**Tabla 3.2. Comparación de las características de superficies receptoras.**<sup>42</sup>

	Superficie receptora plana	Receptor de tubos al vacío
Eficiencia óptica	0.81	0.806
Coeficiente de pérdida lineal ( $W/m^2K$ )	3.48	1.133
Coeficiente de pérdida cuadrático ( $W/m^2K$ )	0.0164	0.0638
Rendimiento Teórico	0.7704	0.7852

Como se ve en la tabla 3.2, el rendimiento teórico de los tubos en vacío es mayor que el rendimiento de receptor de placa plana y por lo tanto esta clase de receptor es preferible.

Con este indicador general se concluye que los receptores de tubo en vacío son los más adecuados para cualquier tipo de aplicación, ya que se disminuyen las pérdidas en el receptor. No obstante a ésto, dicha configuración es de alto costo aún para nuestro medio, por lo que el presente trabajo será realizado con tan sólo una tubería, es decir sin cubierta de vidrio.

### 3.4 Dimensionamiento<sup>43</sup>

El implemento de un receptor con tubería en vacío haría del colector un elemento con mejor eficiencia. Debido a la inaccesibilidad de esta tecnología en el mercado nacional, por ser

<sup>42</sup> Los valores para la eficiencia óptica, el coeficiente de pérdida lineal y el coeficiente de pérdida cuadrático se obtuvieron de la fuente bibliográfica [2]. Página 62.

<sup>43</sup> Para el Dimensionamiento se utilizó la información de la fuente bibliográfica [2].

costosa, se utilizará una opción de mayor simplicidad, la implementación de un receptor sin cubierta de vidrio por donde circulará el fluido, para este caso, agua.

Una ventaja de trabajar con tuberías como elemento receptor es la libertad que nos provee para la configuración de las dimensiones de la superficie colectora, ya que es fácilmente adaptable.

Las tuberías seleccionadas como receptores serán tuberías de cobre de 2 pulgadas de diámetro nominal. Estas tuberías de cobre serán del tipo L y tendrán una longitud de 2 metros. La medida del diámetro nominal de las tuberías de cobre impone una anchura del colector múltiple de 2 pulgadas, añadiéndole una longitud adicional para el espacio ocupado por los respectivos sujetadores de las tuberías, asimismo la longitud del dispositivo será de 2 metros.

En el Anexo B se muestran las distintas clases de tuberías de cobre existentes en el mercado.

Este trabajo se ha enfocado a realizar el diseño teórico de un colector cilindro parabólico compuesto. Si se quisiera realizar un prototipo experimental, se deberá pensar en un modelo a escala, que manteniendo las proporciones de las dimensiones se obtenga una idea de la eficiencia del CPC.

**Tabla 3.3. Parámetros de dimensionamiento del colector con escala de 2:1.**

a' [m]	a [m]	Sen. $\theta_c$ [rad]	$\theta_c$ [Grados]	Foco [m]	L [m]	L/2 [m]	$C_{geoL}$	Profundidad : 1 [m]	Area de salida [m <sup>2</sup> ]	Relación de 2: 1 en $A_{sal}$ [m <sup>2</sup> ].
0.26	0.64	0.41	24	0.37	2.02	1.01	2.46	4	2.08	4
0.13	0.32	0.41	24	0.18	1.01	0.50	2.46	2	0.52	

Se podría realizar un prototipo con escala de 2 a 1, respecto a las dimensiones lineales, pero esta reducción de parámetros implicaría la reducción a un cuarto de energía capturada. Esto se puede verificar de la tabla 3.3 que muestra un área de salida o área receptora que se reduce en ésta proporción. Al reducir el área receptora o de salida, se reduce proporcionalmente la energía capturada.

Para obtener información de la radiación solar acumulada diaria en el departamento de Piura, se utilizaron los datos medidos por La Estación Meteorológica del Radar UDEP.

**Tabla 3.4. Potencia capturada en el departamento de Piura**

Mes	Prom. por mes (kWh/m <sup>2</sup> )	Horas solares pico (hsp)	Potencia media del día (W/m <sup>2</sup> )	Potencia capturada (W/m <sup>2</sup> )
<b>Enero</b>	4.99	5.00	999.70	2459.26
<b>Febrero</b>	5.19	5.00	1039.39	2556.89
<b>Marzo</b>	5.47	5.00	1094.66	2692.86
<b>Abril</b>	5.48	5.00	1096.38	2697.09
<b>Mayo</b>	4.80	5.00	960.31	2362.36
<b>Junio</b>	4.28	5.00	856.68	2107.43
<b>Julio</b>	4.37	5.00	874.27	2150.70
<b>Agosto</b>	4.73	5.00	946.14	2327.50
<b>Septiembre</b>	5.35	5.00	1070.86	2634.31
<b>Octubre</b>	5.59	5.00	1118.85	2752.37
<b>Noviembre</b>	5.54	5.00	1108.31	2726.44
<b>Diciembre</b>	5.43	5.00	1087.77	2675.91

La información que se muestra en la tabla 3.4 es la siguiente:

- Promedio por mes de radiación solar acumulada (kWh/m<sup>2</sup>): datos promedios mensuales obtenidos de la data diaria medida por el radar UDEP entre los años 1992 y 2000.
- Horas solares pico (HSP): horas de radiación solar constante. Este tiempo es el mismo tiempo en que el sistema estará en funcionamiento.
- Potencia media del día (W/m<sup>2</sup>): resultado obtenido de dividir el promedio de radiación solar mensual entre las horas solares pico.
- Potencia capturada (W/m<sup>2</sup>): es la potencia capturada por el fluido calotransportador en situaciones ideales con una relación de concentración de 2.46, propia del dimensionamiento de nuestro colector, aún sin truncamiento.

Aparentemente la potencia capturada por m<sup>2</sup> es alta, sin embargo es tan sólo un cálculo general teórico dónde no se ha tomado en cuenta las características ópticas de los materiales a utilizarse en la construcción del colector ni tampoco las características geométricas de nuestro diseño que condicionarán el rendimiento de nuestro dispositivo. Tan sólo es un alcance de la energía que se podría capturar en nuestro absorbedor con su relación de concentración.

En cuanto a los datos de temperaturas medias mensuales del ambiente, se han hecho referencia a datos estadísticos de las 24 horas del día del año 2007 y del año 2008, medición realizada por la estación meteorológica UDEP y que se muestra en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5. Temperatura ambiental promedio mensual de la ciudad de Piura.**

<b>Mes</b>	<b>Temperatura ambiental promedio mensual (24 horas ) (°C)</b>	<b>Temperatura ambiental promedio durante las horas de radiación solar (°C)</b>
<b>Enero</b>	25.66	27.34
<b>Febrero</b>	26.83	28.42
<b>Marzo</b>	27.81	29.42
<b>Abril</b>	25.58	27.45
<b>Mayo</b>	22.84	24.17
<b>Junio</b>	21.83	22.81
<b>Julio</b>	21.68	22.70
<b>Agosto</b>	21.47	22.58
<b>Septiembre</b>	21.61	23.50
<b>Octubre</b>	21.18	23.31
<b>Noviembre</b>	21.99	24.40
<b>Diciembre</b>	22.46	24.62

Fuente: Estación Meteorológica UDEP

Para las columnas de la tabla 3.5 se tiene la siguiente explicación

- Temperatura ambiental promedio mensual (°C): dato promedio mensual obtenido de la información otorgada por el radar UDEP de la temperatura ambiental medida por horas durante las 24 horas del día. Para mayor detalle buscar en el archivo Excel adjunto, en la pestaña Temperatura Horaria.
- Temperatura ambiental promedio durante las horas de radiación solar (°C): promedio de la temperatura ambiental mensual medida sólo en las horas de radiación solar durante el día.

En este trabajo se ha planteado el dimensionamiento de un colector cilindro parabólico compuesto con su respectivo análisis térmico de manera teórica.

Con el diseño elegido para el CPC, de ser el caso se podrá pasar a la construcción de un prototipo con la finalidad de realizar algunos ensayos experimentales y comparativos.

Se explicará a grandes rasgos y de manera teórica la construcción de un prototipo en caso se desarrolle un trabajo experimental sobre el terreno.

### 3.4.1 Estructura<sup>44</sup>

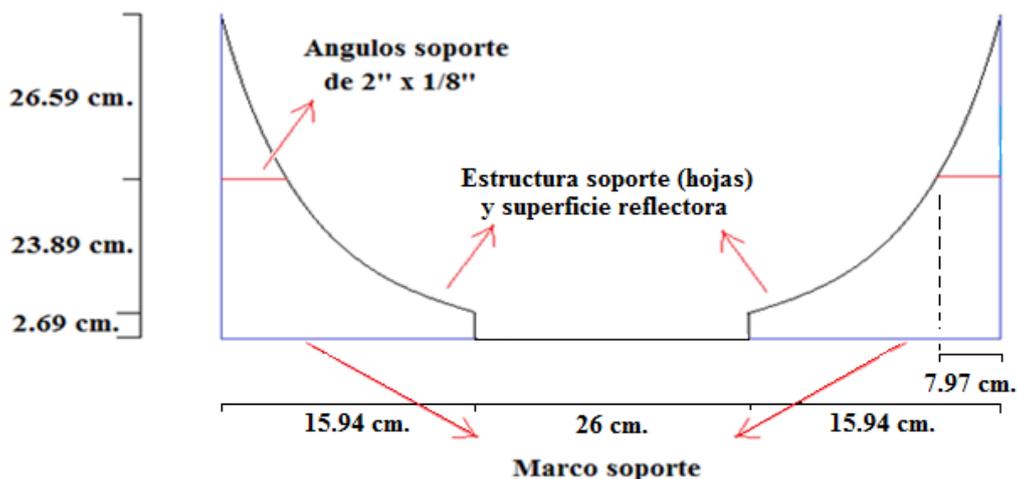
La estructura del colector que soportará la superficie reflectora podrá realizarse de una plancha de hierro liso de 1/8" de espesor. Se ha escogido la plancha de hierro de 1/8 por la facilidad con la que se puede trabajar sobre ella y su bajo costo en comparación a otros materiales de nuestro medio. Incluso en términos de peso, el peso de este material por m<sup>2</sup> es de 24.86 kg, que representa una ventaja respecto al peso de otros materiales. En caso se requiera una producción a gran escala el material al que se deberá hacer referencia será aluminio, que combina sus propiedades de estabilidad estructural con un bajo peso. En el Anexo C se muestran distintos espesores para las planchas de hierro con sus características.

La forma de superficies parabólicas que se deben dar a las planchas de hierro para la estructura soporte de la superficie reflectora se realizará mediante el proceso de cilindrado.

La construcción de la estructura es un paso muy delicado, debido a que será responsable de mantener la superficie reflectora fija y estable, por otra parte será responsable también de mantener fijas las tuberías de cobre con un perfecto ángulo de inclinación con respecto al sol.

Dicha estructura metálica por ser de poco espesor tendrá una tendencia a deformarse por la carga aplicada de la superficie reflectora. Es por esto que sería necesario fijar cada hoja<sup>45</sup> en un intervalo de 40 cm a lo largo de su longitud y de igual forma en intervalos de 26.59<sup>46</sup> cm para su altura, ya que de esta manera aseguraríamos la firmeza de las hojas y por ende de su superficie reflectora, que como sabe, la eficiencia del colector dependerá de la perfección de la curvatura, ya que en ésta incidirán los rayos solares que serán concentrados en el foco. El material seleccionado para la sujeción de la plancha serán tramos de ángulo de hierro de 2" x 1/8".

**Figura 3.1. Estructura del CPC truncado. Vista de perfil**<sup>47</sup>



Fuente: Elaboración Propia

<sup>44</sup> El sustento para el tipo de soportes propuestos en este trabajo, que irán soldados al marco soporte y que darán firmeza a la estructura, se basa en primera instancia en el menor costo alcanzado al realizarlos de esta manera y al asesoramiento otorgado por el Taller de Mecánica de la Universidad Privada de Piura.

<sup>45</sup> Hoja: plancha de hierro en forma de parábola que soportará a la superficie reflectora.

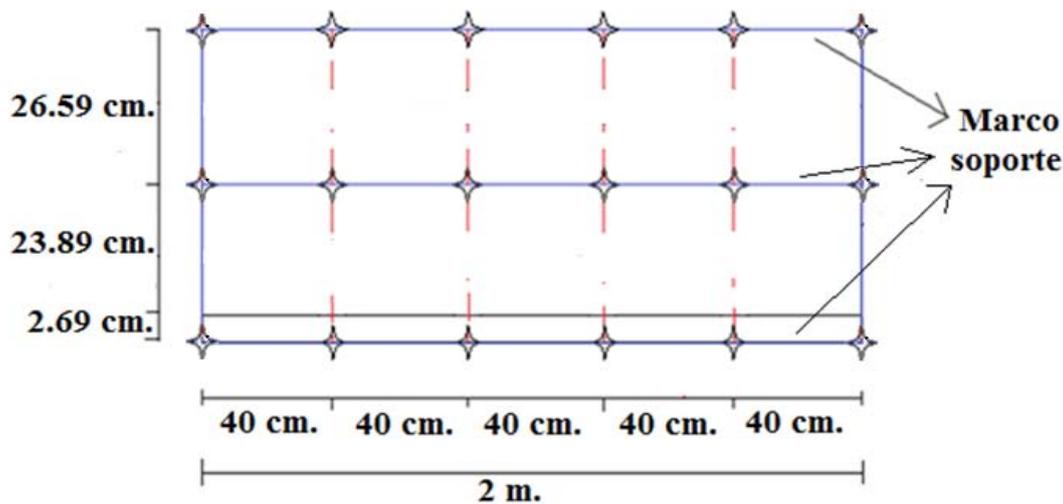
<sup>46</sup> La información para las medidas empleadas en la estructura se ha obtenido de manera similar de un modelo propuesto en la fuente bibliográfica [2].

<sup>47</sup> El modelo para la estructura del colector, así como para los soportes de las hojas, es avalado por el Taller de Mecánica de la Universidad Privada de Piura.

Con la finalidad de fabricar una base donde soportar los ángulos, se necesitará construir un marco soporte. En este marco se soldarán los tramos de ángulo para la estabilidad de las hojas. El tipo de soldadura que se utilizará será Cellocord E6011.

En la figura 3.1 vemos los intervalos de longitud para la altura del colector en los que los ángulos de sujeción de 2'' x 1/8'' representados por las líneas de color rojo deberían acoplarse al marco soporte. El marco soporte también podrá construirse con este mismo ángulo de 2'' x 1/8'' y en la figura 3.1 está representado por la línea de color azul.

**Figura 3.2. Estructura del CPC truncado. Vista lateral**



Fuente: Elaboración Propia

La figura 3.2 es una vista lateral donde las líneas punteadas de color rojo representan los intervalos a lo largo de la longitud de 2 metros del colector.

Los tramos de ángulo de sujeción por ser montados en forma horizontal, se visualizan en forma de estrella: “✦” (que representa los puntos de soldadura de los ángulos soporte con el marco soporte<sup>48</sup>), y están posicionados cada 26.59 cm. de altura. Estos ángulos soporte deberán ir soldados al marco soporte representado por las líneas de color azul y en las posiciones indicadas por “✦”.

Todas las uniones serán soldadas y por ser el sistema de tipo estacionario, el colector se construirá con un determinado ángulo de inclinación, posición con la que permanecerá durante su vida útil. La pintura que se seleccionará deberá ser anticorrosiva y de preferencia de color amarillo.

De igual forma se puede observar en la figura 3.1 y en la figura 3.2, una extensión de 2.69 cm, dicha medida es la altura de la cavidad que también deberá ser tomada en cuenta en la construcción de la estructura, dónde se alojarán las 3 tuberías receptoras, por las cuales pasará el fluido calotransportador.

Un modelo similar al propuesto a excepción del tipo de soporte de las hojas, es el presentado en la figura 3.3. Se puede ver claramente las planchas en forma de parábola y la base donde irán montadas las tuberías receptoras. Sin embargo los soportes planos con agujeros,

<sup>48</sup> Los puntos de soldadura mostrados en la parte superior del marco soporte no corresponden al acople de ángulos soporte, sino tan sólo a los puntos de soldadura entre el marco soporte y las hojas.

mostrados en la figura, que dan rigidez a las planchas en forma de parábolas serían suplantados por ángulos soporte en el diseño propuesto, además de la existencia de un marco soporte para acoplar los ángulos.

**Figura 3.3. Modelo de estructura con soportes planos con agujeros.**



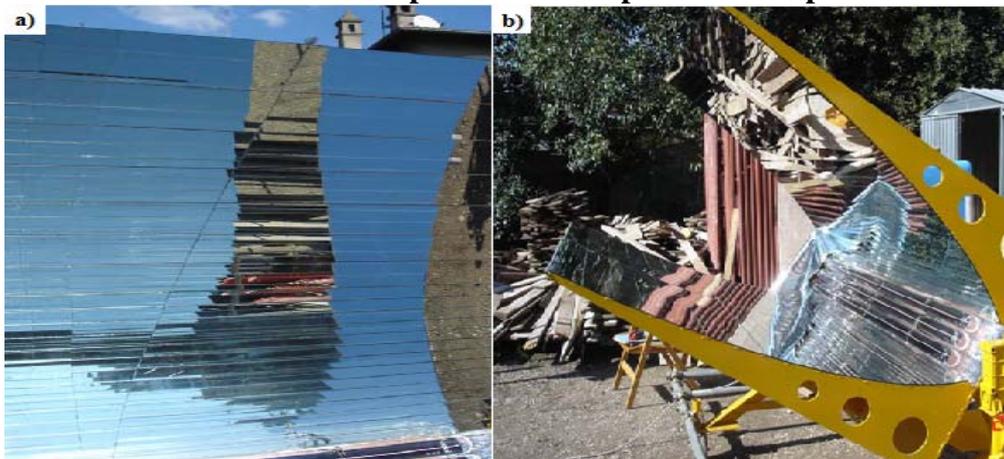
Fuente: Bibliografía [2]. Página 75.

### 3.4.2 Superficie reflectante

La superficie reflectante irá apoyada en las hojas (planchas de hierro en forma de parábola), en este caso se podrá optar por utilizar espejo semidoble de 3 mm de espesor y espejo doble de 4 mm de espesor. El espejo tiene el mérito de ser comercial y de tener un costo bajo en comparación con otro tipo de materiales, además posee un coeficiente de reflexión de 0.97. Como desventaja el espejo presenta una superficie rígida, al menos el comercial, por lo tanto no podrá seguir fielmente la curvatura de las hojas.

Como solución se propone segmentar el espejo a tiras con la misma longitud de la estructura de hierro, como se puede observar en la figura 3.4.

**Figura 3.4. a) Modelo de segmentos de espejo a modo de superficie reflectora. b) Modelo de estructura de un colector cilindro parabólico compuesto con superficie reflectora**



Fuente: Bibliografía [2]. Página 81.

La figura 3.4 es el modelo que se propone, un espejo segmentado en tiras con un ancho de 3mm, 4 mm ó 5 mm en la parte más curva de las hojas , parte inferior, y segmentado con un ancho de 5 mm ó 10 mm en la parte superior de la parábola por ser menos curva, claramente se puede ver como estos segmentos definen la parte parabólica de la superficie reflectora sin mayor dificultad.

### 3.4.3 Superficie absorbente

El cobre por ser un material con alto índice de conductividad térmica es ideal para trabajar como superficie absorbente de calor. Como se había mencionado anteriormente se ha elegido receptores de cobre de forma tubular sin cubierta de vidrio. Estos receptores captarán los rayos solares direccionados de la superficie reflectora y luego transmitirán esa energía en forma de calor al fluido calotransportador, elevando así su temperatura.

La mejor configuración que se amolda al diseño de este colector y a la aplicación requerida consta de tres tuberías de cobre tipo L, de 2 pulgadas de diámetro nominal cada una, colocadas en paralelo de manera horizontal en el foco de las superficies parabólicas. El diámetro nominal óptimo de las tuberías de cobre fue hallado calculando el coeficiente global de pérdidas térmicas desde la superficie de la tubería al exterior y el coeficiente global de transferencia de calor desde la superficie de la tubería al fluido calotransportador, iterando con distintos diámetros nominales de tuberías hasta llegar a una medida que nos represente las menores pérdidas. En el Anexo B se muestra una variedad de diámetros nominales de tuberías de cobre a elegir de acuerdo al diseño geométrico del colector.

En caso de tener acceso a receptores con cubierta de vidrio en vacío, se debe señalar que el vacío en los tubos de vidrio garantiza el máximo aislamiento térmico, de este modo se evitarán dispersiones entre la tubería de vidrio (la tubería de vidrio representa la función de cubierta) y el absorbedor, es decir disminuirán las pérdidas térmicas.

**Figura 3.4. Modelo de la configuración de los receptores. Receptores con tuberías de vidrio en vacío.**



Fuente: Bibliografía [2]. Página 85.

En la figura 3.4 se ilustra la configuración propuesta de las tuberías receptoras, cada una de estas tuberías receptoras estarán espaciadas 24.5 mm una de la otra. También se puede ver los sujetadores de los receptores que serán necesarios por dos motivos:

- Para evitar el contacto entre la estructura y la tubería y para evitar el contacto entre tuberías, reduciendo así las posibles pérdidas por conducción.
- Para sujetar las tuberías a la estructura, dándoles firmeza.

### 3.5 Análisis térmico de un colector cilindro parabólico compuesto <sup>49</sup>

El parámetro básico que debemos considerar es la eficiencia térmica del colector.

La eficiencia térmica “ $\eta$ ” de un CPC es definida como el cociente de la energía útil capturada o ganada, con la radiación incidente en el plano de apertura;

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a S} \quad (3.3)$$

Donde:

$\eta$  = eficiencia térmica del colector.

$Q_u$  = potencia útil.

$A_a$  = área de apertura del colector ( $m^2$ ).

$S$  = radiación solar absorbida en el plano de apertura ( $W/m^2$ )

Se puede resumir el análisis térmico para nuestro trabajo en 4 pasos:

1. *Se hallará la radiación solar total absorbida por el colector ( $S$ ).*
2. *Luego se encontrará el factor de transferencia de calor del colector ( $F_R$ ).*
3. *Con la radiación solar absorbida y el factor de transferencia de calor del colector se resolverá la potencia útil del colector, ( $Q_u$ ), de la ecuación (3.32).*
4. *Finalmente se podrá resolver la eficiencia de nuestro colector, ( $\eta$ ), con la ecuación (3.3)*

#### 3.5.1 Radiación solar absorbida por el colector CPC ( $S$ )<sup>50</sup>

Para estimar la radiación solar absorbida por el receptor de un CPC,  $S$ , es necesario determinar si el ángulo de incidencia de los rayos solares se encuentra dentro del rango del ángulo de aceptación,  $2\theta_c$ , luego es necesario estimar la contribución de la radiación directa (subíndice B, por *beam radiation*), la radiación difusa (subíndice D, por *diffuse radiation*) y la radiación reflejada por el suelo (subíndice G, por *ground-reflected radiation*).

