

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**Facultad de Ciencias**

**Escuela Académica Profesional de Física Aplicada**

**Diseño, construcción y evaluación de un Concentrador  
Cilíndrico Parabólico para generar vapor de  
agua a alta temperatura**

**Tesis**

**Presentada por:**

**Bach. Elisban Juani Sacari Sacari**

**Para optar el Título Profesional de:**

**LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA**

**Tacna – Perú**

**2012**

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Escuela Académica Profesional de Física Aplicada**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN CONCENTRADOR  
CILÍNDRICO PARABÓLICO PARA GENERAR VAPOR DE AGUA A ALTA  
TEMPERATURA”**

Tesis sustentada en acto público y aprobado por el jurado calificador, integrado por:

Presidente:



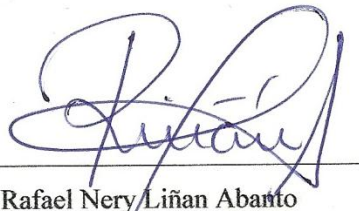
MSc. Cesar Efraín Rivasplata Cabanillas

Secretario:



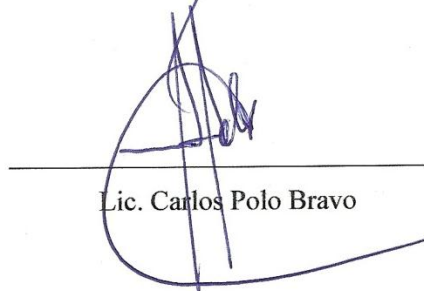
Lic. Carlos Alberto Zavaleta Caballero

Vocal:



MSc. Rafael Nery Liñan Abanto

Asesor:



Lic. Carlos Polo Bravo

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA  
FACULTAD DE CIENCIAS

TESIS N° .....

TÍTULO PROFESIONAL DE:  
“Licenciado en Física Aplicada”

La Secretaría Académica Administrativa de la Facultad de Ciencias, certifica que el Consejo de Facultad ha designado como jurados para la sustentación de la Tesis “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO PARA GENERAR VAPOR DE AGUA A ALTA TEMPERATURA**”.

El mismo que está conformado por:

Presidente : MSc. Cesar Efraín Rivasplata Cabanillas  
Secretario : Lic. Carlos Alberto Zavaleta Caballero  
Vocal : MSc. Rafael Nery Liñán Abanto

Para examinar y calificar la tesis sustentada en acto público el día 27 de diciembre del año 2012.

Presentado por el Señor Bachiller: **ELISBAN JUANI SACARI SACARI** de la Escuela Académica Profesional de **FÍSICA APLICADA**.

El jurado calificador de forma secreta e individual emitió su calificativo sobre el trabajo expuesto y procedió a obtener resultado de: aprobado por unanimidad con el calificativo de bueno y con la nota promedio de dieciséis coma cinco (16,5).

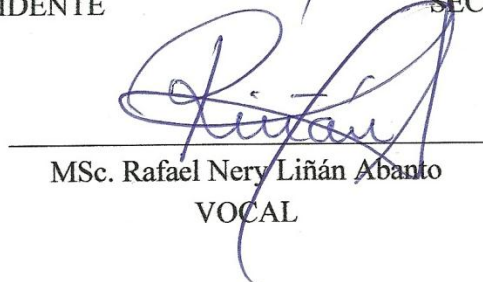
Para ratificar lo detallado firman:



MSc. Cesar Efraín Rivasplata Cabanillas  
PRESIDENTE



Lic. Carlos Alberto Zavaleta Caballero  
SECRETARIO



MSc. Rafael Nery Liñán Abanto  
VOCAL

## **AGRADECIMIENTO**

Deseo agradecer a todas las personas que directa o indirectamente me apoyaron en la culminación de la presente tesis.

Además agradecer de manera muy especial:

Al Lic. Carlos Polo Bravo ya que gracias a su perseverante apoyo logre terminar la presente tesis.

Al laboratorio de energías renovables de la E.A.P de Física Aplicada por el apoyo de materiales para la realización de la presente tesis.

Al Centro de Energías Renovables de Tacna por haberme brindado los ambientes y equipos para el desarrollo de la presente tesis.

Al laboratorio de electrónica de la E.A.P. de Física Aplicada por su apoyo en el desarrollo del prototipo del sistema de seguimiento solar.

A todos los docentes de la E.A.P. de Física Aplicada por su interés y apoyo al contribuir en mi formación profesional.

A mi familia por su constante apoyo.

A DIOS por todo.

**GRACIAS A TODOS**

## *Dedicatoria*

*A Dios porque siempre es mi fortaleza y siempre está a mi lado.*

*Con mucho amor a mis padres Juan y Dominga por su o constante apoyo, por sus sabios consejos, por ser ejemplo de sacrificio y esfuerzo, por creer en mí; este trabajo es para Ustedes.*

*A mis hermanos Jeremias y Sarita porque me permiten ser el ejemplo que los impulse a salir adelante.*

*De forma muy especial a mi compañera Rocío Tamayo, por su apoyo incondicional.*

*Elisban*

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	13
INTRODUCCIÓN .....	15
CAPITULO 1: .....	17
DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.1. Planteamiento de problema .....	17
1.2. Objetivos .....	18
1.2.1. Objetivo General .....	18
1.2.2. Objetivos Específicos .....	18
1.3. Hipótesis .....	19
CAPITULO 2: .....	20
FUNDAMENTO TEORICO .....	20
2.1. Presentación .....	20
2.2. El Sol y La Radiación Solar .....	23
2.3. Concentración de la radiación solar .....	27
2.4. Concentrador cilíndrico parabólico.....	34
2.4.1. Componentes principales de un CCP .....	35
2.4.2. Fluido de trabajo para un CCP .....	48

2.4.3.	Razón de concentración geométrica y ángulo de aceptación de un CCP.....	50
2.4.4.	Pérdidas ópticas y geométricas en un CCP .....	53
2.4.5.	Pérdidas térmicas en un CCP .....	59
2.4.6.	Rendimiento global de un CCP .....	61
2.4.7.	Extracción de la energía térmica.....	69
2.4.8.	Conversión de calor en el concentrador cilíndrico parabólico ...	70
2.4.9.	Método estacionario para la medición de la eficiencia óptica.....	74
2.4.10.	El coeficiente global de pérdidas térmicas .....	74
CAPITULO 3.....		76
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR SOLAR		
	CILINDRICO PARABOLICO .....	76
3.1.	Consideraciones generales.....	76
3.1.1.	Para el diseño del concentrador.....	76
3.2.	Construcción .....	85
3.3.	Montaje .....	88
CAPITULO 4.....		92
METODOLOGIA Y RECURSOS EMPLEADOS .....		92

4.1.	Descripción de trabajo realizado .....	92
4.2.	Metodología empleada para la evaluación.....	93
4.2.1.	Determinación del factor de concentración. ....	93
4.2.2.	Pérdidas debido al ángulo de inclinación del concentrador cilíndrico parabólico.....	94
4.2.3.	Determinación de la eficiencia óptica ( $\sigma_T$ ): .....	95
4.2.4.	Determinación del coeficiente global de pérdidas de calor: ( $U_{L,abs}$ ) .....	96
4.2.5.	Determinación de la eficiencia térmica.....	98
4.2.6.	Generación directa de vapor .....	98
4.2.7.	Calentamiento de 500 litros de agua.....	98
4.3.	Asignación de recursos .....	99
4.3.1.	Recursos humanos .....	99
4.3.2.	Recursos materiales.....	100
CAPITULO 5.....		101
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		101
5.1.	Características del CCP .....	101
5.2.	Factor de concentración.....	103

5.3.	Pérdidas debido al ángulo de inclinación del concentrador cilíndrico parabólico.....	103
5.4.	Cálculo de la eficiencia óptica ( $\alpha_T$ ): .....	105
5.5.	Cálculo del coeficiente global de pérdidas de calor: ( $U_{L,abs}$ )....	108
5.6.	Cálculo de la eficiencia térmica.....	111
5.7.	Generación directa de vapor .....	113
5.8.	Velocidad de calentamiento de 500 litros de agua.....	115
5.9.	Análisis y discusión de resultados:.....	117
	CAPITULO 6.....	121
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	121
6.1.	Conclusiones.....	121
6.2.	Recomendaciones.....	122
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	123

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Intensidad del espectro solar en función de la longitud de onda.....	25
Figura 2.	Formas más comunes para concentrar la radiación solar directa.....	33
Figura 3.	Componentes de un CCP .....	36
Figura 4.	Diferentes tipos de vidrios.....	38
Figura 5.	Tubo absorbedor de vacío para CCP .....	40
Figura 6.	Esquema de funcionamiento de un sistema de seguimiento solar en un eje .....	44
Figura 7.	Las dos principales orientaciones del eje de giro de un CCP	45
Figura 8.	Diferentes tipos de accionamiento .....	46
Figura 9.	Ángulo de aceptación y razón de concentración geométrica de un CCP .....	51
Figura 10.	Parámetros ópticos de un CCP.....	55
Figura 11.	Pérdidas geométricas de final de un CCP .....	58
Figura 12.	Pérdidas térmicas en el tubo absorbedor de un CCP.....	60
Figura 13.	Diagrama de pérdidas y rendimiento de un CCP.....	65
Figura 14.	Rendimiento global de un CCP en función de la temperatura, para $\varphi=0^\circ$ .....	68

Figura 15. Curva característica de la eficiencia térmica instantánea de un colector en función a las condiciones operativas $T_m$ , $T_{amb}$ y $G_t$ .....	73
Figura 16. Vista de la hoja de cálculo para el dimensionamiento del CCP .....	77
Figura 17. Resultados del dimensionamiento en la hoja de cálculo.....	78
Figura 18. Plano del CCP vista lateral y soporte.....	79
Figura 19. Plano del CCP vista de planta y elevacion .....	80
Figura 20. Plano del CCP, detalles de las uniones para los tubos de vidrio .....	81
Figura 21. Plano CCP, soporte para el tubo receptor y base estructural .....	82
Figura 22. Plano CCP 3D vista superior .....	83
Figura 23. Plano CCP 3D vista posterior .....	84
Figura 24. Construcción del soporte metálico del concentrador .....	85
Figura 25. Construcción de la viga principal del CCP .....	86
Figura 26. Construcción de Los arcos parabólicos .....	86
Figura 27. Construcción del soporte para el tubo absorbente y soportes para la superficie reflector.....	87
Figura 28. Ubicación del Concentrador en el CERT .....	88
Figura 29. Colocado de los arcos parabólicos .....	89

Figura 30. Colocado de soporte para tubo absorbente y superficie reflectora.....	89
Figura 31. Colocación de superficie reflectora.....	90
Figura 32. Anclaje de columnas de soporte al techo del CERT.....	90
Figura 33. Montaje de la estructura parabólica a las columnas de soporte.....	91
Figura 34. Presentación final del CCP.....	91
Figura 35. Perdida de superficie reflectora debido al ángulo de incidencia de la radiación solar directa.....	94
Figura 36. Esquema para la determinación de $\tau \alpha$ del concentrador cilíndrico parabólico y ubicación de sensores.....	96
Figura 37. Esquema para la determinación de $U_L$ .....	97
Figura 38. Esquema para la determinación de $U_L$ .....	99
Figura 39. Vista frontal del CCP.....	101
Figura 40. Tubos rotos de Termas.....	102
Figura 41. Esquema de las pérdidas debidas al ángulo de incidencia de la radiación.....	103
Figura 42. Ubicación de equipos para determinar la eficiencia óptica .	105
Figura 43. Variación de la temperatura en el cálculo de la eficiencia óptica.....	107

Figura 44. Ubicación de equipos para determinar el coeficiente global de pérdidas. ....	108
Figura 45. Variación de la temperatura en el cálculo del coeficiente global de pérdidas. ....	110
Figura 46. Eficiencia térmica del tubo absorbente con y sin cobertor de vidrio. ....	112
Figura 47. Ubicación de los equipos para la generación de vapor.....	113
Figura 48. Variación de la temperatura para la generación de vapor. .	115
Figura 50. Instalación para la generación de vapor. ....	116
Figura 51. Calentamiento de 500 litros de agua. ....	117

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1.	Datos obtenidos para determinar la eficiencia óptica del CCP sin cobertor de vidrio.....	106
TABLA 2.	Datos obtenidos para determinar la eficiencia óptica del CCP con cobertor de vidrio.....	106
TABLA 3.	Eficiencia óptica de CCP sin cobertor de vidrio.....	107
TABLA 4.	Eficiencia óptica de CCP con cobertor de vidrio.....	107
TABLA 5.	Datos obtenidos del tubo absorbente sin cobertor de vidrio.....	109
TABLA 6.	Datos obtenidos del tubo absorbente con cobertor de vidrio.....	109
TABLA 7.	Coefficiente global de pérdidas para el tubo absorbente sin cobertor de vidrio.....	110
TABLA 8.	Coefficiente global de pérdidas para el tubo absorbente con cobertor de vidrio.....	110
TABLA 9.	Datos de la generación de vapor.....	114
TABLA 10.	Datos del calentamiento de 500 litros de agua.....	116

## NOMENCLATURA

$G_{sc}$  : Constante solar,  $1,353 \text{ kWm}^{-2}$ .

$\alpha$ : Absortividad solar del tubo absorbente.

$\varepsilon$  : Emitividad infrarroja del tubo absorbente.

$\sigma$  :  $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  (constante de Boltzman).

$\beta$  : ángulo de aceptación,

$r$  : Reflectividad de la superficie reflectante del concentrador parabólico.

$\varphi$  : Factor de interceptación

$\tau$  : Transmitividad del cobertor de cristal,

$\eta$  : es el rendimiento,

$P_W$  : es la potencia asociada al trabajo producido por el sistema

$P_E$  : flujo de energía radiante sobre el sistema.

$d_o$ : diámetro externo del tubo absorbedor metálico

$l$  : longitud del concentrador cilíndrico parabólico

$l_a$ : ancho (abertura) del concentrador cilíndrico parabólico

$C_{optica}$  : concentración óptica

$C_{geometrica}$  : la razón de concentración geométrica

$K(\varphi)$  : modificador de ángulo de incidencia

$l_\varphi$  : longitud perdida en el extremo del concentrador

$f$  : distancia focal

$f_m$  : Distancia media entre la superficie de la parábola y el absorbedor dentro de una misma sección transversal del concentrador

$\varphi$  : ángulo de incidencia

$P_{Q,abs-amb}$ : Pérdidas térmicas por radiación en el tubo metálico absorbedor [W]

$P_{Q,abs-vidrio}$ : Pérdidas térmicas por conducción y convección entre el tubo metálico absorbedor y la cubierta de vidrio [W]

$P_{Q,vidrio-amb}$ : Pérdidas térmicas por convección, conducción y radiación desde la cubierta de vidrio del tubo absorbedor al ambiente [W]

$P_{Q,sol-vidrio}$ : Flujo de energía radiante proveniente del sol que es absorbida por la cubierta de vidrio del tubo absorbedor [W]

$P_{Qsol-concentrador}$  : Potencia radiante sobre la abertura del concentrador [W]

$P_{Q,concentrador-fluido}$  : Potencia térmica útil suministrada por el concentrador [W]

$A_c$  : área de abertura de la superficie reflexiva del concentrador [m<sup>2</sup>]

$E_d$  : irradiancia solar directa, Wm<sup>-2</sup>

$Q_m$  : Caudal másico del fluido de trabajo [kgs<sup>-1</sup>]

$h_{in}$  : Entalpia específica del fluido de trabajo a la entrada del concentrador [ J.kg<sup>-1</sup>]

$h_{out}$  : Entalpia específica del fluido de trabajo a la salida del concentrador [ J.kg<sup>-1</sup>]

$\eta_{global}$  : Rendimiento global

$\eta_{opt,0^\circ}$  : Rendimiento óptico con un ángulo de incidencia de  $0^\circ$  (rendimiento óptico pico)

$\eta_{th}$  : Rendimiento térmico

$T$  : Temperatura del tubo absorbente.

$U_{L,abs}$  : Coeficiente global de pérdidas del tubo absorbente por conducción, convección y radiación al ambiente.

$Q_{\acute{u}til}$  : Potencia útil [W]

$Q_{perdidas}$  : Potencia perdida por radiación, convección y conducción [W]

$Q_{absorbido}$  : Potencia absorbida por el área de absorbedor negro [W]

$Q_{sol}$  : Energía solar incidente sobre el área del tubo absorbente.

$T_{amb}$  : Temperatura ambiente [ $^\circ$  C]

$T_e, T_s$  : Temperatura de entrada y salida del fluido [ $^\circ$  C].

$A_r$  : Área del tubo absorbente [ $m^2$ ].

$\dot{m}$  : Flujo másico del fluido caloportador [ $kg s^{-1}$ ].

$\tau\alpha$  : Eficiencia óptica (producto de la absorptancia por la transmitancia)

$c$  : Calor específico del agua [ $kJ.kg^{-1}.\text{ }^\circ C^{-1}$ ].

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis desarrolla el diseño, construcción y evaluación de un sistema de concentración solar del tipo Cilíndrico Parabólico, el cual fue realizado en los ambientes del Centro de Energías Renovables de Tacna – CERT de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Para el diseño se utilizaron dos software tales como el Microsoft Excel y el AutoCAD.

Para la construcción se emplearon materiales que son fácilmente accesibles en el mercado nacional y local, parte de estos incluso son material reciclado, por ejemplo el cobertor de vidrio del tubo absorbente se tomó de tubos rotos de termas solares de tubos al vacío.

El factor de concentración del sistema es de 26,44 soles, con esto podemos alcanzar temperaturas superiores a los 100°C en el tubo absorbente en condiciones normales de temperatura y radiación (radiación directa).

Al evaluarse el concentrador se encontraron los valores de la eficiencia óptica para el caso de un CCP sin cobertor de vidrio es de 0,35, y la del CCP con cobertor de vidrio es de 0,71, y el coeficiente global de pérdidas

para el CCP sin cobertor de vidrio es de  $50,97 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ , y para el CCP con cobertor de vidrio es de  $5,10 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ .

Se generó vapor de agua a  $128 \text{ }^\circ\text{C}$ , casi inmediatamente, con un caudal de  $0.0083 \text{ ls}^{-1}$ ,

También se encontró que la velocidad de calentamiento del agua en un tanque con 500 litros de agua potable empleando el CCP es de  $0,14 \text{ }^\circ\text{C}$  por minuto.

## INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene por finalidad ampliar el conocimiento acerca de los sistemas de concentración de la energía solar, dicho sistema pertenece a una de las muchas tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables de energía, en este caso este sistema emplea la energía solar como fuente energética, debido a que es un recurso con alto potencial en la Región Tacna.

Los sistemas de concentración cilíndrico parabólico (CCP) son sistemas que pueden llegar a generar temperaturas superiores a los 250°C del fluido de trabajo, esta puede ser empleada para cubrir las necesidades de fluidos a alta temperatura en diversas actividades comerciales e industriales.

Realizando el estudio del sistema de concentración cilíndrico parabólico se ha demostrado que es una opción atractiva económica, ambiental y energéticamente.

El concentrador cilíndrico parabólico, está constituido básicamente por varias planchas de aluminio anodizado que van sobrepuestos sobre una estructura metálica de forma parabólica, la cual concentra la radiación solar en el foco de la parábola, lugar por el cual pasa el absorbedor o tubo

absorbente, el mismo que cuenta con un cobertor de vidrio para evitar las pérdidas de calor del tubo absorbedor al medio ambiente.

La tesis cuenta con siete capítulos que se detallan a continuación:

En el Capítulo 1 se describe la problemática energética nacional y mundial, así como la hipótesis y los objetivos de la presente tesis.

En el capítulo 2 se detalla el fundamento teórico de la radiación solar y el aprovechamiento de la misma con los concentradores cilíndrico parabólicos.

En el capítulo 3 se muestra los pasos para el diseño y la construcción y el montaje del concentrador cilíndrico parabólico.

En el capítulo 4 se describe la metodología a seguir para la evaluación del concentrador cilíndrico parabólico.

En el capítulo 5 se muestran los resultados de la evaluación realizada al concentrador cilíndrico parabólico.

En el capítulo 6 se muestran las conclusiones de la tesis y las recomendaciones para un mejor funcionamiento del concentrador cilíndrico parabólico.

En el capítulo 7 se muestra la bibliografía empleada en el desarrollo de la tesis.

## **CAPITULO 1:**

### **DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Planteamiento de problema**

Actualmente en nuestro país el desarrollo las energías renovables vienen tomando fuerza, con la implementación de parques solares, parques eólicos, centrales hidroeléctricas, entre otras, pero el desarrollo del aprovechamiento de la energía solar por medio de sistemas de concentración no se encuentra muy estudiada, en comparación a otros países tales como España, Estados Unidos y otras que apuestan por esta tecnología para la generación de energía eléctrica la cual es económicamente factible y a la vez amigable con el medio ambiente.

Viéndose que la investigación de los sistemas de concentración de la energía solar en nuestro país es aún muy joven, es necesario investigarla, diseñando y creando prototipos e irlos mejorando hasta alcanzar un desempeño óptimo de estos sistemas, que a su vez que sean accesibles a las industrias, con materiales que sean de fácil acceso y sean bajos en precios, además de ser sistemas sin emisiones de gases de efecto invernadero.

La presente tesis tiene por finalidad desarrollar un sistema de concentración de energía solar del tipo cilíndrico parabólico, el cual generara vapor de agua a alta temperatura, dicho sistema puede ser empleado para diversas actividades en las cuales sea necesario el vapor de agua a elevada temperatura en el sector industrial y a futuro para la generación de electricidad.

¿Es posible generar vapor de agua a alta temperatura mediante la concentración de la energía solar a través de un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Diseñar, construir y evaluar un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico, con el propósito de transformar la energía solar en energía térmica, para la obtención de vapor de agua a alta temperatura.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar la estructura física de un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico.
- Construir la estructura física de un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico.

- Generar vapor de agua a alta temperatura usando como fuente energética la radiación solar.
- Evaluar el Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico, determinando el factor de concentración geométrico, y su rendimiento térmico – energético bajo las condiciones de radiación solar de la ciudad de Tacna.
- Determinar experimentalmente la eficiencia óptica y energética del Concentrador Cilíndrico Parabólico.
- Caracterizar el funcionamiento térmico - energético de un Concentrador solar Cilíndrico Parabólico.

### **1.3. Hipótesis**

“Se puede generar vapor de agua a alta temperatura mediante la concentración de la energía solar a través de un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico.”

## **CAPITULO 2:**

### **FUNDAMENTO TEORICO**

#### **2.1. Presentación**

Actualmente existe todo un abanico de opciones tecnológicas para aprovechar energéticamente la radiación solar. De todas las opciones disponibles, solo algunas son conocidas popularmente, como es el caso de los sistemas solares para producción de agua caliente o los sistemas fotovoltaicos para producir electricidad. Pero existen otras tecnologías desconocidas por la gran mayoría de la población. A pesar de estar suficientemente maduras como para ser implementadas comercialmente a gran escala. Tal es el caso de los Concentradores Solares Cilíndrico Parabólicos, conocidas mediante las siglas CCP.

Los CCP son captadores solares de concentración que transforman la radiación solar directa en energía térmica, calentando un fluido de trabajo hasta temperaturas del orden de los 675 K, con una eficiencia de 60 % - 70 %. Debido a la elevada temperatura de trabajo que pueden alcanzar, los CCP, son idóneos para alimentar térmicamente a una gran diversidad de procesos industriales (producción de acetona, industria láctea, procesado de residuos, producción de electricidad mediante ciclos

Rankine, etc), reemplazando de este modo a los combustibles fósiles tradicionales.

Buena prueba de la madurez tecnológica que tienen actualmente los sistemas solares con CCP son los más de 2,5 millones de metros cuadrados de CCP que existen actualmente en California (EEUU) y que alimentan térmicamente a ocho centrales eléctricas termosolares denominadas SEGS – II, III, ..., IX, que poseen una potencia total de 340 MWe.

En las plantas SEGS, los CCP son utilizados para producir electricidad a partir del ciclo Rankine. La tecnología utilizada por dichas plantas es la denominada *Heat Transfer Fluid*, conocida internacionalmente con las siglas HTF, que consiste en utilizar un medio de transferencia de calor (generalmente se trata de aceite sintético) que transporta la energía térmica suministrada por un campo de solar CCP hasta el bloque de potencia en el cual se aprovecha dicha energía para alimentar un ciclo Rankine de agua/vapor. De este modo, la radiación solar directa es transformada primeramente en energía térmica posteriormente el electricidad. El aceite calentado por el campo de colectores solares es enviado a un intercambiador de calor aceite/agua donde se produce vapor sobrecalentado que requiere la turbina de vapor para accionar el generador eléctrico correspondiente.

Las plantas SEGS nacieron impulsadas por el aumento de precio del petróleo en los años setenta. No obstante, la reducción del precio de petróleo en los años ochenta puso de manifiesto la necesidad de reducir los costes e incrementar la eficiencia de los sistemas solares CCP para aumentar su competitividad frente a los sistemas convencionales basados en combustibles fósiles.

Teniendo en cuenta que los procesos industriales trabajan en el rango de temperatura 425 K – 675 K suelen ser alimentados mediante vapor, la tecnología HTF requiere el uso de un intercambiador de calor intermedio aceite/agua para generar vapor que demanda el proceso al cual se acopla en campo solar. Así pues entre las posibles mejoras que desde un principio han demostrado un mayor potencial para reducir los costes y aumentar la eficiencia de este tipo de sistemas solares, destaca la generación en los mismos colectores el vapor que requiere el proceso industrial. Este proceso se denomina Generación Directa de Vapor (GDV), y permite eliminar la necesidad de un fluido intermedio (aceite) y del intercambiador de calor que requiere la tecnología HTF, con la consiguiente reducción de costes y aumento de la eficiencia global del sistema.

A pesar del gran interés que el proceso GDV presenta para aumentar la competitividad de los sistemas CCP, su implementación comercial

requiere la previa investigación experimental de algunas cuestiones técnicas que resultan esenciales para que el proceso sea viable. Entre dichas cuestiones están los gradientes de temperatura y el estrés que se produce en los tubos absorbedores de los colectores solares como consecuencia del flujo bifásico agua/vapor que circula por su interior. También es necesario investigar experimentalmente las diferentes formas en las que el vapor puede ser producido directamente en los CCP.

## **2.2. El Sol y La Radiación Solar**

El Sol, como cualquier otra estrella activa, es un gigantesco reactor de fusión en el que cada segundo se generan 600 millones de toneladas de helio a través del ciclo protón-protón, que puede sintetizarse en la siguiente reacción:  $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^- + \nu_e + 26,2\text{MeV}$ . Estos procesos de fusión nuclear liberan una enorme cantidad de potencia calorífica, evaluada en  $3,86 \times 10^{23}$  kWh.

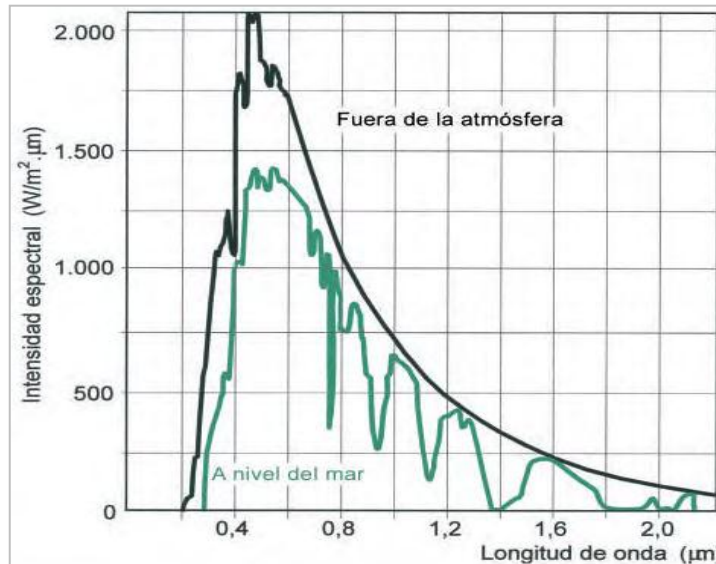
A pesar de la compleja estructura del Sol, para el aprovechamiento de su energía se puede adoptar un modelo mucho más simplificado. Así, se considera el Sol como un cuerpo negro que radia energía a la temperatura de 5780 K, ya que su distribución espectral es muy similar a la de dicho cuerpo negro para el rango de longitudes de onda típico de los procesos térmicos y fototérmicos.

En la Figura 1, se ha representado la distribución espectral de la radiación extraterrestre y de la radiación a nivel del mar.

Se denomina radiación extraterrestre a la radiación que llega a la Tierra procedente del Sol y que no ha sufrido todavía la atenuación atmosférica. Lógicamente, esta radiación sí que va a estar sometida a una atenuación geométrica (proporcional a la distancia al cuadrado), de tal forma que en el exterior de la atmósfera terrestre su valor es de  $1,73 \times 10^{14}$  kW, o también,  $1,353 \text{ kWm}^{-2}$ , que es el valor de la constante solar,  $G_{sc}$ .

Existen dos fuentes de variación de la radiación solar extraterrestre que deben ser tenidas en cuenta (*Duffie y Beckman, 1991*):

La variación intrínseca de la radiación emitida por el Sol. En la bibliografía se pueden encontrar distintas explicaciones de estas alteraciones, muchas de ellas contradictorias. Debido a esta incertidumbre y a que representan un valor muy pequeño comparado con las variaciones atmosféricas, la energía que emite el Sol puede considerarse constante para aplicaciones de ingeniería.



**Figura 1.** Intensidad del espectro solar en función de la longitud de onda

**Fuente:** *Martínez et al., (2004)*

La variación de la distancia Tierra-Sol, sin embargo, sí que ha de tenerse en cuenta, por producir una variación del flujo de radiación en el rango de  $\pm 3\%$ . La dependencia de la radiación extraterrestre con el día del año viene dado por la ecuación:

$$G_{on} = G_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \quad (2.1)$$

Donde  $n$  es el día del año y  $G_{sc}$  el valor antes dicho de la constante solar,  $1,353 \text{ kWm}^{-2}$ .

Al atravesar la capa atmosférica, la radiación va a ser difundida y absorbida, incluso reflejada, por las moléculas en suspensión dentro de la misma, como por ejemplo el vapor de agua condensado en las nubes.

No obstante, como habrá una cierta cantidad de radiación solar que no encontrará obstáculo y otra cantidad que sí, se introducen los siguientes conceptos:

**Radiación directa:** es la radiación solar recibida en la superficie terrestre sin que haya sufrido ningún cambio de dirección en su recorrido.

**Radiación difusa:** es la componente de la radiación solar recibida en la superficie terrestre después de que los procesos de dispersión (reflexión y difusión) por la atmósfera hayan modificado su recorrido.

**Radiación de albedo:** es la componente de la radiación solar procedente de la reflexión del suelo.

La radiación total será la suma de la radiación directa, difusa y de albedo.

Como conclusión, se puede afirmar que la radiación total incidente sobre la superficie de la Tierra va a estar sujeta a variaciones, algunas previsibles (diurnas y estacionales) y otras no previsibles (las meteorológicas, particularmente el vapor de agua condensado en las nubes).

Por ello, como se observa en la Figura 1, la distribución espectral de la radiación solar a nivel del mar se modifica respecto a la extraterrestre. Estas variaciones son sin duda un problema para la explotación de la energía solar térmica, que puede paliarse en cierta medida con mecanismos de almacenamiento de energía. Conviene subrayar que el nivel de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra es relativamente moderado, e incluso muy bajo, para las aplicaciones industriales, lo cual comporta numerosos problemas que en definitiva se manifiestan como dificultades de coste y tecnología para aprovechar esta energía. En el caso de necesitarse flujos de energía no muy altos, se puede utilizar radiación difusa, que tiene la ventaja de no requerir ningún tipo de movimiento de los paneles solares para hacer un seguimiento del sol a lo largo de su trayectoria diurna. Por el contrario, si las aplicaciones energéticas requieren mayores valores de flujo de radiación, hay que concentrar la radiación solar, y ello sólo puede hacerse con la radiación directa, lo cual restringe la ubicación de estas aplicaciones a los parajes de gran insolación, ya que de otra forma se encontrarían muy pocas horas al año de radiación útil a los efectos buscados por este tipo de colectores.

### **2.3. Concentración de la radiación solar**

Visto desde la tierra y de una forma aproximada se puede decir que el sol se comporta como un cuerpo negro a una temperatura de 5777 K. Esta

elevada temperatura confiere a la radiación solar una alta calidad termodinámica. Desde un punto de vista termodinámico, si se tiene un sistema solar que convierte la energía de la radiación solar en trabajo (sea de naturaleza mecánica, eléctrica, térmica o química), sin otro consumo energético adicional, el rendimiento viene dado por la ecuación 2.2 donde  $\eta$  es el rendimiento,  $P_W$  es la potencia asociada al trabajo producido por el sistema y  $P_E$  representa el flujo de energía radiante sobre el sistema.

$$\eta = \frac{P_W}{P_E} \quad (2.2)$$

El límite máximo del rendimiento que puede tener el sistema solar que se está considerando viene impuesto por el ciclo de Carnot cuyas temperaturas superior o inferior coinciden respectivamente con la equivalencia del sol como su cuerpo negro radiante ( $T_{\text{sol}} = 5777 \text{ K}$ ) y la del ambiente ( $T_{\text{Amb}} = 300 \text{ K}$ ). Dicho rendimiento se calcula en función de estas temperaturas mediante la ecuación 2.3, obteniéndose el valor de 0,948.

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T_S} \quad (2.3)$$

Para hacer una aproximación más real, debe tenerse en cuenta el carácter espectral de la radiación solar y el flujo de energía radiante

asociado a cada diferencial de longitud de onda, ya que es de mayor calidad la radiación con longitudes de onda,  $\lambda$ , más cortas. De este modo la ecuación 2.2 se transforma en la ecuación 2.3

$$\eta = \frac{P_W}{P_E} = \frac{\int_0^{\infty} P_{W\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{E\lambda} d\lambda} \quad (2.4)$$

La elevada exergía que posee la radiación solar en su origen se ve disminuida drásticamente cuando llega a la superficie terrestre, debido a la reducción que experimenta su flujo ( $1367 \text{ Wm}^{-2}$  en el exterior de la atmosfera terrestre, frente a los  $63,2 \text{ MWm}^{-2}$  en la superficie del sol) este inconveniente puede salvarse, aunque sea parcialmente, mediante la concentración de la radiación solar que nos llega a nivel de la superficie terrestre, de modo que a mayor grado de concentración, mayor es el rendimiento máximo alcanzable mediante un sistema solar térmico.

De una forma más intuitiva, se puede decir que la temperatura alcanzable con nuestro sistema al obtener energía térmica a partir de la radiación solar marca la calidad energética del sistema, siendo mayor cuanto mayor es dicha temperatura. Como la irradiancia solar a nivel de la superficie terrestre es baja ( $E < 1367 \text{ Wm}^{-2}$ ), la temperatura que se puede alcanzar en nuestro sistema térmico es muy limitada si no se recurre a la concentración de la radiación solar. Cuanto mayor sea el grado de

concentración, mayor será la temperatura máxima posible y, por consiguiente, el rendimiento exergético de nuestro sistema.

No obstante, también hay que tener presente que la concentración de la radiación solar tiene el inconveniente de aprovechar solamente la radiación solar directa y una pequeña fracción de la radiación difusa, y además requiere de equipos ópticos y mecánicos que pueden llegar a tener un precio elevado si se desea conseguir un alto grado de concentración, por lo que se planean unos límites prácticos a la concentración de la radiación solar frente a los máximos teóricos alcanzables. A esto hay que añadir que la propia limitación de que el sol visto desde la tierra no es una fuente luminosa puntual, ya que la esfera solar sustiende un ángulo solido de  $0,25^\circ$ , y que la segunda ley de la termodinámica impone también un límite para la concentración óptica,  $C_{optica}$ , lo cual conduce a un valor de  $C_{optica} = 46200$  para el límite teórico de la concentración en el caso de un concentrador de foco puntual, y ,  $C_{optica} = 220$  para el caso de concentradores con foco lineal. De hecho, en los sistemas solares que existen actualmente no se sobrepasa una concentración de más de 5000, con la salvedad de algunos hornos solares en los que se alcanzan concentraciones del orden de 10000.

Desde este punto de vista de la concentración de la radiación solar, los captadores solares pueden dividirse en dos grandes grupos:

a) **Captadores sin concentración:** aquellos en los que la radiación solar es convertida en energía térmica sin sufrir previamente una concentración.

b) **Captadores con concentración:** aquellos en los que la radiación solar es concentrada antes de convertirla en energía térmica.

Dependiendo de la temperatura a la que se desee calentar el fluido de trabajo que circula por los captadores, resultara más idóneo un tipo u otro captador solar. Asilos captadores sin concentración son adecuados para temperaturas inferiores a los 375 K, aunque a veces (captadores de vacío) pueden llegar a trabajar a temperaturas del orden de los 425 K. Si se desean conseguir temperaturas más altas, entonces es necesario concentrar la radiación solar.

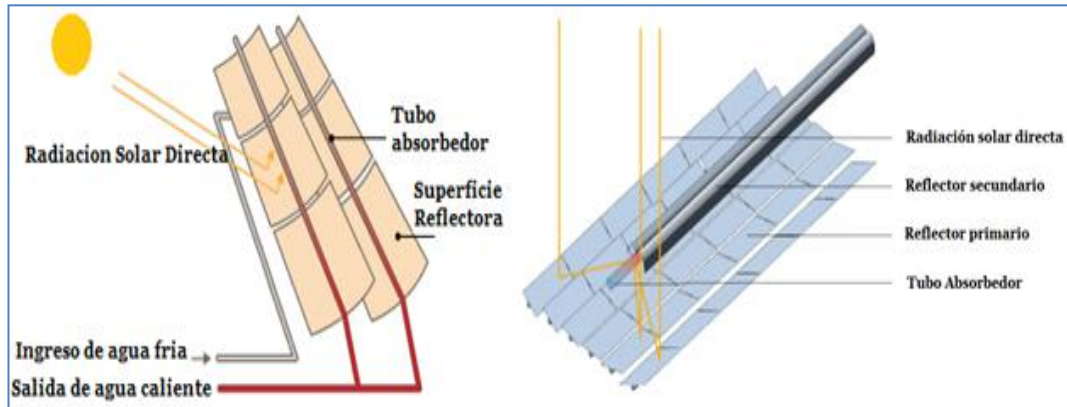
El grado de concentración deberá ser tanto más alto cuanto mayor sea la temperatura de trabajo deseada.

La concentración de la radiación solar puede realizarse de diversas formas, siendo las dos más comunes las siguientes: (Figura 2)

- Utilización de una superficie reflectante (espejo) que concentre la radiación solar directa sobre un receptor con una superficie menor que la superficie captadora.

- Utilización de lentes Fresnel, que consisten en muchas superficies refractivas pequeñas.

Aunque este tipo de concentración refractiva puede hacerse también con lentes convexas, las lentes Fresnel son más baratas, más ligeras y absorben menos energía. Como ya ha sido puesto de manifiesto en un párrafo anterior, los captadores con concentración solo pueden aprovechar la radiación solar directa, porque es la única que tiene una trayectoria bien definida. La radiación solar difusa es inutilizable casi en su totalidad por aquellos captadores solares que concentran la radiación solar mediante espejos o lentes. Por el contrario, la componente difusa de la radiación solar resulta útil para los captadores solares sin concentración como es el caso de los captadores planos usados para agua caliente, o para aquellos captadores solares con un grado de concentración muy pequeño ( $<2$ ).



**a) Concentración mediante una superficie reflectora**

**b) Concentración mediante lentes Fresnel**

**Figura 2.** Formas más comunes para concentrar la radiación solar directa

**Fuente:** Romero, M., Zarza, E. (2007)

Debido a que los captadores solares de concentración utilizan solamente la radiación solar directa, y puesto que la trayectoria de dicha radiación viene dada por la posición del sol con respecto a la tierra, los captadores de concentración tienen que ir provistos de un sistema de movimiento que le permita hacer un seguimiento del sol a lo largo del día. La existencia de sistemas de seguimiento hace que este tipo de captadores solares sea mas caro, pero no sería posible alcanzar temperaturas altas sin concentración. Además actualmente existen sistemas de seguimiento solar muy perfeccionados y económicos por lo que esta necesidad no

supone ninguna barrera para el uso comercial de los colectores de concentración.

De todos los captadores solares con concentración que existen actualmente en el mercado, los colectores solares cilíndrico parabólicos son los que poseen una mayor implantación comercial.

#### **2.4. Concentrador cilíndrico parabólico**

Un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico, conocido mediante las siglas CCP, está compuesto básicamente por un espejo cilíndrico parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo absorbedor colocado en la línea focal de la parábola. Esta radiación concentrada sobre el absorbedor hace que el fluido que circula por el interior del tubo se caliente, obteniendo de esa forma energía térmica a partir de la radiación solar, Kalogirou,S. (2004).

Los CCP son, colectores solares de concentración con foco lineal, que permite alcanzar temperaturas de hasta 675 K con una buena eficiencia (60% - 70%). La concentración óptica de la radiación solar hace que la superficie del tubo absorbedor sea mucho menor que el área de abertura del colector, lo que reduce significativamente las pérdidas térmicas del colector, ya que las pérdidas térmicas son función no solo de la temperatura media de trabajo, sino también de la superficie del

absorbedor, que es el componente “caliente” del colector. Como se explicó anteriormente este tipo de colectores solo aprovecha la radiación solar directa, además exige que el colector se mueva a lo largo del día conforme el sol describe su trayectoria diaria.

Desde un principio, los CCP fueron pensados para aplicaciones que demandasen energía térmica a unos niveles superiores a los 400 K, que suelen ser procesos industriales. Puesto que la potencia térmica demandada por cualquier proceso industrial es del orden de los kW o incluso de los MW, los CCP han sido tradicionalmente diseñados para ser instalados en grandes campos solares, varios ordenes de magnitud mayores a los tradicionales sistemas domésticos de producción de agua caliente. Además, por razones de economía, las dimensiones de un CCP son notablemente mayores que las de un colector solar plano. Debido a la necesidad de poseer un sistema de seguimiento solar y a las características técnicas y constructivas inherentes a este tipo de concentrador solar, se consigue una reducción notable del coste específico por metro cuadrado de captación cuando se incrementa el tamaño del CCP, dentro de unos límites lógicos, Diver, R., Moss, T. (2007).

#### **2.4.1. Componentes principales de un CCP**

Los componentes principales de un CCP son:

- El reflector cilíndrico parabólico
- El tubo absorbedor o receptor
- El sistema de seguimiento solar
- La estructura metálica



**Figura 3.** Componentes de un CCP

**Fuente:** Richter et al., (2009)

La misión del reflector cilíndrico parabólico es, como su nombre lo indica, la de reflejar la radiación solar que incide sobre el y proyectarla de forma concentrada sobre un tubo absorbedor situado en la línea focal del reflector. Se trata en definitiva de un espejo que, gracias a su forma geométrica, concentra sobre una línea focal toda la radiación solar directa que incide sobre su abertura. Para llevar a cabo la reflexión, se utiliza películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da la

suficiente rigidez. En la actualidad se utilizan diferentes tipos de soporte para la película reflectante: a) planchas metálicas, b) plástico, o c) cristal.

**En el caso de planchas metálicas**, se suelen usar planchas de aluminio pulido de alta reflectividad en las que el material soporte actúa a la vez de elemento reflectivo con una reflectancia especular aproximada del 80%. La principal ventaja de esta opción es su bajo costo, pero posee una baja durabilidad, ya que la reflectividad del aluminio se deteriora con cierta rapidez cuando está a la intemperie, por lo que los reflectores de plancha de aluminio no suelen usarse para aplicaciones industriales donde se requiere gran durabilidad. Cuando el medio de soporte es vidrio, sobre la cara superior se deposita una fina película de plata protegida por una película de cobre y otra de pintura epoxi. El resultado final es un espejo similar al que se usa en cualquier casa o tienda. Dependiendo del espesor del vidrio sobre el que se deposita la película reflexiva de plata, se tienen dos tipos diferentes de espejos: a) de vidrio grueso (espesor  $>3\text{mm}$ ), o b) de vidrio delgado (espesor  $<1,5\text{mm}$ ).

Cuando se utiliza vidrio grueso como soporte, antes de depositar la película de plata, el vidrio es curvado en caliente para que adopte la forma parabólica que debe tener, de modo que los espejos pueden ir directamente colocados sobre la estructura metálica del colector. Un

ejemplo de este tipo de espejos es el utilizado en los colectores LS-3 y EUROTROUGH (Figura 4a)

Cuando el espesor del vidrio es pequeño ( $<1,5$  mm) los espejos tienen la suficiente flexibilidad como para curvarse en frío y pueden pegarse directamente sobre una placa metálica que es la que asegura la adecuada curvatura del concentrador (véase Figura 4a). Es decir, la forma cilíndrico parabólica la aporta una placa metálica gruesa donde se pegan los espejos de pequeños espesor. Un ejemplo de este tipo de espejos es el fabricado y comercializados por la empresa europea HIRTZ con vidrio de 1mm de espesor y usado en los discos parabólicos fabricados por la empresa alemana SchlaichBergmannundPartner (SBP).



a) Vidrio grueso

b) vidrio delgado

**Figura 4.** Diferentes tipos de vidrios

**Fuente:** *El campo de captadores (2010)*

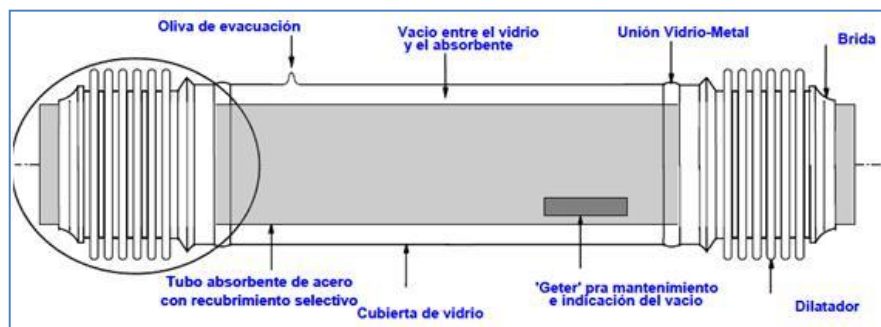
El concentrador cilíndrico parabólico, construido en para el desarrollo de la presente tesis, cuenta con un reflector de aluminio anodizado, el mismo que posee una reflectancia de 82%, una de las ventajas del empleo de este tipo de reflectores es que además de concentrar la radiación solar concentra también la radiación ultravioleta de manera superior a los demás tipos de reflector.