La radiación solar total absorbida puede ser estimada mediante la definición (3.4) (Duffie and Beckman, 1991)<sup>51</sup>:

$$S = (G_{B,CPC} \tau_{c,B} \tau_{CPC,B} \alpha_B + G_{D,CPC} \tau_{c,D} \tau_{CPC,D} \alpha_D + G_{G,CPC} \tau_{c,G} \tau_{CPC,G} \alpha_G) \quad (3.4)$$

<sup>49</sup> Esta subsección 3.5 ha sido elaborada en base a la información de la fuente bibliográfica [4] (Subsección 3.3.4, 3.6.2 y 3.6.4) y a la fuente bibliográfica [5] (Subsección 7.3, 7.6 y 7.7)

<sup>50</sup> La subsección 3.5.1 se trabajó en base a la información de la fuente bibliográfica [4], página 192; y de la fuente bibliográfica [5], página 348.

<sup>51</sup> Fuente bibliográfica [4]. Página 353.

En la ecuación (3.4), el primer término es la contribución de la radiación directa, el segundo es la contribución de la radiación difusa, y el tercero es la contribución de radiación por el reflejo del suelo (radiación de albedo).

Donde:

- $G_{B,CPC}$  = es la radiación incidente en el plano de apertura y dentro del ángulo de aceptación.  
 $\tau_{c,B}$  = es la transmitancia de la radiación directa la cubierta del CPC (en caso se utilice cubierta protectora)  
 $\tau_{CPC,B}$  = es la transmitancia efectiva del CPC para la radiación directa, o pérdidas de transmisividad por el número promedio de reflexiones.  
 $\alpha_B$  = es la absorptancia del receptor para la radiación directa.

Los demás factores en los términos de radiación difusa (segundo término), y radiación reflejada por el suelo (tercer término), son análogos a los de la radiación directa (primer término).

Los componentes de la radiación en la ecuación (3.4) están condicionados por la geometría del colector de la siguiente manera:

$$G_{B,CPC} = G_{Bn} \cos \theta \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{si } (\beta - \theta_c) \leq \tan^{-1}[\tan \theta_z \cos \gamma_s] \\ \leq (\beta + \theta_c) \end{array} \right. \quad (3.5)$$

$$G_{D,CPC} = \begin{cases} \frac{G_D}{C} & \text{si } (\beta + \theta_c) < 90^\circ \\ \frac{G_D}{2} \left( \frac{1}{C} + \cos \beta \right) & \text{si } (\beta + \theta_c) > 90^\circ \end{cases} \quad (3.6)$$

$$G_{G,CPC} = \begin{cases} 0 & \text{si } (\beta + \theta_c) < 90^\circ \\ \frac{G_G}{2} \left( \frac{1}{C} - \cos \beta \right) & \text{si } (\beta + \theta_c) > 90^\circ \end{cases} \quad (3.7)$$

Donde:

- $C$  = factor de concentración del colector CPC truncado  
 $\beta$  = ángulo de inclinación del CPC con respecto a la horizontal.  
 $\theta_c$  = semiángulo de aceptación

Las componentes de la radiación solar total absorbida podrán ser simplificadas de acuerdo a las condiciones de las ecuaciones (3.5), (3.6) y (3.7), teniendo en cuenta las siguientes 4 consideraciones que se aplicarán en este trabajo:

1. Para la contribución de la radiación directa en la radiación solar total absorbida, no se tomará la ecuación (3.5) por ser una ecuación teórica. Por otra parte, debido a que se cuenta con los datos de radiación directa de la estación meteorológica del radar UDEP, se prefiere utilizar dicha información para una mejor aproximación ( $G_B$ ).

$$G_{B,CPC} = G_B \quad (3.8)$$

2. De la ecuación (3.6), según la condición  $\beta + \theta_c$ , para este caso y sabiendo que:

- El ángulo de inclinación respecto a la superficie horizontal,  $\beta$ , de este colector es igual a  $15^\circ$

- El semiángulo de aceptación del colector,  $\theta_c$ , es igual a  $24^\circ$

Con lo cual se tendrá  $\beta + \theta_c = 15^\circ + 24^\circ = 39^\circ$ , que será menor que  $90^\circ$ , lo que conllevará a resolver la primera condición para la radiación difusa.

$$G_{D,CPC} = \frac{G_D}{C_t} \quad (3.9)$$

Dónde

$C_t$  = factor de concentración del colector CPC truncado

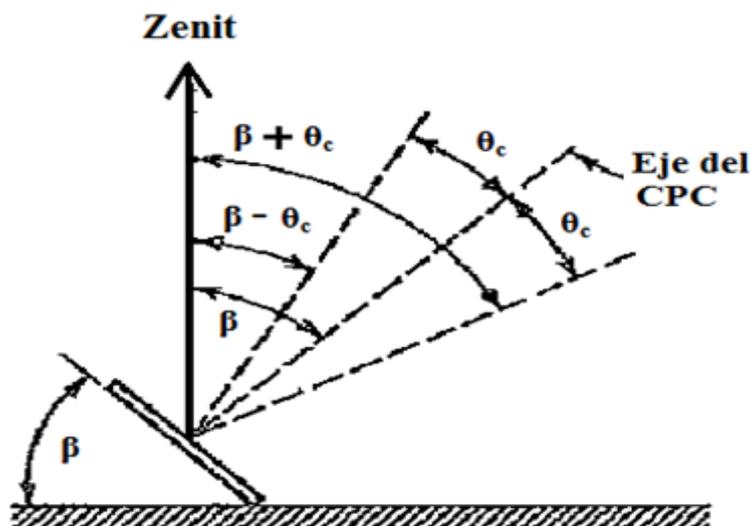
3. En cuanto a la radiación reflejada por el suelo para nuestro diseño se despreciará por ser prácticamente nula, es decir:

$$G_{G,CPC} = 0 \quad (3.10)$$

Además de que en este colector, para la radiación reflejada por el suelo, se cumple la segunda condición ya que  $(\beta + \theta_c) < 90^\circ$ .

En la ecuación (3.7) la radiación reflejada por el suelo sólo contribuye si  $(\beta + \theta_c) > 90^\circ$ , es decir, cuando el receptor “ve” el suelo. Para un mejor entendimiento se muestran los ángulos  $\beta$  y  $\theta_c$ , en sus distintas configuraciones en la figura 3.5

**Figura 3.5. Proyección en un plano norte-sur del ángulo de aceptación de un CPC con inclinación en un eje orientado en dirección este-oeste**



Fuente: Bibliografía [5]. Página 353.

4. Con los puntos anteriores aclarados, quedaría por simplificar las propiedades ópticas de los materiales con los que se construirá el dispositivo.

**a) Transmitancia de la cobertura ( $\tau_c$ )**

Los colectores CPC's suelen tener una cobertura transparente que cubre su estructura. Esta cobertura desempeña dos funciones, la primera es proteger la superficie reflectora y la superficie absorbadora, y la segunda es reducir las

pérdidas térmicas del absorbedor. Por otro lado la radiación directa y difusa que incidan en el CPC será reducida por la transmitancia de la cobertura.  $\tau_c$ .

Este colector no posee cobertura, ni en la estructura ni en los absorbedores por lo tanto:

$$\tau_c = 1 \quad (3.11)$$

**b) Transmitancia efectiva ( $\tau_{CPC}$ )**

La transmitancia efectiva,  $\tau_{CPC}$ , del CPC, toma en cuenta las pérdidas por reflexión dentro del colector. La fracción de la radiación que pasa a través de la apertura del colector que eventualmente se concentra en el receptor depende de la reflectividad especular,  $\rho$ , de las paredes del CPC y del número promedio de reflexiones,  $n$ , esta transmitancia es expresada por la ecuación (3.12)

$$\tau_{CPC} = \tau_{CPC,B} = \tau_{CPC,D} = \rho^n \quad (3.12)$$

La ecuación (3.12) puede también ser usada para estimar  $\tau_{CPC,B}$ ,  $\tau_{CPC,D}$  y  $\tau_{CPC,G}$ , que usualmente son tomadas como el mismo valor (para este trabajo se tomará el mismo valor). Valores de  $n$  para un CPC completo y un CPC truncado pueden obtenerse de la figura 2.28. Tal cual se mencionó anteriormente, los extremos superiores de las hojas del CPC contribuyen poco en la concentración de radiación hacia el receptor, y usualmente los CPCs son truncados por razones económicas. Como se puede ver en la figura 2.28, el número promedio de reflexiones se encuentra en función del ratio de concentración,  $C$ , y del semiángulo de aceptación,  $\theta_c$ . Para un concentrador truncado, la línea  $(1 - 1/C)$  puede ser tomada como el límite inferior para el número de reflexiones de los rayos incidentes dentro del ángulo de aceptación.

**c) Absortancia ( $\alpha$ )**

Es la absortancia de la superficie receptora para la radiación. Las tuberías receptoras son de cobre, por lo tanto se debe conocer la absortancia de este material, que será el mismo valor para la radiación directa y la radiación difusa.

$$\alpha_B = \alpha_D = \alpha_r \quad (3.13)$$

Donde

$\alpha_r$  = absortancia de la tubería receptora de cobre.

**d) Factor de corrección por separación del receptor y el reflector ( $\rho'$ )<sup>52</sup>**

El diseño geométrico considera al tubo absorbedor pegado al reflector, sin espacio aparente entre ellos, pero para evitar las pérdidas por conducción con el reflector se ha separado una distancia determinada, lo cual también afecta a la cantidad de radiación absorbida y por lo que se introduce un factor de corrección por la distancia entre el absorbedor y el reflector ( $g$ ). La ecuación (3.14) expresa dicho factor de corrección:

<sup>52</sup> El apartado d) se trabajó en base a la información de la fuente bibliográfica [17]. Página 5.

$$\rho' = 1 - \left( \frac{g}{\pi D_o} \right) \quad (3.14)$$

Donde:

- $\rho'$  = factor de corrección por la distancia entre el receptor y el reflector
- $g$  = distancia entre el absorbedor y el reflector
- $D_o$  = diámetro externo de la tubería receptora de cobre

Resueltas las 4 consideraciones anteriores, y reemplazando la ecuación (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13) y (3.14) en la ecuación (3.4), la ecuación para la radiación solar absorbida quedará de la siguiente manera:

$$S = (G_{B,CPC} \tau_{CPC,B} \alpha_B + G_{D,CPC} \tau_{CPC,D} \alpha_D) = \left( G_B + \frac{G_D}{C_t} \right) (\tau_{CPC} \alpha_r) (\rho') \quad (3.15)$$

### 3.5.2 Factor de eliminación de calor del colector ( $F_R$ )

Es necesario relacionar las características de diseño de este colector en particular, con las expresiones apropiadas para el factor de eficiencia del colector,  $F'$ ; el factor de flujo del colector,  $F''$ ; el coeficiente global de pérdidas térmicas,  $U_L$ , y para el coeficiente global de transferencia de calor al fluido,  $U_o$ .

Para una tubería receptora sin algún tipo de cobertura y asumiendo que no hay gradientes de temperatura en los alrededores del tubo receptor, el coeficiente global de pérdidas térmicas, considerando convección y radiación desde los alrededores, y conducción por la estructura soporte es dado por la ecuación (3.16)

$$U_L = h_w + h_r + h_c \quad (3.16)$$

El coeficiente de radiación lineal es estimado por la ecuación (3.17)<sup>53</sup>

$$h_r = 4\sigma\varepsilon\bar{T}^3 \quad (3.17)$$

Donde:

- $h_r$  = coeficiente de radiación de los alrededores al receptor
- $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
- $\varepsilon$  = emisividad del receptor de cobre
- $\bar{T}$  = temperatura media absoluta entre la temperatura del receptor y la temperatura ambiente.

Si un único valor de  $h_r$  no es aceptable debido a grandes variaciones de temperatura a lo largo del recorrido del fluido, el colector puede ser dividido en pequeños segmentos, donde cada segmento tenga su constante  $h_r$ .

Para el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $h_w$ , desde la superficie externa de una tubería receptora (en nuestro caso tubería de cobre) con un entorno al aire libre, las

<sup>53</sup> La ecuación (3.17) se puede verificar en la fuente bibliográfica [5], página 330. También se puede verificar en la fuente bibliográfica [4], página 199.

ecuaciones recomendadas han sido modificadas de la siguiente manera respecto al número de Nusselt <sup>54</sup>:

- Para un número de Reynolds:  $0.1 \leq Re \leq 1000$ ,

$$Nu = 0.4 + 0.54 (Re)^{0.52} \quad (3.18)$$

- Para un número de Reynolds:  $1000 \leq Re \leq 50000$ ,

$$Nu = 0.3 (Re)^{0.6} \quad (3.19)$$

Para el cálculo del coeficiente de pérdidas por conducción se requiere conocimiento de la construcción del colector, por ejemplo la forma de los soportes con los que se es fijada y soportada la superficie absorbadora, en nuestro diseño, esas pérdidas las consideraremos despreciables, es decir  $h_r = 0$

Usualmente, para reducir las pérdidas térmicas, se emplea una tubería de vidrio concéntrica alrededor de la tubería receptora. El espacio entre la tubería de vidrio y la tubería receptora se encuentra usualmente en vacío, de esta manera las pérdidas por convección son prácticamente insignificantes. En caso se decida la construcción de la tubería receptora con tubería de vidrio en vacío, el coeficiente global de pérdidas térmicas,  $U_L$ , estará dado por la ecuación (3.20)

$$U_L = \left[ \frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a})A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (3.20)$$

Donde:

$A_r$  = área de la superficie externa de la tubería receptora de cobre. ( $m^2$ )

$A_c$  = área de la superficie externa de la cubierta de vidrio del receptor. ( $m^2$ )

$h_w$  = coeficiente de transferencia de calor por convección desde la superficie externa de la cubierta de vidrio al exterior. ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

$h_{r,c-a}$  = coeficiente lineal de transferencia de calor por radiación desde la cubierta de vidrio al exterior. ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

$h_{r,r-c}$  = coeficiente lineal de transferencia de calor por radiación desde la tubería receptora de cobre a la cubierta de vidrio. ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ). Este coeficiente de radiación se podrá hallar con la ecuación (3.21)

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma (T_r^2 + T_c^2)(T_r + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_c} \left( \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right)} \quad (3.21)$$

Donde:

$T_r$  = temperatura del receptor. Se asumirá igual a la temperatura alcanzada por el fluido.

$T_c$  = temperatura de la cobertura de vidrio.

$\varepsilon_r$  = emisividad del receptor de cobre.

$\varepsilon_c$  = emisividad de la cobertura de vidrio.

En la ecuación anterior, para estimar las propiedades de la cubierta de vidrio, la temperatura de la cubierta de vidrio,  $T_c$ , es requerida. Esta temperatura es más cercana a la temperatura ambiente que a la temperatura del receptor. Por lo tanto, ignorando la radiación absorbida por

<sup>54</sup> Información tomada de la fuente bibliográfica [5]. Página 166.

la cobertura,  $T_c$  puede ser obtenido a través de un balance de energía como se muestra en la ecuación (3.22)

$$A_c(h_{r, c-a} + h_w)(T_c - T_a) = A_r h_{r, r-c}(T_r - T_c) \quad (3.22)$$

Resolviendo la ecuación (3.22), se tiene para  $T_c$ :

$$T_c = \frac{A_r h_{r, r-c} T_r + A_c (h_{r, c-a} + h_w) T_a}{A_r h_{r, r-c} + A_c (h_{r, c-a} + h_w)} \quad (3.23)$$

El procedimiento para encontrar  $T_c$  es por iteración, se estima un valor de  $T_c$ , se resuelve  $h_{r, c-a}$  y  $h_{r, r-c}$  y se reemplazan en la ecuación (3.23), considerando un  $T_c$  iterado (cercano a la temperatura ambiente  $T_a$ ). Si  $T_c$  obtenido de la ecuación (3.23) es muy diferente del valor original, se debe seguir iterando. Usualmente, no son requeridas más de dos iteraciones. Luego se halla  $U_L$  de la ecuación (3.20).

Si la radiación absorbida por la cobertura de vidrio es considerada, el término apropiado debe ser añadido en la parte derecha de la ecuación (3.20)<sup>55</sup>

Obtenido  $U_L$ , se necesitará estimar el coeficiente global de transferencia de calor,  $U_o$ . Éste incluye las paredes de la tubería porque el flujo de calor en un colector concentrador es alto. Basado en el diámetro exterior de la tubería, el  $U_o$  es dado por la ecuación (3.24)

$$U_o = \left[ \frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln \left( \frac{D_o}{D_i} \right)}{2k} \right]^{-1} \quad (3.24)$$

Donde

$D_o$  = diámetro exterior del tubo receptor

$D_i$  = diámetro interior del tubo receptor

$h_{fi}$  = coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior de la tubería receptora ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

$k$  = conductividad térmica del receptor ( $W/m \text{ } ^\circ C$ )

El coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del tubo receptor,  $h_{fi}$ , puede ser calculado por la ecuación del flujo standard que pasa por una tubería. Considerando así la ecuación (3.25) para el número de Nusselt.

$$Nu = 0.023(Re)^{0.8}(Pr)^{0.4} \quad (3.25)$$

Donde

$Re$  = número de Reynolds =  $\rho v_s D_o / \mu = v_s D_o / \nu$

$Pr$  = número de Prandtl =  $c_p \mu / k_f$

$\rho$  = densidad del fluido ( $kg/m^3$ )

$v_s$  = velocidad característica del fluido (m/s)

$D_o$  = Diámetro exterior de la tubería receptora a través de la cual circula el fluido (m).

<sup>55</sup> Para mayor detalle acudir a la fuente bibliográfica [5]. 2da edición. (Página 337). O acudir a la fuente bibliográfica [4]. (Página 200).

- $\mu$  = viscosidad dinámica del fluido. (Kg/ms)  
 $\nu$  = viscosidad cinemática del fluido =  $\mu/\rho$   
 $k_f$  = conductividad térmica del fluido (W/m °C)

Debe tenerse en cuenta que la ecuación (3.25) corresponde a un número de Nusselt propio de un flujo turbulento ( $Re \geq 2300$ ). Para el caso de un flujo laminar el número de Nusselt será constante,  $Nu = 4.364 = \text{constante}$ .

Así con la ecuación (3.26), se resolverá el coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior de la tubería receptora,  $h_{fi}$

$$h_{fi} = \frac{Nu k}{D_i} \quad (3.26)$$

Donde

$k$  = conductividad térmica del fluido (W/m.°C)

Una vez hallados el coeficiente global de pérdidas térmicas,  $U_L$ , y el coeficiente global de transferencia de calor,  $U_o$ , se procederá a resolver las ecuaciones necesarias para hallar el factor de eliminación de calor del colector,  $F_R$ .

La energía ganada por unidad de longitud del colector,  $q'_u$ , expresada en términos de la temperatura local del receptor,  $T_r$ , y de la radiación solar absorbida por unidad de área de apertura,  $S$ , está dada por la ecuación (3.27)

$$q'_u = \frac{A_a S}{L} - \frac{A_r U_L}{L} (T_r - T_a) \quad (3.27)$$

Donde

- $A_a$  = área sin sombra en la apertura del concentrador  
 $A_r$  = área del receptor. ( $\pi D_o L$ , para absorbedores cilíndricos)  
 $L$  = longitud del receptor (m).  
 $T_r$  = temperatura del receptor  
 $T_a$  = temperatura ambiente

En términos de la energía transferida al fluido con la temperatura local del fluido,  $T_f$ :

$$q'_u = \frac{\left(\frac{A_r}{L}\right) (T_r - T_f)}{\frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (3.28)$$

Si  $T_r$  es eliminado de la ecuación (3.27) y (3.28), se tendrá:

$$q'_u = F' \frac{A_a}{L} \left( S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_f - T_a) \right) \quad (3.29)$$

Donde el factor de eficiencia del colector,  $F'$ , es dado por:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi}D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (3.30)$$

o

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad (3.31)$$

Con las ecuaciones (3.29), (3.30) y (3.31), se siguen los mismos procedimientos analíticos que para los colectores de placa plana<sup>56</sup>, y a través del uso del factor de eliminación de calor,  $F_R$ , se puede obtener una expresión para la potencia útil,  $Q_u$ , utilizando además el concepto de la radiación solar absorbida

$$Q_u = F_R A_a \left[ S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_i - T_a) \right] \quad (3.32)$$

Donde

- $F_R$  = factor de transferencia de calor del colector
- $A_a$  = área de apertura por donde incide la radiación (m<sup>2</sup>)
- $A_r$  = área de la superficie externa del receptor de cobre (m<sup>2</sup>)
- $U_L$  = coeficiente global de pérdidas térmicas (W/ m<sup>2</sup>°C)
- $T_i$  = temperatura de entrada del fluido al colector (°C)
- $T_a$  = temperatura ambiente (°C)

Si se considera el colector en estado estacionario y los valores de la radiación y pérdidas constantes, la potencia útil viene dada por la expresión:

$$Q_u = F_R A_a \left[ S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_s - T_a) \right] \quad (3.33)$$

Donde:

- $T_s$  = temperatura de salida del fluido (°C)

De una manera análoga a la del colector de placa plana<sup>57</sup>, se obtiene la expresión para el factor de flujo del colector,  $F''$ , a través de la ecuación (3.34)

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}C_p}{A_r U_L F'} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_r U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (3.34)$$

Donde

- $F''$  = factor de flujo del colector
- $F'$  = factor de eficiencia del colector

<sup>56</sup> Para profundizar dicho procedimiento se puede consultar la fuente bibliográfica [5] (Página 334), o la fuente bibliográfica [4] (Página 201).

<sup>57</sup> Para profundizar dicho procedimiento se puede consultar la fuente bibliográfica [5] (Página 334), o la fuente bibliográfica [4] (Página 173).

$\dot{m}$  = flujo másico del fluido que pasa por el receptor  
 $C_p$  = calor específico del fluido a una temperatura promedio entre la temperatura del fluido y la temperatura ambiente

Con el factor de eficiencia del colector,  $F'$ , y el factor de flujo del colector,  $F''$ , hallados, se podrá resolver la ecuación (3.35) para el factor de eliminación de calor del colector, que se deduce de la ecuación (3.34)

$$F_R = F''F' \quad (3.35)$$

Las diferencias entre el receptor sin cobertura y el receptor con cobertura se encuentran en el cálculo de la radiación solar total absorbida por el colector,  $S$ , y el coeficiente global de pérdidas térmicas,  $U_L$ .

## **Capítulo 4**

# **Resultados y consideraciones**

### **4.1 Introducción**

Dados los fundamentos básicos para el uso de la energía termosolar y especialmente para el uso del colector CPC, así como las características geométricas óptimas para la construcción de un diseño de colector de este tipo, es necesario expresar la efectividad de este dispositivo con resultados teóricos, información que se detalla con mayor profundidad en el Anexo adjunto. Es de esta manera que se podrá conocer la factibilidad del estudio realizado y su posterior aplicación a temas prácticos.