Cuando el medio de soporte de la película reflectante es plástico, lo que se hace es depositar la película de plata o aluminio sobre un film de material plástico, de modo que al final lo que se tiene es una fina lamina de plástico reflectante que puede pegarse sobre cualquier substrato.

En este caso, como en el de los vidrios delgados, la forma parabólica del concentrador tiene que ser aportada por un soporte más resistente donde se pegara el film reflectante. Según Price,H.,Lupfer,E. (2002), La firma 3M tiene diferentes productos de este tipo como el ECP-305. El principal problema de estos films reflectantes es su baja durabilidad en la intemperie, ya que las partículas que transporta el aire araña y erosionan su superficie, lo que a su vez resulta en una pérdida de specularidad. Otro problema que se ha detectado con este tipo de superficies reflexivas es que presentan un grado de ensuciamiento mayor que los espejos de vidrio. Se piensa que el mayor ensuciamiento es debido a que se cargan

electrostáticamente por la acción del viento y, atraído por esta carga electrostática, se depositan sobre ellas una mayor cantidad de polvo.

El tubo absorbedor (véase Figura 5) es uno de los elementos fundamentales de todo el CCP, ya que de él depende en gran medida el rendimiento global del concentrador. El tubo absorbedor de un CCP, consta en realidad de dos tubos: uno interior metálico (por el que circula el flujo que se calienta) y otro exterior de cristal.



**Figura 5.** Tubo absorbedor de vacío para CCP

**Fuente:** Jurgens et al., (2010)

El tubo metálico lleva recubrimiento selectivo que posee una elevada absorptividad (>90%) y una baja emisividad en el espectro infrarrojo (<30%), lo que le proporciona un elevado rendimiento térmico. Hay diferentes tipos de recubrimiento selectivos. Los más asequibles están compuestos por una película de cromo, níquel, o cobalto negro, que

poseen una buena absorptividad y una emisividad moderada. El único inconveniente es que no pueden trabajar a temperaturas superiores a los 575K, porque se degradan rápidamente y su emisividad aumenta. Para temperaturas superiores (hasta 700K) hay que recurrir a recubrimientos selectivos obtenidos por Sputtering o PVD (Physical Vapour Deposition), que consiguen una absorptividad superior al 95% y una emisividad del 15% e incluso menor a 675 K. el principal problema de los recubrimientos mediante PVD o Sputtering es que la mayoría de ellos se degradan al contacto con el aire cuando están calientes, por lo que requieren que exista un alto vacío en la cámara que queda entre el tubo metálico interior y la cubierta de cristal,.

El tubo de cristal que rodea al tubo interior metálico tiene una doble emisión: proteger el recubrimiento selectivo de las inclemencias meteorológicas, y reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo absorbedor. Cuando entre el tubo metálico y el tubo de vidrio se hace el vacío para que no se degrade la superficie selectiva, los extremos del tubo de vidrio van unidos, mediante una soldadura vidrio-metal, a un fuelle metálico que va soldado por su otro extremo al tubo metálico interior. De esta forma se logra que exista un espacio anular estanco entre el tubo interior metálico y el exterior de vidrio, a la vez el fuelle metálico sirve para

compensar la diferente dilatación térmica de los tubos de vidrio y metal cuando se alcanza la temperatura de trabajo.

El tubo de cristal suele conllevar un tratamiento antireflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmitividad y aumentar el rendimiento óptico del concentrador.

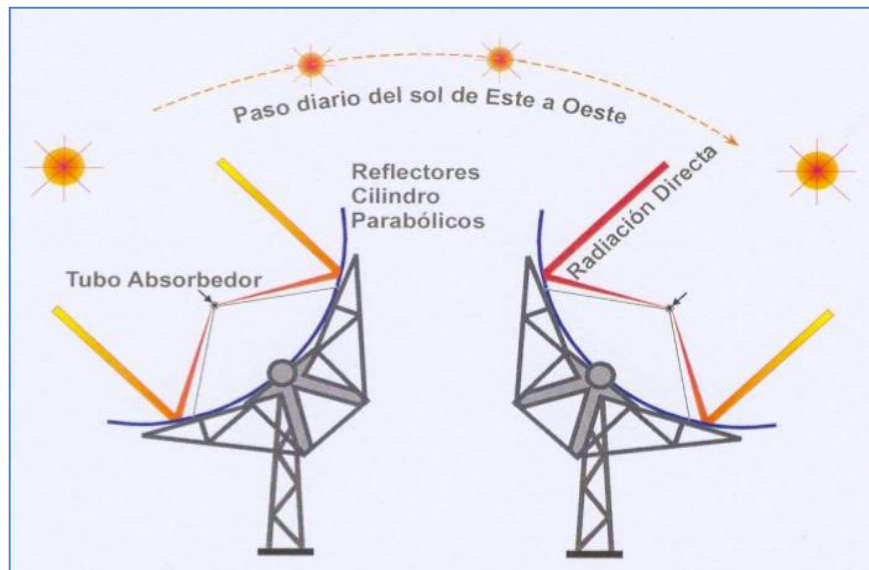
Cuando entre el tubo de cristal y el tubo interior de acero hay vacío, se colocan adheridas al tubo metálico unas piezas pequeñas, con forma redonda o plana, que tienen por misión la de absorber las escasas moléculas de las diferentes sustancias que, con el paso del tiempo puedan ir penetrando en el espacio anular que hay entre el tubo metálico y el de vidrio y que irían degradando el vacío inicial si no se eliminasen. Debe tenerse en cuenta que el vacío que existe inicialmente entre el tubo metálico y el de vidrio es de  $10^{-4}$  Pa (alto vacío). Estas piezas especialmente se denominan Getters y deben ser manejadas con precaución durante el proceso de fabricación de tubo, ya que si se activan en contacto con el aire pueden dar lugar a una pequeña deflagración.

Para hacer el vacío, una vez fabricado el tubo se conecta una bomba de vacío a una pequeña toma que existe en la cubierta de vidrio (oliva de evacuación), la cual se sella cuando se ha alcanzado el vacío deseado. El tubo absorbedor mostrado en la Figura 5, que posee una longitud de 4

metros, corresponde al tubo absorbedor diseñado por la empresa SOLEL Solar Systems.

Para poder concentrar la radiación solar sobre el tubo absorbedor, el CCP debe seguir al sol durante el día, para lo cual se necesita un mecanismo de seguimiento solar que cambie la posición del CCP conforme el sol se va moviendo en el cielo, el sistema de seguimiento solar más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilíndrico parabólicos del CCP alrededor de un eje. La Figura 6 muestra el funcionamiento de un sistema de seguimiento solar en un eje, como es el caso del concentrador mostrado en la Figura 3.

Aunque también se han fabricado CCP que pueden girar en dos ejes, la experiencia ha demostrado que dichos concentradores son menos rentables porque necesitan mayor mantenimiento (debido a su mayor complejidad mecánica) y aunque el flujo útil de radiación solar sobre el área de abertura es mayor que en un concentrador con sistema de seguimiento de un eje, las pérdidas térmicas también son superiores porque la longitud de tubería pasivas (tuberías provistas de aislamiento térmico) dentro del concentrador es mayor, por lo que la potencia térmica útil que suministran es igual o menor que en los concentradores con seguimiento en un solo eje.



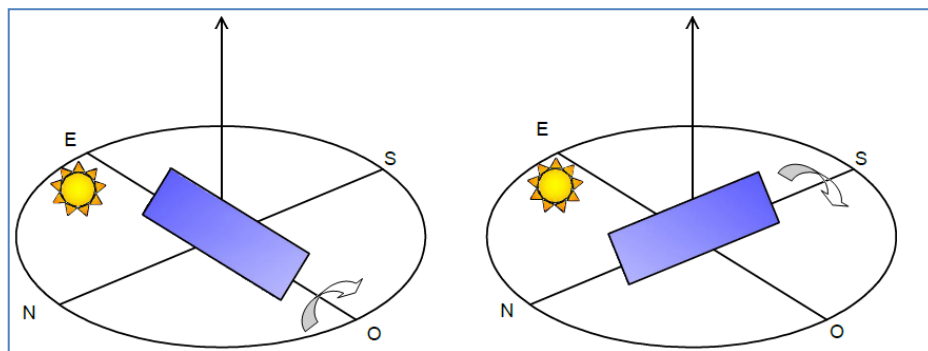
**Figura 6.** Esquema de funcionamiento de un sistema de seguimiento solar en un eje

**Fuente:** *Jurgens et al., (2010)*

Normalmente, los CCPs se instalan de forma que su eje de giro quede orientado en la dirección Este –Oeste o Norte – Sur, aunque se puede utilizar también orientaciones intermedias. La Figura 7 muestra las dos orientaciones más usuales.

La rotación del colector requiere un mecanismo de accionamiento, eléctrico o hidráulico, que mueva e colector de acuerdo con la posición del sol. La Figura 8 muestra los dos tipos de mecanismos de accionamiento más usuales. A veces se utiliza un mecanismo consistente en un motor

eléctrico acoplado a una reductora cuyo eje de salida va rígidamente unido al eje de rotación del concentrador, como el mecanismo mostrado en la Figura 8.a , que corresponde al de un concentrador ACUREX 3001. Este tipo de mecanismos es más adecuado para concentradores de tamaño pequeño o medio, donde no se requiera altos pares de giro en el eje del colector.



a) Orientación Este-Oeste

b) Orientación Norte-Sur

**Figura 7.** Las dos principales orientaciones del eje de giro de un CCP

**Fuente:** *Elaboración propia*

Para colectores grandes, como los modelos LS-3 o EUROTROUGH, los altos pares requeridos para girar al colector obligan a usar mecanismos hidráulicos, como el mostrado en la Figura 8.b. En estos mecanismos, una bomba eléctrica alimenta dos pistones hidráulicos que son los que giran la estructura del colector alrededor del eje de seguimiento.



a) Motor eléctrico con reductor

b) Mecanismo Hidráulico

**Figura 8.** Diferentes tipos de accionamiento

**Fuente:** *Jurgens et al., (2010)*

Con el fin de abaratar costos y simplificar la construcción del CCP, un solo mecanismo de acondicionamiento mueve a varios módulos cilíndrico parabólicos conectados en serie y operados conjuntamente por un solo elemento.

El mecanismo de accionamiento normalmente cuenta con un sistema de control electrónico basado en un sensor solar que detecta la posición del sol, este sistema direcciona al concentrador de una manera conveniente que siempre este enfocado hacia el sol.

Los sensores solares más comunes están constituidos por dos fotocélulas instaladas sobre una superficie plana de modo que están separadas por una fina pared intermedia (llamada banda de sombra), y el conjunto del sensor se instala en el CCP de forma que el sol se encuentre en un plano normal a dicha superficie cuando el concentrador está bien enfocado, y la banda de sombra quede paralela al eje de giro del concentrador. De este modo, cuando el colector está orientado correctamente, la banda de sombra no ensombrece ninguna de las fotocélulas y sus salidas eléctricas están equilibradas. Conforme el sol se va moviendo en el cielo, la banda de sombra empieza a sombrear parcialmente a una de las fotocélulas, provocando el desequilibrio de las señales eléctricas suministradas por ambas fotocélulas. Este desequilibrio entre las señales eléctricas proporcionadas por las fotocélulas es procesado por un comparador electrónico que, dependiendo de la magnitud y polaridad de la diferencia entre ambas señales, ordena al mecanismo de accionamiento que gire el concentrador en el sentido correcto hasta que desaparece la sombra y la señal suministrada por ambas fotocélulas coincide.

Actualmente existen también sistemas de seguimiento solar basados en algoritmos matemáticos que calculan con gran precisión las coordenadas del sol con respecto al concentrador, lo que permite prescindir de los sensores solares tradicionales. Mediante un decodificador angular

acoplado al eje de giro del concentrador se puede conocer con gran precisión la posición del concentrador en cada instante. Si la posición del concentrador dada por el decodificador angular no se corresponde con la que debería de ser para que, de acuerdo con la posición del sol calculada por el algoritmo, el concentrador este adecuadamente enfocado, un microprocesador da la orden al mecanismo de accionamiento para que se mueva el concentrador hasta que la posición de su eje e giro sea la que debe ser.

#### **2.4.2. Fluido de trabajo para un CCP**

El rango de temperatura ideal para trabajar con concentradores cilíndrico parabólicos es 425K – 675K. Para temperaturas superiores, las pérdidas térmicas de este tipo de colectores son altas y reducen su rendimiento. Para temperaturas inferiores a 425K hay otros concentradores más económicos (concentradores CPC, o colectores de vacío).

El tipo de fluido que se utiliza en los CCP depende de la temperatura que se desee alcanzar. Si las temperaturas que se desean son moderadas (<450K) la utilización de agua desmineralizada como fluido de trabajo no conlleva grandes problemas, ya que la presión de trabajo no es excesiva. En cambio, se utiliza aceite sintético en aquellas aplicaciones donde se desean temperaturas más altas ( $400K < T < 675K$ ). La explicación de este

hecho estriba en que para temperaturas altas las tuberías deberían estar sometidas a elevadas presiones si el fluido de trabajo es agua, porque para evitar que se evapore el agua es necesario mantenerla en todo momento a una presión superior a la de saturación correspondiente a la temperatura máxima que alcance el agua en los concentradores solares. Esto significa que si se desea tener agua caliente a 590 K a la salida de los concentradores, la presión en el circuito tendrá que ser superior a 10 MPa. En cambio, puesto que la presión de vapor del aceite para estas temperaturas es mucho menor que la del agua, se puede calentar a 590 K sin tener que mantener el circuito a más de 1,5 MPa. Trabajar a menores presiones posibilita usar materiales más económicos para las tuberías y simplifica la instalación y sus medidas de seguridad.

Existe una diversidad de opciones que hay que valorar antes de seleccionar el fluido de trabajo para un campo de concentradores cilíndrico parabólicos. En los colectores solares planos usados para producir agua caliente sanitaria se puede usar simplemente agua porque en condiciones normales de trabajo no se alcanzan temperaturas superiores a los 426 K, y las correspondientes presiones en las tuberías son admisibles. Además, los colectores solares planos suelen llevar una válvula de seguridad que evita superar presiones moderadas y poner en peligro la integridad mecánica y la estanqueidad del sistema.

### 2.4.3. Razón de concentración geométrica y ángulo de aceptación de un CCP

Dos de los parámetros básicos de un CCP son su razón de concentración geométrica y su ángulo de aceptación.

La razón de concentración geométrica  $C_{geométrica}$ , es la razón entre el área de abertura del concentrador y el área total del tubo absorbedor, mientras que el ángulo de aceptación,  $\beta$ , es el ángulo máximo que puede ser formado por dos rayos en un plano transversal a la abertura del concentrador de manera que intercepten el tubo absorbedor después de ser reflejados por la superficie reflectora del CCP, Coz P, Vera, J. (1982)., la Figura 9 ilustra estos conceptos. La razón de concentración geométrica,  $C_{geométrica}$ , viene dada por la Ecuación 2.5.

$$C_{geométrica} = \frac{l_a \cdot l}{\pi \cdot d_o \cdot l} = \frac{l_a}{\pi \cdot d_o} \quad (2.5)$$

Siendo:

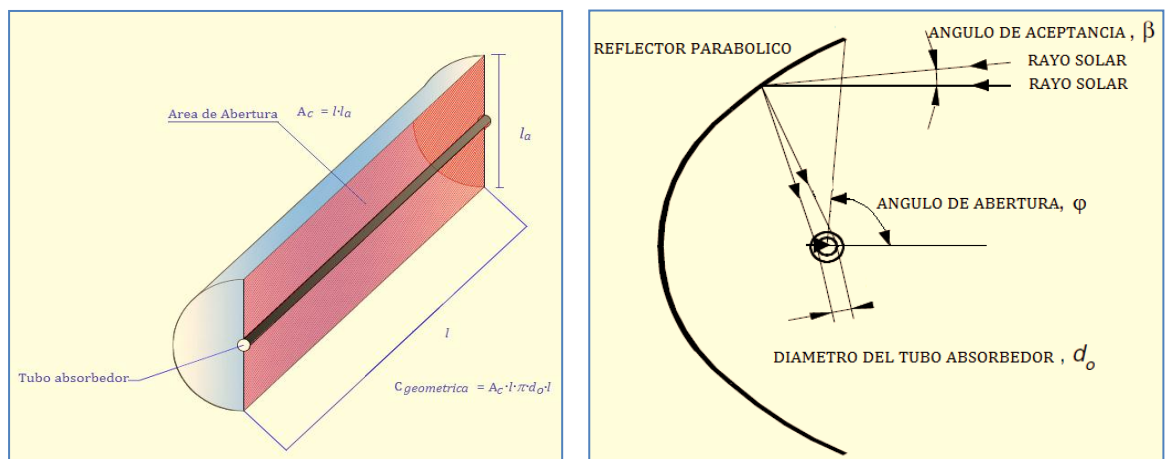
$d_o$ : diámetro externo del tubo absorbedor metálico

$l$  : longitud del concentrador cilíndrico parabólico

$l_a$ : ancho (abertura) del concentrador cilíndrico parabólico

Conviene en este punto aclarar la diferencia conceptual entre la razón de concentración óptica,  $C_{optica}$ , y la razón de concentración geométrica,

$C_{geometrica}$ . Se denomina razón de concentración óptica de la radiación solar al cociente entre el flujo de energía radiante antes y después de la concentración. La diferencia entre estos dos conceptos estriba en que no toda la superficie del absorbedor está siempre sujeta a la radiación concentrada que produce el concentrador.



**Figura 9.** Ángulo de aceptación y razón de concentración geométrica de un CCP

**Fuente:** Romero, M., Zarza, E. (2007)

La tolerancia del sistema de seguimiento solar de un CCP tiene que ser menor que su ángulo de aceptación,  $\beta$ , lo que significa que cuanto mayor es el ángulo de aceptación, menor tiene que ser la precisión del sistema de seguimiento solar, ya que el concentrador no necesitará actualizar su

posición con mucha frecuencia. Los CCP actuales tienen un ángulo de aceptación inferior a  $2^\circ$  (valores usuales del ángulo de aceptación del orden de  $0,7^\circ - 1^\circ$ ) y necesitan un sistema de seguimiento preciso ( $\pm 0,2^\circ$ ), de lo contrario solamente captarían una pequeña fracción de la radiación solar directa disponible en cada momento, porque necesitan seguir al sol con un error de seguimiento inferior al ángulo de captación.

Los valores usuales de la razón de concentración geométrica de un CCP están alrededor de 20, aunque pueden conseguirse valores de hasta 70. Valores muy altos para la razón de concentración requieren un valor muy pequeño del ángulo de aceptación, y hay que tener presente que el valor mínimo para dicho ángulo es de  $32'$ , que es el ángulo sólido medio bajo el que se ve desde la tierra la esfera solar. Cualquier concentrador que tuviera un ángulo de aceptación menor que este valor desaprovecharía una parte importante de radiación solar directa disponible, por muy preciso que fuera su sistema de seguimiento solar. Además, razones de concentración más altas demandarían la implementación de un sistema de seguimiento solar muy preciso y consecuentemente, más costoso. Así pues, los valores usuales del grado de concentración geométrica de un CCP suelen estar en torno a 20 o 30 aunque el límite teórico es del orden de 220.

#### 2.4.4. Pérdidas ópticas y geométricas en un CCP

Cuando la radiación solar directa alcanza la superficie de un CCP, se pierde una cantidad importante de ella debido a diversos factores. El total de las pérdidas que tienen lugar en un CCP se puede dividir en tres grupos, que en orden descendente de importancia son:

- Pérdidas ópticas.
- Pérdidas térmicas desde el tubo al medio ambiente
- Pérdidas geométricas.

Las **pérdidas ópticas** son debidas a que ni la superficie reflexiva del concentrador es un reflector perfecto, ni el vidrio que cubre el tubo absorbente es totalmente transparente, ni la superficie selectiva del tubo metálico es un absorbedor perfecto, ni la geometría del concentrador parabólico es perfecta. Estas imperfecciones provocan que solo una parte de la radiación solar que incide sobre la abertura del concentrador parabólico llegue al fluido que circula por el interior del tubo absorbedor. La Figura 10 muestra los cuatro parámetros que intervienen en las pérdidas ópticas de un CCP, que son:

- **Reflectividad de la superficie reflectante del concentrador parabólico,  $r$ .** las superficies reflexivas de los concentradores no son perfectas, lo que provoca que solo una parte de la radiación incidente

se refleje. Los valores típicos de la reflectividad están alrededor del 90%. Sin embargo, los valores de reflectividad disminuyen progresivamente conforme aumenta el grado de ensuciamiento de la superficie.

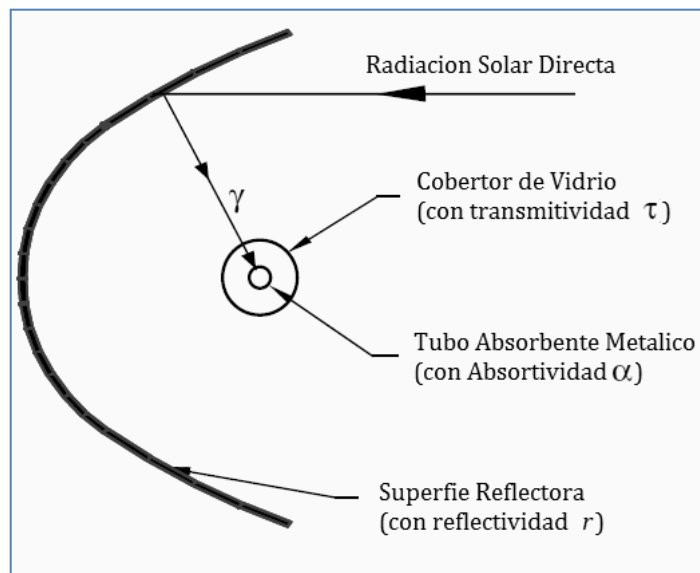
- **Factor de interceptación,  $\gamma$ .** Una fracción de la radiación solar reflejada por la superficie reflectora no alcanza a la cubierta de vidrio del tubo absorbedor debido a diversas causas, como imperfecciones microscópicas o macroscópicas de la superficie reflectora, errores de posicionamiento del concentrador, o incluso bloqueo que puede suponer los soportes del tubo absorbedor.

Las imperfecciones de la superficie reflectora y los posibles errores de seguimiento solar provocan que algunos rayos no intercepten al tubo absorbedor durante su trayectoria después de ser reflejados. Estas pérdidas se cuantifican globalmente mediante el llamado factor de interceptación,  $\gamma$ . Un valor típico de este parámetro óptico es 0,95.

- **Transmitividad de la cubierta de cristal,  $\tau$ .** El tubo absorbedor metálico está situado dentro de una cubierta de cristal para disminuir las pérdidas térmicas y proteger a la superficie selectiva. Una fracción solar reflejada por la superficie reflectora y que alcanza la cubierta de cristal del tubo absorbedor no es capaz de atravesarlo. La razón entre la radiación que pasa a través de la cubierta de cristal y la radiación

total incidente sobre ella, da la Transmitividad,  $\tau$ , de dicha cubierta de vidrio. Un valor típico de este parámetro es 0,9 ó 0.95, dependiendo de que el cristal haya sido objeto de un tratamiento antirreflexivo o no.

- **Absortividad de la superficie selectiva,  $\alpha$ .** Este parámetro cuantifica la cantidad de radiación que es capaz de absorber la superficie selectiva que recubre al tubo metálico absorbedor, comparada con la cantidad de radiación que llega a dicha superficie. Un valor típico de la Absortividad está en el rango 90% - 96%.



**Figura 10.** Parámetros ópticos de un CCP

**Fuente:** Romero, M., Zarza, E. (2007)

Además de los factores antes mencionados (reflectividad, absorptividad, Transmitividad y factor de intercepción) hay otro tipo de pérdidas en los CCP, llamadas pérdidas geométricas, que provocan una distribución del área efectiva de la captación de los concentradores.

Las pérdidas geométricas inherentes a cada CCP están causadas por el hecho de que los concentradores están provistos de un sistema de seguimiento en un solo eje y, por lo tanto, solo pueden girar alrededor del eje de seguimiento, lo que da lugar a la existencia del llamado ángulo de incidencia,  $\varphi$ , que es el ángulo formado por la radiación directa que incide sobre el plano de abertura del concentrador y la normal a dicho plano de abertura. Este ángulo de incidencia depende de la hora y del día del año, ya que es función de las coordenadas del sol con respecto a un sistema cartesiano con origen en el concentrador, y provoca que en los extremos del concentrador

haya una pérdida de superficie reflexiva útil. La Figura 11 muestra este tipo de pérdidas geométrica.

La existencia de un ángulo de incidencia no solo reduce el área efectiva de captación que tiene el concentrador, también afecta a los valores de reflectividad, absorptividad y transmitividad del concentrador, ya que estos parámetros presentan un valor máximo cuando el ángulo de incidencia es

0°. El efecto del ángulo de incidencia en el rendimiento del concentrador se cuantifica mediante un parámetro que se denomina modificador de ángulo de incidencia  $K(\varphi)$ .

La Figura 11 muestra un corte longitudinal y un perfil axonometrico de un CCP para explicar de una manera muy simplificada, como existe al final de un concentrador una zona que no es útil, porque la radiación solar que refleja no puede interceptar el tubo absorbedor. El área del concentrador que se pierde al final por este hecho,  $A_e$ , vienen viene dadas por las ecuaciones 2.6 y ecuación 2.7, siendo  $l_a$  el ancho del concentrador cilíndrico parabólico,  $l$  la longitud del concentrador cilíndrico parabólico,  $f_a$  distancia focal de la parábola,  $f_m$ , la distancia media entre la superficie de la parábola y el absorbedor dentro de una misma sección transversal del concentrador, y  $\varphi$  el ángulo de incidencia de la radiación solar directa.

$$A_e = l_a \cdot l_\varphi = l_a \cdot f_m \cdot \tan \varphi \quad (2.6)$$

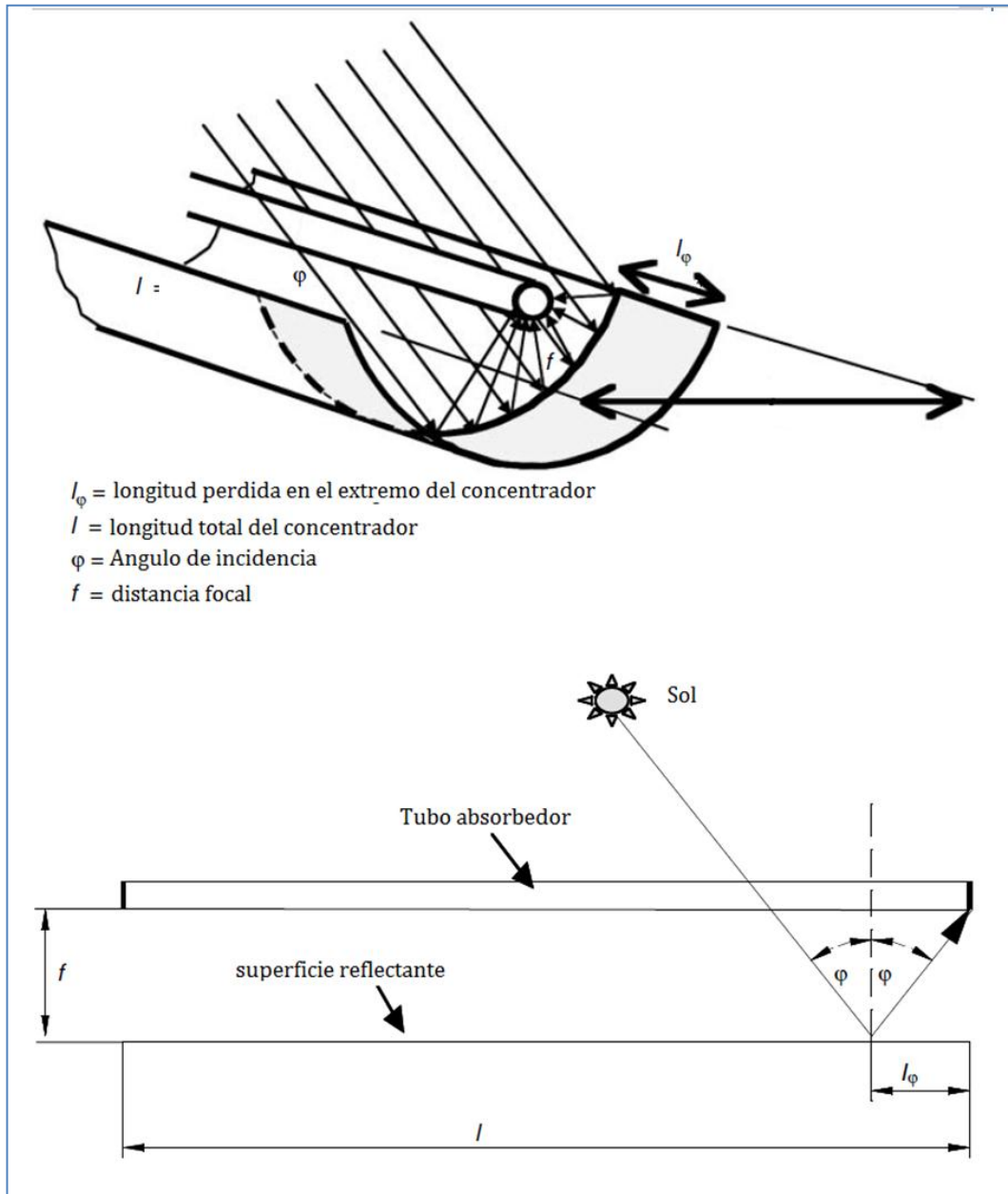
$$f_m = f + [(f \cdot l_a^2)/(48 \cdot f^2)] \quad (2.7)$$

$\varphi$  = ángulo de incidencia

$l$  = longitud total del concentrador parabólico

$l_\varphi$  = longitud perdida en el extremo del concentrador

$f$  = distancia focal



**Figura 11.** Perdidas geométricas de final de un CCP

**Fuente:** Romero, M., Zarza, E. (2007)

#### **2.4.5. Pérdidas térmicas en un CCP**

Además de las pérdidas ópticas y geométricas, en un CCP también existen pérdidas térmicas, las cuales ocupan el segundo lugar en el orden de importancia, detrás de las pérdidas ópticas.

Las pérdidas térmicas se producen principalmente en dos lugares: en el tubo absorbedor y en la tubería de fluido térmico, siendo bastante más importantes las producidas en el absorbedor.

Según Forristall, R. (2003), Las pérdidas térmicas asociadas al tubo absorbedor están formadas por: pérdidas de calor por conducción a través de los soportes del tubo, pérdidas por radiación, convección y conducción, desde el tubo de cristal al ambiente. En aquellos tubos absorbentes en los que entre el tubo metálico y el de cristal hay vacío, las pérdidas térmicas por conducción y convección desde el tubo metálico hacia la cubierta de vidrio quedan eliminadas, y solo hay entre el tubo metálico y la cubierta de cristal pérdidas por radiación.

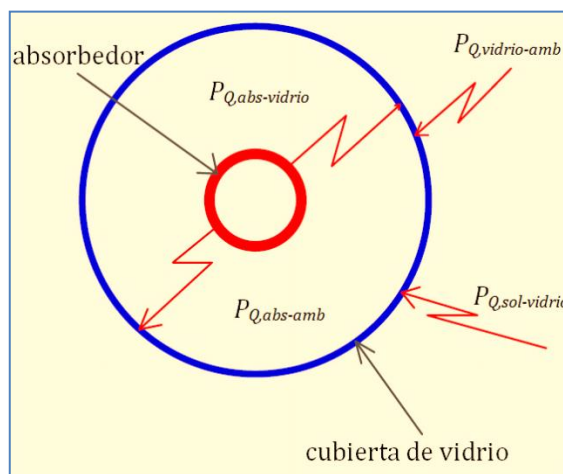
Puesto que las pérdidas térmicas a través de los soportes del tubo absorbedor se pueden despreciar frente a las otras, las pérdidas térmicas que tienen lugar en el tubo absorbedor son representadas en la Figura 12, donde se ha empleado la siguiente nomenclatura:

$P_{Q,abs-amb}$ : Pérdidas térmicas por radiación en el tubo metálico absorbedor [W]

$P_{Q,abs-vidrio}$ : pérdidas térmicas por conducción y convección entre el tubo metálico absorbedor y la cubierta de vidrio [W]

$P_{Q,vidrio-amb}$ : pérdidas térmicas por convección, conducción y radiación desde la cubierta de vidrio del tubo absorbedor al ambiente [W]

$P_{Q,sol-vidrio}$ : flujo de energía radiante proveniente del sol que es absorbida por la cubierta de vidrio del tubo absorbedor [W]



**Figura 12.** Pérdidas térmicas en el tubo absorbedor de un CCP.

**Fuente:** *Elaboración propia*

Aunque cada uno de los términos representados en la Figura 12 podrían calcularse analíticamente, aplicando las ecuaciones que rigen los procesos de transferencia de calor por radiación, convección y conducción, en la práctica las pérdidas térmicas globales en un CCP,

$P_{Q,concentrador-ambiente}$ , suelen calcularse mediante un coeficiente global de pérdidas térmicas desde el tubo absorbente al ambiente,  $U_{L,abs}$ , de acuerdo con la Ecuación 2.8, en la que  $T_{abs}$  es la temperatura media del tubo absorbedor metálico,  $T_{amb}$  es la temperatura del ambiente,  $d_o$  es el diámetro exterior del tubo metálico absorbedor y  $l$  es la longitud de dicho tubo ( que coincide con la longitud del CCP).

$$\begin{aligned}
 P_{Q,concentrador-ambiente} &= P_{Q,abs-amb} + P_{Q,abs-vidrio} & (2.8) \\
 &= U_{L,abs} \cdot \pi \cdot d_o \cdot l \cdot (T_{abs} - T_{amb})
 \end{aligned}$$

En la Ecuación 2.8, el coeficiente global de pérdidas viene dado por unidad de área del tubo absorbedor, sus unidades son  $[Wm^{-1}_{abs}K^{-1}]$ .

#### **2.4.6. Rendimiento global de un CCP**

Como consecuencia de todas las pérdidas ópticas, geométricas y térmicas que existen en un CCP, la potencia térmica útil que da es menor a la que daría en condiciones ideales, cuando no existieran dichas pérdidas. A continuación se explicara cómo se calcula la potencia térmica

útil que puede dar un CCP en función de la irradiancia solar directa disponible y de los parámetros característicos del concentrador.

El flujo de energía radiante o potencia radiante sobre un plano de abertura de un concentrador cilíndrico parabólico debido a la radiación solar directa,  $P_{Q_{sol-concentrador}}$ , viene dada por la Ecuación 2.9:

$$P_{Q_{sol-concentrador}} = A_c \cdot E_d \cdot \cos(\varphi) \quad (2.9)$$

Siendo

$P_{Q_{sol-concentrador}}$  = potencia radiante sobre la abertura del concentrador [W]

$A_c$  = área de abertura de la superficie reflexiva del concentrador [m<sup>2</sup>]

$E_d$  = irradiancia solar directa, Wm<sup>-2</sup>

$\varphi$  = ángulo de incidencia [°]

La potencia térmica útil suministrada por el concentrador viene dada, en términos del incremento entálpico que experimenta el fluido de trabajo del concentrador, por la Ecuación 2.10:

$$P_{Q_{concentrador-fluido}} = q_m \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (2.10)$$

Siendo:

$P_{Q,concentrador-fluido}$  =Potencia térmica útil suministrada por el concentrador  
(W)

$Q_m$ = Caudal másico del fluido de trabajo [ $\text{kgs}^{-1}$ ]

$h_{in}$ = Entalpia especifica del fluido de trabajo a la entrada del concentrador  
[  $\text{J.kg}^{-1}$ ]

$h_{out}$  = Entalpia especifica del fluido de trabajo a la salida del concentrador  
[  $\text{J.kg}^{-1}$ ]

En un CCP se suelen definir tres rendimientos diferentes:

$\eta_{global}$  = rendimiento global

$\eta_{opt,0^\circ}$ = rendimiento óptico con un ángulo de incidencia de  $0^\circ$  (rendimiento  
óptico pico)

$\eta_{th}$ = rendimiento térmico

$K(\varphi)$  = modificador por ángulo de incidencia

El rendimiento global de concentrador considera todas las pérdidas que tienen lugar en el concentrador, tanto ópticas como geométricas y térmicas, y se calcula como el cociente entre la potencia térmica útil suministrada por el concentrador y la potencia radiante que incide sobre el plano de abertura del concentrador debido a la radiación solar directa, de acuerdo con la Ecuación 2.11 donde  $P_{Q,sol-concentrador}$  y  $P_{Q,concentrador-fluido}$  vienen dadas en las ecuaciones 2.9 y 2.10 respectivamente.

$$\eta_{global} = \frac{P_{Q,concentrador-fluido}}{P_{Q,sol-concentrador}} \quad (2.11)$$

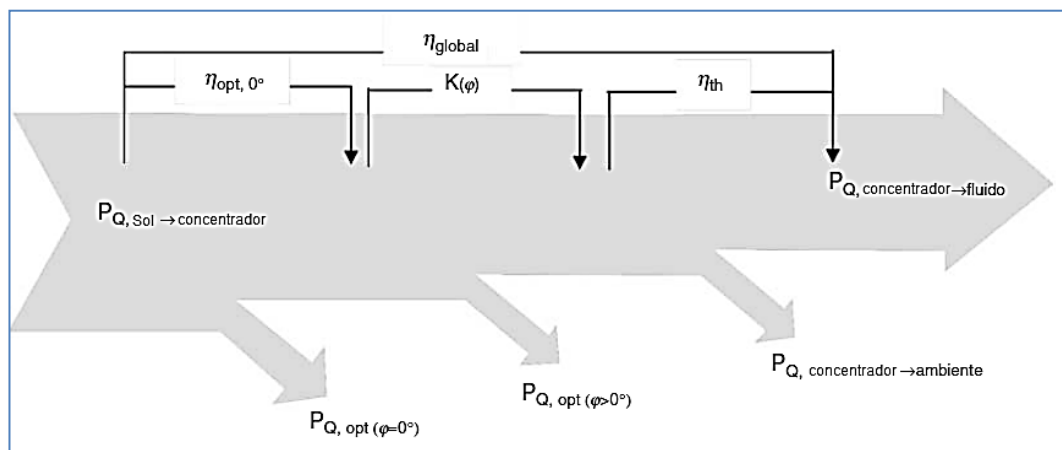
El rendimiento  $\eta_{opt,0^\circ}$  considera todas las pérdidas ópticas y geométricas que tienen lugar en el concentrador con un ángulo de incidencia de  $\varphi = 0^\circ$ , representadas en la Figura 13 mediante el término  $P_{Q,opt(\varphi=0)}$ . Su valor viene dado por el producto de estos cuatro factores para  $\varphi=0^\circ$ : reflectividad de la superficie reflectora, transmitividad del tubo de vidrio, factor de interceptación (que tiene en cuenta la parte de radiación reflejada que por cualquier causa no alcanza el absorbedor) y absorptividad de la superficie selectiva que recubre el tubo metálico absorbedor.

El rendimiento térmico,  $\eta_{th}$ , considera todas las pérdidas térmicas que tienen lugar en el concentrador, mientras que el modificador de ángulo de incidencia,  $K(\varphi)$ , considera todas las pérdidas ópticas y geométricas que tienen lugar en el concentrador para un ángulo de incidencia  $\varphi > 0^\circ$  y que no están tenidas en cuenta por  $\eta_{opt,0^\circ}$  (pérdidas geométricas de final del concentrador, bloqueo de la radiación concentrada por parte de los soportes del tubo absorbedor e influencia del ángulo de incidencia en la absorptividad y transmitividad del tubo absorbedor, y en la reflectividad de la superficie reflectora).

La relación entre los dos rendimientos descritos anteriormente y el modificador por ángulo de incidencia viene dada por la Ecuación 2.12:

$$\eta_{global} = \eta_{opt,0^\circ} \cdot K(\varphi) \cdot \eta_{th} \quad (2.12)$$

La Figura 13 representa gráficamente el balance energético en un CCP, ilustrando el significado de los diferentes rendimientos y del modificador por ángulo de incidencia explicados anteriormente.



**Figura 13.** Diagrama de pérdidas y rendimiento de un CCP

**Fuente:** Kalogirou, S. (2009)

La Figura 13 pone en manifiesto cómo una parte del flujo de energía o potencia radiante que incide sobre el CCP se pierde a causa del rendimiento óptico, mientras que otra parte se pierde como consecuencia de la existencia de un ángulo de incidencia  $\varphi \neq 0^\circ$ . Las pérdidas en el

concentrador se completan con las pérdidas térmicas que tienen lugar en el tubo absorbedor del concentrador, como consecuencia de su temperatura.

El rendimiento óptico  $\eta_{\text{opt},0^\circ}$  es constante y no depende de la radiación solar ni de la temperatura de trabajo del fluido. El valor de  $\eta_{\text{opt},0^\circ}$  sí depende del grado de ensuciamiento del concentrador,  $F_e$ , ya que ello afecta a la reflectividad de la superficie reflectora y a la transmitividad e la cubierta de vidrio del tubo absorbedor.

El modificador por ángulo de incidencia,  $K(\varphi)$ , depende directamente del ángulo de incidencia, siendo  $K=1$  para  $\varphi=0$ , y  $K=0$  para  $\varphi=90^\circ$ . El valor de  $K(\varphi)$  se da en forma polinómica, cuyos coeficientes se determinan experimentalmente.

El rendimiento térmico  $\eta_{\text{th}}$ , depende directamente de la temperatura de trabajo del tubo metálico absorbedor, de modo que vale  $\eta_{\text{th}}=1$  para una temperatura del absorbedor igual a la temperatura del cielo. El valor de ese rendimiento suele darse como una función de la temperatura ambiente y de la temperatura del absorbedor, para un determinado valor de la radiación solar directa.

Desde el punto de vista práctico, el cálculo de la potencia térmica útil que no puede suministrar un CCP,  $P_{Q,\text{concentrador-fluido}}$ , en función de la

irradiancia solar directa que incide sobre él,  $P_{Q,sol-concentrador}$  , y de los parámetros del concentrador, se calcula mediante la Ecuación 2.13, donde el factor de ensuciamiento del concentrador ( $0 < F_e < 1$ )

$$\begin{aligned}
 P_{Q,concentrador-fluido} &= P_{Q,sol-concentrador} \cdot \eta_{global} \\
 &= A_c E_d \cos(\varphi) \eta_{opt,0^\circ} K(\varphi) \eta_{th} F_e
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Si se usa la expresión de las perdidas térmicas en vez del rendimiento térmico tenemos:

$$P_{Q,concentrador-fluido} = A_c E_d \cos(\varphi) \eta_{opt,0^\circ} K(\varphi) \eta_{th} F_e - P_{Q,concentrador-ambiente}
 \tag{2.14}$$

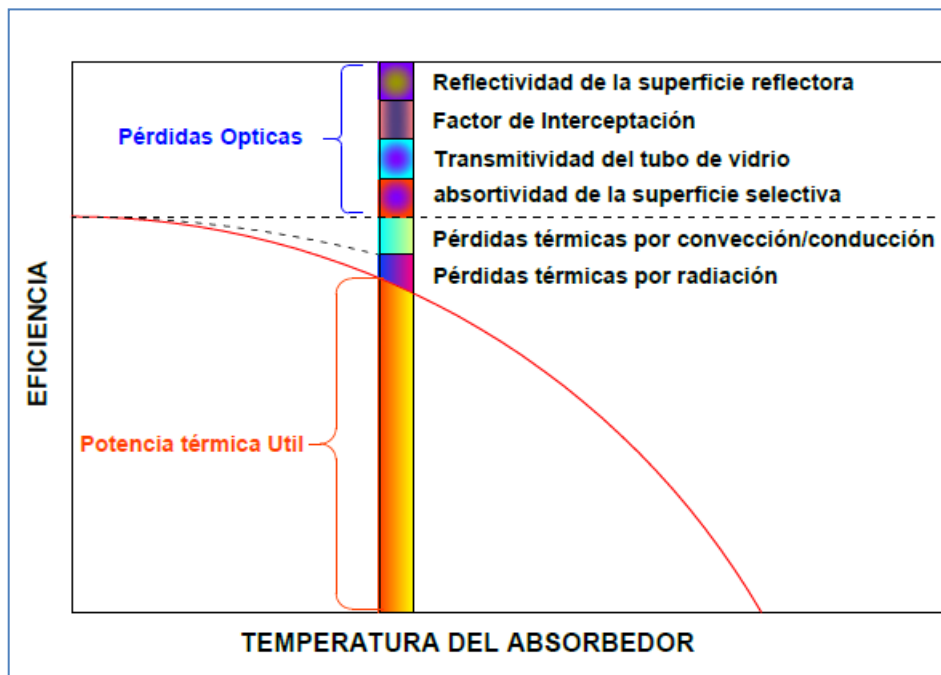
Quedando:

$$P_{Q,concentrador-fluido} = A_c E_d \cos(\varphi) \eta_{opt,0^\circ} K(\varphi) \eta_{th} F_e - U_{L,abs} \pi d_o l (T_{abs} - T_{amb})
 \tag{2.15}$$

Usando la Ecuación 2.12, se puede hacer una representación cualitativa del rendimiento global de un CCP en función de su temperatura de trabajo, para un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ . Dicha representación se muestra en la Figura 14 .puesto que se ha dicho que para  $\varphi=0^\circ$ ,  $K=1$ , quedando:

$$\eta_{global} = \eta_{opt,0^\circ} \cdot \eta_{th} \quad (2.16)$$

Puesto que  $\eta_{opt,0^\circ}$  no depende de la temperatura, como ya se ha explicado, las pérdidas ópticas permanecen constantes, tal y como se indica en la Figura 14.