En el presente capítulo se presentarán los cálculos realizados a partir de un modelo teórico, así como los resultados numéricos obtenidos en base al presente dimensionamiento. Por otro lado se podrá conocer numéricamente la influencia de las distintas variables en el presente diseño a tomarse en cuenta para cualquier aplicación con este tipo de colectores.

Se ha utilizado información de radiación y temperatura reales, obtenidos por la estación meteorológica UDEP. Se decidió usar dicha información por dos razones fundamentales: porque es accesible, y porque uno de los objetivos de este estudio es analizar el potencial solar de Piura para aplicaciones de este tipo. Cabe indicar que se ha elegido el uso de agua como fluido de trabajo, por ser accesible en todo momento y por el costo mínimo que representa.

### **4.2 Descripción del sistema**

El colector parabólico compuesto (CPC) está compuesto de 2 superficies parabólicas que tienen como foco el mismo eje lo que permite concentrar en el eje la luz que llegue al CPC con una inclinación y ángulo de aceptación acorde con la aplicación. Se determina un ángulo de aceptación conveniente, o sea que permite captar en el eje la mayor cantidad de luz incidente, combinando adecuadamente diámetro del eje y profundidad del CPC.

El eje común del CPC se constituye de tres tubos de cobre que se calentarán con la radiación concentrada en ellos, en su interior circula el agua que eventualmente aumentará su temperatura. Con la finalidad de aumentar la cantidad de luz captada que viene con cualquier inclinación, refiriéndonos a la luz difusa, y para ahorrar material de construcción, se procede

al proceso de truncamiento de la parábola del colector, incrementando ligeramente el ángulo de aceptación de rayos solares en el colector.

El sistema de calentamiento está constituido en base a dispositivos colectores unitarios de 2 metros de longitud, teniendo espejo como superficie reflectora, tres receptores de cobre como superficie absorbidora cada uno y una estructura de fierro como soporte.

Un sistema de calentamiento utiliza la energía solar para calentar agua, que después puede ser almacenada en un tanque para poder utilizarla a cualquier hora del día, inclusive en la noche, cuando no hay sol, ya que en el tanque se mantiene caliente.

Como primer paso se debe colocar el dispositivo colector orientado de tal manera que obtenga la mayor radiación posible, generalmente la orientación ideal es hacia el sur en el hemisferio norte y hacia el norte en el hemisferio sur, es decir apuntando hacia el ecuador. También es necesario colocarlo a cierta inclinación, ya que de esta manera podrá captar mayor radiación solar.

El funcionamiento es sencillo, los tubos absorbedores tienen una entrada y una salida. Por la entrada ingresará el agua fría, la cual se calentará al recorrer la longitud de la tubería de cobre. Una vez caliente sale de la tubería para ser almacenada en el tanque acumulador. Para que el agua circule por el colector solar, no es indispensable el uso de bombas, estos dispositivos funcionan por medio de un fenómeno físico llamado termosifón. Según el principio del efecto termosifón, el agua al calentarse sufre un desplazamiento vertical y hacia arriba basado en la disminución de su densidad con el aumento de la temperatura. Esto provoca, que el agua contenida en un depósito se encuentre estratificada, ocupando las posiciones más altas, las de mayor energía o temperatura. La idea fundamental de este efecto consiste en tomar el agua contenida en la parte inferior del depósito (la más fría), hacerla circular a través de los colectores para elevar su temperatura y devolverla de nuevo a la parte superior del depósito (la más caliente), de esta forma se irá transformando el agua fría en caliente, que es el objetivo. El mismo depósito puede servir de acumulador para disponer de agua caliente en los períodos de baja o nula radiación. Por lo que si la entrada se conecta en la parte inferior del acumulador, y la salida en la parte superior, el fenómeno de termosifón es el que hará circular el agua naturalmente.

Por otro lado por contar nuestro sistema con 25 colectores dispuestos en serie para aumentar la temperatura del total de volumen de agua, es necesario contar con un dispositivo que obligue al fluido a circular por los 25 colectores, es decir, será necesario el uso de una bomba. Asimismo por la longitud total de nuestros colectores, se tiene que pensar en un primer tanque de 13000 litros, desde donde se alimentará al sistema de agua y un segundo tanque de 13000 litros que se ubicará al final del sistema termosolar y nos servirá de acumulador, este segundo tanque deberá poseer un adecuado aislante térmico en sus paredes para tratar de disminuir las pérdidas por calor a través de ellas.

### **4.3 Datos de partida**

Para realizar el análisis completo del sistema de calentamiento, primero se debe conocer cuál es la demanda real de energía que se debe consumir.

En este caso se trabajó con una demanda de 10 000 litros de agua, cantidad a la cual se deberá incrementar su temperatura a través de los colectores CPC diseñados. El agua a utilizar se tomará desde nuestro primer tanque de agua, alimentado directamente por la red de agua

potable, con una temperatura promedio de 25°C. Esta cantidad de agua fluirá por nuestros colectores hasta alcanzar una temperatura de trabajo de 50°C. El tiempo de funcionamiento de este sistema de calentamiento será de 5 horas, por lo que los cálculos realizados sobre el diseño del colector en estudio se hicieron para ese período de tiempo. Ver tabla 4.1.

El fluido dentro del sistema podrá ser recirculado por un pequeño sistema de bombeo que certificará la continuidad del ciclo, si así se requiere. Los 10000 litros de agua recorrerán las tuberías de cobre por 5 horas, garantizando el salto de temperatura de 25°C al final de dicho período de tiempo.

**Tabla 4.1: Datos del sistema de calentamiento**

Tipo de fluido	Agua
Volumen de fluido (l)	10000
Temperatura de ingreso del fluido (°C)	25°C
Temperatura de salida del fluido (°C)	50°C
Tiempo de funcionamiento del sistema (horas)	5 horas
Temperatura del aire (°C)	Data UDEP
Radiación para la ciudad de Piura (kWh/m <sup>2</sup> )	Data UDEP

Conociendo los datos anteriores se procederá a mostrar en la tabla 4.2 las características que determinarán el flujo en nuestro colector.

**Tabla 4.2. Características del flujo en el colector**

Fluido	AGUA
Volumen de fluido por colector (kg/día) (l/día)	10000
Número de tuberías por colector (unidades)	3
Flujo másico total (kg/s)	0.5522
Flujo másico total por cada tubería (kg/s)	0.1841
Caudal total (m <sup>3</sup> /s)	0.0006
Caudal total por cada tubería (m <sup>3</sup> /s)	0.0002
Velocidad del fluido por tubería (m/s)	0.0928
Cp de fluido (kJ/kg.°C)	4.18
Densidad del fluido a 35 °C (kg/m <sup>3</sup> )	994
Conductividad térmica del fluido (K <sub>f</sub> ) (W/m.°C)	0.676
Tiempo empleado por el fluido en cruzar concentrador (s)	21.5635
Tiempo de calentamiento del sistema (horas)	5
Tiempo de funcionamiento del sistema (horas)	5
Calor latente del agua (kJ. kg <sup>-1</sup> ) .	2260

A simple vista por la carga total a cubrir, se tendrá que pensar en diseñar una configuración modular de colectores de concentración solar, configurados en serie y así garantizar el calentamiento del fluido. Se deberá procurar tener la mejor eficiencia energética con la menor cantidad de colectores posibles.

### 4.3.1 Consideraciones para el diseño

El diseño de un sistema solar conlleva a múltiples consideraciones adicionales, fuera de la cantidad de radiación solar emitida por el sol, se debe considerar la latitud del lugar donde será instalado el dispositivo, la influencia de las superficies cercanas al colector y las horas de funcionamiento del sistema.

#### 4.3.1.1 Inclinación del colector<sup>58</sup>

Muchos de los colectores solares están inclinados para captar mayor radiación solar. La cantidad óptima de energía se capta cuando el colector está inclinado en el mismo ángulo que el de latitud. Éste debería ser de por lo menos 15° para asegurar que el agua de las lluvias drene fácilmente, lavando el polvo al mismo tiempo. A latitudes mayores (> 30° N ó S), los colectores están más inclinados sobre el ángulo de latitud para tratar de nivelar fluctuaciones por estaciones.

Si los colectores solares están inclinados para optimizar la recolección de energía, o si circunstancias locales rigen cuál debe ser el ángulo óptimo, entonces la radiación promedio recibida deberá ser corregida utilizando un factor de inclinación. Ver tabla 4.3

**Tabla 4.3: Ángulo y factor de inclinación de acuerdo a la latitud del lugar.**

Latitud	Factores de inclinación					
	15°	20°	25°	30°	35°	40°
0 – 5°	0.99	0.97	0.94	0.92	0.88	0.84
5 – 10°	1.01	1.00	0.98	0.96	0.93	0.89
10 – 15°	1.03	1.02	1.02	1.00	0.98	0.96
15 – 20°	1.06	1.07	1.06	1.05	1.04	1.02

Fuente: [http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual\\_ES\\_termica.pdf](http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual_ES_termica.pdf)

Por ejemplo para un lugar en el norte del Perú (latitud 0 – 5°), el factor de inclinación para un sistema de calentadores solares de agua orientados hacia el norte a un ángulo de 15° N es de 0.99 o menor. Esto es debido a que el ángulo óptimo sería de 5°. Pero para evitar que el polvo se asiente y para permitir un adecuado drenaje del agua, el ángulo mínimo deberá ser de 15°.

<sup>58</sup> La subsección 4.3.1.1 se ha desarrollado en base a información de la página web: [http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual\\_ES\\_termica.pdf](http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual_ES_termica.pdf) (Página 17).

Por lo tanto, la energía real recibida en el lugar sobre los colectores debe ser 0.99 veces la radiación sobre la superficie horizontal. Para otros ángulos de inclinación y lugares, el factor de inclinación puede diferir sustancialmente de 1, desempeñando un papel importante en la determinación del tamaño y optimización del sistema.

Hay que tener en cuenta que en este cuadro se supone que los colectores están mirando hacia la dirección correcta. Esto significa que en nuestro hemisferio (Sur), los colectores están mirando exactamente hacia el norte. Si éste no es el caso, se debe utilizar factores de corrección similares a los de la desviación de ángulo de inclinación óptimo. Se pueden utilizar compases o mapas de la ciudad para determinar la orientación correcta.

En países cercanos al ecuador, las consecuencias de desviaciones de la inclinación óptima son poco importantes. El ángulo de inclinación es pequeño, así que los colectores solares normales (normal = línea haciendo ángulo de  $90^\circ$  con el plano horizontal de la superficie del colector) no se desvían mucho del ángulo promedio de incidencia sobre la radiación solar que está cercana a la normal sobre la superficie de la tierra. Aún así, de ser posible, es mejor dejar que los colectores miren al sol.

Para el caso del distrito de Piura, en la provincia de Piura, en el departamento de Piura, le corresponderá una latitud de  $5^\circ 22'$  según la información otorgada por la estación meteorológica UDEP. Por este motivo nuestro colector tendrá un ángulo de inclinación,  $\beta$ , igual a  $15^\circ$  y un factor de inclinación que según la tabla 4.1 debería ser 1.01, valor que para este trabajo asumiremos igual a 1. Para efectos de cálculo no se tomará el factor de inclinación asumido ya que no tendría influencia en algún resultado. Por otro lado el ángulo de inclinación,  $\beta=15^\circ$ , será el valor que se utilizará en este diseño.

En el Anexo E se muestra una tabla con el ángulo de inclinación para los colectores de acuerdo a la latitud del lugar donde serán instalados, para los departamentos del Perú.

#### 4.3.1.2 Sombras y reflejos<sup>59</sup>

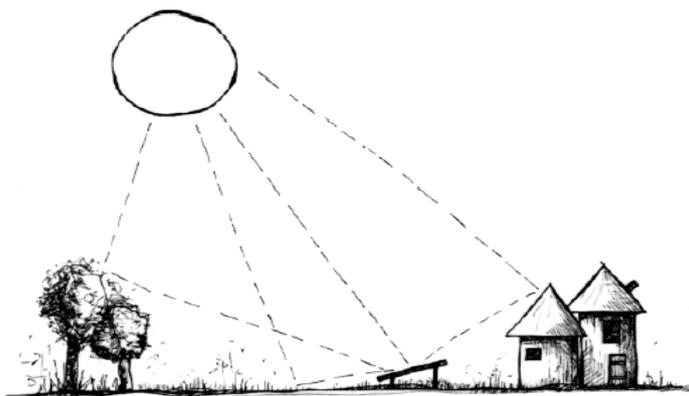
En lo posible, deben evitarse las sombras. Cualquier sombra tiene una influencia negativa sobre el rendimiento de un sistema solar, ya sea la sombra de un árbol al este del colector solar o de un edificio alto ubicado a 100 metros, hasta la existencia de una pared detrás de los colectores tiene influencia en el rendimiento del sistema solar. Así que, aún un árbol pequeño (además del hecho de que muchos de los árboles pequeños eventualmente se convierten en árboles grandes) puede tener influencia sustancial sobre el rendimiento si está justo en el lugar equivocado.

Otro efecto frecuentemente olvidado, es el de los reflejos de la radiación solar desde la superficie de la tierra u objetos en los alrededores. Diferentes materiales tienen diferentes coeficientes de reflexión. Por ejemplo, un edificio blanco refleja casi toda la radiación. Un edificio oscuro absorbe mucha radiación. El césped o los árboles reflejan parte de la radiación, mientras que la tierra oscura absorbe mucho más. (Ver figura 4.1)

---

<sup>59</sup> La subsección 4.3.1.1 se ha desarrollado en base a información de la página web: [http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual\\_ES\\_termica.pdf](http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual_ES_termica.pdf) (Página 18).

**Figura 4.1: Radiación reflejada**



Fuente: [http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual\\_ES\\_termica.pdf](http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual_ES_termica.pdf) (Página 19).

Si uno tiene la oportunidad de escoger el color de las paredes en el vecindario directamente relacionado con un sistema solar, es aconsejable escoger el blanco. De lo contrario, si uno tiene la oportunidad de escoger el lugar se puede tomar en consideración este reflejo. Bajo ciertas circunstancias, la reflexión puede ser de un 10% del total de la radiación o más, así que sí vale la pena.

#### 4.3.1.3 Horas solares pico (HSP)<sup>60</sup>

Esta unidad denominada hora solar pico es muy usada en el campo de la energía solar fotovoltaica y su conocimiento resulta útil en el análisis de sistemas fotovoltaicos. Si bien el sistema de calentamiento de agua que se presenta en este trabajo no pertenece a las aplicaciones fotovoltaicas, se utilizará este concepto por fines prácticos. Se debe indicar que para el análisis de un colector CPC no es indispensable el uso de este concepto, ya que un CPC absorbe la radiación difusa y además puede estar sujeto a un sistema de seguimiento solar.

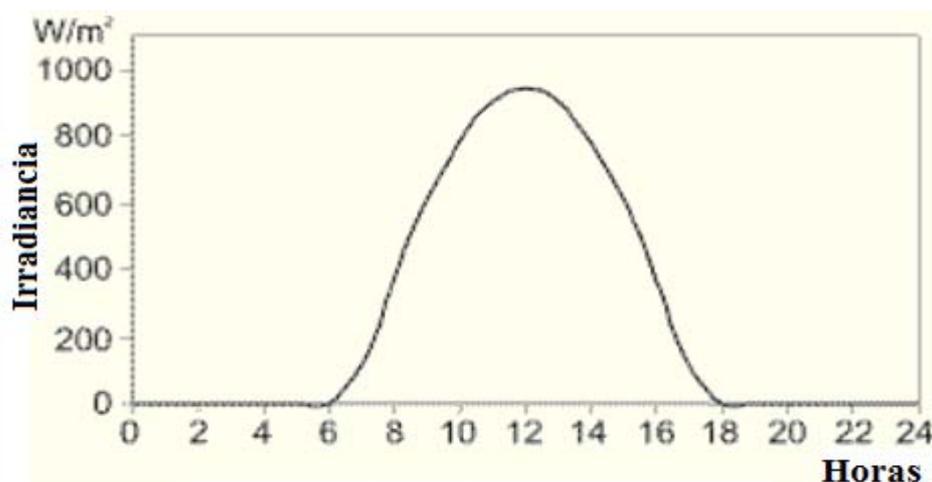
El origen e interpretación de la hora solar pico puede comprenderse a partir de las siguientes consideraciones:

La irradiancia solar sobre la superficie terrestre en un día cualquiera puede tener un comportamiento como el mostrado en la figura 4.2. La presencia de las nubes modifica esta distribución, pero en el presente análisis, no resulta esencial y no será tomada en cuenta.

La característica de esta distribución cambia según el verano o el invierno, algo también importante para un análisis integral a lo largo del año, pero para la interpretación de la hora solar pico se mantendrá como referencia la distribución mostrada en la figura 4.2, como ejemplo de un día cualquiera.

<sup>60</sup> Esta subsección 4.3.1.3 se ha desarrollado en base a la información del artículo: “La hora solar pico” del Dr. Ing. Antonio Sarmiento Sera. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo03.html>.

**Figura 4.2. Distribución horaria de la irradiancia solar en un día sin nubes.**



Fuente: Artículo “La hora solar pico”. Dr. Ing. Antonio Sarmiento Sera. Web: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo03.html>.

El cálculo de la energía total recibida en un metro cuadrado de superficie terrestre (o de un panel fotovoltaico) horizontal, es representado por el área bajo la curva de la figura 4.2, por lo que deberá obtenerse en un promedio aproximado un valor de 5 000 Wh/m<sup>2</sup> ó 5 kWh/m<sup>2</sup>.<sup>61</sup>

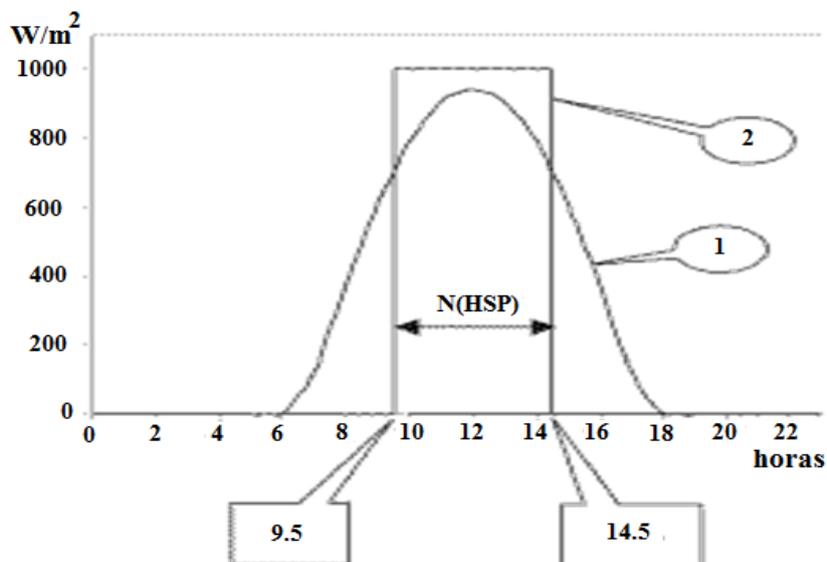
Este valor de 5 kWh/m<sup>2</sup> resulta de la suma o integración de la energía incidente en cada hora, tanto los menores valores de las horas tempranas o tardes del día, como los de mayores valores del mediodía.

Con el objetivo de facilitar los cálculos, se considera el caso hipotético de un sol que logre una irradiancia constante de 1 000 W/m<sup>2</sup>, durante un relativo corto tiempo, pero de modo tal que la energía total que incida sobre el metro cuadrado considerado, durante todo el día, fuera igual a la que produce el sol verdadero.

En la figura 4.3 se ha representado el efecto del sol hipotético actuando desde las 9:30 a.m. hasta las 2:30 p.m., es decir, un tiempo total de 5 horas. Gráficamente, las áreas bajo las curvas son iguales, ya que ambas representan la misma energía total incidente

<sup>61</sup> En el caso de Perú, este valor será de 5.5 kWh/m<sup>2</sup> para regiones de clima soleado como Puno, Arequipa, Cuzco, y en regiones donde el cielo es bastante nublado la mayor parte del tiempo como lima, este valor es mucho menor. [http://www.greenet.org/Documentos/Consumo\\_energia\\_INQUIETUDES.pdf](http://www.greenet.org/Documentos/Consumo_energia_INQUIETUDES.pdf)

**Figura 4.3. Distribución horaria de la irradiancia solar en un caso real (1) y otro hipotético (2).**



Fuente: Fuente: Artículo “La hora solar pico”. Dr. Ing. Antonio Sarmiento Sera. Web: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo03.html>.

El tiempo que requiere ese sol hipotético de  $1\,000\text{ W/m}^2$ , será el número de hora solar pico [n (HSP)]. En el ejemplo mostrado resultan 5 HSP.

Por otra parte, la potencia de los paneles fotovoltaicos se especifica en watt pico (Wp), lo cual representa la potencia eléctrica que entrega el panel, cuando la irradiancia sobre él es de  $1\,000\text{ W/m}^2$  (estándar o norma de certificación) con un espectro o composición similar a la radiación solar, y con una temperatura de  $25\text{ }^\circ\text{C}$

Para calcular la energía total incidente en el día del ejemplo y un metro cuadrado, se tienen dos métodos:

- 1.- Irradiación = Área bajo la curva 1.
- 2.- Irradiación = Área bajo la curva 2

Evidentemente, el cálculo es más simple por el segundo método, ya que

$$\text{Irradiación} = (\text{ancho}) \times (\text{alto}) = n (\text{HSP}) \times 1\,000\text{ W/m}^2.$$

Utilizando ahora la unidad kW y precisando que  $n (\text{HSP}) = 5\text{ h}$ .

$$\text{Irradiación} = 5\text{ h} \times 1\text{ kW/m}^2 = 5\text{ kWh/m}^2.$$

Obsérvese que el valor numérico de 5 (en  $\text{kWh/m}^2$ ), es igual al número de hora solar pico. Debe señalarse que esto último es sólo válido con las unidades aquí utilizadas y gracias al valor unitario de  $1\text{ kW/m}^2$ , por lo que al caracterizar la irradiación solar del día analizado, puede hacerse por:  $5\text{ kWh/m}^2$  o 5 HSP.

El objetivo práctico de todo lo anterior se observa al realizar el análisis o cálculo de la energía que produce un panel, a partir de una irradiación solar concreta.

Para calcular la energía eléctrica que produce, por ejemplo, un panel fotovoltaico de 165 Wp, en un día caracterizado por  $5 \text{ kWh/m}^2$ , el procedimiento sería el siguiente:

1.- El valor de  $5 \text{ kWh/m}^2$  se interpreta como 5 HSP.

2.- La energía diaria se calcula por:

Energía diaria = potencia x tiempo.

Energía diaria =  $165 \text{ Wp} \times 5 \text{ h} = 825 \text{ Wh}$ .

El cálculo es correcto, pues los 165 Wp se certificaron con una irradiancia de  $1 \text{ kW/m}^2$ , lo cual coincide con la definición de HSP.

Obsérvese que en este procedimiento no se requiere conocer ni introducir el área del panel, ni su eficiencia (lo cual hubiera sido necesario con el método 2); sólo se requiere conocer la potencia del panel (en Wp) y la irradiación solar (en  $\text{kWh/m}^2$ ), la cual se interpretará numéricamente en HSP. Todo esto simplifica el proceso.

Debe aclararse para el ejemplo (y en general) que 5 HSP no significa que existan 5 horas de sol. En la figura 4.3 se puede observar que existen unas 12 horas de sol. Las 5 horas se refieren a un sol hipotético de  $1000 \text{ W/m}^2$  que logra, en sólo 5 horas, producir la misma irradiación que logra el sol verdadero en 12 horas.

Por último, puede ilustrarse la capacidad de los 825 Wh al considerar como consumo energético para una escuela primaria rural, sin computadora, el siguiente consumo:

Un equipo de vídeo de 30 W, trabajando 4 horas diarias = 120 Wh.

Un televisor de 80 W, trabajando 4 horas diarias = 320 Wh.

Dos lámparas de 15 W cada una, trabajando 8 horas diarias = 240 Wh.

Pérdidas del sistema (inversor, regulador, baterías, cables) = 20 Wh.

Reserva = 125 Wh.

En el Anexo F, se puede observar el promedio anual de irradiación en el departamento de Piura, dicho valor oscila entre  $5 - 5.5 \text{ kWh/m}^2$ .

#### 4.3.1.4 Cálculo de las horas solares pico (HSP)

Para calcular las HSP en cualquier ubicación del planeta donde se quiera instalar un dispositivo de captación solar, se adjuntan en el Anexo realizado en excel las pestañas "HSP", "Factor k\_1", "Factor k\_2", que nos darán la información necesaria para el cálculo de las HSP. Con una multiplicación sencilla pero que requiere la comprensión conceptual de cada elemento, se explicará el procedimiento a seguir a partir de la ecuación (4.1).

$$\text{HSP} = H * \text{valor de corrección atmosférico} * k * 0.2778 \quad (4.1)$$

- Se toma de la pestaña "Radiación solar" el promedio de los 3 meses con menos radiación solar en  $\text{kWh/m}^2$ , para nuestro caso serían los meses de Junio, Julio y Agosto para la provincia de Piura según la estación Meteorológica UDEP
- Las unidades se transforman de  $\text{kWh/m}^2$  a  $\text{MJ/m}^2$ , multiplicando nuestro promedio obtenido en el punto 1 por 3600 seg/h. Éste valor será el valor H corregido.
- El valor de corrección atmosférico se asumirá igual a 1
- El valor de "k" se toma de acuerdo a la latitud y a la inclinación del colector. En nuestro caso Piura tiene una latitud aproximada de  $-5.22$  que la asumiremos  $-6$  y nuestro colector tendrá una inclinación de  $15^\circ$ , así mismo tomaremos el valor del mes de Junio que es el mes con menor valor de irradiación, por lo que tomaremos el valor de "k" de 1.07, obtenido de la pestaña "Factor k\_2" de nuestro archivo Excel adjunto.

- A este valor se le multiplica por el valor de 0.2778 para igualar las unidades a HSP.

Como resultado se obtiene un valor de 4.7746 HSP para el distrito de Piura en el departamento de Piura, con lo que aproximando este valor a 5, asumiremos 5 HSP para nuestra localidad y para el presente trabajo.

#### 4.4 Resultados

Los cálculos numéricos y resultados se presentan en un Anexo realizado en excel adjunto, pero en esta sección se mostrará su descripción.

##### 4.4.1 Temperaturas

En la tabla 4.4 se muestran las temperaturas representativas para nuestro análisis térmico.

Se debe tener en cuenta que la temperatura de ingreso al colector,  $T_i$ , es de  $25^\circ$ , paulatinamente mientras el agua va circulando por el colector, la temperatura del volumen de agua en el tanque acumulador se va incrementando, lo que nos conlleva a un ingreso de fluido que posee una temperatura ligeramente mayor a los  $25^\circ\text{C}$ , el sistema solar está diseñado tal que al finalizar el período de funcionamiento, el volumen total de agua tendrá la temperatura de  $50^\circ\text{C}$ .

Debido a que los cálculos se han planteado con un volumen de 10000 litros de agua de consumo, se asume que recirculará esa cantidad total de litros de agua diariamente, sólo de esta manera se alcanzarán los  $50^\circ\text{C}$  de temperatura en todo el volumen de agua. De no consumirse por completo esta cantidad de agua al día y considerando un buen aislante térmico en el tanque acumulador, el agua que ingresará al colector en la siguiente jornada ingresará con una temperatura mayor a los  $25^\circ\text{C}$ , lo que nos permitiría alcanzar una temperatura al final del período de funcionamiento del sistema mayor a  $50^\circ\text{C}$ .

**Tabla 4.4. Temperaturas**

<b>Temperaturas</b>	
Temp. ingreso a colector ( $T_i$ ) ( $^\circ\text{C}$ )	25
Temp. salida de colector ( $T_s$ ) ( $^\circ\text{C}$ )	50
Temp. ambiente ( $T_a$ ) ( $^\circ\text{C}$ )	25.06
Temp. promedio del agua ( $T_p$ ) ( $^\circ\text{C}$ )	37.5

##### 4.4.2 Diseño de parábola

Con los parámetros de diseño realizados en el capítulo 3 se procede a graficar la parábola en la pestaña “GráficaParábola1” del archivo Excel adjunto. Se sabe también que sólo es un segmento de parábola que nos será útil para el diseño de nuestro colector, asimismo este tramo de parábola será rotado un ángulo determinado visto ya anteriormente, para finalmente obtener el perfil de nuestro colector CPC.

Para hallar el segmento de parábola a utilizar, se necesita en principio identificar las funciones de las secciones que luego se intersectarán con la finalidad de ubicar el punto inicial y el punto final de la sección útil de parábola.

Del capítulo 2 y de la subsección 2.4.6 específicamente, se tienen dos condiciones que definirán la sección útil de parábola y que claramente se pueden observar en la figura 2.20, de dicho capítulo.

- El punto inicial del segmento útil de parábola se encontrará en la intersección de dos secciones, la primera pertenece a una *circunferencia 2* de radio  $2a'$  con centro en el foco de parábola,  $F$ , y la segunda pertenece a la parábola con vértice en la coordenada (0,0), foco en  $F$  y abierta hacia la zona de los  $Z$ 's positivos. Al punto intersectado se le ha denominado  $Q$ .
- El punto final del segmento útil de parábola se encontrará en la intersección de dos secciones, la primera pertenece a una *circunferencia 3* de radio  $r_m$  con centro en el foco de parábola,  $F$ , y la segunda pertenece a la parábola con vértice en la coordenada (0,0), con foco en  $F$  y abierta hacia la zona de los  $Z$ 's positivos. Al punto intersectado se le ha denominado  $P$ .

En la tabla 4.5 se muestran las ecuaciones de las secciones.

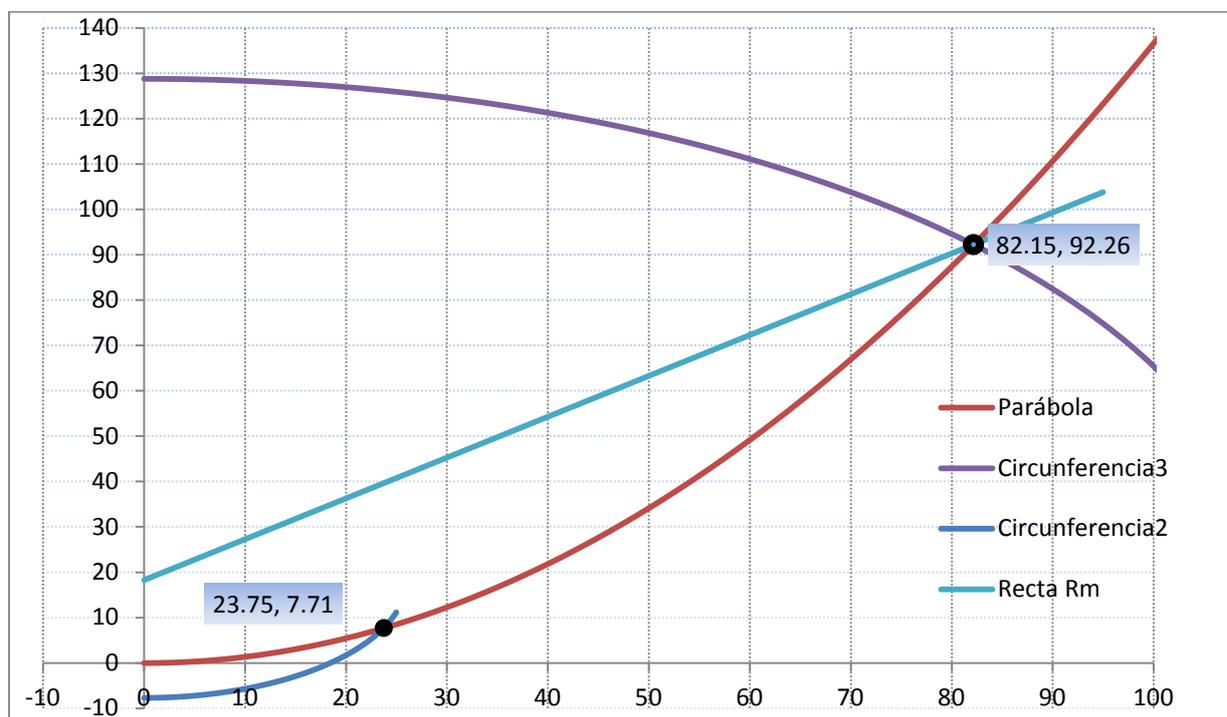
**Tabla 4.5. Ecuaciones de las secciones a intersectar**

Superficie	Vértice		Foco		Centro		Radio (cm.)	Ecuación
	X	Y	X	Y	X	Y		
Parábola	0	0	0	18.28	-	-	-	$Y = \frac{X^2}{(4 * 18.287576)}$
Circunferencia 2	-	-	-	-	0	18.28	26	$Y = \frac{\sqrt{(26^2 - X^2)}}{+ 18.287576}$
Circunferencia 3	-	-	-	-	-	18.28	110.54	$Y = \frac{\sqrt{110.5426^2 - X^2}}{+ 18.287576}$

En la figura 4.4 se puede observar las dos condiciones expuestas anteriormente. El punto inicial y el punto final del segmento útil de parábola son localizados por los dos puntos negros. El punto inicial es hallado en la coordenada (23.75, 7.71) producto de la primera condición, es decir de la intersección de la parábola (color rojo) con la circunferencia 2 (color azul), mientras que el punto final es hallado en la coordenada (82.15, 92.26) producto de la segunda condición, es decir de la intersección de la parábola (color rojo) con la circunferencia 3 (color morado). Ambos puntos determinan el segmento útil de parábola.

La recta  $r_m$  representa el radio de la circunferencia 3 (color morado), que tiene su centro en el foco de coordenadas (0,18.28).

Figura 4.4: Intersección de secciones.



Información que será útil para realizar cálculos para el diseño se presenta en la pestaña “*DiseñoCPC*” de nuestro archivo Excel adjunto. En la tabla 4.6 se resume esta información.

Tabla 4.6: Diseño de parábola

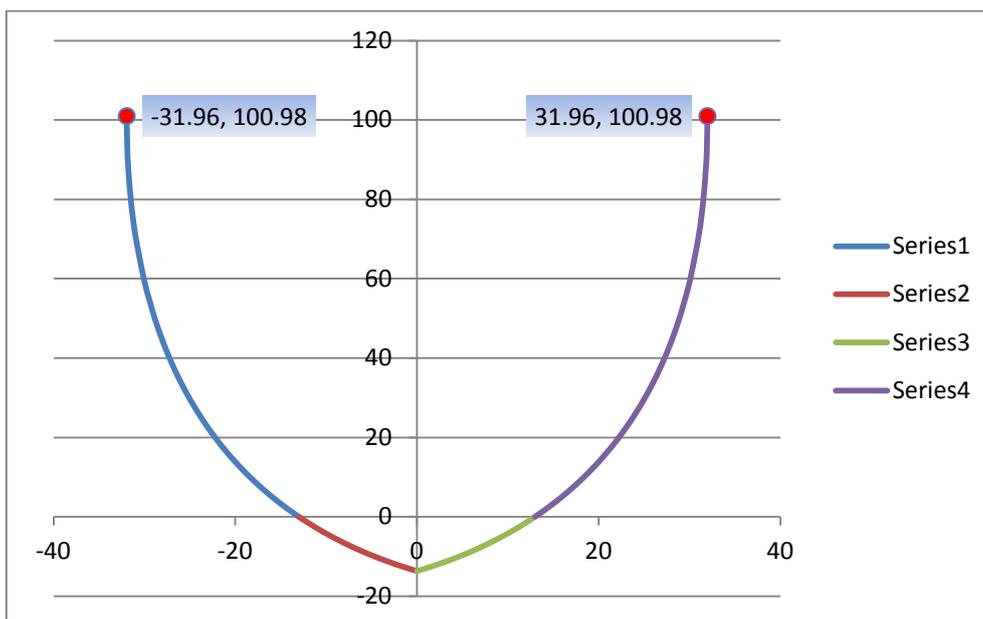
Diseño de parábola	
Distancia del vértice al foco (cm.)	18.28757
Apertura de la parábola en el pto. <i>QI</i> .Coordenada X (cm.)	23.75218
Longitud de línea de la parábola en el intervalo $0 < X < 23.75218$ (cm.)	91.1531
Apertura de la parábola en el pto. <i>PI</i> .Coordenada X (cm.)	82.14915
Longitud de línea de la parábola en el intervalo $0 < X < 82.14915$ (cm.)	195.1285
Radio menor de la parábola (distancia del foco al pto. <i>QI</i> ) (cm).	26
Radio mayor de la parábola: $r_m$ (distancia del foco al pto. <i>PI</i> ) (cm.)	110.54256

#### 4.4.3 Superficie del colector cilindro parabólico compuesto

Con el segmento de parábola útil identificado se procederá a obtener la función del perfil que describirá el colector CPC cilíndrico en el sistema de coordenadas de los ejes  $x$  y  $z$ , haciendo uso de relaciones de transformación de traslación de ejes descritas anteriormente en la subsección 2.4.7.

En la figura 4.5 se ha graficado el perfil del CPC

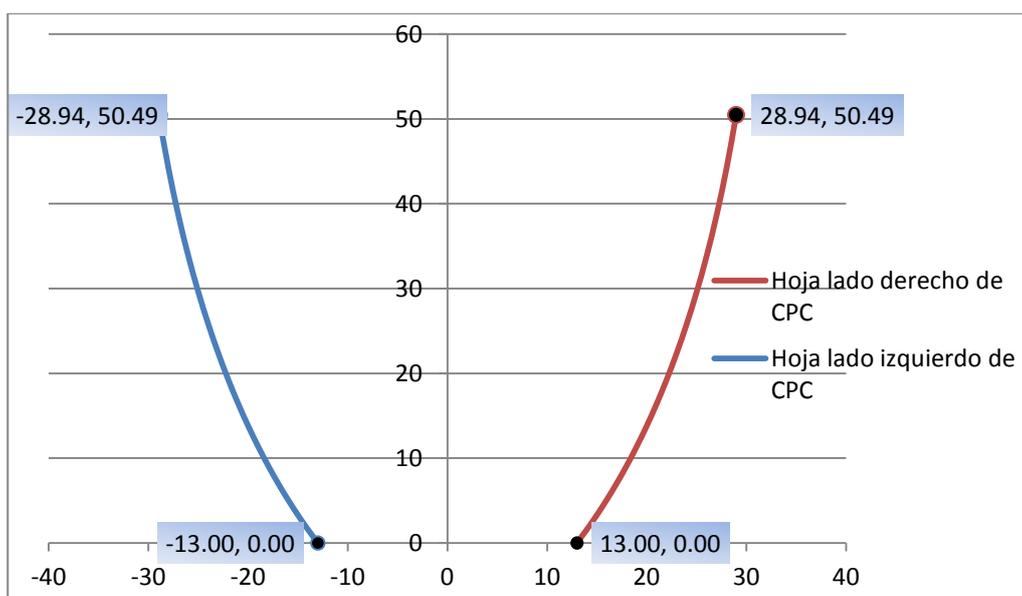
**Figura 4.5: Perfil del colector CPC completo.**



Como se puede observar la función graficada no es una parábola, esto es debido a que la función es una expresión que consideró tan sólo el segmento de parábola útil para la descripción del perfil del CPC. Los segmentos de color verde y rojo no pertenecen al perfil del colector, se han graficado con la finalidad de dar a notar que no se forma un vértice de parábola.

En la figura 4.6 se muestra el perfil del colector CPC sometido al proceso de truncamiento de parábola, se aprecia una altura de 50.49 cm., así como las coordenadas del punto inicial y final de los segmentos de parábola. De igual manera se puede deducir la longitud de entrada y la longitud de salida del colector CPC.

**Figura 4.6. Perfil del CPC truncado**



En la tabla 4.7 se ha plasmado las características de la superficie del colector cilindro parabólico.

**Tabla 4.7. Detalles de la superficie del colector cilindro parabólico compuesto**

<b>Diseño del colector CPC cilíndrico</b>	
Longitud inicial de semiapertura de entrada del colector CPC (a)(m.)	0.31961
Longitud inicial de semiapertura de salida del colector CPC (a')(m.)	0.13
Altura inicial del colector CPC (L) (m)	1.00985
Long. modificada de semiapertura de entrada del colector CPC truncado (a)(m.)	0.28944
Long. modificada de semiapertura de salida del colector CPC truncado (a')(m.)	0.13
Altura modificada del colector CPC truncado. Altura a L/2.. (m.)	0.50492
Largo (L) (m)	2
Longitud de línea total del perfil de parábola a usar para el diseño del colector CPC (cm.)(Longitud de línea de los dos segmentos parabólicos)	99.7556
Area desarrollada de la superficie del colector CPC a L/2 (m <sup>2</sup> )	1.99511
Area desarrollada ahorrada al optimizar la altura de L a L/2 (m <sup>2</sup> )	2.1639
Porcentaje de área desarrollada ahorrada al optimizar la altura a L/2	52.03%
Semiángulo de aceptación de la parábola a una altura de L ( $\theta_c$ °)	24
Angulo de aceptación de la parábola a una altura de L ( $2\theta_c$ °)	48
Semiángulo de aceptación de la parábola a una altura de L/2 ( $\theta_c$ °)	39.71669
Angulo de aceptación de la parábola a una altura de L/2 ( $2\theta_c$ °)	79.43338
Concentración geométrica del sistema de concentración con $\theta_c = 24^\circ$	2.45859
Concentración geométrica del sistema de concentración con $\theta_c = 39.71669^\circ$	1.56496

La información suministrada es una comparación entre las características del colector CPC completo y el colector CPC truncado, dándonos una idea de los cambios en las dimensiones del colector al someterlo al proceso de truncamiento.

#### 4.4.4 Superficie reflectora

La superficie reflectora elegida es espejo que se cortará en segmentos con forma de tiras y con longitud de 2 metros, para acoplarse a las hojas de fierro en forma de parábolas. Para los primeros 30 cm. de longitud de parábola desde la base, se cortarán tiras de espejo con un ancho de 3 cm. ya que como sabemos en toda parábola dicha zona tiene una curvatura pronunciada. En la parte superior de las hojas en forma de parábola se tendrán tiras de espejo con un espesor de 5 cm. por la poca curvatura que se presenta en esta sección. De esta manera las tiras de espejo seguirán la curvatura de la parábola del colector CPC y concentrarán la radiación en la superficie absorbadora.

Mayor detalle de la superficie reflectora se presenta en la tabla 4.8.

**Tabla 4.8. Detalles de la superficie reflectora del CPC**

<b>Datos de la superficie reflectora del colector CPC</b>	
Tipo de material	Espejo
Area de la superficie reflectora del colector. (m <sup>2</sup> .)	1.99511
<b>Tiras de vidrio en los primeros 70 cm. de la parábola para el CPC</b>	
Ancho (cm.)	3
Espesor (mm.)	4
Largo (m.)	2
Número de piezas de vidrio para el colector CPC (ambos lados)	20
<b>Tiras de vidrio en la parte superior del colector CPC (menos curva)</b>	
Ancho (cm.)	5
Espesor (mm.)	3
Largo (m.)	2
Número de piezas de vidrio para el colector CPC (ambos lados)	8
<b>Propiedades del material</b>	
Absorbancia ( $\alpha$ )	Espejo 0.02
Reflectancia ( $r$ )	0.97
Transmitancia ( $\tau$ )	0.01
Emitancia de la superficie cilindro-parabólica	0.94

#### 4.4.5 Superficie receptora

La superficie receptora como se ha mencionado anteriormente contará de 3 tuberías de cobre dispuestas en paralelo en la base del colector cilindro parabólico compuesto.

El tubo de cobre, por su durabilidad, su propiedad anticorrosiva y sus propiedades térmicas, es la mejor elección para este tipo de sistemas.

Los tubos tipos K, L, M y el tubo de gas medicinal se especifican por medio de diámetros estándar ASTM, con un diámetro exterior real siempre 1/8'' mayor que la indicada en el tamaño estándar. Cada tipo representa una serie de diámetros con diferentes espesores de pared. El tubo tipo K tiene paredes más gruesas que el tipo L, y las paredes del tipo L también son más gruesas que las tipo M, para cualquier diámetro dado. Los diámetros interiores dependen del tamaño del tubo y del espesor de pared.

En el Anexo B, se presentan las dimensiones de tubos K, L, y M.

En los motivos expuestos se basó la elección del material para las tuberías receptoras. Como las tuberías de cobre receptoras estarán apoyadas en el área de salida del colector, y éste tendrá un ángulo de inclinación de  $\beta=15^\circ$ , dichas tuberías deberán estar fijadas a la estructura mediante abrazaderas

En la tabla 4.9 se muestran las características de la superficie receptora que se utilizará para nuestro colector CPC.

**Tabla 4.9. Características de la superficie receptora**

<b>Datos de Superficie Receptora</b>	
Tipo de material	Cobre
Diámetro exterior del receptor (m)	0.05398
Espesor del receptor (m)	0.00178
Diámetro interior del receptor (m)	0.05042
Longitud de cada receptor (m)	2
Número de tuberías por colector	3
<b>Propiedades del material</b>	
Absorbancia ( $\alpha$ )	0.95
Emisividad ( $\epsilon$ )	0.05
Reflectancia ( $r$ )	0.16
Conductividad térmica (K) (W/m.°C)	401

#### 4.4.6 Otros componentes a considerar<sup>62</sup>

El sistema de calentamiento posee otros componentes que no han sido mencionados anteriormente, pero que ayudarán para la mejor eficiencia del sistema. Estos componentes no son indispensables si se desea una instalación sencilla, dependiendo el uso de éstos, del tipo de aplicación, del volumen de flujo que se quiera procesar, de la variación de temperatura que ese quiera obtener y de la eficiencia del sistema que se requiera.