**Figura 14.** Rendimiento global de un CCP en función de la temperatura, para  $\phi=0^\circ$

**Fuente:** *Elaboración Propia*

#### 2.4.7. Extracción de la energía térmica

Para calcular la potencia de la radiación que incide sobre el absorbente, tenemos que considerar solamente la radiación incidente dentro del ángulo de aceptación  $\beta$ , sobre la abertura  $A_C$  del concentrador, la cual llega al absorbente (ver Figura 9).

Esto implica que, con el concentrador orientado hacia el sol, prácticamente solo la radiación solar directa  $E_d$ , es absorbida.

La radiación difusa del cielo, en contraste a un colector solar plano, no es usada.

Por lo tanto los colectores de concentración no funcionan si no brilla el sol.

A mediodía, en un día claro, se obtiene  $E_d \approx 700 - 900 \text{ Wm}^{-2}$ . Esta irradiancia, multiplicada por el área,  $A_C$ , representa la potencia,  $E_d \cdot A_C$ , que entra al concentrador (suponiendo incidencia normal; si la radiación incide bajo un ángulo sobre  $A_C$ , se debe multiplicar todavía por el **cos  $\varphi$** ).

De la potencia, solamente una fracción llega al absorbente, tal reducción es causada por absorción del concentrador, reflexión imperfecta en la superficie reflectora, o sea por mala orientación parcial o por una reflectancia menor que uno. Generalmente se obtiene  $\tau \approx 0.5 - 0.9$ . Para

fines prácticos podemos hacer un balance térmico aproximado del tubo absorbente empleando la siguiente fórmula

$$\alpha \cdot \tau \cdot E_d \cdot A = \varepsilon \cdot \sigma (T^4 - T_{amb}^4) \cdot A_r + U_{L,abs} (T - T_a) \cdot A_r + \dot{q}_{util} \quad (2.17)$$

Donde:

$\alpha$ : Absortividad solar del tubo absorbente.

$\varepsilon$ : Emitividad infrarroja del tubo absorbente.

$\tau$ : Transmitividad del cobertor de vidrio

$\sigma$ :  $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  (constante de Boltzman).

$E_d$ : Radiación Solar directa

$T$ : Temperatura del tubo absorbente.

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente.

$U_{L,abs}$ : Coeficiente global de pérdidas del tubo absorbente por conducción, convección y radiación al ambiente.

$A_r$ : Área del absorbedor.

$\dot{q}_{util}$ : Calor útil extraído a la temperatura  $T$  del concentrador.

#### **2.4.8. Conversión de calor en el concentrador cilíndrico parabólico**

El concentrador solar cilíndrico parabólico transforma la radiación solar en energía térmica mediante la concentración de la radiación solar a lo largo

de su foco lineal, por lo tanto es necesario establecer cuál es la capacidad del sistema de generar calor en su absorbedor o receptor para obtener altas temperaturas para las aplicaciones posteriores.

Para obtener la ecuación de la eficiencia térmica de un concentrador solar, se empieza a partir de la ecuación del balance energético para un colector solar, que relaciona las ganancias y pérdidas de un absorbedor (tubo absorbente) es:

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{absorbido}} - Q_{\text{pérdidas}} \quad (2.18)$$

Los flujos energéticos mencionados los obtenemos a partir de las ecuaciones 2.8, 2.9, 2.10, 2.13 y 2.15, teniendo como resultado:

$$Q_{\text{sol}} = E_d \cdot A_c \quad (2.19)$$

$$Q_{\text{útil}} = \dot{m}c(T_s - T_e) \quad (2.20)$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = U_{L,abs}A_r(T_m - T_{amb}), \quad T_m = (T_e - T_s)/2 \quad (2.21)$$

$$Q_{\text{absorbido}} = \alpha \tau Q_{\text{sol}} = \alpha \tau G_t A_c \quad (2.22)$$

Donde:

$Q_{\text{útil}}$  = Potencia útil [W]

$Q_{\text{pérdidas}}$  = Potencia perdida por radiación, convección y conducción [W]

$Q_{absorbido}$  = Potencia absorbida por el área de absorbedor negro [W]

$Q_{sol}$  = Energía solar incidente sobre el área del tubo absorbente.

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente [° C]

$T_e, T_s$  = Temperatura de entrada y salida del fluido [° C].

$E_d$  = Radiación solar directa [ $Wm^{-2}$ ]

$A_c$  = Área de abertura del colector

$A_r$  = Área del tubo absorbente [ $m^2$ ].

$\dot{m}$  =Flujo másico del fluido caloportador [ $kgs^{-1}$ ].

$\tau\alpha$ = Eficiencia óptica (producto de la absorptancia por la transmitancia)

$U_{L,abs}$ = Coeficiente global de pérdidas del tubo absorbente por conducción, convección y radiación al ambiente.

La definición de la eficiencia instantánea  $\eta$  es:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{sol}} \quad (2.23)$$

También tenemos que:

$$Q_{util} = \alpha \tau E_d A_c - U_{L,abs} A_r (T_m - T_{Amb}) \quad (2.24)$$

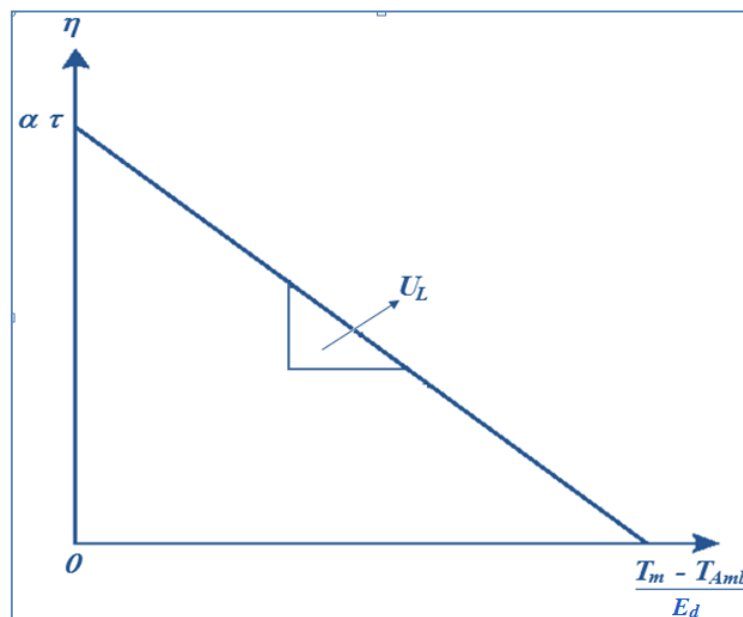
Reemplazando (24) en (23) tenemos la ecuación de la eficiencia térmica instantánea:

$$\eta = \alpha \tau - U_{L,abs} \frac{A_r (T_m - T_{Amb})}{E_d A_c} \quad (2.25)$$

De acuerdo a la ecuación (5), podemos decir que factor de concentración es:  $C_{geometrica} = A_d/A_r$ , insertando esta en la Ecuación 2.25 obtenemos:

$$\eta = \alpha \tau - U_{L,abs} \frac{(T_m - T_{Amb})}{E_d C_{geometrica}} \quad (2.26)$$

La ecuación 2.26 es la ecuación para la **eficiencia térmica instantánea** de un concentrador solar.



**Figura 15.** Curva característica de la eficiencia térmica instantánea de un colector en función a las condiciones operativas  $T_m$ ,  $T_{amb}$  y  $G_t$

**Fuente:** *Elaboración Propia*

#### 2.4.9. Método estacionario para la medición de la eficiencia óptica

De la curva característica en la Figura 15 y de la Ecuación 2.25 se puede ver fácilmente que, si  $T_m = T_{amb.}$ , entonces:  $\eta = \tau\alpha$ ; estas condiciones se obtienen durante una medición al aire libre bajo sol directo, ajustando las temperaturas del agua de entrada ( $T_e$ ) y salida ( $T_s$ ) hasta que se cumpla la condición:  $T_m = (T_e + T_s)/2 = T_{Amb.}$

$$Q_{\acute{u}til} = \dot{m}c(T_s - T_e) = \alpha \tau E_d A_r \quad (2.27)$$

Donde:

$E_d$  = Radiación solar directa [ $Wm^{-2}$ ]

$A_r$  = Área del tubo absorbente [ $m^{-2}$ ]

$\dot{m}$  = Flujo másico del agua [ $kgs^{-1}$ ]

De la Ecuación 2.27 obtenemos la expresión para la eficiencia óptica  $\tau\alpha$  de la forma siguiente:

$$\alpha \tau = \frac{\dot{m}c (T_s - T_e)}{E_d A_r} \quad (2.28)$$

#### 2.4.10. El coeficiente global de pérdidas térmicas

El coeficiente global de pérdidas térmicas  $U_{L,abs}$  considera todas las pérdidas de calor sea por conducción, convección y radiación. Se obtiene

bajo mediciones en condiciones estacionarias de funcionamiento del colector, sin radiación solar incidente ( $E_d = 0$ ) dentro del laboratorio o ambiente de trabajo, para esto, primeramente se debe de tapar completamente todos los accesos por donde pueda ingresar la luz solar, apagar todas las fuentes luminosas, luego haciendo circular el agua en dirección inversa al funcionamiento normal del colector, calentada por un Termostato Diferencial Automático a la temperatura previamente establecida de 80 °C, esperar 60 minutos para que el sistema funcione en estado estacionario, en este instante las temperaturas de entrada ( $T_e$ ) y salida ( $T_s$ ) permanecen casi constantes. De las Ecuaciones 2.24 y 2.20, si  $E_d = 0$ , obtenemos:

$$U_{L,abs} = \frac{\dot{m}c(T_s - T_e)}{A_r(T_m - T_{Amb})} \quad (2.29)$$

Donde:

$A_r$  = Área del tubo absorbente [ $m^2$ ]

$\dot{m}$  = Flujo másico del agua [ $kgs^{-1}$ ]

$c$  = Calor específico del agua [ $kJ.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ].

**CAPITULO 3**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR SOLAR**

**CILINDRICO PARABOLICO**

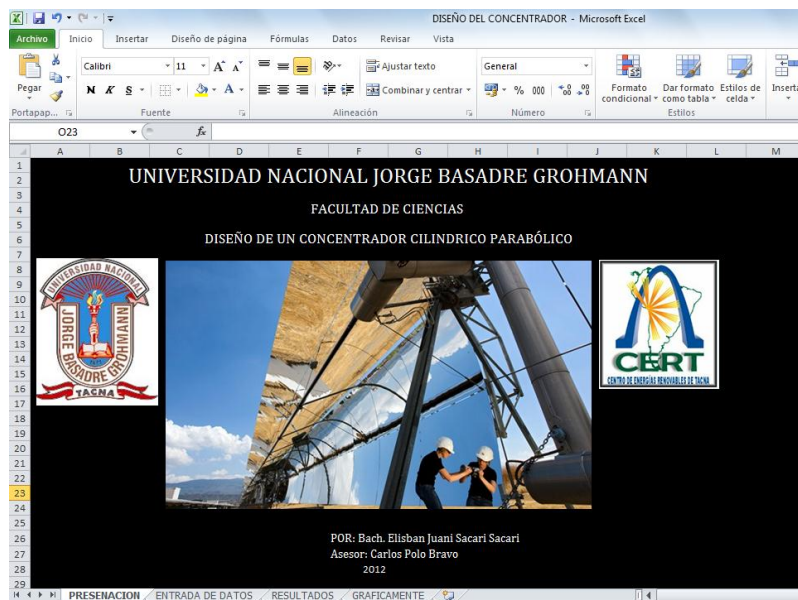
**3.1. Consideraciones generales.**

**3.1.1. Para el diseño del concentrador**

Se construyó el sistema de concentración cilíndrico parabólico con materiales que se tienen a disposición en el laboratorio de energías renovables de la Escuela Académica Profesional de Física Aplicada, tales como:

- 04 planchas de aluminio anodizado de 2,42 m de largo y 1,25 m de ancho.
- 01 tubo de cobre de 1" de diámetro.

Para realizar un cálculo rápido emplearemos la hoja de cálculo basada en las ecuaciones desarrolladas en los capítulos anteriores.



**Figura 16.** Vista de la hoja de cálculo para el dimensionamiento del CCP

**Fuente:** *Elaboración Propia*

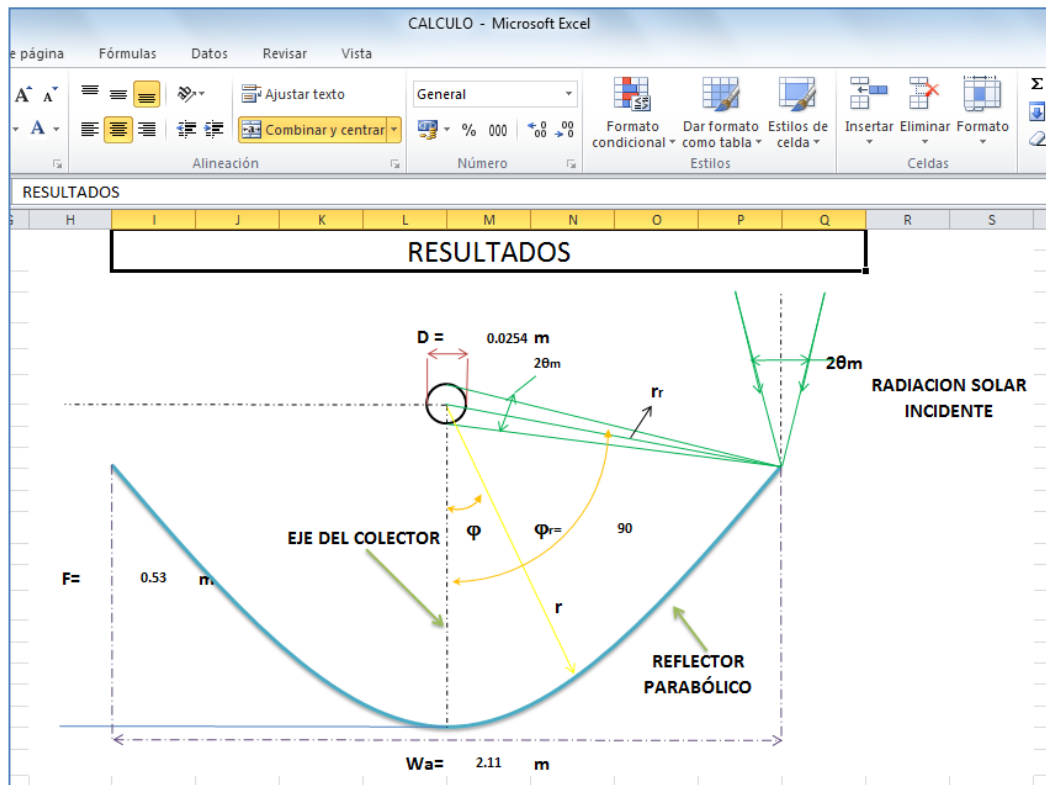
Para aprovechar al máximo estos dos principales materiales consideraremos los siguientes valores iniciales:

Diámetro del tubo absorbente = 2,54cm

Ángulo de incidencia ( $\varphi$ ) de la radiación solar =  $90^\circ$

Arco de la parábola = 2,42m

Insertamos los valores en la hoja de cálculo dándonos como resultado:



**Figura 17.** Resultados del dimensionamiento en la hoja de cálculo

**Fuente:** *Elaboración Propia*

El lado recto de la parábola = 2,11m

Distancia focal = 0,53m

Con estos datos podemos empezar a hacer los planos del concentrador solar cilíndrico parabólico en el programa AUTOCAD, como sigue a continuación.