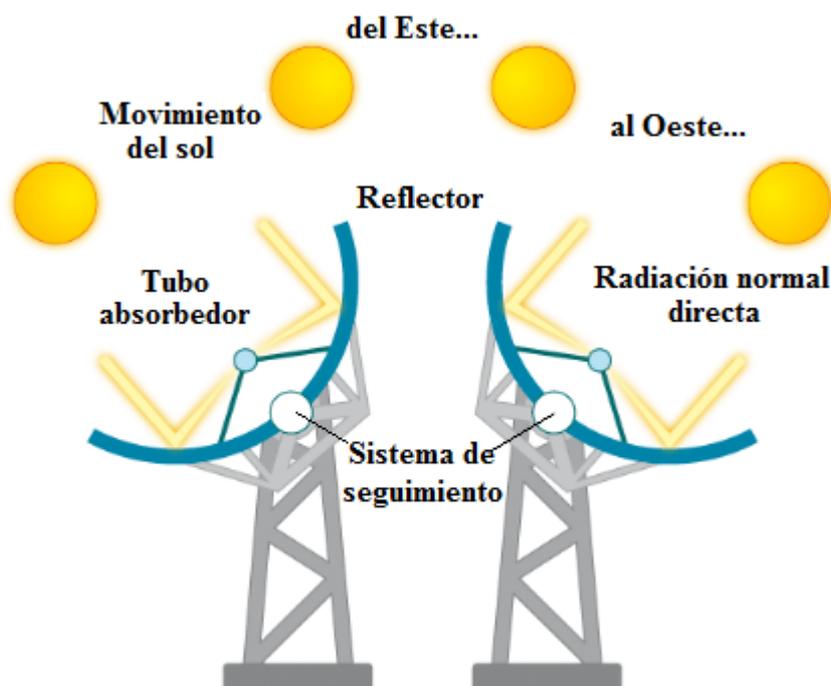
##### 4.4.6.1 Sistema de seguimiento

Un mecanismo de seguimiento solar debe ser confiable y permitir rastrear el sol con cierto grado de exactitud, regresar al colector a su posición original al final del día o durante la noche, y también seguir al sol durante los períodos de nubosidad intermitente.

El sistema del colector CPC aprovecha la radiación solar directa al máximo si existe un mecanismo de seguimiento solar automatizado que siga la trayectoria del sol. Este sistema consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del colector alrededor de un eje de seguimiento. En la figura 4.7 se puede observar este sistema.

<sup>62</sup> La subsección 4.4.6, en su mayoría, se desarrolló en base a la información de la fuente bibliográfica: Aplicaciones del cobre. Componentes de las instalaciones solares térmicas. Procobre.

Figura 4.7. Seguimiento solar típico de un colector



Fuente: Bibliografía [30]. Página 66.

#### 4.4.6.2 Cubierta<sup>63</sup>

Como se explicó en secciones anteriores, su función principal es brindar el efecto invernadero y reducir las pérdidas de energía por convección en la tubería absorbente, por el viento principalmente. Su propiedad física prioritaria es su alta transmitancia. La transmitancia es la capacidad de un cuerpo transparente en permitir el paso de los rayos incidentes, se expresa en forma en forma porcentual. La transmitancia depende de la longitud de onda del rayo incidente, en vidrios normales es muy transparente o permite el paso libre para la radiación de onda corta y es opaca para la radiación de onda larga o infrarroja.

Existe un comportamiento de filtro para los rayos infrarrojos, esta filtración depende básicamente de la cantidad de óxido de hierro que lo contiene<sup>64</sup> si su concentración es alta, mayor será su absorción del calor y por ende conducirá calor en su sección transversal produciendo pérdidas hacia la atmósfera, para el diseño se requiere que el vidrio no se caliente por filtraciones de calor de longitud de onda larga sino por el contrario, en permitir únicamente el paso de los rayos incidentes. El plástico posee propiedades adecuadas para este diseño, pero su costo es elevado. Para intensificar el calor proveniente de la radiación solar, los colectores solares pueden ser construidos de hasta tres cubiertas transparentes y/o superficies selectivas.

El material de la cubierta transparente debe ser vidrio normal o templado (para evitar degradaciones) y de espesor no inferior a 3 mm. (para evitar roturas).

La distancia entre el absorbedor y la cubierta transparente debe ser entre 2 y 4 cm.

<sup>63</sup> La subsección 4.4.6.2 se ha desarrollado en base a la información de la bibliografía [29]. Página 35.

<sup>64</sup> El óxido de hierro se visualiza en el vidrio en las secciones transversales de corte por la presencia de coloración verde-agua, entre mayor sea la coloración, más contenido de hierro tendrá el vidrio.

El número de cubiertas tiene una relación directamente proporcional con la elevación de temperatura del fluido. En la tabla 4.10 y de una forma referencial, se pueden obtener los incrementos de temperatura del fluido en base al número de cubiertas o superficies selectivas puestas en el colector.

**Tabla 4.10. Incremento de temperatura del fluido obtenido según el número de cubiertas.**

	$\Delta T$ [°C]	$\Delta T$ [°F]
Sin cubierta	5	9
1 cubierta	35	63
2 cubiertas o 1 cubierta con una superficie selectiva	55	100
3 cubiertas o 2 cubiertas con una superficie selectiva	80	144

Fuente: Bibliografía [29]. Página 36.

#### 4.4.6.3 Acumulador

El diseño de los acumuladores deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Forma y disposición del depósito
- Resistencia del conjunto a la máxima presión y temperatura
- Tratamiento interno de materiales en contacto con agua a una alta temperatura.
- Aislamiento y protección para evitar pérdidas de calor
- Situación de conexiones de entrada y salida
- Medidas para favorecer la estratificación y evitar la mezcla de agua fría con caliente
- Previsión de corrosiones y degradaciones

Los principales problemas encontrados en el funcionamiento de los depósitos acumuladores de agua caliente son:

- Mermas de rendimiento por excesivas pérdidas de calor, generadas por un aislamiento defectuoso o por flujo inverso durante la noche
- Pérdidas de rendimiento por la aparición de caminos preferentes del fluido, motivadas por un diseño defectuoso de las conexiones de entrada y salida
- Degradación del tratamiento de protección interior y perforación del tanque por corrosiones de las paredes internas.

Los principales problemas de corrosión se producen por efecto del exceso de temperatura, la aparición de pares galvánicos y por el oxígeno y sales disueltos en el agua.

El exceso de temperatura es difícil de prever en instalaciones por termosifón, por lo que se recomienda utilizar diseños superiores a 70 u 80 litros por metro cuadrado de captador.

Para nuestro colector, el volumen final de los acumuladores serán calculados con un factor de seguridad de 1.3. Esto le dará holgura adicional al acumulador para que pueda almacenar la siguiente tercera parte del fluido.

Volumen del depósito = Volumen de fluido (litros) \* Factor de seguridad del acumulador

Volumen del depósito para 10000 litros = 10000 \* 1.3 = 13000 litros

Volumen del depósito para 100 litros =  $100 * 1.3 = 130$  litros

#### 4.4.6.4 Intercambiador

Se utiliza para evitar incrustaciones calcáreas en captadores, para eliminar posibles problemas de corrosión, para permitir el uso de anticongelante como sistema anti-helada o para usar colectores con presión de trabajo inferior a la red.

Los intercambiadores habitualmente utilizados, incorporados al acumulador son:

- Intercambiadores sumergidos en el interior del depósito, serpentín, horquilla y anular
- Intercambiadores de calor constituidos por una doble envolvente del depósito.

Los intercambiadores de calor quedan caracterizados por la potencia térmica, su efectividad (o rendimiento térmico) y la pérdida de carga. Para los intercambiadores incorporados en el depósito, los factores de potencia térmica y rendimiento se suelen utilizar de forma global y transformado en metros cuadrados de superficie útil de intercambio.

La superficie útil de intercambio representa la superficie total del intercambiador que está en contacto con el agua del acumulador.

#### 4.4.6.5 Bomba circuladora

La bomba circuladora se utiliza en las instalaciones de circulación forzada para producir el movimiento de fluido entre captadores y acumulador.

Las bombas se caracterizan por las condiciones de funcionamiento representadas, para un determinado fluido de trabajo, por el caudal volumétrico y la altura de impulsión o manométrica.

En cuanto a su instalación, las bombas en línea se instalarán con el eje de rotación horizontal y con espacio suficiente para que el conjunto motor-rodete pueda ser fácilmente desmontado. Las tuberías conectadas a las bombas en línea se soportarán en correspondencia de las inmediaciones de las bombas. El diámetro de las tuberías de acoplamiento no podrá ser nunca inferior al diámetro de la boca de aspiración de la bomba. Las válvulas de retención se situarán en la tubería de impulsión de la bomba.

#### 4.4.6.6 Válvulas

Las válvulas se identifican por las siguientes características funcionales:

- Caudal, dependiente de la superficie libre de paso.
- Pérdida de presión a obturador abierto, dependiente de la forma del paso del fluido
- Hermeticidad de la válvula a obturador cerrado o presión diferencial máxima, que depende del tipo de cierre y de los materiales empleados
- Presión máxima de servicio, que depende del material del cuerpo de válvula, las dimensiones y el espesor del material.
- El tipo y diámetro de las conexiones, por rosca, bridas o soldadura.

La elección de las válvulas se realizará, de acuerdo con la función que desempeñan y las condiciones extremas de funcionamiento (presión y temperatura). Pudiendo ser de aislamiento

(válvulas de esfera), de equilibrado de circuitos (válvulas de asiento), de vaciado (válvulas de esfera o macho), de llenado (válvulas de esfera), de purga de aire (válvulas de esfera o de macho), de seguridad (válvulas de resorte) o de retención (válvulas de disco o de placeta)

No se permitirá el uso de las válvulas de compuerta.

#### **4.4.6.7 Equipos de energía auxiliar**

El sistema de energía auxiliar debe ser diseñado y calculado para abastecer la demanda completa de agua caliente y, en ese sentido, debe considerarse como un sistema convencional de calentamiento de agua. Su acoplamiento a una instalación solar exige la toma en consideración de los siguientes aspectos:

- La temperatura de salida del acumulador solar puede variar en un amplio margen.
- El sistema de calentamiento auxiliar no debe interferir el proceso de aprovechamiento de la radiación solar
- Debe optimizarse el acoplamiento para conseguir el máximo rendimiento del conjunto.

Para ello es necesario que el agua, en el sentido de circulación, se caliente primero en el acumulador solar y después pase por el sistema auxiliar antes de ser consumida.

#### **4.4.6.8 Equipos de regulación y control**

En instalaciones con circulación forzada, se utiliza el control diferencial de temperaturas para activar la bomba en función de las temperaturas de salida de colectores y del acumulador. En ningún caso las bombas estarán en marcha con diferencias de temperaturas menores de 2°C ni paradas con diferencias superiores a 7°C. El sistema de control incluirá señalizaciones luminosas de la alimentación del sistema del funcionamiento de bombas. El rango de temperatura ambiente de funcionamiento del sistema de control será, como mínimo, entre -10 y 50°C.

En el diseño de la instalación debe cuidarse la ubicación de sondas de forma que se detecten exactamente las temperaturas que se desean, instalándose los sensores en el interior de vainas y evitándose las tuberías separadas de la salida de los captadores y las zonas de estancamiento en los depósitos.

En el Anexo G se muestra un sistema gráfico implementado con estos componentes.

En el Anexo H se muestra un sistema de calentamiento de agua casero.

### **4.5 Resultados de las pérdidas térmicas y eficiencia**

Con los detalles geométricos de los elementos que conforman al colector CPC y teniendo en cuenta las características térmicas y ópticas de los materiales utilizados en su construcción se procederá a hallar las pérdidas térmicas y la eficiencia del colector CPC. En la pestaña “Pérdidas CPC” de nuestro archivo Excel adjunto se ha calculado paso a paso dichos conceptos. En la tabla 4.11 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 4.11 Resultados obtenidos del análisis térmico.**

<b>Análisis térmico del CPC</b>	
Volumen de fluido (litros)	10000
Concentración geométrica del sistema de concentración con $\theta_c=39.716^\circ$	1.5650
S (Radiación solar total absorbida por área) ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )	1.0441
$h_r$ (Coeficiente de transferencia de calor por radiación) ( $\text{W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	0.3395
$h_w$ ( Coeficiente de transferencia de calor por convección) ( $\text{W}/ \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ )	42.9231
$h_{fi}$ ( Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el receptor al fluido ) ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	678.5038
$U_L$ . Coeficiente global de pérdidas térmicas hacia el exterior. ( $\text{W}/ \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	43.2625
$U_o$ . Coeficiente global de transferencia de calor ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	40.4904
$F'$ . Factor de eficiencia del colector	0.9359
$F''$ . Factor del flujo del colector	0.9911
$F_R$ . Factor de transferencia de calor	0.9276
$Q_u$ (Potencia útil) (W)	781.1256
$Q_d$ (Potencia demandada) ( $\text{kW-h}/\text{día}$ )	288.4671
$\eta_o$ (Eficiencia óptica del colector)	0.6278
$\eta_c$ (Eficiencia del colector)	0.6461
Número de colectores ( $N_c$ )	25

En la tabla 4.11 se observa que se necesitarán 25 colectores en serie para elevar la temperatura de 10000 litros de agua en  $25^\circ\text{C}$ , en un período de 5 horas por día.

De una manera más práctica, en el supuesto caso que sólo se utilice un colector con este diseño, los resultados se muestran en la tabla 4.12.

**Tabla 4.12. Análisis térmico para un solo colector .**

<b>Resumen</b>	
Volumen de fluido por colector (litros)	100.00
Concentración geométrica del sistema de concentración con $\theta_c = 39.7166^\circ$	1.5650
S ( Radiación solar total absorbida por área ) ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )	1.0441
$h_r$ (Coef. TR por radiación) ( $\text{W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	0.3395
$h_w$ ( Coef. TR por convección ) ( $\text{W}/ \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ )	42.9231
$h_{fi}$ (Coeficiente TR por Convección desde el receptor al fluido) ( $\text{W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	17.0432
$U_L$ . Coef global de pérdidas térmicas hacia el exterior. ( $\text{W}/ \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	43.2625
$U_o$ . Coef global de transferencia de calor ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	11.6365
$F'$ . Factor de eficiencia del colector	0.2690
$F''$ . Factor del flujo del colector	0.7822
$F_R$ . Factor de transferencia de calor	0.2104
$Q_u$ ( Potencia útil ) ( W )	177.1760
$\eta_o$ ( Eficiencia óptica del colector )	0.6278
$\eta_c$ ( Eficiencia del colector )	0.1466
$Q_d$ (Energía demandada) ( kW - h / día )	2.8847
Número de colectores ( $N_c$ )	1.00

En la tabla 4.12, se puede observar que un sólo colector de estas características podrá elevar la temperatura con un salto térmico de 25°C en un período de 5 horas una cantidad de 100 litros al día, cantidad que se adecúa para desempeñar la aplicación de una terma solar

#### 4.5.1 Cálculo del consumo de agua caliente y del patrón de demanda

Para establecer el tamaño óptimo de una terma solar para determinados clientes, primero se necesita conocer la demanda de agua caliente. Para calcular el consumo de agua caliente y el patrón de demanda de una casa hotel o empresa es preferible utilizar medidores de energía (para medir el flujo y la temperatura del agua fría y caliente) durante un período de un año aproximadamente.

El resultado de esta medición permite un cálculo detallado de la demanda y del patrón de demanda (por día, por mes y por año).

Si no fuera posible usar medidores de energía, por lo menos se puede medir el consumo de agua caliente de una semana, con lo cual se podrá calcular el consumo por mes y por año.

Otra opción para calcular el uso de agua caliente en un hogar es analizar mensualmente recibos de agua. Para el promedio de familias, la cantidad de agua caliente utilizada constituye aproximadamente el 25% del consumo total de agua.

Si ninguno de estos métodos es factible, la demanda será calculada mediante reglas básicas, utilizando la tabla 4.13 para demanda de agua caliente (LPD = litros por día) a 50°C.

**Tabla 4.13. Cantidad de agua caliente usada por diferentes sectores**

<b>Uso doméstico</b>	- Baños - Cocina y lavado	- 25 LPD/persona - 5 LPD/persona
<b>Hoteles</b>	- Por cama personal	- 30 LPD
<b>Hospitales</b>	- Por cama personal	- 35 LPD
<b>Cafeterías</b>	- Por turno	- 5 LPD/persona

Fuente: Energía Solar Térmica. Manual técnico para termas solares. M.Sc.Ing.Carlos Orbeagozo / Ing. Roberto Arivilca. 2010. Green Energy Consultoría y Servicios SRL.

#### 4.6 Mantenimiento del equipo<sup>65</sup>

Este tipo de sistemas solares tienen un bajo coste de mantenimiento, por lo que este punto se limitará únicamente a exponer dicho procedimiento.

<sup>65</sup> Esta subsección se ha elaborado con la información de la fuente bibliográfica [29]. Página 144.

#### **4.6.1 Mantenimiento predictivo**

En cada recarga se debe verificar el estado de la cubierta (en caso tenga), el estado de los canales de recolección, el estado de la estructura soporte y el estado del exterior del equipo

#### **4.6.2 Mantenimiento preventivo**

Semanalmente se debe realizar una limpieza general para evitar acumulación de suciedades tanto en la cubierta (en caso utilice cubierta) como en la estructura.

Cada 3 meses revisar el estado de la pintura exterior y verificar zonas afectadas por corrosión (recomendado limpiar y pintar), realizar limpieza general

#### **4.6.3 Mantenimiento correctivo**

Anualmente limpiar zonas afectadas por corrosión y pintar, esto alargará la vida útil del equipo.

## Capítulo 5

### Análisis económico y conclusiones

#### 5.1 Introducción

Es necesario realizar un estudio económico financiero del presente trabajo, ya sea para su materialización en un proyecto aislado o quizá para su fabricación en serie de este tipo de colectores. El análisis económico nos permitirá medir la rentabilidad de este tipo de dispositivo con las características propias ya detalladas anteriormente.

Los materiales seleccionados para la construcción del colector CPC se pueden encontrar fácilmente en el mercado local, pudiendo ser adquiridos a un precio no muy alto en comparación a otros materiales también usados en este tipo de equipos, asimismo estos materiales cumplen con las exigencias que se requieren para cada una de sus aplicaciones.

Se necesita establecer un cronograma de inversiones, los estados financieros de ganancias, pérdidas y flujos de caja, que es donde se detalla el comportamiento que tendrá el dinero desde que se decide realizar la inversión, hasta su respectiva proyección que tendrá durante todos los años de vida útil del proyecto.

Cabe resaltar que para este tipo de sistemas el costo de mantenimiento es bajo y sencillo de realizar.

Por otro lado por la naturaleza de la energía de este tipo de dispositivos de energía solar, está de más decir que no existe costo alguno por el consumo de la energía proveniente del sol. En cuanto al medio ambiente, la forma más barata y adecuada para preservarlo se encuentra en el uso de sistemas basados en las energías renovables, quizá el costo de instalación sea alto pero se compensa con el tiempo de vida útil del sistema.

Un dato importante y motivador que se debe conocer relacionado al uso de las energías renovables, es que por cada megavatio hora de energía aprovechada mediante estos dispositivos, se está evitando la emisión de 400 kg. de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.<sup>66</sup>

---

<sup>66</sup> Información obtenida de la página web: [www.diarioecología.com](http://www.diarioecología.com). Artículo : “España: la energía fotovoltaica ahorra al año unos 1200 millones de toneladas de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera”

## 5.2 Análisis económico

Existen medidas estándar para la construcción de este tipo de dispositivos, tanto en la Unión Europea y EEUU, donde esta tecnología ya se encuentra en el mercado industrial. En este trabajo y como se ha visto en los capítulos anteriores se ha optado por el diseño de las dimensiones para su posterior fabricación si así se diera el caso.

Se debe señalar que el dimensionamiento del colector cilindro parabólico compuesto ha sido realizado tomando en cuenta distintos factores propios del lugar de instalación del equipo, como es el caso de la radiación solar propia del lugar, la latitud del lugar de instalación, así como el costo de fabricación y mantenimiento del colector.

En cuanto al tamaño y peso, se debe mencionar que este dispositivo de forma unitaria ocupará poco espacio con un área de  $1.2 \text{ m}^2$  y con una altura de 1 a 1.5 m. dependiendo ambas medidas de las condiciones de instalación exigidas por el usuario en cuanto a la aplicación del dispositivo. Por ser un colector estacionario con un semiángulo de aceptación,  $\theta_c$ , igual a  $24^\circ$ , y por haberse sometido al proceso de truncamiento que en sí, este proceso prioriza el ahorro de casi el 50% del material utilizado, el colector no tendrá mucho peso por los materiales seleccionados. No obstante a esto, el material utilizado en la construcción de las hojas que soportarán la superficie reflectora es fierro de 1/8" de espesor, que ya de por sí tiene un bajo peso en comparación con otras planchas. En el Anexo C se puede observar distintos espesores de planchas de fierro con su respectivo peso.

Si el volumen de fluido calotransportador que se requiere calentar es considerable, se necesitará un conjunto de estos dispositivos dispuestos en serie, lo que lógicamente incrementará el costo. Es por tal motivo que la cantidad de colectores de este particular diseño, dependerá de la demanda energética para elevar la temperatura de un determinado volumen de fluido. Si la demanda energética es baja, y el número de colectores es mayor al número de colectores necesarios, se producirá un sobredimensionamiento produciendo un gasto mayor en la inversión y en el mantenimiento y disminuyendo la eficiencia.

La soldadura de las partes se puede realizar con éxito empleando procedimientos habituales siempre que los consumibles empleados sean los adecuados. Es importante mantener la limpieza y la ausencia de contaminantes por ello se deben evitar los aceites, hidrocarburos y los marcadores de cera para evitar la captación de carbono. Además, la soldadura no debe contener zinc, ni cobre ni ninguna de sus aleaciones. También, deben minimizarse los defectos en la soldadura como mordeduras, salpicaduras, escorias y dispersión de arco eléctrico pues producen puntos potenciales de inicio de corrosión. En soldaduras MIG y TIG, el gas protector no debe contener dióxido de carbono debido a que este se puede descomponer y ocasionar la captación de carbono.

### 5.2.1 Inversión inicial fija y capital de trabajo

En esta parte del análisis, se procede a realizar un cálculo de la inversión requerida para la ejecución del proyecto. Los recursos necesarios para la implementación del sistema, se clasifican en dos grupos: la inversión fija, que incluye los gastos de pre operación y el capital de trabajo que son los gastos requeridos para la operación de la misma.

Se entiende como inversión fija aquello que está constituido por todo el conjunto de bienes y servicios que se requieren durante la etapa de instalación de toda la maquinaria, y que se utilizan durante toda la vida útil del sistema. Dentro de este grupo se debe distinguir dos partes importantes que son la inversión tangible, que es todo lo necesario para poner en

operación el proyecto, pero que es cuantificable, y la inversión intangible, que también es una parte importante dentro de la constitución del sistema, pero que no se puede cuantificar, lo que no se ve a simple vista. Las principales componentes de la inversión tangible están en el terreno, las instalaciones (eléctricas, sanitarias, auxiliares), la maquinaria y equipo a comprar, y las piezas de manufactura; y lo que constituye la inversión intangible es: el estudio técnico del diseño del dispositivo, el costo por la mejora implementada en la maquinaria (innovación), gastos de constitución, gastos notariales.