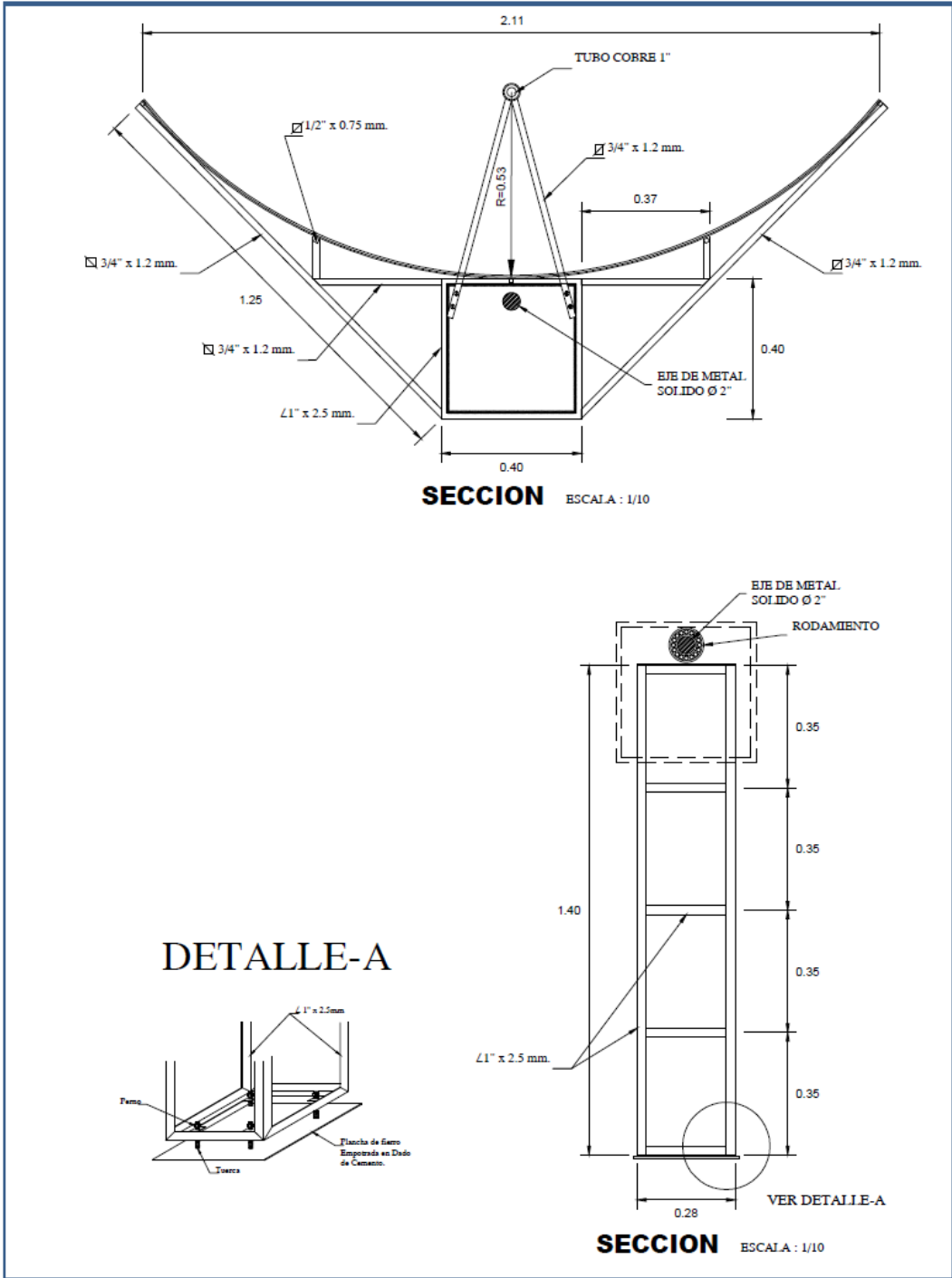


Figura 18. Plano del CCP vista lateral y soporte

Fuente: *Elaboración Propia*

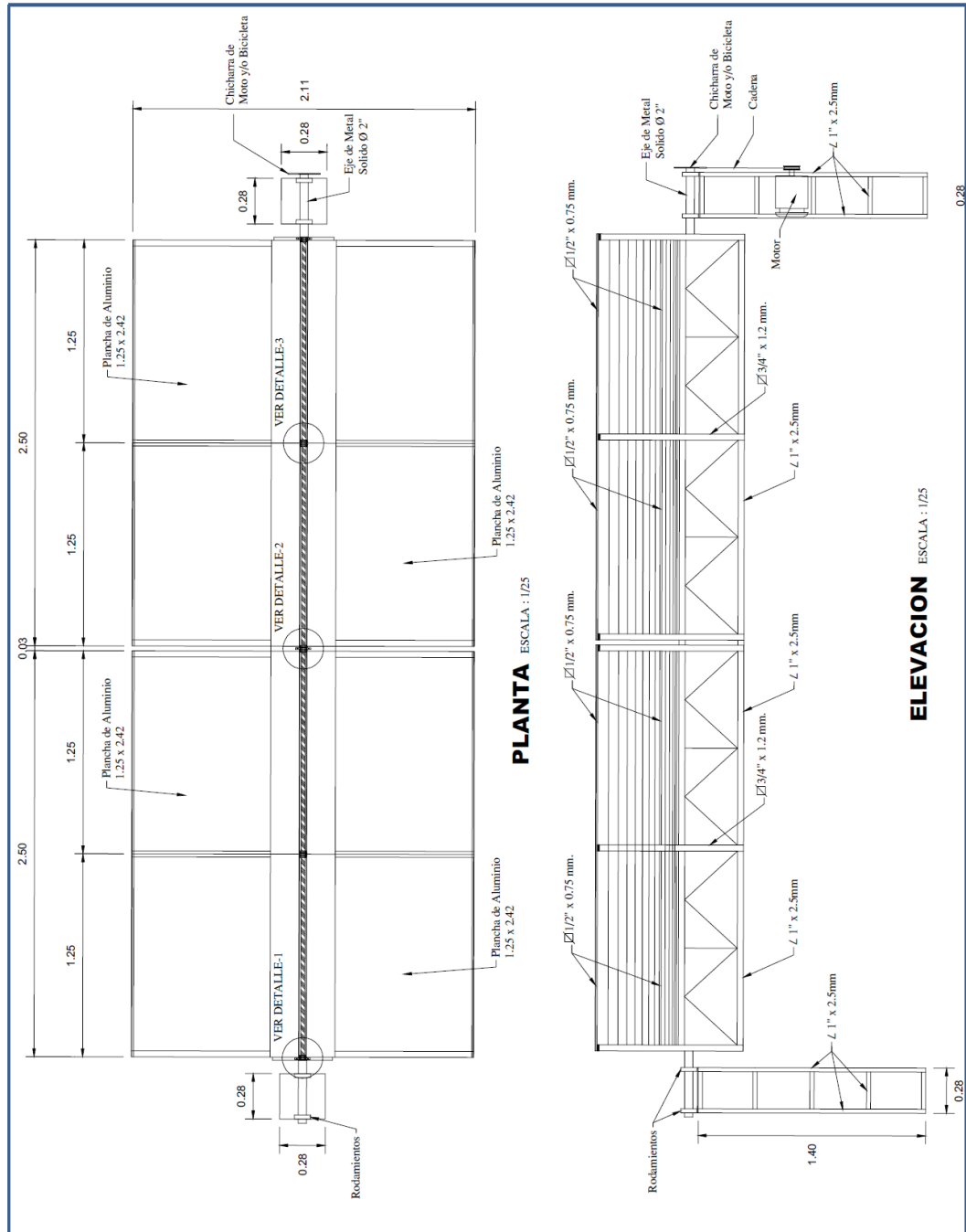


Figura 19. Plano del CCP vista de planta y elevación

Fuente: *Elaboración Propia*

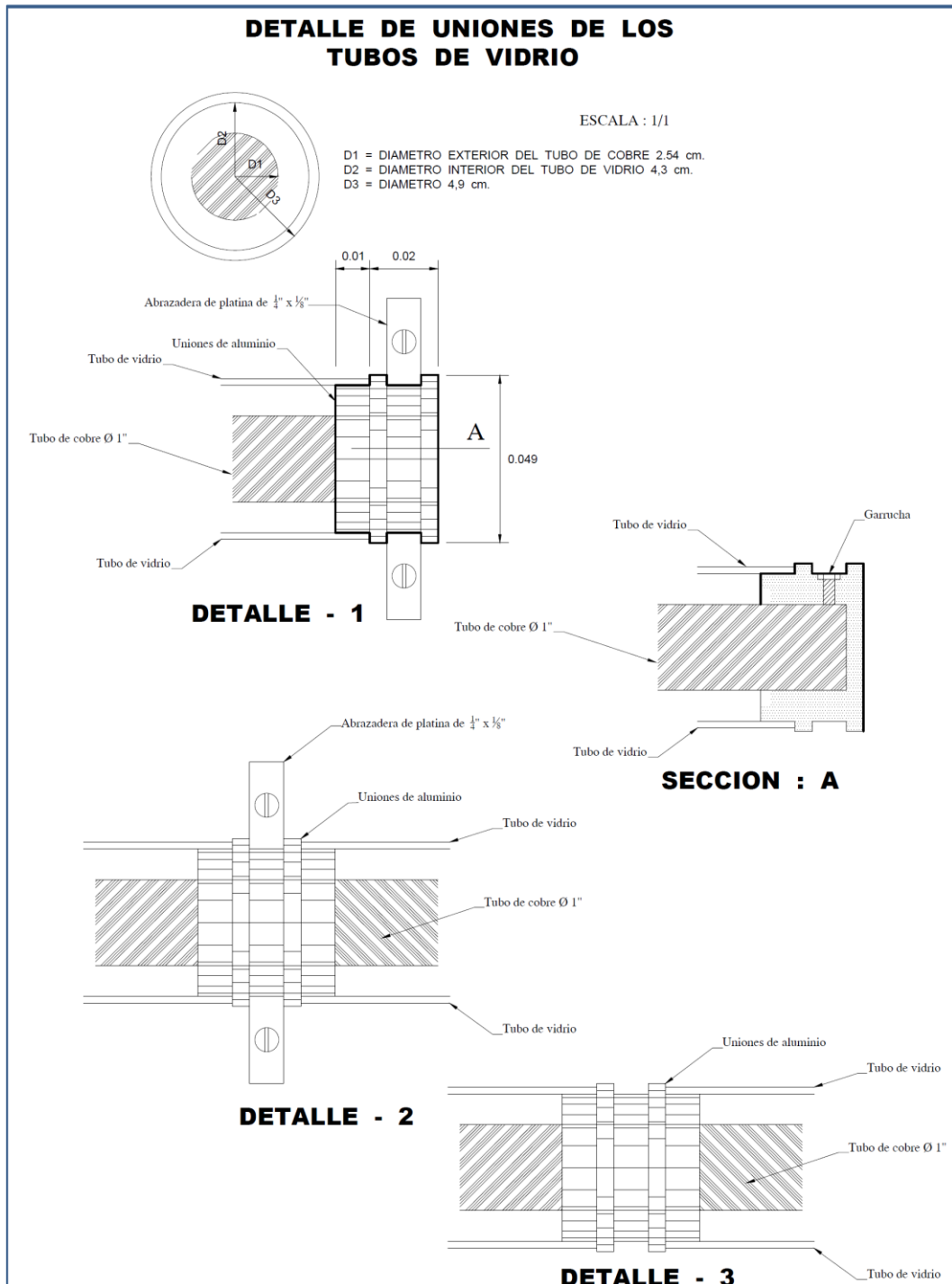


Figura 20. Plano del CCP, detalles de las uniones para los tubos de vidrio

Fuente: *Elaboración Propia*

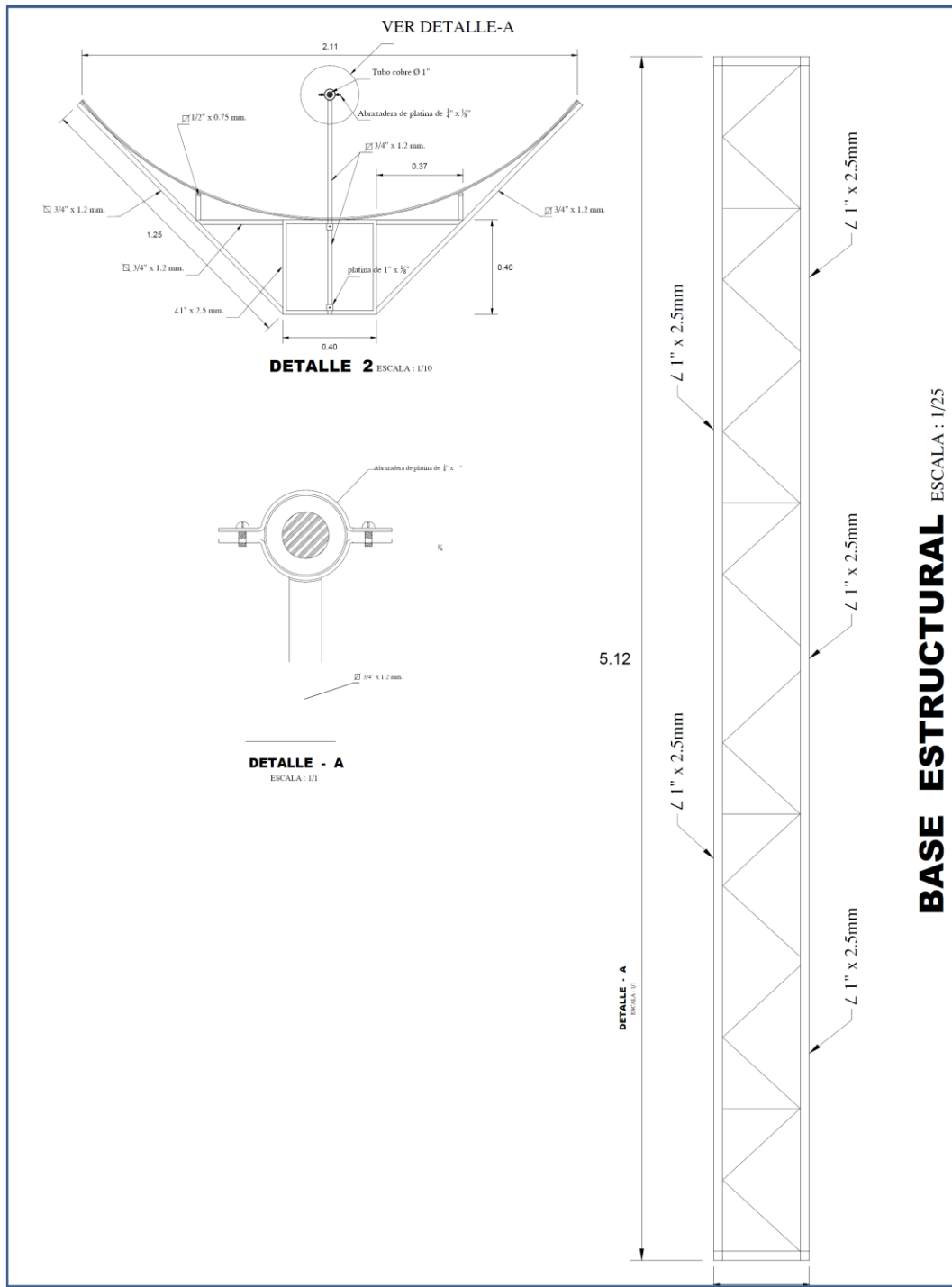
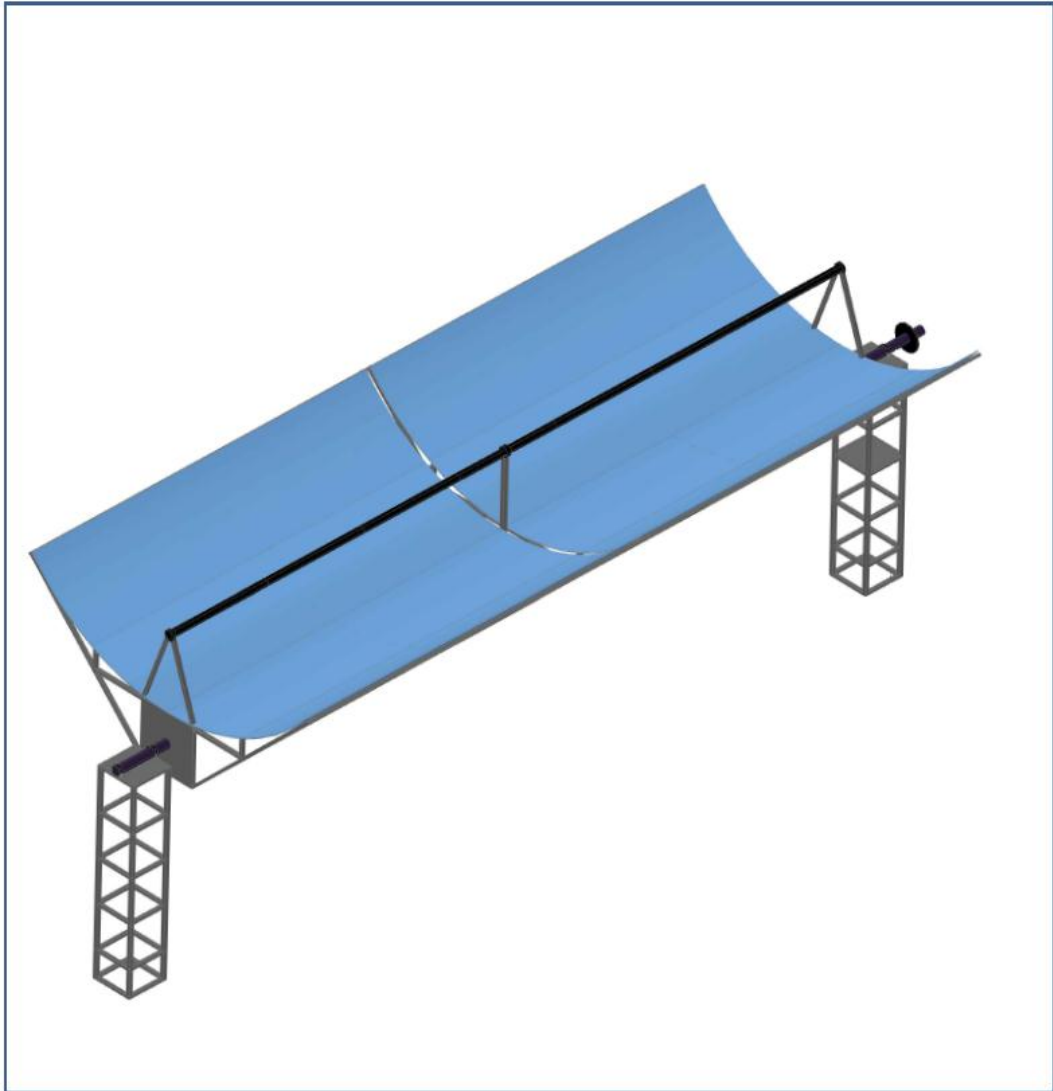


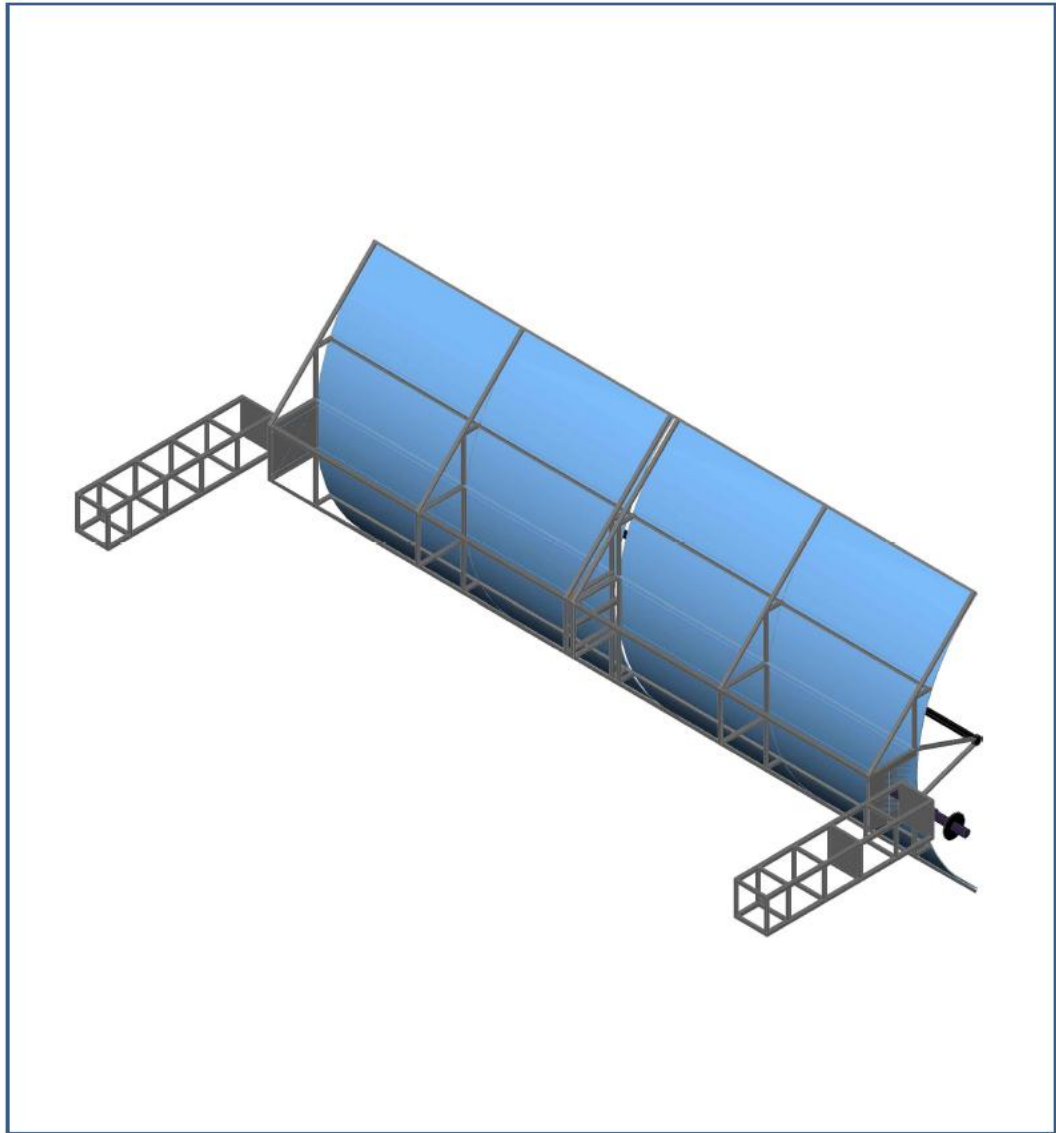
Figura 21. Plano CCP, soporte para el tubo receptor y base estructural

Fuente: *Elaboración Propia*



**Figura 22.** Plano CCP 3D vista superior

**Fuente:** *Elaboración Propia*



**Figura 23.** Plano CCP 3D vista posterior

**Fuente:** *Elaboración Propia*

### 3.2. Construcción

Considerando los criterios de diseño y los planos hechos de acuerdo a los materiales con que se cuenta, se procedió a la construcción del concentrador solar cilíndrico parabólico, ocupando un área  $14,77\text{m}^2$  ( $2.11 \times 7\text{m}$ ), conformado por 4 planchas de aluminio anodizado, sobrepuestas sobre una estructura la cual evita las deflexiones de la placa de aluminio.

Se empezó con la construcción de los soportes del concentrador, los mismos que contaran con rodamientos en la parte superior en la cual ira el eje del concentrador cilíndrico parabólico.

En la parte inferior contara con un plancha metálica que ira empotrada a una superficie solida de preferencia de concreto la cual le brindarle estabilidad al soporte y concentrador.



**Figura 24.** Construcción del soporte metálico del concentrador

**Fuente:** *Elaboración Propia*

Luego se construyó la viga principal del concentrador la cual llevara seis anillos de forma parabólica con base cuadrada, estos anillos irán entraran dentro de la viga y se situarán en la uniones de las placas.



**Figura 25.** Construcción de la viga principal del CCP

**Fuente:** *Elaboración Propia*

Quedando de la siguiente manera



**Figura 26.** Construcción de los arcos parabólicos

**Fuente:** *Elaboración Propia*

Luego se construyeron también los soportes para el tubo absorbente y las planchas de aluminio, quedando de la siguiente manera.



**Figura 27.** Construcción del soporte para el tubo absorbente y soportes para la superficie reflector

**Fuente:** *Elaboración Propia*

### 3.3. Montaje

Una vez terminada la construcción del CCP, se lo traslado al Centro de Energías Renovables de Tacna, donde se procedió al montaje del CCP, la orientación elegida fue de NORTE a SUR, para que así el concentrador pueda seguir al sol del ESTE al OESTE durante el día.



**Figura 28.** Ubicación del Concentrador en el CERT

**Fuente:** *Elaboración Propia*



**Figura 29.** Colocado de los arcos parabólicos

**Fuente:** *Elaboración Propia*



**Figura 30.** Colocado de soporte para tubo absorbente y superficie reflectora

**Fuente:** *Elaboración Propia*



**Figura 31.** Colocación de superficie reflectora

**Fuente:** *Elaboración Propia*



**Figura 32.** Anclaje de columnas de soporte al techo del CERT.

**Fuente:** *Elaboración Propia*



**Figura 33.** Montaje de la estructura parabólica a las columnas de soporte.

**Fuente:** *Elaboración Propia*



**Figura 34.** Presentación final del CCP.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

## CAPITULO 4

### METODOLOGIA Y RECURSOS EMPLEADOS

#### 4.1. Descripción de trabajo realizado

Para el diseño del concentrador cilíndrico parabólico se implementó una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel, a la que en adelante llamaremos CCPCreator.

El CCPCreator nos da la facilidad de ingresar algunos datos conocidos tales como el diámetro del tubo receptor, la longitud del ancho de la parábola, el ángulo de incidencia, factor de intercepción, transmitividad del cobertor de vidrio, absortividad del tubo absorbente y la reflectividad de la superficie reflectora, una vez ingresados estos obtenemos el factor de concentración, el punto focal y pérdidas ópticas,

Conocidas las variables del concentrador, diseñamos la estructura de este con el software AutoCAD, la estructura debe de tener la forma de una parábola teniendo en cuenta los variables antes encontradas, además de la estabilidad y solidez necesaria para que el concentrador tenga un buen desempeño.

Para el desarrollo experimental se calcularon los valores de la eficiencia instantánea, eficiencia óptica y del coeficiente global de pérdidas. Este trabajo se realizó en los ambientes del Centro de Energías Renovables de Tacna – Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, para esto se tomaron datos con un sistema de adquisición de datos que monitoreaba las temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo al concentrador, la temperatura del tubo absorbente, la temperatura ambiente, la radiación solar, el caudal, dichos datos se procesaron con el software Microsoft Excel.

## **4.2. Metodología empleada para la evaluación**

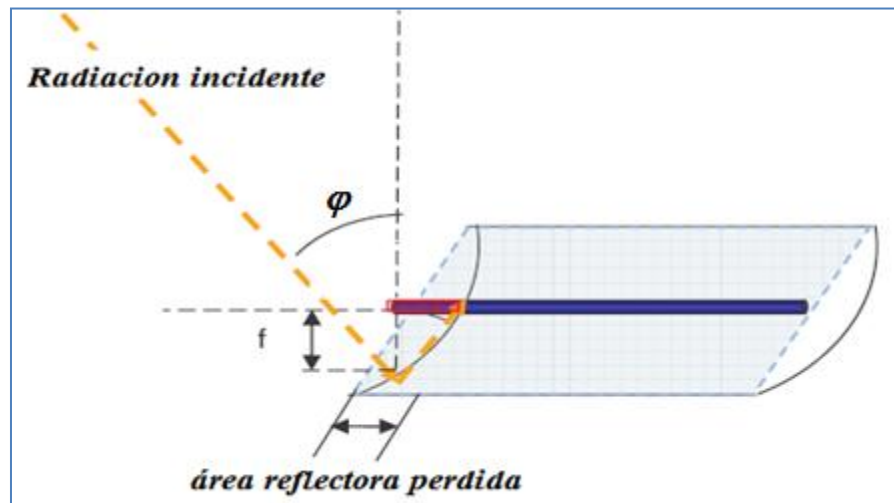
### **4.2.1. Determinación del factor de concentración.**

Para determinar el factor de concentración del concentrador cilíndrico parabólico empleamos la siguiente relación dada en la ecuación 2.5 que es:

$$C_{geometrica} = \frac{A_c}{A_r}$$

#### 4.2.2. Pérdidas debido al ángulo de inclinación del concentrador cilíndrico parabólico.

Este tipo de pérdidas se presenta debido que el concentrador no se encuentra situado perpendicularmente a la radiación incidente (ver Figura 35).