Se entiende por capital de trabajo a lo que constituye todos los recursos, tanto para financiar el sistema total, como para que la instalación final pueda atender sus operaciones de producción, supervisión, mantenimiento, etc., durante todo su tiempo de vida.

Se empezará por realizar una cotización de la construcción del colector como el diseñado, se deberá medir todas las partes que conforman el dispositivo así como conocer el tipo de material y los costos respectivos en el mercado nacional. En la tabla 5.1, se puede observar la lista de materiales para el colector como unidad, con este diseño en particular.

**Tabla 5.1. Descripción de materiales para el colector CPC como unidad.**

Materiales	Detalles del material dispuesto en venta como unidad comercial	Cantidad de material requerido:	Costo de material requerido (soles)
Plancha de fierro lisa de 1/8'' de espesor.	Área comercial de la plancha: 1.2 m. x 2.4 m. = 2.88 m <sup>2</sup> .	2 m <sup>2</sup>	145.90
Superficie reflectora. Espejo semidoble de 3 mm. de espesor.	Área comercial del espejo: 1.8m. x 1.2m. = 2.16m <sup>2</sup>	0.8 m <sup>2</sup>	25.20
Superficie reflectora. Espejo doble de 4 mm. de espesor.	Área comercial del espejo: 1.8m x 1.5m. = 2.7m <sup>2</sup>	1.2 m <sup>2</sup>	97.40
Tubería de cobre tipo L de 2'' de diámetro nominal.	Longitud : 6 m.	3 m	375
Ángulo de 2'' x 1/8''	Longitud : 6 m.	13 m	116.4
Soldadura Cellocord E-6011	1 kg.	1 kg	12.30
Pintura anticorrosiva CPP color amarillo	1 galón. (rinde para 30 m <sup>2</sup> )	1/5 galón (rinde 6 m <sup>2</sup> )	7.8
Base zincromato CPP	1 galón (rinde para 70 m <sup>2</sup> a 1 mil)	1/5 galón (rinde 6m <sup>2</sup> )	10
Esmalte CPP	1 galón (rinde para 30 m <sup>2</sup> )	1/5 galón (rinde 6m <sup>2</sup> )	7.2
<b>Costo total del material por unidad</b>			<b>797.20</b>

Con respecto a la lista de materiales expuestos en la tabla 5.1 se tiene:

- Plancha de fierro lisa de 1/8'' de espesor, para la fabricación de las hojas con forma parabólica. En estas superficies se apoyará la superficie reflectora. Para darle la forma parabólica a estas planchas se necesitará somerterlas al proceso de rolado. El área requerida de las planchas de fierro para las dos hojas de un CPC es  $2\text{m}^2$ .
- El espejo doble de 4 mm. de espesor conforma parte de la superficie reflectora del CPC, este espejo es dividido en tiras con un ancho de 3 cm. y con longitud de 2 m., para luego apoyarse en la parte inferior de las hojas metálicas, ya que dicha parte posee una curvatura mas pronunciada y así acoplarse lo más fielmente posible. El área requerida de este tipo de espejo para las dos hojas de un CPC con este diseño es de  $1.2\text{m}^2$ .
- El espejo semidoble de 3 mm. de espesor conforma parte de la superficie reflectora de un CPC, este espejo es dividido en tiras con un ancho de 5 cm. y con longitud de 2 m., para luego apoyarse en la parte superior de las hojas metálicas y acoplarse a la curvatura lo más fielmente posible. El área requerida de este tipo de espejo para las dos hojas de un CPC con este diseño es de  $0.8\text{m}^2$ .
- Las tuberías de cobre tipo L de 2'' de diámetro nominal desempeñarán el rol de tuberías receptoras de la radiación solar, concentrada por la superficie reflectora. Se ubicarán en la parte inferior del dispositivo, justamente en los focos de ambos perfiles de parábolas (hojas). Por estas tuberías circulará el fluido calotransportador, en nuestro caso agua. El número de tuberías de cobre requeridas de acuerdo a la configuración propuesta es de 3 tuberías de 2 m. de longitud cada una, que se dispondrán en paralelo.
- El ángulo de acero de 2'' x 1/8'' será utilizado en la conformación del marco soporte del colector. La longitud requerida de ángulo de acero de estas dimensiones para nuestro colector será de 13 metros considerando las medidas que se presentan en la figura 3.1 y 3.2.
- La soldadura elegida es Cellocord E-6011. Su arco potente y estable produce depósitos de muy buena calidad. Es aconsejable para uniones a tope y carpintería metálica.<sup>67</sup> La cantidad de soldadura requerida en peso para este trabajo se estima entre el 3% y 5% del peso total de la estructura. Dado que nuestro prototipo CPC, tomando en cuenta la longitud total del ángulo y las planchas de acero a usar, tiene un peso de 49 kg, el peso que se ha considerado utilizar es del 4%, es decir, se necesitará 1 kg. de soldadura.
- La pintura anticorrosiva a aplicar en la estructura soporte puede ser color blanco o amarillo. Ésta tiene el propósito de inhibir la oxidación del material, y proporcionar una superficie que ofrezca las condiciones propicias para ser pintada con otros acabados o esmaltes. Después de aplicar la pintura se aplicará una base de zincromato con un espesor de 3 mils<sup>68</sup>, como un agente extra anticorrosivo, además que favorecerá la adhesión de las siguientes capas de repintado en caso se requiera, finalmente se aplicará una capa de esmalte como capa protectora con un espesor de 6 mil.

---

<sup>67</sup> Para mayor detalle se puede revisar su ficha técnica en la Página web: <http://www.empresasotero.cl/sitio-solda/E6011.pdf>.

<sup>68</sup> 1 mil = 25  $\mu\text{m}$  (micras). 1  $\mu\text{m}$  = 0.000001 m.

**Tabla 5.2. Sistema de colectores cilindro parabólico compuesto. Inversión inicial fija. Modelo económico financiero.<sup>69</sup>**

<b>Inversión inicial tangible</b>			
Requerimientos	Detalles del requerimiento dispuesto en venta como unidad comercial	Cantidad de material requerido:	Costo de material requerido (soles)
Plancha de fierro lisa de 1/8'' de espesor.	Area comercial de la plancha: 1.2 m. x 2.4 m. = 2.88 m <sup>2</sup> .	50 m <sup>2</sup>	-3,648
Superficie reflectora. Espejo semidoble de 3 mm. de espesor.	Área comercial del espejo: 1.8m. x 1.2m. = 2.16m <sup>2</sup>	20 m <sup>2</sup>	-630
Superficie reflectora. Espejo doble de 4 mm. de espesor.	Área comercial del espejo: 1.8m x 1.5m. = 2.7m <sup>2</sup>	30 m <sup>2</sup>	-2,435
Tubería de cobre tipo L de 2'' de diámetro nominal.	Longitud : 6 m.	75 m	-9,375
Ángulo de 2'' x 1/8''	Longitud : 6 m.	325 m	-2,910
Soldadura Cellocord E-6011	1 kg.	25 kg	-308
Pintura anticorrosiva CPP color amarillo	1 galón. (rinde para 30 m <sup>2</sup> )	5 galones	-195
Base zincromato CPP	1 galón (rinde para 70 m <sup>2</sup> a 1 mil)	5 galones	-250
Esmalte CPP	1 galón (rinde para 30 m <sup>2</sup> )	5 galones	-180
Bomba	1 unidad	1 unidad	-1,200
Tanque de almacenamiento de agua	Con capacidad de 13 mil litros de agua.	1 tanque	-44,000
Tanque de descarga de agua a 50 °C	Aislado térmicamente	1 tanque	-55,000
Accesorios hidráulicos	1 válvula check , 1 válvula tipo compuerta, 21 m. de tubería para la absorción y descarga de agua	2 válvulas y 21 m. de tubería	-1,200
Piezas para ensamblaje en general	Sujetadores de tuberías de cobre, otros.	-	-300
Instalación del sistema de bombeo	Bomba, válvulas, tuberías	-	-3,000
Obras civiles (bases)	Bases para los tanques	-	-22,000
Instalación de la red eléctrica	Energía para el funcionamiento de la bomba, el sistema de control y la iluminación	-	-600
<b>Total inversión inicial tangible</b>			<b>-147,231</b>

<sup>69</sup> El costo de los tanques de almacenamiento y descarga, el costo de la instalación del sistema de bombeo y el costo de las obras civiles tuvieron como referencia la fuente bibliográfica [41]. Página 149.

El costo de construcción para un colector con este diseño es de 797.20 soles, tal cual se muestra en la tabla 5.1. Si se quisiera elevar la temperatura de 100 litros de agua a 50 °C en una jornada de 5 horas, será suficiente el empleo de un solo colector con su respectivo sistema hidráulico. En este caso se debe considerar el empleo de un solo tanque, generando la circulación de agua a través del colector por medio del efecto termosifón, lo que disminuiría el costo inicial en el sistema hidráulico.

Al considerar el sistema completo para el aumento de temperatura de 10000 litros de agua mediante colectores, se hará necesario el empleo de dos tanques con una capacidad de 13 mil litros cada uno, una pequeña bomba, y demás accesorios hidráulicos. El sistema contará con 25 colectores del tipo cilindro parabólico compuesto, por lo que se debe realizar una cotización de todo el material necesario, la mano de obra y los diferentes gastos que constituirán la inversión inicial. Esta información se muestra en la tabla 5.2.

- El sistema funcionará por circulación forzada, por lo que se necesitará una bomba que impulse el fluido desde el tanque de almacenamiento de agua hasta el tanque de descarga, con el caudal requerido por el sistema. La bomba es de 1.4 HP, con 3450 rpm y monofásica, y se puede conseguir en la empresa nacional Hidrostral.
- El tanque de almacenamiento de agua es un reservorio de agua vertida directamente de la red de agua potable. Desde este tanque se impulsará el fluido hacia los colectores. Se podría conectar el sistema directamente a la red de agua potable, obviando la construcción de este tanque, así los costos de instalación del sistema disminuirían considerablemente, como desventaja, la confiabilidad de la operación de nuestro sistema se reduciría ya que en caso de un eventual corte del abastecimiento de agua, el sistema dejaría de operar, por no contar con este reservorio.
- El tanque de descarga, tendrá que estar aislado térmicamente para conservar la temperatura del agua, así las pérdidas de calor a través de las paredes del tanque disminuirán o serán insignificantes de acuerdo al aislamiento utilizado. Desde este tanque se proveerá de agua a 50 °C de temperatura para los fines requeridos del consumidor.
- La válvula Check o de retención, impedirá la inversión de la circulación de agua cuando el sistema deje de funcionar. La circulación del líquido en el sentido deseado abre la válvula, al invertirse la circulación esta válvula se cierra.
- La válvula tipo compuerta, se encargará de la apertura total o cierre total del sistema, permitirá la circulación del agua en la operación del sistema e impedirá la circulación del agua cuando el sistema deje de funcionar.
- Por último se deberá tener en cuenta la implementación de un sistema de control, lo que incrementaría el costo de instalación pero nos daría un mejor rendimiento de nuestro sistema. Este estudio no se ha realizado en este trabajo.

Un esquema del sistema de colectores a utilizar constituido por estos elementos es mostrado en el Anexo J.

En la tabla 5.3, se detalla el análisis de inversión inicial fija intangible.

**Tabla 5.3. Inversión inicial fija intangible**

<b>Inversión inicial fija intangible. (Gastos pre-operativos)</b>	
<b>Gastos pre-operativos</b>	<b>Costo (soles)</b>
Estudio técnico / Diseño dispositivo CPC	-35,000
Costo por Mejora / Innovación	-55,000
Gastos por constitución	-350
Gastos notariales	-250
<b>Total inversión inicial intangible</b>	<b>-90,600</b>
<b>Total inversión fija tangible + intangible</b>	<b>-237,831</b>

En la tabla 5.4 se muestra los valores obtenidos del capital de trabajo

**Tabla 5.4. Capital de trabajo (3 meses)**

	<b>Mensual</b>	<b>Trimestre</b>
Planilla (Salarios)	-100	-300
Energía eléctrica	-50	-150
Impuestos municipales	-20	-60
Teléfono	-60	-180
Agua	-205	-615
Artículos de oficina	-10	-30
Artículos de limpieza	-100	-300
<b>Total capital de trabajo</b>		<b>-1635</b>

### 5.3 Conclusiones

Si bien la realización de este trabajo es esencialmente teórica, se han llegado a conclusiones muy importantes en cuanto al diseño y la eficiencia de este tipo de colectores. La factibilidad de proyectos que cuenten con este concentrador como equipo principal hace que se considere al colector cilindro parabólico compuesto como un camino viable tanto económicamente como energéticamente. En resumen se pueden concluir los siguientes puntos:

#### 5.3.1 Aprovechamiento del potencial solar de la ciudad de Piura

Previo a iniciar con la etapa de dimensionamiento del colector, se debe conocer las características de la radiación solar propias del lugar donde se instalará el sistema de colectores.

Por medio de la información proporcionada por la estación meteorológica del radar UDEP, se ha comprobado el gran potencial solar que tiene el departamento de Piura. Mediante los resultados de este trabajo se corrobora teóricamente el beneficio que se puede obtener al aplicar esta tecnología en los diversos procesos industriales de la región, por lo que se debería generar un impulso importante en la mayor investigación de la tecnología termosolar.

Piura posee diversas industrias que podrían fácilmente hacer uso de sistemas de colectores solares, aprovechando su nivel de radiación solar. Aplicaciones como el calentamiento de agua para piscinas y la calefacción de hogares representan los procesos de mayor sencillez, mientras que aplicaciones como para procesos industriales o la generación de energía eléctrica son de mayor complejidad pero realizables.

#### 5.3.2 Realización de un diseño óptimo de un colector CPC de tipo estacionario

Es posible diseñar un colector cilindro parabólico compuesto del tipo estacionario, es decir, sin la necesidad de la instalación de un sistema de seguimiento solar, lo que ocasionaría el incremento de la inversión neta tangible. Si bien el sistema de seguimiento solar proveería al sistema mayor eficiencia en la recepción de los rayos solares, tendría que realizarse un profundo estudio sobre el diseño y construcción de éste, así como la realización de un prototipo, lo que demandaría mayor tiempo y mayor dinero a invertirse en el proyecto. El sistema de seguimiento solar dependerá del ángulo de aceptación con el que se ha diseñado el colector, podría ser construido un sistema de seguimiento que gire constantemente mirando al sol, siguiéndolo continuamente en el tiempo, o podría construirse un sistema de seguimiento que se posicione en distintos ángulos cada cierto tiempo, siguiendo de esta manera la posición del sol. En la tabla 5.7 se muestra la relación existente entre el número de ajustes del ángulo del colector con su respectivo semiángulo de aceptación de radiación solar.

**Tabla 5.7. Ajustes del ángulo del colector. Se requiere un tiempo de colección solar mínimo de 7 horas/día (a excepción del semiángulo de aceptación,  $\theta_c = 5.5^\circ$ , cuyo período de tiempo mínimo de colección = 6.78 horas/día)**

Semi ángulo de aceptación $\theta_c$ (concentración ideal para espejo perfecto)	Tiempo de colección solar. Promedio en todo el año. (horas/día)	Número de ajustes al año	Períodos cortos de ajuste	Promedio de tiempo de colección solar si se ajustara el ángulo del colector diariamente

				(horas/día)
19.5° ( C = 3.0 )	9.22	2	180 días	10.72
14 ° ( C = 4.13 )	8.76	4	35 días	10.04
11 ° ( C = 5.24 )	8.60	6	35 días	9.52
9 ° ( C = 6.39 )	8.38	10	24 días	9.08
8° ( C = 7.19 )	8.22	14	16 días	8.82
7° ( C = 8.21 )	8.04	20	13 días	8.54
6.5° ( C = 8.83 )	7.96	26	9 días	8.36
6° ( C = 9.57 )	7.78	80	1 día	8.18
5.5° ( C = 10.43 )	7.60	84	1 día	8.00

Fuente: Fuente Bibliográfica [24]. Página 98.

La información mostrada en la tabla 5.7 no se ha elaborado en base a un sistema de seguimiento para un colector instalado precisamente en la ciudad de Piura pero se podrá utilizar como una referencia aproximada para un caso práctico. Esta tabla se ha usado especialmente para observar el grado de influencia de un sistema de seguimiento acoplado a un colector. En la tabla 5.7 se ve claramente que un sistema de seguimiento solar incrementaría el período de tiempo de captación de los rayos solares, por lo que se podría aprovechar una mayor cantidad de energía solar. El período de tiempo de ajuste de cada colector, así como su número de ajustes al año, estará directamente relacionado con el semiángulo de aceptación del diseño del colector. A menor semiángulo de aceptación, mayor número de ajustes al año se tendrán que realizar. Como se observa, para un semiángulo de aceptación de 19.5° se necesitarán 2 ajustes al año. Con esta información, se concluye que para un semiángulo de aceptación de 24°, diseño propio de nuestro colector, no se necesitará un sistema de seguimiento solar, por lo que nuestro sistema funcionará de manera estacionaria sin mayor dificultad.

### 5.3.3 Concentración aceptable del colector diseñado

Al ser el colector diseñado, del tipo estacionario, se conseguirá una baja concentración, esto es debido a que no se podrá seguir de manera precisa el movimiento del sol, obteniendo una menor captación de radiación directa en nuestro colector. El proceso de truncamiento influye de dos maneras en la concentración del colector, en primer lugar la disminuye de manera considerable, en un principio la concentración del colector es de 2.46 cuando el semiángulo de aceptación es de 24°, y luego la concentración del colector es de 1.56 después del proceso de truncamiento, en segundo lugar el proceso de truncamiento beneficia ligeramente a la concentración, ya que permite al colector, la captación de mayor radiación difusa, pero por ser una radiación menos influyente, el beneficio es casi imperceptible para este caso.

Se concluye entonces que la concentración del colector podrá no ser alta pero es suficiente para la aplicación que se requiere. Por otro lado la concentración se puede mejorar considerablemente modificando algunos elementos del sistema, como puede ser la

implementación de tubos en vacío como receptores, o la implementación de cubiertas de vidrio en el colector.

### 5.3.4 Un colector del tipo CPC posee ventajas frente a los colectores solares planos

Dado el gran volumen de agua que se requiere procesar será necesario una gran cantidad de colectores del tipo cilindro parabólico compuesto. Como se vio en los resultados del capítulo anterior, se necesitarán 25 colectores con el diseño propuesto en este trabajo, por esta razón será necesaria una amplia extensión de terreno donde poder instalar el sistema de colectores.

Por motivos de comparación y sin ser un tema de estudio que se profundice en esta tesis, se realizó un cálculo aproximado del número de colectores solares del tipo plano (también llamados paneles solares planos) que serán necesarios para obtener el mismo salto de temperatura en la misma cantidad de volumen de agua. Los resultados obtenidos de este dimensionamiento aproximado se encuentran en el Anexo adjunto realizado en Excel, específicamente en la pestaña “*Cálculos paneles solares*”<sup>70</sup>. Como es lógico el área de captación solar del número total de colectores que se necesitará para cualquier aplicación será directamente proporcional al terreno que será necesario para la instalación de éstos.

En la tabla 5.8 se puede ver la comparación correspondiente al área necesaria para la instalación de sistemas de colectores para cada caso.

**Tabla 5.8. Area requerida para cada tipo de colector**

Tipo de colector	CPC	Plano
Número de colectores	25	60
Area de apertura de cada colector (m <sup>2</sup> )	1.16	1.812
Area de apertura total del sistema de colectores (m <sup>2</sup> )	28.95	108.72

No es sólo el ahorro en área de terreno lo que representaría una ventaja frente a los colectores solares planos, como es de suponerse representa un ahorro económicamente significativo para la construcción de los colectores, dado que se necesitarán 25 colectores cilindro parabólicos compuestos frente a 60 colectores solares del tipo plano para este caso en especial.

Se debe entender también que existirá un ahorro en el mantenimiento y en los materiales hidráulicos del sistema solar al disminuir el número de colectores.

Esta diferencia se debe a la mayor concentración de radiación solar existente en los colectores del tipo cilindro parabólico compuesto.

<sup>70</sup> Para el dimensionamiento del panel solar plano se utilizó una hoja en Excel de la fuente bibliográfica: Material de especialización. Introducción a la aplicación de energías renovables. Capítulo 02. Energía Solar Térmica. FUNIBER.

### 5.3.5 Construcción del sistema de colectores solares económicamente viable

Este trabajo se basó en la elaboración de un diseño para un colector de tipo estacionario con la finalidad de economizar costos en la construcción del colector, y de esta manera hacer viable un sistema de colectores para una aplicación práctica. La omisión de un sistema de seguimiento solar representa un ahorro considerable en la inversión inicial. El proceso de truncamiento de las hojas del colector, al reducir su altura a la mitad, también persigue la misma finalidad de reducir costos al reducir el material para su construcción. Asimismo los materiales elegidos para la construcción de los colectores, reúnen las propiedades térmicas y ópticas necesarias para desempeñar la función que se les asignará a cada uno, como partes del colector. Dichos materiales se encuentran fácilmente en el mercado nacional y son de bajo costo, a excepción de las tuberías receptoras que son de cobre y su compra en grandes proporciones origina un costo considerable, pero cuya rentabilidad se obtiene en el tiempo total de operación del sistema..

La vida útil de proyectos de energías renovables, como el de este trabajo, se estima en aproximadamente 25 <sup>71</sup> años, y la recuperación de la inversión exigida por este tipo de proyectos en promedio se empieza aproximadamente a partir del décimo año en teoría.

### 5.3.6 Tecnología amigable con los aspectos medioambientales.

La aplicación práctica del sistema de colectores diseñado en este trabajo es la de elevar la temperatura de cierto volumen de agua, es así que se aprovecha a través de los colectores CPC la energía solar para alcanzar este fin, de esta manera se deja de consumir energía proveniente de plantas convencionales que provocan la emisión de gases por su proceso de combustión, produciendo así el efecto invernadero.

La energía termosolar forma parte del conjunto de energías renovables cuya principal aplicación es la producción de energía eléctrica. Aunque esta aplicación no es tema de este trabajo, se debe mencionar que las consecuencias de la instalación de un sistema de energía renovable ya sea para procesos industriales sencillos como para la generación de energía eléctrica, serán las mismas, evitar la contaminación del medio ambiente.

La gran ventaja de la energía solar termoeléctrica es poder producir electricidad de la misma forma que las centrales convencionales, pero utilizando como energía primaria la radiación solar concentrada. Se trata de una tecnología que puede producir grandes cantidades de energía y contribuir de una manera significativa al abastecimiento energético, es decir avanzar en la satisfacción de las necesidades energéticas para el desarrollo del mundo sin destruirlo y sin agotar sus reservas o influyendo en el cambio climático.