**Figura 35.** Pérdida de superficie reflectora debido al ángulo de incidencia de la radiación solar directa.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

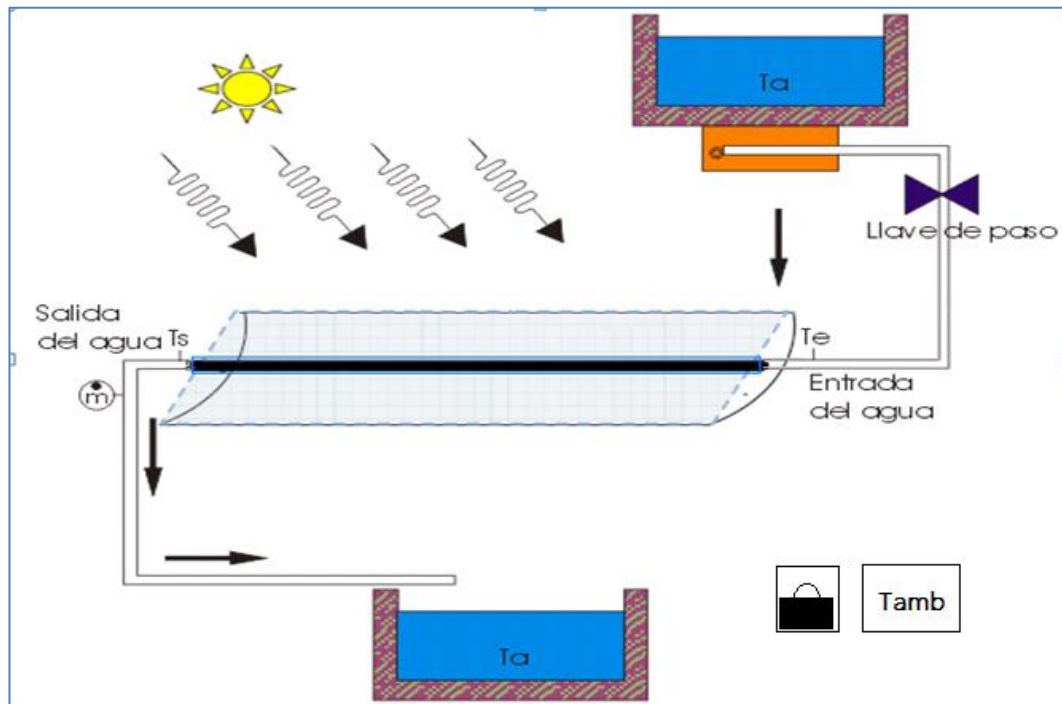
Como podemos ver en la Figura 35, la radiación solar incide al concentrador cilíndrico parabólico con un ángulo de incidencia  $\varphi$  (el cual es diferente de cero) de la normal del concentrador, es debido a este ángulo que se pierde una parte del área reflectora ya que el haz incidente

es reflejado con el mismo ángulo, hacia el tubo absorbente, es debido a esto que parte del tubo absorbente (parte pintada de rojo) no recibe la radiación reflejada por el concentrador. Para calcular esta área reflectora perdida, simplemente medimos la distancia del tubo absorbente a la cual no le llega la radiación reflejada, luego lo multiplicamos por el ancho del concentrador cilíndrico parabólico, o aplicamos la Ecuación 2.9.

#### **4.2.3. Determinación de la eficiencia óptica ( $\alpha\tau$ ):**

Según Polo, C. (2006), Para la determinación de la eficiencia óptica del concentrador cilíndrico parabólico, se llena el tubo absorbente con agua fría, a una temperatura inferior a la temperatura ambiente ( $T_e \ll T_{amb}$ ); para ello se usó hielo. El agua fría ingresa a una temperatura  $T_e$ , por un extremo del tubo absorbente como se muestra en la figura 36, y con una llave paso se regula el flujo de agua. La salida del agua a una temperatura  $T_s$  del tubo absorbente es dirigida por medio de una manguera a un recipiente.

El concentrador cilíndrico parabólico es orientado hacia el sol de sur a norte, y con inclinación igual a la latitud de Tacna  $17^\circ$ ; se dejó calentar el sistema lentamente hasta obtener las condiciones deseadas, para tomar los valores que expresan la Ecuación 2.28, esta evaluación se hará, primeramente con el tubo absorbente sin el cobertor de vidrio y luego con el cobertor de vidrio.



**Figura 36.** Esquema para la determinación de  $\tau \alpha$  del concentrador cilíndrico parabólico y ubicación de sensores.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

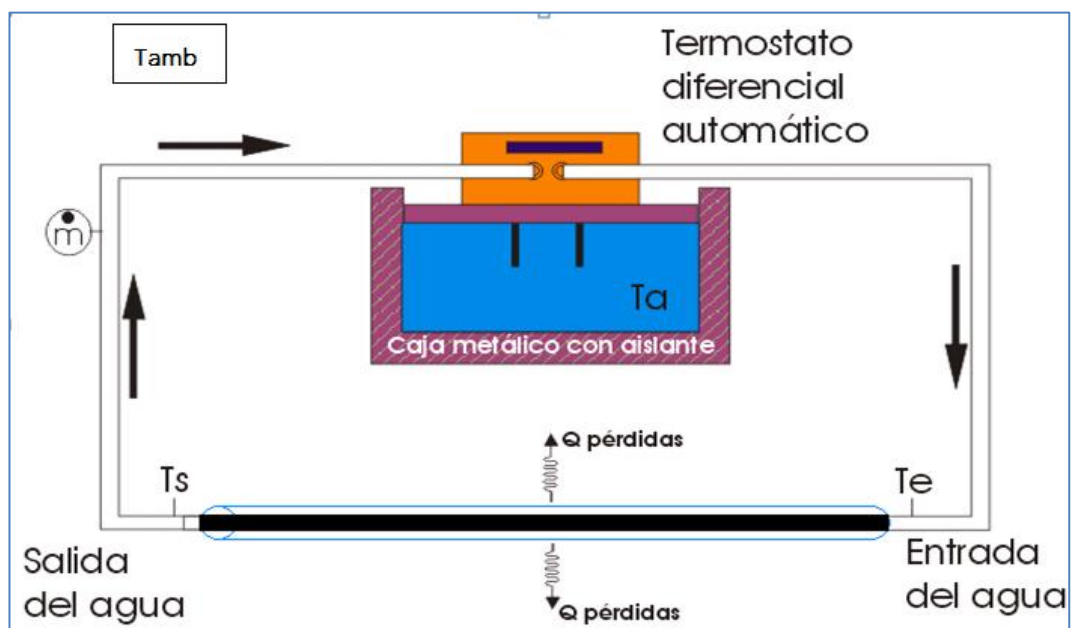
#### 4.2.4. Determinación del coeficiente global de pérdidas de calor:

$$(U_{L,abs})$$

Armamos el esquema de la Figura 37 y mantenemos funcionando el termostato, calentando el agua a una temperatura de 70 °C, por lo menos una hora hasta que la temperatura se estabilice, luego se miden las temperaturas de entrada y salida del tubo absorbente con las termocuplas tipo K, unas veinte veces, luego se saca un promedio, asimismo

simultáneamente, se midió la temperatura del ambiente de trabajo ( $T_{amb}$ ), el flujo volumétrico ( $\dot{m}$ ). Se calculó la temperatura promedio ( $T_m$ ) entre las temperaturas de entrada y salida del agua del tubo absorbente, se midió el área del tubo absorbente ( $A_r$ ), y finalmente se calculó  $U_{L,abs}$  según la Ecuación 2.29; el trabajo se realizó en un ambiente cerrado y a oscuras.

Esta evaluación del tubo absorbente la hacemos con y sin el cobertor de vidrio.



**Figura 37.** Esquema para la determinación de  $U_L$

**Fuente:** *Elaboración Propia*

#### 4.2.5. Determinación de la eficiencia térmica.

Con la determinación de la eficiencia óptica y el coeficiente global de pérdidas, obtenemos la siguiente relación a partir de la Ecuación 2.26:

$$\eta = \alpha \tau - U_{L,abs} \frac{(T_m - T_{Amb})}{E_d C_{geometrica}} \quad \text{y; el factor de concentración del}$$

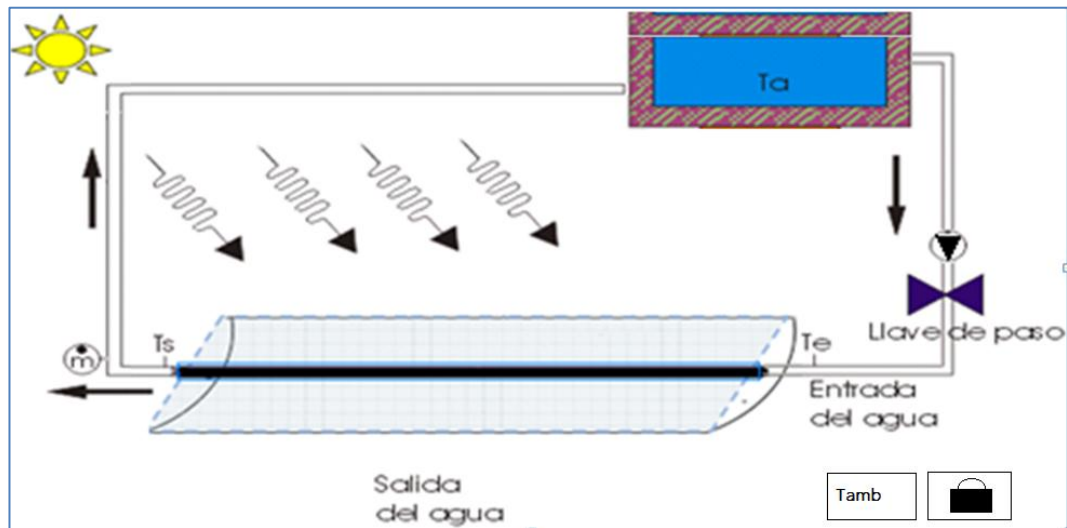
concentrador es  $C_{geometrica} = A_c/A_r$ , esta operación la realizamos para determinación de la eficiencia térmica del concentrador para los casos donde el tubo absorbente esta con y sin el cobertor de vidrio.

#### 4.2.6. Generación directa de vapor

Para esta evaluación armaremos nuestros equipos cómo lo indica en la Figura 36, para esto tendremos nuestro reservorio de agua lleno, con agua a temperatura ambiente, y un caudal controlado de  $0.0083 \text{ ls}^{-1}$ , la misma que será regulada por medio de llaves de paso en la entrada y salida del concentrador.

#### 4.2.7. Calentamiento de 500 litros de agua

Para calentar los 500 litros de agua armaremos los equipos como se muestra en diagrama de la figura 38



**Figura 38.**Esquema para la determinación de  $U_L$

**Fuente:** *Elaboración Propia*

Para hacer recircular el agua del tanque instalamos una bomba de  $\frac{1}{2}$  HP de 220VAC, para controlar el caudal instalamos llaves de paso tanto en la entrada como en la salida del concentrador, y ubicamos los sensores como se muestra en la figura anterior.

### 4.3. Asignación de recursos

#### 4.3.1. Recursos humanos

- Responsable de la investigación.
- Asesor de la investigación.
- 01 Cadista.

- 01 soldador de estructuras metálicas.

#### **4.3.2. Recursos materiales**

- 01 Concentrador solar cilíndrico parabólico.
- 01 tanque de almacenamiento de 500 litros.
- Tubería de PVC de ¾" para conexiones.
- 01 bomba de 0,5HP de potencia, 220VAC.
- 06 sensores de temperatura LM35
- 01 Solarímetro Kipp&Zonen
- 06 termocuplas tipo K
- 01 termostato diferencial automático marca Haake N3, 220VAC
- 01 sistema de adquisición de datos SQUIRREL SQ 1200 series
- Herramientas (prensas, alicate, llaves, taladro, brocas, etc.)

## CAPITULO 5

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 5.1. Características del CCP

El concentrador cilíndrico parabólico construido tiene las siguientes características:

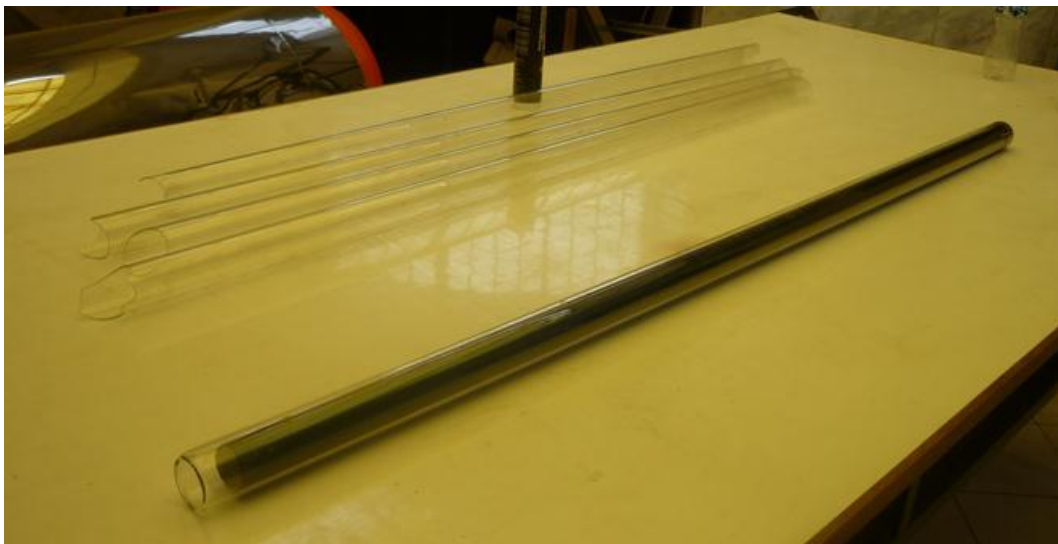


**Figura 39.** Vista frontal del CCP.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

- La superficie reflectante es de aluminio anodizado de alto coeficiente de reflexión.
- El receptor o tubo absorbente es de cobre pintado con pintura negro mate para aumentar la capacidad de absorción de calor, tiene un radio de 1,27 cm ( $\frac{1}{2}$ ").

- El cobertor de vidrio empleado fue adaptado, empleando los tubos al vacío rotos de termas solares, y colocadas concéntricamente al tubo absorbente para evitar pérdidas de calor por convección del calor al medio ambiente, además están sobrepuestas sobre anillo metálico de soporte, sellado con pegamento de alta temperatura.



**Figura 40.** Tubos rotos de Termas

**Fuente:** *Elaboración Propia*

- El área de abertura del concentrador cilíndrico parabólico es de  $10,55\text{m}^2$ .
- Se cuenta con un Solarímetro Kipp & Zonen, para medir la radiación solar (constante de calibración:  $10.35 \times 10^{-3} \text{ mV/Wm}^{-2}$ ).

## 5.2. Factor de concentración.

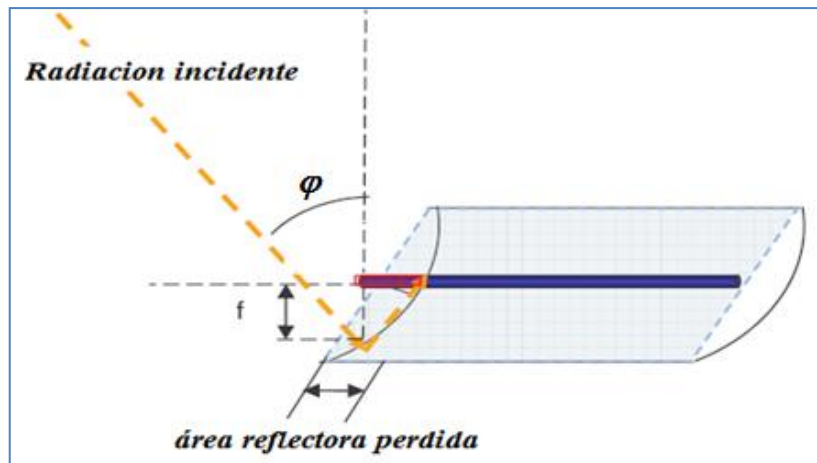
Aplicando la Ecuación 2.5, tenemos:

$$C_{geometrica} = \frac{A_c}{A_r} = \frac{105,5cm}{3,1416 \cdot 1,27cm} = 26,44$$

$$C_{geometrica} = 26,44$$

## 5.3. Pérdidas debido al ángulo de inclinación del concentrador cilíndrico parabólico.

Para determinar las pérdidas ocasionadas por el ángulo de inclinación del concentrador emplearemos la Ecuación 2.9.



**Figura 41.** Esquema de las pérdidas debidas al ángulo de incidencia de la radiación.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

Sabiendo que:

Del grafico anterior experimentalmente la parte roja mide 23 cm, conociendo la distancia focal =0.53m, podemos calcular el área de superficie reflectante que se esta desperdiciando debido al ángulo de incidencia de la radiación solar.

$$A_{\text{perdida}}=2,11\text{m} \times 0.23\text{m}$$

$$A_{\text{perdida}}= 0,4853\text{m}^2$$

La potencia útil estaría dada por:

$$E_d=790\text{Wm}^{-2}$$

$$A_c=10,55\text{m}^2, \text{ y conociendo}$$

$$\varphi= 23.45$$

Y aplicando la Ecuación

$$P_{Q,\text{sol-concentrador}} = A_c \cdot E_d \cdot \cos(\varphi)$$

$$P_{Q,\text{sol-concentrador}} = 10,55\text{m}^2 \cdot 790\text{Wm}^{-2} \cdot \cos(23,45)$$

$$P_{Q,\text{sol-concentrador}} = 7646,13\text{W}$$

Entonces 7646,13W estaría llegando a la superficie reflectora y estaría siendo aprovechada por el CCP.

#### 5.4. Cálculo de la eficiencia óptica ( $\alpha\tau$ ):

Armamos el equipo como se indica en la Figura 36, para esto podemos ver que contamos con un reservorio de agua (ver Figura 42) de color azul en la parte superior derecha de la siguiente imagen, que abastecerá al CCP, el cual mantendrá un caudal constante para esto también se instalaron dos llaves de paso tanto en la entrada como en la salida del concentrador.

Para la toma de datos se instalaron sensores de temperatura tanto en la entrada y salida del tubo absorbente del CCP, además de medir también la radiación solar y la temperatura ambiente.



**Figura 42.** Ubicación de equipos para determinar la eficiencia óptica

**Fuente:** *Elaboración Propia*

Para empezar la evaluación debemos de tener agua el agua del reservorio a una temperatura mucho menor a la temperatura del ambiente, para ello le agregamos bolsas de hielo haciendo que la temperatura del agua del reservorio baje a una temperatura comprendida entre los 8 y 10 grados centígrados.

Una vez realizada la evaluación y obtenidos los datos se reemplazaron en la Ecuación 2.28, y obtenemos:

**TABLA 1.** Datos obtenidos para determinar la eficiencia óptica del CCP sin cobertor de vidrio

EFICIENCIA OPTICA DEL CCP SIN COBERTOR DE VIDRIO				
TIEMPO (min)	Te (°C)	Ts (°C)	Tamb (°C)	Ed Wm-2
1	10	10.2	20.8	914.3
2	10	10.2	20.8	935
3	9.8	10.5	20.8	935
4	9.8	10.3	20.9	914.3
5	9.8	10.5	20.9	914.3
6	9.6	10.2	20.9	914.3
7	9.5	10.5	20.9	893.6
8	9.5	10.7	21.1	883.25
9	9.4	10.6	21.2	883.25
10	9.4	10.5	21.1	872.9
11	9.2	10.6	21.1	872.9
12	9.2	10.4	21.1	852.2
13	9.2	10.1	21.1	852.2
14	9.1	10.3	21.2	852.2
15	9	10.1	21.2	841.85
16	9.1	10	21.2	831.5
17	8.9	10.1	21.2	841.85
18	9	10.3	21.1	821.15
19	9	10.1	21.2	831.5
20	8.9	10	21.2	831.5
<b>PROMEDIO</b>	<b>9.37</b>	<b>10.31</b>	<b>21.05</b>	<b>874.4525</b>

*Fuente: Elaboración Propia*

**TABLA 2.** Datos obtenidos para determinar la eficiencia óptica del CCP con cobertor de vidrio

EFICIENCIA OPTICA DEL CCP CON COBERTOR DE VIDRIO				
TIEMPO (min)	Te (°C)	Ts (°C)	Tamb (°C)	Ed Wm-2
1	7.7	10.5	18.4	789.8
2	8.5	10.5	18.4	790
3	8.6	11.1	18.4	790
4	8.7	11.4	18.2	789.8
5	8.7	11.2	18.1	789.8
6	8.7	10.6	18.1	789.8
7	8.7	10.3	18	789.6
8	8.7	10.3	18	789.5
9	8.7	10.6	17.9	789.5
10	8.8	10.4	17.9	789.4
11	8.8	10.2	17.8	789.4
12	8.8	10	17.7	789.2
13	8.9	10.1	17.7	789.2
14	8.9	10.4	17.6	789.2
15	9	10.7	17.5	789.1
16	9	10.9	17.4	789
17	9	10.5	17.3	789.1
18	9.1	10.2	17.2	788.9
19	9.1	10.3	17.1	789
20	9.2	10.1	17	789
<b>PROMEDIO</b>	<b>8.78</b>	<b>10.515</b>	<b>17.785</b>	<b>789.415</b>

*Fuente: Elaboración Propia*

**TABLA 3.** Eficiencia óptica de CCP sin cobertor de vidrio

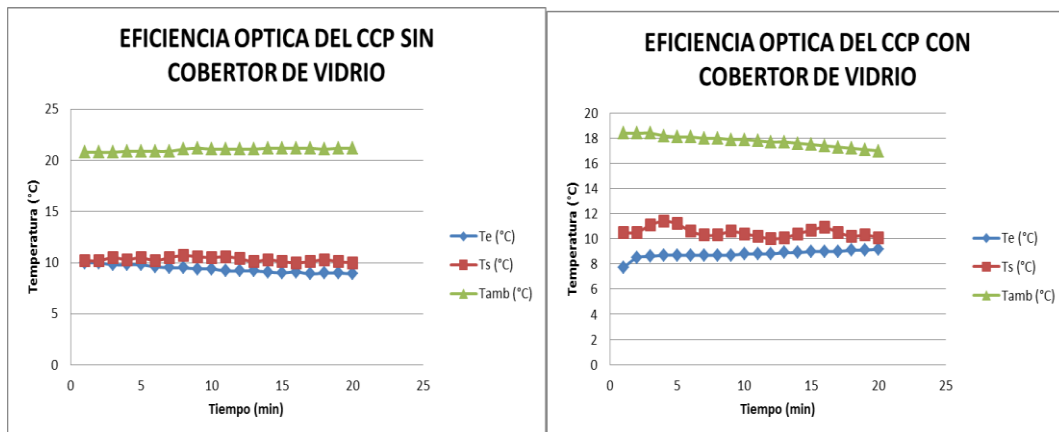
EFICIENCIA OPTICA (TUBO ABSORBENTE SIN COBERTOR EL COBERTOR VIDRIO)	
Temperatura de entrada $T_e$ (°C)	9.37
Temperatura de salida $T_s$ (°C)	10.31
Temperatura ambiente $T_{amb}$ (°C)	21.05
Radiación Solar $E_d$ (W/m <sup>2</sup> )	874.4525
Calor específico del agua $c$ (kJ/kg °C)	4.19
Área del tubo absorbente (m <sup>2</sup> )	0.26
Flujo de agua $m$ (kg/s)	0.02
<b>Eficiencia óptica <math>\alpha\tau</math></b>	<b>0.3464673</b>

*Fuente: Elaboración Propia*

**TABLA 4.** Eficiencia óptica de CCP con cobertor de vidrio

EFICIENCIA OPTICA (TUBO ABSORBENTE CON COBERTOR EL COBERTOR VIDRIO)	
Temperatura de entrada $T_e$ (°C)	8.78
Temperatura de salida $T_s$ (°C)	10.515
Temperatura ambiente $T_{amb}$ (°C)	17.785
Radiación Solar $E_d$ (W/m <sup>2</sup> )	789.415
Calor específico del agua $c$ (kJ/kg °C)	4.19
Área del tubo absorbente (m <sup>2</sup> )	0.26
Flujo de agua $m$ (kg/s)	0.02
<b>Eficiencia óptica <math>\alpha\tau</math></b>	<b>0.7083775</b>

*Fuente: Elaboración Propia*



a) variación de temperatura CCP sin Cobertor de vidrio

b) variación de temperatura CCP con Cobertor de vidrio

**Figura 43.** Variación de la temperatura en el cálculo de la eficiencia óptica

*Fuente: Elaboración Propia*

### 5.5. Cálculo del coeficiente global de pérdidas de calor: ( $U_{L,abs}$ )

Para determinar experimentalmente el valor de  $U_{L,abs}$  debemos de armar nuestros equipos tal como lo indica la Figura 37.