Con este tipo de sistema de colectores, y en general con los proyectos de energías renovables, no existen impactos sobre el medio físico, ni sobre la calidad del aire, ni sobre los suelos; tampoco se provocan ruidos ni se afecta a la hidrología existente. Tampoco representa algún riesgo significativo para la seguridad de las personas.

En términos generales se puede decir que las principales repercusiones son de impacto visual y la ocupación de terrenos, que en el caso de grandes instalaciones pueden ser de gran impacto. Esta ocupación de terrenos en algunos lugares específicos podría tener incidencia

---

<sup>71</sup> Información recogida del texto: Plan de energías renovables en España 2005-2010. Capítulo 3.4: Sector solar termoeléctrico. Página 141. (Página web: [http://www.mityc.es/energia/desarrollo/EnergiaRenovable/Plan/Documentos/DocumentoCompleto/6Cap34\\_SectorTermoelectrico.pdf](http://www.mityc.es/energia/desarrollo/EnergiaRenovable/Plan/Documentos/DocumentoCompleto/6Cap34_SectorTermoelectrico.pdf))

sobre la flora y la fauna del lugar de trabajo, aunque el impacto no es superior al de cualquier planta convencional.

Respecto a la ocupación de terrenos también existen diferencias entre tecnologías. Mientras que en las centrales de colectores cilindro parabólicos la ocupación es de aproximadamente una hectárea por cada MW, para los proyectos de torre central este ratio se multiplica por 6 ó por 8.

Nuevas tecnologías como los colectores lineales de Fresnel podrían significar un gran avance en este sentido, ya que su configuración permitiría combinar aspectos útiles de su diseño, como el empleo del suelo debajo de los colectores con fines agrícolas.

Por otro lado, desmontar un sistema de colectores no representa dificultades por lo que se podría hablar de reversibilidad y la mayoría de los materiales que se utilizan en las plantas (acero, cobre, vidrio, cristal, etc.) se pueden reciclar.

En el caso del impacto visual, las plantas de tecnología cilindro parabólica poseen una altura inferior a 4 metros, lo que significa que a 100 metros de distancia el impacto visual es nulo por ser el ángulo visual menor de  $2.5^\circ$ .

## Bibliografía

Las referencias bibliográficas utilizadas fueron:

- [1] Concentrador Parabólico Compuesto: Una Descripción Opto-geométrica. S. Tapia S. y J.A. del Río P. 2009.
- [2] Progettazione e Realizzazione di un Compound Parabolic Concentratore Test di Efficienza Energética. Saverio D'Ubaldo.
- [3] Performance Analysis of CPC Solar Collector With Automatic Sun tracking. Taveewat Suparos. ASME Summer Heat Transfer Conference 2005.
- [4] Solar energy engineering: processes and systems. Soteris Kalogirou. Primera edición. Elsevier.2009
- [5] Solar Engineering of Thermal Processes. Third Edition. John A. Duffie and William A. Beckman. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2006.
- [6] Energía Solar Térmica. Departamento de Energía Solar. Viessmann S.L
- [7] Studying the feasibility of the compound parabolic concentrator for solarcooling. Ass. Prof. Dr. Abdullatif S. Zgalei and Ass. Prof. Dr. Omar M. Mahgiub and G. Eng. Khaled E. Albahloul.
- [8] Analytic solutions for the geometric and optical properties of stationary compound parabolic concentrators with fully illuminated inverted V receiver. Naum Fraidenraich and Chigueru Tiba and Braulio B. Brandao and Olga C. Vilela.
- [9] A thermal-optical analysis of a compound parabolic concentrator for single and multiphase flows, including superheat. A.Y. El-Assay and J.A. Clark.
- [10] Diseño y construcción de un collector parabólico compuesto de tubos evacuados para aplicaciones de temperaturas intermedias. Raúl Paredes Miranda. 1988.
- [11] Design and Test of Non-evacuated Solar Collectors with Compound Parabolic Concentrators. A. Rabl and J. O'Gallagher and R. Winston.
- [12] Historia de los Colectores Solares. Renove Tecnología S.L.2010.
- [13] Atlas de Energía Solar del Perú.
- [14] Optical Characterization of Solar Collectors from Outdoor Measurements. Incidence Angle Dependence of Asymmetric Collectors. Anna Helgesson.
- [15] Diseño y Construcción de un sistema de enfriamiento por adsorción solar. María Gabriela Campuzano Páez y Juan Víctor Chiriboga Albuja. Julio 2010.

- [16] Photovoltaic Concentrators and Building Integrated Photovoltaics. Tapas Kumar Mallick.
- [17] Desarrollo de un sistema de calentamiento solar y acoplamiento a un digestor anaeróbico. Aguayo, D. y Velazquez, N y Ojeda, S. Septiembre 2009. México.
- [18] CPC Type Integrated Collector Storage Systems. Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis and Th. Nousia. 2001.
- [19] Notas sobre el curso de Energía Solar. Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales. Division de Ingeniería. ITESO. 1995.
- [20] Aprovechamiento de la energía solar en media y alta temperatura. Sistemas termosolares de concentración. Manuel Silva Pérez. 2005.
- [21] The Research of Solar-heated Generations System Using CPC Collector. Lixi Zhang and Chunlei Li. 2008.
- [22] Energía Solar Fotovoltaica. Rafael Martín Lamaison Urioste.
- [23] Estudio Teórico y Experimental de Colector Solar Parabólico para Generación de Energía Eléctrica. Jorge Quinteros Grijalva. 2008.
- [24] Comparison of Solar Concentrators. Ari Rabl. Solar Energy Group, Argonne National Laboratory, Argonne. U.S.A. 1975.
- [25] Solar Thermal Collectors and Applications. Soteris A. Kalogirou. 2004.
- [26] Process Heat Collectors. State of the Art within Task 33/IV. Werner Weiss and Mathias Rommel. 2008.
- [27] Diseño y Construcción de una cocina solar experimental, de tipo cilíndrico parabólico con aplicación al sector rural marginal. Enrique Santiago Benavides Salcedo. 2006.
- [28] Diseño y Construcción de un destilador solar de aguas residuales para el laboratorio de energías renovables-DECEM. Roberto Rafael Rodríguez Leiva y Wilson David Saavedra Acosta. 2008.
- [29] Diseño y Construcción de un sistema de aprovechamiento del agua de una piscina con capacidad de 60 m<sup>3</sup>, con colectores solares planos para la Quinta Carmen. Paul Marcelo Dávalos Saa y Francisco Javier Curicama Pinargote. 2008.
- [30] Diseño y Construcción de un sistema de generación de electricidad, a partir del uso de energía solar, mediante un concentrador parabólico de 1.8m. Oscar Alberto Mejía Burbano y Felipe Diego Zamora Orellana. 2008.
- [31] Colector Parabólico Compuesto para Terma Solar. Werner Pacheco Luján. 2006.

- [32] Transferencia de Calor. Yunus A. Cengel. 2da. Edición. 1998.
- [33] Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ta. Edición. Incropera.
- [34] Advances in Solar Energy Technology: Collection and Storage Systems. H.P. Garg. 1987.
- [35] <http://www.sitiosolar.com/Historia%20de%20la%20energia%20solar%20termica.htm>  
(Página Web: Portal de las energías renovables.Sitio Solar.Historia de la energía solar térmica I)
- [36] [http://www.nrel.gov/csp/troughnet/power\\_plant\\_data.html](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/power_plant_data.html) (Página Web: National Renewable Energy Laboratory. NREL)
- [37] <http://www.centralestermosolares.com/almacenamientotermico.html> (Página Web: Renovetec. Almacenamiento Térmico)
- [38] [http://www.abengoasolar.com/corp/web/es/nuestros\\_proyectos/plataforma\\_solucar/ps10/index.html](http://www.abengoasolar.com/corp/web/es/nuestros_proyectos/plataforma_solucar/ps10/index.html) (Pagina Web: Abengoa Solar)
- [39] Energía solar térmica.Sistemas de concentración.
- [40] <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (Página web: NASA Surface meteorology and Solar Energy.)
- [41] Diseño de sistema concentrador solar cilindro parabólico para proceso de deshidratación de alimentos. Jorge Orlando Bazán Díaz. Diciembre 2008.

## Anexo A

Datos sobre plantas de energía que utilizan colectores cilindro-parabólicos que están en funcionamiento o en construcción en los Estados Unidos. Los datos incluyen el tipo de planta, la localización, la producción neta, la eficiencia de la turbina, el ciclo de poder.

Nombre de la Planta	Localización	Primer año de operación	Potencia de salida (MW)	Salida del campo solar (°C)	Área del campo solar (m <sup>2</sup> )	Efic. de la turb. solar (%)	Ciclo de poder	Suministro proporcionado por
<a href="#">Nevada Solar One</a>	Boulder City, NV	2007*	64	390	357,200	37.6	100 bar, recalentar	Ninguno
<a href="#">APS Saquaro</a>	Tucson, AZ	2006	1	300	10,340	20.7	ORC	Ninguno
<a href="#">SEGS IX</a>	Harper Lake, CA	1991	80	390	483,960	37.6	100 bar, recalentar	HTF calentador
<a href="#">SEGS VIII</a>	Harper Lake, CA	1990	80	390	464,340	37.6	100 bar, recalentar	HTF calentador
<a href="#">SEGS VI</a>	Kramer Junction, CA	1989	30	390	188,000	37.5	100 bar, recalentar	caldera de gas
<a href="#">SEGS VII</a>	Kramer Junction, CA	1989	30	390	194,280	37.5	100 bar, recalentar	caldera de gas
<a href="#">SEGS V</a>	Kramer Junction, CA	1988	30	349	250,500	30.6	40 bar, vapor	caldera de gas
<a href="#">SEGS III</a>	Kramer Junction, CA	1987	30	349	230,300	30.6	40 bar, vapor	caldera de gas
<a href="#">SEGS IV</a>	Kramer Junction, CA	1987	30	349	230,300	30.6	40 bar, steam	caldera de gas
<a href="#">SEGS II</a>	Daggett, CA	1986	30	316	190,338	29.4	40 bar, vapor	caldera de gas
<a href="#">SEGS I</a>	Daggett, CA	1985	13.8	307	82,960	31.5	40 bar, vapor	3-hrs TES

Fuente: National Renewable Energy Laboratory. NREL. Enero 2010. ([http://www.nrel.gov/csp/troughnet/power\\_plant\\_data.html](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/power_plant_data.html))

\*Fecha prevista para su operación

## Anexo B

### Tipos de tuberías de cobre con distintos diámetros nominales.

DIAMETRO NOMINAL		DIAMETRO EXTERIOR	ESPEORES DE PARED mm			DIAMETRO INTERIOR mm		
pulg	mm	mm	Tipo K	Tipo L	Tipo M	Tipo K	Tipo L	Tipo M
3/8	10	12.70	1.24	0.89	0.64	10.22	10.92	11.42
1/2	13	15.88	1.24	1.02	0.71	13.40	13.84	14.46
5/8	15	19.05	1.24	1.07	–	16.57	16.91	–
3/4	19	22.22	1.65	1.14	0.81	18.92	19.94	20.60
1.	25	28.58	1.65	1.27	0.89	25.28	26.04	26.80
1.1/4	32	34.92	1.65	1.40	1.07	31.62	32.12	32.78
1.1/2	38	41.28	1.83	1.52	1.24	37.62	38.24	38.80
2	50	53.98	2.11	1.78	1.47	49.76	50.42	51.04
2.1/2	63	66.68	2.41	2.03	1.65	61.86	62.62	63.38
3.	75	79.38	2.77	2.29	1.83	73.84	74.80	75.72
3.1/2	90	92.08	3.05	2.54	2.11	85.98	87.00	87.86
4.	100	104.78	3.40	2.79	2.41	97.98	99.20	99.96
5.	125	130.18	4.06	3.18	2.77	122.06	123.82	124.64
6.	150	155.58	4.88	3.56	3.10	145.82	148.46	149.38
8	200	206.38	6.88	5.08	4.32	192.62	196.22	197.74
10.	250	257.18	8.58	6.35	5.38	240.02	244.48	246.42
12	300	307.98	10.29	7.11	6.45	287.40	293.76	295.08

Fuente: Manual de tubería de cobre. Propiedades, aplicaciones, técnicas de soldadura.  
[http://www.procobre.org/archivos/pdf/download\\_biblioteca/MX/manual\\_tuberias.pdf](http://www.procobre.org/archivos/pdf/download_biblioteca/MX/manual_tuberias.pdf)

## Anexo C

Guía de peso por unidad de area (kg/m<sup>2</sup>) de placas de acero en medidas estándar

MEDIDAS		1"	15/16"	7/8"	13/16"	3/4"	11/16"
PIES	METROS	25.4 mm.	23.8 mm.	22.2 mm.	20.6 mm.	19.1 mm.	17.5 mm.
3' x 6'	(.914 x 1.83)	333	312	291	271	250	229
3' x 8'	(.914 x 2.44)	444	416	389	361	333	305
3 x 10'	(.914 x 3.05)	555	521	486	451	416	382
4' x 8'	(1.22 x 2.44)	592	555	518	481	444	407
4' x 10'	(1.22 x 3.05)	740	694	648	601	555	509
4' x 12'	(1.22 x 3.66)	888	833	777	722	666	611
5' x 10'	(1.52 x 3.05)	925	868	810	752	694	636
5' x 15'	(1.52 x 4.57)	1388	1301	1215	1128	1011	954
5' x 20'	(1.52 x 6.10)	1851	1735	1619	1504	1388	1272
6' x 12'	(1.83 x 3.66)	1333	1249	1166	1083	999	916
6' x 18'	(1.83 x 5.49)	1999	1874	1749	1624	1499	1374
6' x 20'	(1.83 x 6.10)	2221	2082	1943	1804	1666	1527
<b>Kilos por M2</b>		<b>199.21</b>	<b>186.75</b>	<b>174.31</b>	<b>161.85</b>	<b>149.41</b>	<b>136.96</b>
<b>Kilos por Pié 2</b>		<b>18.507</b>	<b>17.35</b>	<b>16.194</b>	<b>15.037</b>	<b>13.88</b>	<b>12.724</b>

Fuente: <http://www.bideco.com.mx/tecnico/perfiles/tablaplaca.html>

## Anexo C

Guía de peso por unidad de área ( $\text{kg/m}^2$ ) de placas de acero en medidas estándar.

MEDIDAS		5/8"	9/16"	1/2"	7/16"	3/8"	5/16"	1/4"	3/16"	1/8"
PIES	METROS	15.9	14.3	12.7	11.1	9.5	7.9	6.4	4.8	3
		mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
3' x 6'	(.914 x 1.83)	208	187	167	146	125	104	83	62	42
3' x 8'	(.914 x 2.44)	278	250	222	194	167	139	111	83	56
3 x 10'	(.914 x 3.05)	347	312	278	243	208	173	139	104	69
4' x 8'	(1.22 x 2.44)	370	333	296	259	222	185	148	111	74
4' x 10'	(1.22 x 3.05)	463	416	370	324	278	231	185	139	93
4' x 12'	(1.22 x 3.66)	555	500	444	389	333	278	222	167	111
5' x 10'	(1.52 x 3.05)	578	521	463	405	347	289	231	174	116
5' x 15'	(1.52 x 4.57)	868	781	694	607	521	434	347	260	174
5' x 20'	(1.52 x 6.10)	1157	1041	925	810	694	578	463	347	231
6' x 12'	(1.83 x 3.66)	833	750	666	583	500	416	333	250	167
6' x 18'	(1.83 x 5.49)	1249	1124	999	874	750	625	500	375	250
6' x 20'	(1.83 x 6.10)	1388	1249	1110	972	833	694	555	416	278
<b>Kilos por M2</b>		<b>124.51</b>	<b>112.06</b>	<b>99.61</b>	<b>87.15</b>	<b>74.7</b>	<b>62.25</b>	<b>49.8</b>	<b>37.35</b>	<b>24.42</b>
<b>Kilos por Pié 2</b>		<b>11.567</b>	<b>10.41</b>	<b>9.253</b>	<b>8.097</b>	<b>6.94</b>	<b>5.793</b>	<b>4.627</b>	<b>3.47</b>	<b>2.313</b>

Fuente: <http://www.bideco.com.mx/tecnico/perfiles/tablaplaca.html>

## Anexo D

### Factor de reflexión para luz blanca

<b>Superficie reflectora</b>	<b>% Factor de reflexión</b>
Plata brillante	92 - 97
Plata blanca (mate)	85 - 92
Níquel pulido	60 - 65
Cromo pulido	60 -65
Aluminio pulido	67 - 72
Aluminio electro-abrillantado	86 -90
Aluminio vaporizado	90 -95
Porcelana esmaltada	60 -80
Espejos	80 -85
Pintura blanca mate	70 -80
Amarillo y crema claro	60 -75
Techos acústicos	60 -75
Verde muy claro	70 -80
Verde claro y rosa	45 - 65
Azul claro	45 -55
Gris claro	40 -50
Rojo claro	30 -50
Marrón claro	30 -40
Película de aluminio	79,9
Fibra de vidrio pintada de blanco	70,9

Fuente: Modificado de INDALUX – Luminotecnia 2002 y N.Di Lalla, R. Tarulla, R. Echazú – ASADES 2001. (CONICET Dept. de materiales CAC-CNEA, CITEFA, INENCO – UNAS).

## Anexo E

Angulos de inclinación en relación a la latitud del lugar

De 0° a 8°50' de Paralelo <b>Angulo de inclinacion 15°</b>						
Dpto.	Provincia	Estacion	Latitud	Longitud	Alt. msnm	HoraSol/dia
Tumbes	Tumbes	Puerto Pizarro	3°30'	80°28'	1	5
Tumbes	Zarumilla	Zarumilla	3°30'	80°17'	1	
Tumbes	C. Villar	Cañaverall	3°56'	80°39'	1	
Piura	Paita	Paita	5°17'	81°08'	3	5.3
Lambayeque	Lambayeque	Lambayeque	6°42'	79°55'	18	
Lambayeque	Chiclayo	Reque	6°53'	79°50'	21	
Piura	Piura	San Miguel	5°14'	80°41'	29	
Lambayeque	Ferreñafe	Ferreñafe	6°38'	79°47'	64	
Lambayeque	Chiclayo	Pucala	6°45'	79°36'	85	
Piura	Talara	Talara	4°34'	81°15'	88	
Piura	Sullana	Chilaco	4°42'	80°30'	90	
Piura	Morropón	Chulucanas	5°06'	80°10'	95	
Loreto	Maynas	Iquitos	3°45'	73°15'	126	
Loreto	A. Amazonas	Yurimaguas	5°52'	73°15'	126	
Piura	Morropón	Morropón	5°11'	79°59'	140	
Lambayeque	Lambayeque	Motupe	6°09'	79°44'	147	4.9
Loreto	A. Amazonas	San Ramón	5°56'	76°05'	184	
Ucayali	Ucayali	Contamana	7°21'	75°00'	185	
San Martín	San Martín	El Porvenir	6°35'	76°19'	230	
Lambayeque	Chiclayo	Tinajones	6°38'	79°25'	235	
San Martín	Bellavista	La Unión	7°11'	76°30'	265	4.7
Amazonas	Utcubamba	Bagua Chica	5°39'	78°32'	434	
San Martín	Tocache	Tocache	8°11'	76°31'	512	
Huanuco	Huacaybamba	La Morada	8°45'	76°09'	542	
Cajamarca	Jaen	Jaen	5°40'	78°46'	654	

Fuente: Green GT. Global Technology. [http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL\\_SOLAR-MAX.pdf](http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL_SOLAR-MAX.pdf)

## Anexo E

### Angulos de inclinación en relación a la latitud del lugar

San Martín	Moyobamba	Moyobamba	6°00'	75°58'	860	4.5
San Martín	Moyobamba	Moyobamba	6°03'	76°56'	860	
San Martín	Rioja	Rioja	6°02'	77°10'	880	
Cajamarca	Jaen	San Ignacio	5°08'	78°59'	1283	
Cajamarca	Chota	Cochabamba	6°27'	78°53'	1672	
Amazonas	Chachapoyas	Chachapoyas	6°14'	77°49'	1834	
Piura	Huancabamba	Huancabamba	5°15'	79°43'	1952	5
Cajamarca	Santa Cruz	Santa Cruz	6°38'	78°57'	2026	
Cajamarca	Cutervo	Cutervo	6°22'	78°49'	2450	
Cajamarca	Contumaza	Contumaza	7°21'	78°49'	2452	
Cajamarca	Chota	Chota	6°33'	78°39'	2487	
Cajamarca	San Marcos	San Marcos	7°19'	78°10'	2225	
Cajamarca	Cajabamba	Cajabamba	7°37'	78°03'	2491	
Cajamarca	Hualgayoc	Bambamarca	6°40'	78°31'	2536	
Cajamarca	Celendin	Celendin	6°51'	78°07'	2620	
Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	7°08'	78°29'	2620	
La Libertad	Otuzco	Otuzco	7°54'	78°34'	2635	
Piura	Ayabaca	Ayabaca	4°38'	79°43'	2700	
Cajamarca	Cajamarca	Granja Porcon	7°02'	78°38'	3000	
La Libertad	S. Carrión	Huamachuco	7°49''	78°03'	3200	
La Libertad	Pataz	Tayabamba	8°17''	77°17'	3250	
Cajamarca	Hualgayoc	Hualgayoc	6°46'	78°37'	3510	

Fuente: Green GT. Global Technology. [http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL\\_SOLAR-MAX.pdf](http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL_SOLAR-MAX.pdf)

## ANEXO E

Angulos de inclinación en relación a la latitud del lugar

De 8°51' a 14°50' de Paralelo <b>Angulo de inclinación 20°</b>						
Dpto.	Provincia	Estacion	Latitud	Longitud	Alt. msnm	HoraSol/dia
Ica	Pisco	Pisco	13°44'	76°13'	6	4.2
Lima	Callao	La Punta	12°04'	77°10'	13	2.8
Lima	Callao	Aeropuerto Inter.	12°00'	77°07'	13	
Lima	Lima	Lima	12°05'	76°56'	238	
Ica	Pisco	Isla Chincha Norte	13°28'	76°23'	20	3.7
Lima	Barranca	Paramonga	10°40'	77°47'	60	
Lima	Cañete	Cañete	13°04'	76°19'	158	
Ica	Pisco	Hacienda Bemales	13°45'	75°57'	250	4.5
Ica	Palpa	Rio Grande	14°32'	75°13'	280	
Junín	Satipo	Puerto Ocopa	11°08'	74°15'	305	
Ica	Ica	Ocucaje	14°23'	75°40'	330	5.2
Ica	Ica	San Camilo	14°04'	75°43'	398	
Lima	Lima	Huarangal	11°47'	77°06'	410	
Lima	Cañete	La Capilla 2	12°31'	76°33'	468	
Lima	Huaura	Andahuasi	11°08'	77°14'	470	
Lima	Huaura	Santa Rosa	11°13'	77°23'	485	
Ica	Nazca	Pangaravi	14°50'	74°37'	550	
Lima	Lima	Ñaña	11°59'	76°50'	566	
Lima	Cañete	Pacaran	12°51'	76°03'	721	
Junín	Satipo	Mazamari	11°15'	74°31'	750	
Junín	Chanchamayo	San Ramón	11°07'	75°26'	800	
Lima	Lima	La Cantuta	11°57'	76°42'	850	
Cuzco	Paucartambo	Pilecopata	13°05'	71°01'	900	
Cuzco	La Convención	Quillabamba	12°51'	72°41'	990	

Fuente: Green GT. Global Technology. [http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL\\_SOLAR-MAX.pdf](http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL_SOLAR-MAX.pdf)

## ANEXO E

### Angulos de inclinación en relación a la latitud del lugar

Huanuco	Huanuco	Huanuco	9°57'	76°14'	1947	4.8
Lima	Canta	Canta	11°28'	76°37'	2832	
Lima	Huarochari	Matucana	11°50'	76°22'	2479	
Huanuco	Pachitea	Panao (los molinos)	9°55'	76°03'	2600	
Huancavelica	Tayacaja	San Lorenzo	12°18'	74°48'	2600	
Lima	Huaura	Picoy	10°55'	76°44'	2990	
Cuzco	Paucartambo	Paucartambo	13°19'	71°35'	3042	5.4
Cuzco	Paruro	Paruro	13°46'	71°50'	3084	
Ancash	Huari	Chavin	9°35'	77°10'	3140	
Ayacucho	Lucanas	Puquio	14°42'	74°08'	3215	
Cuzco	Cuzco	Granja Kcayra	13°33'	71°52'	3219	
Junín	Huancayo	Huayao	12°02'	75°19'	3308	
Ancash	Recuay	Recuay	9°43'	77°27'	3462	5.6
Cuzco	Canchis	Combapata	14°06'	71°26'	3464	
Cuzco	Canchis	Sicuani	14°15'	71°14'	3574	
Puno	Azangaro	Azangaro	14°55'	70°11'	3863	
Puno	Melgar	Ayaviri	14°52'	70°35'	3928	
Puno	Melgar	Chuquibambilla	14°47'	70°44'	3971	
Ayacucho	Lucanas	Pedregal	14°25'	74°26'	4100	5.1
Pasco	Pasco	Milpo	10°36'	76°13'	4100	
Pasco	Pasco	Cerro de Pasco	10°41'	76°15'	4260	
Junín	Yauli	Marcapomacocha	11°24'	76°19'	4479	

Fuente: Green GT. Global Technology. [http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL\\_SOLAR-MAX.pdf](http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL_SOLAR-MAX.pdf)

## ANEXO E

Angulos de inclinación en relación a la latitud del lugar

De 14°51' a 20°50' de Paralelo <b>Angulo de inclinación 25°</b>						
Dpto.	Provincia	Estacion	Latitud	Longitud	Alt. msnm	HoraSol/día
Arequipa	Camana	Camana	16°36'	72°41'	23	3.1
Ica	Nazca	San Juan	15°20'	75°08'	30	
Moquegua	Ilo	Punta Coles	17°42'	71°22'	30	
Arequipa	Camana	Ocoña	16°26'	73°06'	58	
Tacna	Tacna	La Yarada	18°12'	70°31'	58	
Tacna	Tacna	Tacna	18°03'	70°15'	452	4.3
Tacna	Tacna	Sama Grande	17°47'	70°29'	552	
Arequipa	Arequipa	La Joya	16°35'	71°55'	1292	6.25
Arequipa	Arequipa	Sta. Rita	16°28'	72°07'	1297	
Moquegua	M Nieto	Moquegua	17°10'	70°56'	1420	
Arequipa	Caylloma	Pampa de Majes	16°19'	72°12'	1434	
Arequipa	Caraveli	Caraveli	15°46'	73°21'	1779	
Arequipa	Arequipa	Characato	16°27'	71°29'	2451	6.5
Arequipa	La Unión	Cotalhuasi	15°22'	72°53'	2683	
Ayacucho	Parinacochas	Coracora	15°01'	73°47'	3200	
Puno	Puno	Puno	15°49'	70°00'	3820	
Puno	Chucuito	Desaguadero	16°34'	69°02'	3860	
Puno	Callao	Ilave	16°05'	69°38'	3880	
Puno	Puno	Capachica	15°37'	69°50'	3933	

Fuente: Green GT. Global Technology. [http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL\\_SOLAR-MAX.pdf](http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL_SOLAR-MAX.pdf)

## ANEXO E

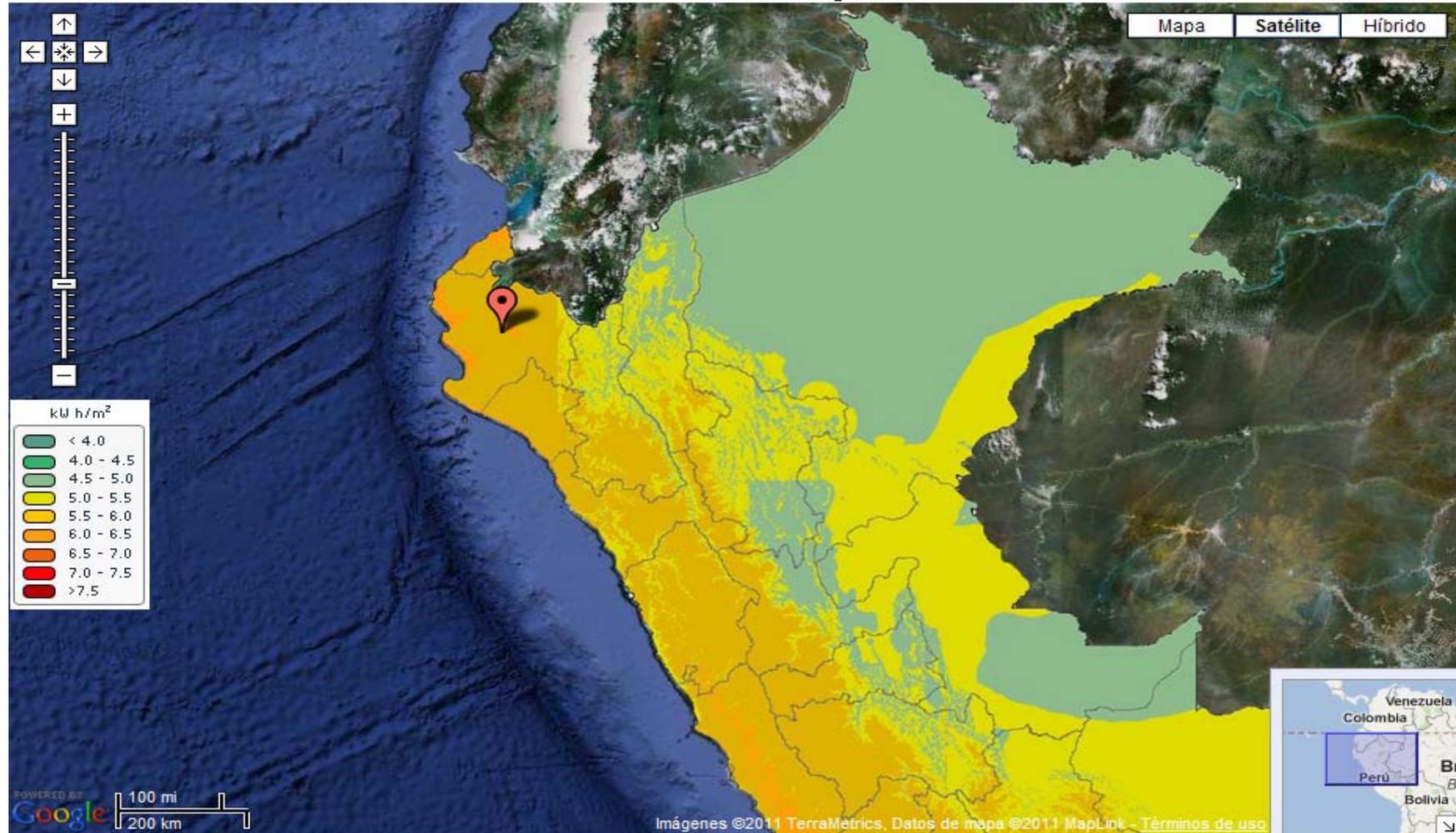
Angulos de inclinación en relación a la latitud del lugar

<b>ANGULO DE INCLINACION SUGERIDO PARA OTROS PAISES</b>							
País	Ciudad	Latitud	Longitud	Alt. msnm	° Inclinación	Orientado al	HoraSol/día
Nueva Zelanda	Wellington	-41	174.8	12	61	Norte	3
Argentina	Buenos Aires	-34	-58	25	44	Norte	4
Brasil	Rio de Janeiro	-23	-43	3	28	Norte	5
Zimbabwe	Harare	-17	31	1479	25	Norte	5.5
Tanzania	Dar Es Salaam	-7	39	55	15	Norte	4
Kenia	Nairobi	-1	36	1798	15	Norte o Sur	4
Brasil	Belem	-1	48	16	15	Norte o Sur	5
Ghana	Accra	5	0	18	15	Sur	3.5
Nigeria	Lagos	6	3	40	15	Sur	3.5
India	Bangalore	13	77	950	20	Sur	4.5
Guatemala		14	90	1489	20 o 25	Sur	5
Sudán	Khartoum	15	32	382	25	Sur	6
USA	Miami	25	80	3	30	Sur	5
Egipto	Cairo	30	31	64	35 o 40	Sur	5
USA	San Diego	32	117	4	42	Sur	6
Libia	Tripoli	33	13	80	43	Sur	5
Afganistán	Kabul	34	69	1630	44	Sur	5
USA	St. Louis	38	90	184	53	Sur	4
España	Madrid	40	-3	609	55 o 60	Sur	3
USA	Nueva York	40	73	3	55 o 60	Sur	4
Sur de Francia	Nice	43	7	4	63	Sur	2
USA	Portland	45	122	8	65	Sur	4
USA	Seattle	47	122	130	67	Sur	4
Norte de Francia	Paris	48	2	118	68	Sur	1.5
Inglaterra	Londres	51	0	62	71	Sur	1

Fuente: Green GT. Global Technology. [http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL\\_SOLAR-MAX.pdf](http://www.greengt.org/Documentos/MANUAL_SOLAR-MAX.pdf)

## Anexo F

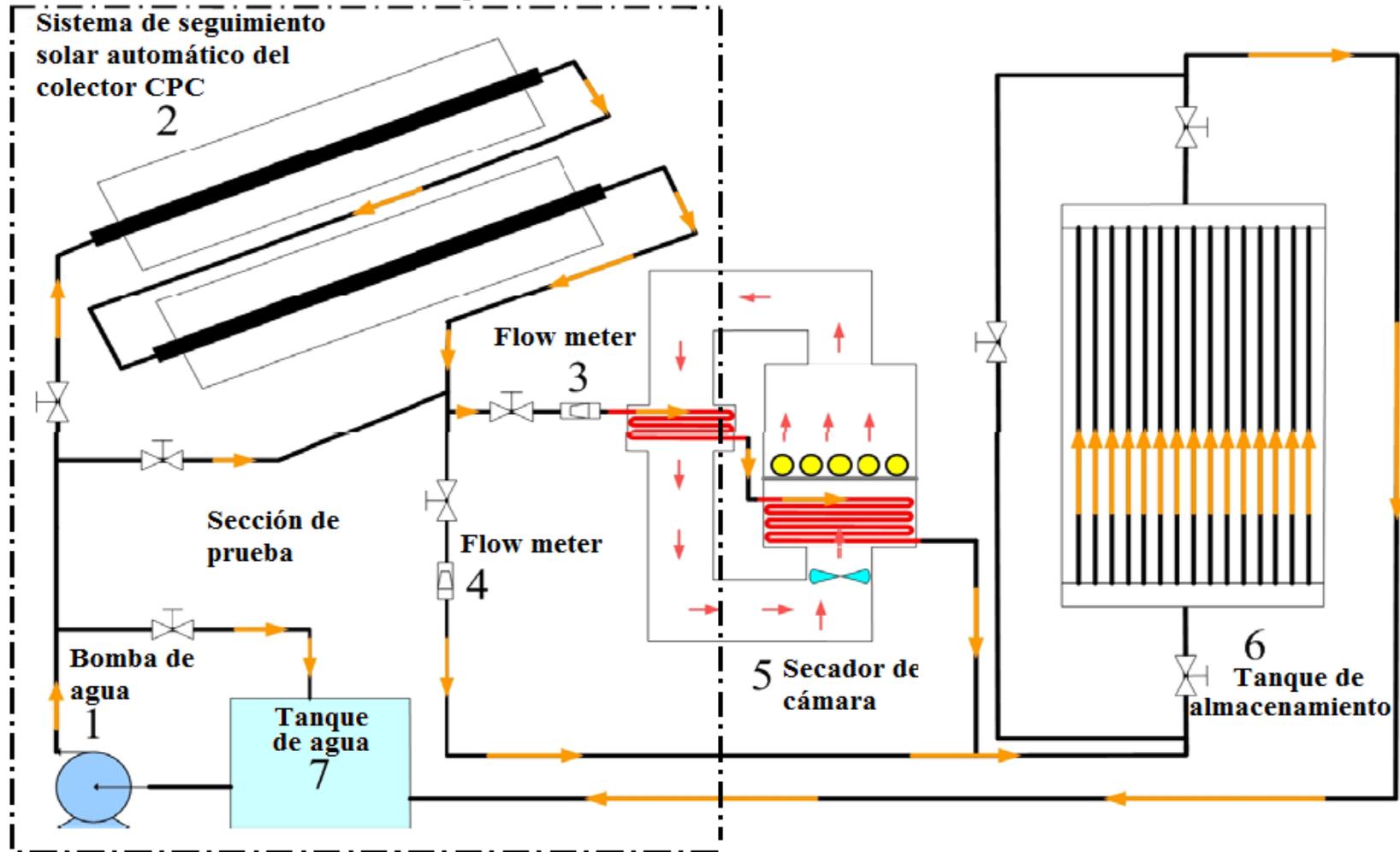
### Promedio anual de irradiancia en la provincia de Piura



Fuente: Atlas de energía solar del Perú. Página web: <http://dger.minem.gob.pe/atlassolar/#>

## Anexo G

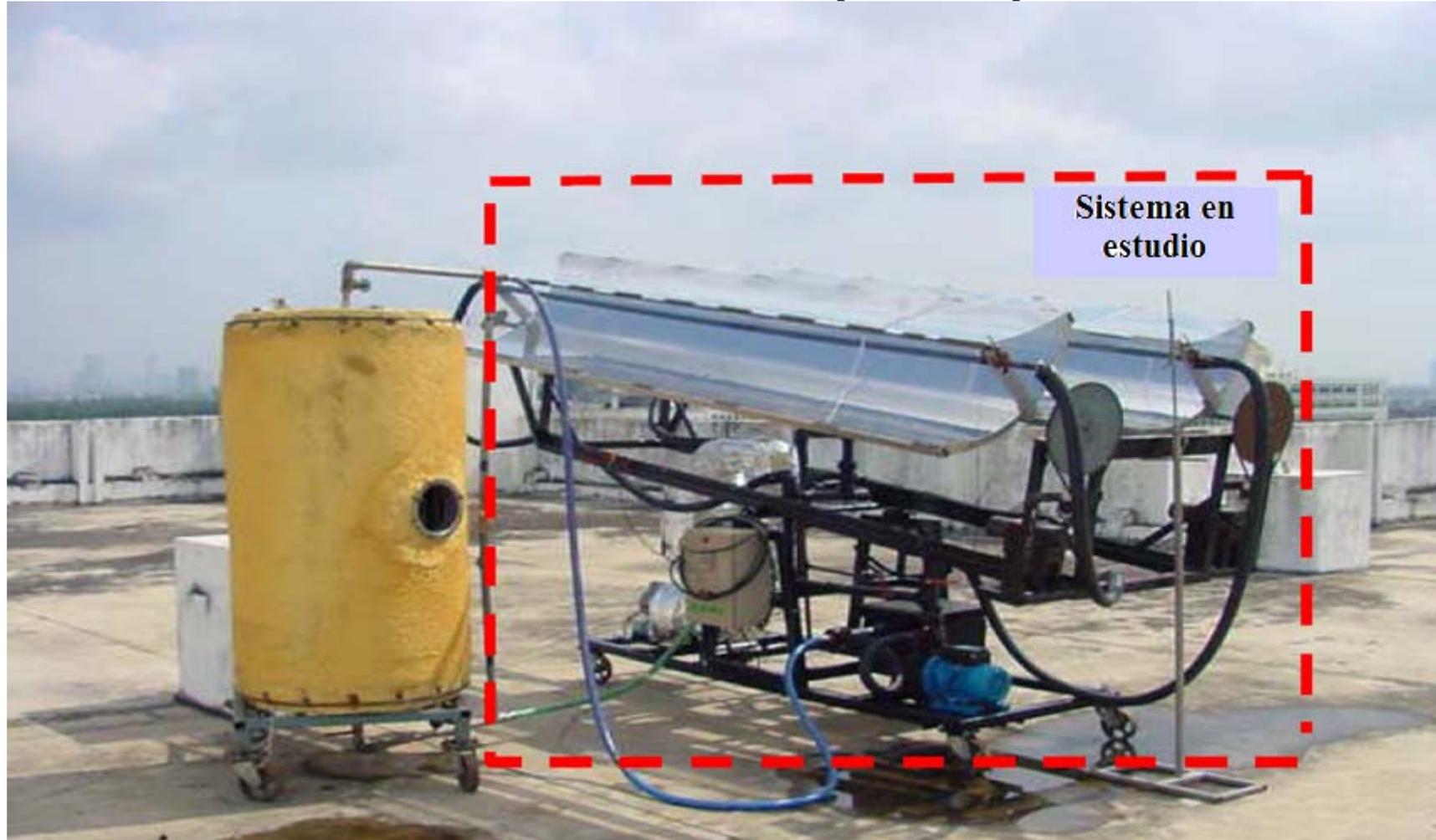
Esquema de un sistema termosolar de colectores.



Fuente: Bibliografía [3]. Página 5

## Anexo H

### Sistema doméstico de un colector cilindro parabólico compuesto



Fuente : Bibliografía [3]. Página 5

## Anexo I

Dimensiones y pesos nominales de ángulos de acero.

DIMENSIONES (pulg.)	PESO ESTIMADO		
	lb/pie	kg/m	kg/6 m
1 1/2 x 1 1/2 x 3/32	0.929	1.382	8.292
1 1/2 x 1 1/2 x 1/8	1.230	1.830	10.983
1 1/2 x 1 1/2 x 3/16	1.800	2.679	16.072
1 1/2 x 1 1/2 x 1/4	2.340	3.482	20.894
1 3/4 x 1 3/4 x 1/8	1.440	2.143	12.858
1 3/4 x 1 3/4 x 3/16	2.120	3.155	18.929
1 3/4 x 1 3/4 x 1/4	2.770	4.122	24.733
2 x 2 x 1/8	1.650	2.455	14.733
2 x 2 x 3/16	2.440	3.631	21.787
2 x 2 x 1/4	3.190	4.747	28.483
2 x 2 x 5/16	3.920	5.834	35.002
2 x 2 x 3/8	4.700	6.994	41.966
2 1/2 x 2 1/2 x 3/16	3.070	4.569	27.412
2 1/2 x 2 1/2 x 1/4	4.100	6.101	36.609
2 1/2 x 2 1/2 x 5/16	5.000	7.441	44.645
2 1/2 x 2 1/2 x 3/8	5.900	8.780	52.681
3 x 3 x 1/4	4.900	7.292	43.752
3 x 3 x 5/16	6.100	9.078	54.467
3 x 3 x 3/8	7.200	10.715	64.289
3 x 3 x 1/2	9.400	13.989	83.932
4 x 4 x 1/4	6.600	9.822	58.932
4 x 4 x 5/16	8.200	12.203	73.218
4 x 4 x 3/8	9.800	14.584	87.504
4 x 4 x 1/2	12.80	19.048	114.288

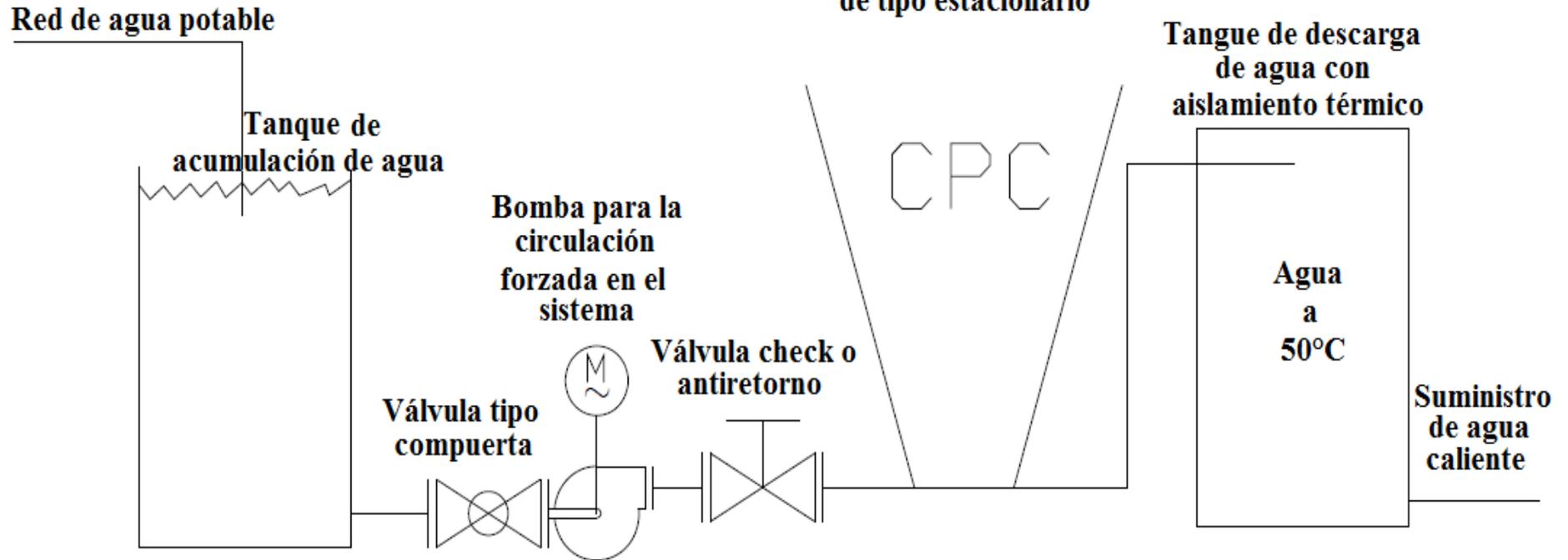
Fuente: Ángulos estructurales. Corporación Aceros Arequipa S.A.

## Anexo J

Configuración del sistema termosolar para el calentamiento de agua.

**Sistema de captación de radiación solar.  
(25 colectores)**

**Colector cilindro parabólico compuesto  
de tipo estacionario**



Fuente: Elaboración propia.