Esta evaluación se realizara dos veces, una de ellas se realizara teniendo al tubo absorbente cubierto con el cobertor de vidrio y la otra se realizara sin el cobertor de vidrio.



**Figura 44.** Ubicación de equipos para determinar el coeficiente global de pérdidas.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

**TABLA 5.** Datos obtenidos del tubo absorbente sin cobertor de vidrio

<b>TUBO ABSORBENTE SIN EL COBERTOR DE VIDRIO</b>			
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>TE (°C)</b>	<b>TS (°C)</b>	<b>Tamb (°C)</b>
1	89.50	84.00	20.00
2	89.50	84.50	20.00
3	89.00	84.50	20.00
4	88.50	84.00	20.00
5	88.50	83.50	19.00
6	88.50	83.50	19.50
7	89.00	83.50	19.00
8	89.50	85.00	20.00
9	90.00	85.00	20.50
10	90.50	85.50	20.50
11	91.00	86.00	20.50
12	92.00	86.50	20.50
13	92.00	85.50	20.50
14	91.50	86.50	20.50
15	91.50	86.00	20.50
16	91.50	87.00	20.50
17	91.50	86.50	20.50
18	89.00	85.00	20.50
19	89.50	86.50	20.50
20	89.50	86.00	20.50
<b>PROMEDIO</b>	<b>90.08</b>	<b>85.23</b>	<b>20.18</b>

Fuente: *Elaboración Propia*

**TABLA 6.** Datos obtenidos del tubo absorbente con cobertor de vidrio

<b>TUBO ABSORBENTE CON EL COBERTOR DE VIDRIO</b>			
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>TE (°C)</b>	<b>TS (°C)</b>	<b>Tamb (°C)</b>
1.00	86.50	86.00	18.50
2.00	87.50	86.50	18.50
3.00	88.00	87.50	18.50
4.00	88.50	88.00	18.50
5.00	89.50	88.50	18.50
6.00	89.50	89.00	18.50
7.00	89.50	89.00	18.50
8.00	90.00	89.50	19.00
9.00	90.00	89.50	19.00
10.00	90.00	89.50	19.00
11.00	89.50	89.50	19.00
12.00	89.50	89.50	19.00
13.00	89.50	89.00	18.50
14.00	89.50	89.00	18.50
15.00	89.50	89.00	18.50
16.00	89.00	88.50	18.50
17.00	89.00	88.50	18.50
18.00	86.50	86.00	18.50
19.00	84.00	83.50	18.50
20.00	82.00	81.50	18.50
<b>PROMEDIO</b>	<b>88.35</b>	<b>87.85</b>	<b>18.63</b>

Fuente: *Elaboración Propia*

**TABLA 7.** Coeficiente global de pérdidas para el tubo absorbente sin cobertor de vidrio

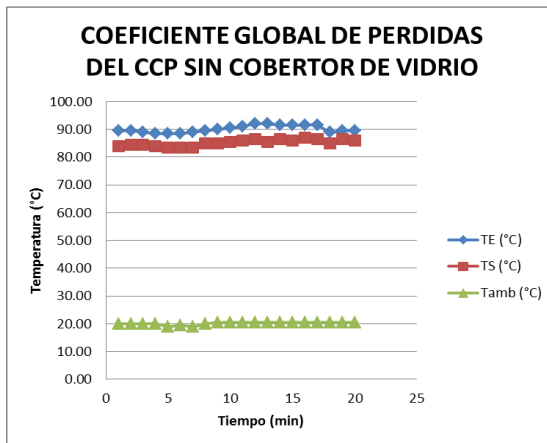
COEFICIENTE GLOBAL DE PERDIDAS PARA EL TUBO ABSORBENTE SIN EL COBERTOR DE VIDRIO	
Temperatura de entrada $T_e$ (°C)	90.08
Temperatura de salida $T_s$ (°C)	85.23
Temperatura media $T_m$ (°C)	87.65
Temperatura ambiente $T_{amb}$ (°C)	20.18
Calor específico del agua $c$ (KJ/kg °C)	4.19
Flujo de agua $m$ (kg/s)	0.04
Área del tubo absorbente $A_r$ (m <sup>2</sup> )	0.26
$U_{L,abs}$ (W/m <sup>2</sup> °C)	<b>50.97</b>

Fuente: *Elaboración Propia*

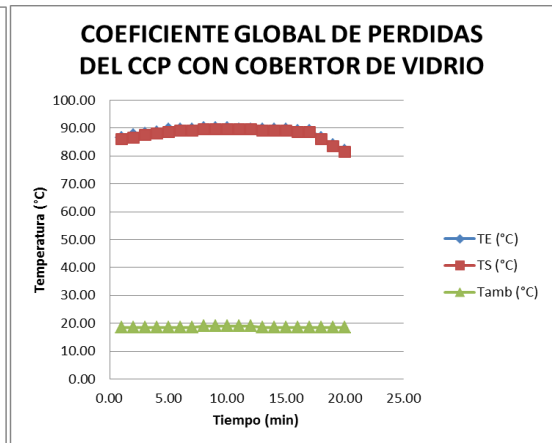
**TABLA 8.** Coeficiente global de pérdidas para el tubo absorbente con cobertor de vidrio

COEFICIENTE GLOBAL DE PERDIDAS PARA EL TUBO ABSORBENTE CON EL COBERTOR DE VIDRIO	
Temperatura de entrada $T_e$ (°C)	88.35
Temperatura de salida $T_s$ (°C)	87.85
Temperatura media $T_m$ (°C)	88.10
Temperatura ambiente $T_{amb}$ (°C)	18.63
Calor específico del agua $c$ (KJ/kg °C)	4.19
Flujo de agua $m$ (kg/s)	0.04
Área del tubo absorbente $A_r$ (m <sup>2</sup> )	0.26
$U_{L,abs}$ (W/m <sup>2</sup> °C)	<b>5.10</b>

Fuente: *Elaboración Propia*



a) variación de temperatura  
CCP sin Cobertor de vidrio



b) variación de temperatura  
CCP con Cobertor de vidrio

**Figura 45.** Variación de la temperatura en el cálculo del coeficiente global de pérdidas.

Fuente: *Elaboración Propia*

## 5.6. Cálculo de la eficiencia térmica

Una vez determinadas la eficiencia óptica y el coeficiente global de pérdidas, partimos de la Ecuación 2.26,

$$\eta = \alpha \tau - U_{L,abs} \frac{(T_m - T_{amb})}{E_d C_{geometrica}}$$

y; el factor de concentración ( $C_{geometrica}$ ) dada en la ecuación 2.7, reemplazando el área de abertura ( $A_c$ ) por el área de abertura eficiente ( $A_{c,eficiente}$ ) eficiente que es igual a 10,0647 m<sup>2</sup>, entonces tenemos que:

El nuevo factor de concentración será = 26,44

$$C_{geometrica,eficiente} = \frac{A_{c,eficiente}}{A_r}$$

$$C_{geometrica,eficiente} = \frac{10,0647m^2}{2\pi rL} = \frac{10,0647m^2}{2 * 3,1416 * 0,0127 * 5m^2} = 23.20$$

Habiendo disminuido en 3,2 con respecto al factor de concentración hallado anteriormente.

Ahora reemplazamos los valores conocidos en la Ecuación 2.26, tenemos:

Para el concentrador con tubo absorbente sin el cobertor de vidrio.

$$\eta_{sin\ cobertor} = 0,3464673 - 50,97 \cdot \frac{(T_m - T_{amb})}{E_d \cdot 23.20}$$

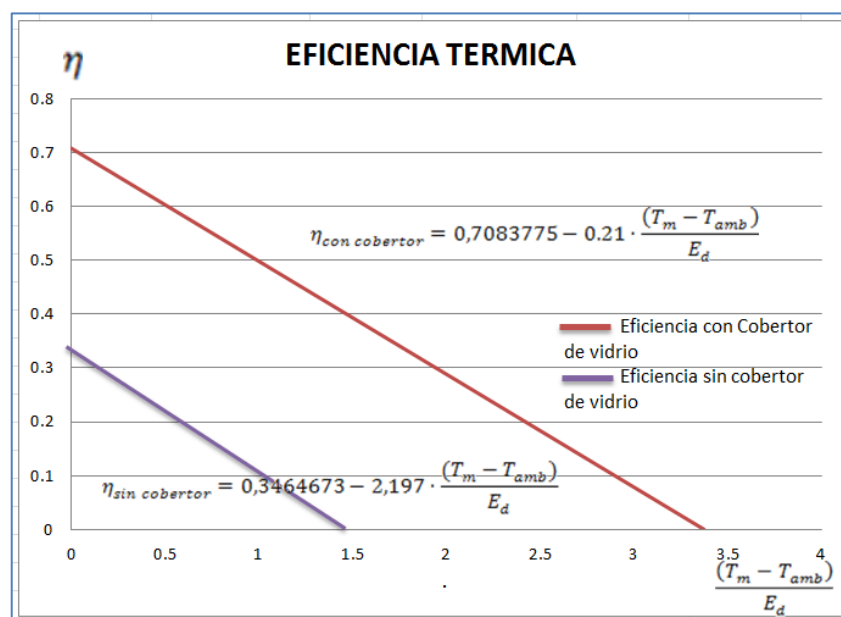
$$\eta_{con\ cobertor} = 0,7083775 - 5,10 \cdot \frac{(T_m - T_{amb})}{E_d \cdot 23.20}$$

Para el concentrador con tubo absorbente con el cobertor de vidrio.

$$\eta_{sin\ cobertor} = 0,3464673 - 2,197 \cdot \frac{(T_m - T_{amb})}{E_d}$$

$$\eta_{con\ cobertor} = 0,7083775 - 0.21 \cdot \frac{(T_m - T_{amb})}{E_d}$$

Comparando las eficiencias térmicas para los casos donde el tubo absorbente cuenta con el cobertor de vidrio y cuando no cuenta el cobertor de vidrio tenemos:



**Figura 46.** Eficiencia térmica del tubo absorbente con y sin cobertor de vidrio.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

## 5.7. Generación directa de vapor

Para esta evaluación armaremos nuestros equipos cómo lo indica en la Figura 36, para esto tendremos nuestro reservorio de agua lleno, con agua a temperatura ambiente, y un caudal controlado de  $0.0083 \text{ ls}^{-1}$ , la misma que será regulada por medio de llaves de paso.



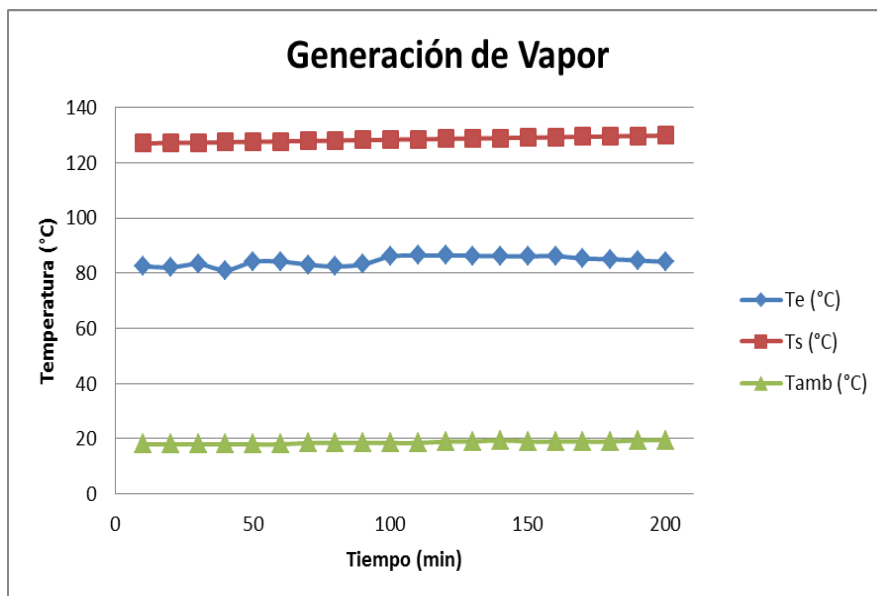
**Figura 47.** Ubicación de los equipos para la generación de vapor.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

**TABLA 9.** Datos de la generación de vapor.

<b>GENERACION DE VAPOR Y EFICIENCIA TERMICA</b>						
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Te (°C)</b>	<b>Ts (°C)</b>	<b>Tamb (°C)</b>	<b>Ed W/m2</b>	<b>Tm °C)</b>	<b>η</b>
10	82.5	127.00	18.00	872	104.75	0.60
20	82.1	127.20	18.00	874	104.65	0.60
30	83.3	127.30	18.00	874	105.30	0.60
40	81.1	127.47	18.00	876	104.28	0.60
50	84.1	127.62	18.00	881	105.86	0.60
60	84.2	127.77	18.00	882	105.98	0.60
70	83.1	127.92	18.50	886	105.51	0.60
80	82.4	128.07	18.50	884	105.23	0.60
90	83.2	128.22	18.50	886	105.71	0.60
100	86.1	128.37	18.50	890	107.23	0.60
110	86.4	128.52	18.50	889	107.46	0.60
120	86.5	128.67	19.00	890	107.58	0.60
130	86.3	128.82	19.00	892	107.56	0.60
140	86.2	128.97	19.50	890	107.58	0.60
150	86.1	129.12	19.00	893	107.61	0.60
160	86.2	129.27	19.00	895	107.73	0.60
170	85.3	129.42	19.00	897	107.36	0.60
180	85.1	129.57	19.00	896	107.33	0.60
190	84.6	129.72	19.50	896	107.16	0.60
200	84.1	129.87	19.50	898	106.98	0.60

**Fuente:** *Elaboración Propia*



**Figura 48.** Variación de la temperatura para la generación de vapor.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

### 5.8. Velocidad de calentamiento de 500 litros de agua.

Armamos los equipos como se muestra en la figura 38.

Para esta evaluación regulamos el caudal a 0.0085 litros por segundo, además de emplear solo el tubo que cuenta con cobertor de vidrio para evitar pérdidas de calor:



**Figura 49.** Instalación para la generación de vapor.

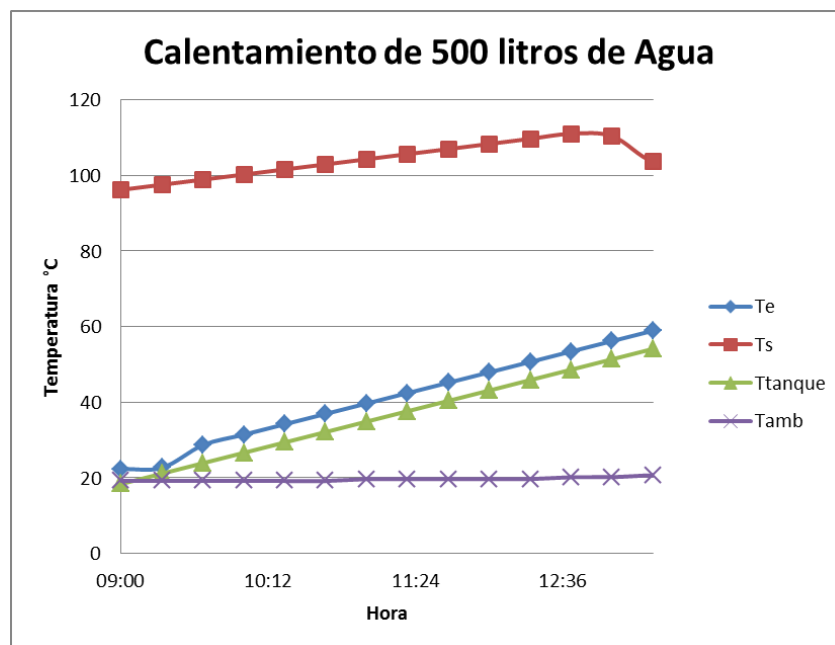
**Fuente:** *Elaboración Propia*

**TABLA 10.** Datos del calentamiento de 500 litros de agua

CALENTAMIENTO DE 500 LITROS DE AGUA					
Hora	Te	Ts	Ttanque	Tamb	Ed
09:00	22.4	96.22	18.40	19.20	635
09:20	22.7	97.57	21.15	19.20	652
09:40	28.70	98.92	23.90	19.20	664
10:00	31.45	100.27	26.65	19.20	671
10:20	34.20	101.62	29.40	19.20	683
10:40	36.95	102.97	32.15	19.20	705
11:00	39.70	104.32	34.90	19.70	740
11:20	42.45	105.67	37.65	19.70	801
11:40	45.20	107.02	40.40	19.70	835
12:00	47.95	108.37	43.15	19.70	853
12:20	50.70	109.72	45.90	19.70	860
12:40	53.45	111.07	48.65	20.20	864
13:00	56.20	110.42	51.40	20.20	855
13:20	58.95	103.77	54.15	20.70	853
13:40	61.70	105.12	56.90	20.20	856
14:00	64.45	101.47	59.65	20.20	840
14:20	67.20	97.00	62.40	20.20	811
14:40	69.90	93.27	65.10	20.20	767
15:00	72.80	90.10	68.00	20.70	720
15:20	75.40	87.92	70.60	20.70	713

**Fuente:** *Elaboración Propia*

Del cuadro anterior podemos ver que la velocidad de calentamiento es de:  $0,14^{\circ}\text{C}/\text{min}$  o también  $8,03^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ .



**Figura 50.** Calentamiento de 500 litros de agua.

**Fuente:** *Elaboración Propia*

### 5.9. Análisis y discusión de resultados:

Una de las características que tienen los CCP, es la exactitud de sus medidas, esto no es problema cuando se diseña con software especializado en el diseño de planos como lo es el AUTOCAD, el problema vienen al momento de la construcción y montaje ya que como

veremos más adelante, buena parte las pérdidas de energía se deben a los factores ópticos del CCP.

- Se determinó el factor de concentración geométrica el cual es igual a 26,44, pero debido al ángulo de incidencia de la radiación solar es que se pierden  $0,4853\text{m}^2$ , provocando esto que pierda 383.39W.
- Según los resultados de las Tablas 3 y 4, podemos ver que la eficiencia óptica del CCP con tubo absorbente y cobertor de vidrio es superior al otro que no cuenta con cobertor de vidrio, ya que su eficiencia óptica es de 0,7083 (tubo con cobertor de vidrio) contra 0,3464 (tubo sin cobertor de vidrio), evidenciándose en este resultado que los tubos absorbentes sin cobertor de vidrio cuentan con demasiadas perdidas de energía debidas a la transferencia de calor del tubo absorbente al medio ambiente directamente, con respecto a la eficiencia óptica del CCP con tubo absorbente y cobertor de vidrio, este resultado aun es bajo ya que debería de ser uno o cerca a uno, pero no se da debido a las imperfecciones encontradas en los bordes de la superficie reflectora debidas a una mala construcción de la estructura, la cual hacia que los estos reflejen la radiación a otro lugar menos al tubo absorbente.
- Lo antes mencionado acerca del tubo absorbente sin cobertor de vidrio se refleja de también en el coeficiente global de perdidas, ya que el

tubo absorbente sin cobertor de vidrio cuenta con un coeficiente global de pérdidas de  $50,97 \text{ Wm}^2\text{C}$ , a comparación de los  $5,10 \text{ Wm}^2\text{C}$  del tubo absorbente con cobertor de vidrio, esto se debe más que todo a que al estar expuesto el tubo absorbente directamente al ambiente, este toma la forma de un radiador que irradia gran parte de la energía que llega a él.

- La eficiencia térmica es dependiente de la eficiencia óptica y del coeficiente global de pérdidas, además de que para hacer este cálculo deberemos actualizar nuestros datos por ejemplo en la concentración geométrica ya que ahora trabajaremos con el área eficiente del concentrador, dándonos como resultado las ecuaciones siguientes que nos ayudan a entender el comportamiento térmico del concentrador, tal como lo indica la Figura 45:

$$\eta_{sin\ cobertor} = 0,3464673 - 2,197 \cdot \frac{(T_m - T_{amb})}{E_d}$$

$$\eta_{con\ cobertor} = 0,7083775 - 0,21 \cdot \frac{(T_m - T_{amb})}{E_d}$$

- Tal como se muestra en la Tabla 9, se generó vapor de agua a  $128 \text{ }^\circ\text{C}$ , casi inmediatamente, con un caudal de  $0.0083 \text{ ls}^{-1}$ , a caudales pequeños es mayor la generación de vapor a alta temperatura,

lamentablemente no se pudo hacer la medida de la presión debido a la falta de equipos y presupuesto.

- Para el calentamiento de los 500 litros de agua, se le instalo una bomba de agua de  $\frac{1}{2}$  HP de potencia que funciona a 220VAC, para hacer recircular el agua de del tanque al concentrador con un caudal de  $0,0085 \text{ l s}^{-1}$  llegándose a calentar de 18,4 a 70,6 en 6 horas y 20 minutos, obteniéndose que la velocidad de calentamiento es de  $0,14 \text{ }^{\circ}\text{C por minuto}$ , para evitar pérdidas de calor en las tuberías se las aisló del medio ambiente con una capa de esponja y encintada para evitar que la humedad y el sol malogren la esponja.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- a) Se diseñó, construyó y evaluó el concentrador solar cilíndrico parabólico de dimensiones: Largo 5,80 m, Ancho 2,11 m, Alto 2 m con la finalidad de generar vapor de agua a alta temperatura empleando como recurso energético la energía solar, utilizando materiales reciclados como tubos de vidrio rotos de termas solares, fierros y otros materiales.
- b) Se ha evaluado el concentrador solar cilíndrico parabólico, obteniéndose un factor de concentración de 26,44 y con rendimiento térmico - energético del concentrador de 60%, bajo las condiciones de radiación de la ciudad de Tacna para la generación de vapor de agua.
- c) La eficiencia óptica para el caso de un CCP sin cobertor de vidrio es de 0,35, y la del CCP con cobertor de vidrio es de 0,71, y el coeficiente global de pérdidas para el CCP sin cobertor de vidrio es de  $50,97 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ , y para el CCP con cobertor de vidrio es de  $5,10 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ .

- d) Se caracterizó el funcionamiento térmico del CCP haciendo dos evaluaciones más, una que es la de generar vapor directamente, donde el CCP es capaz de generar vapor de agua a 129.87°C, además se calentaron 500 litros de agua de 18,4°C a 70,60°C en 6 horas y 20 minutos con una velocidad de calentamiento de 0,14°C por minuto.

## **6.2. Recomendaciones**

- a) Para un mejor desempeño se sugiere la implementación de un sistema de seguimiento solar con un grado de libertad, para que siga al sol durante el día de Este a Oeste.
- b) Cambiar el tubo o hacer soldar canaletas en los extremos de los tubos ya que al generarse vapor existe demasiada presión dentro de los tubos y puede hacer salir las mangueras de los extremos ocasionando accidentes.
- c) En el momento de la construcción del CCP se debe ser bien minuciosos con las medidas que se hacen ya que a veces por ahorrar material se puede ocasionar pérdidas en la eficiencia del CCP.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Chassériaux, J. (1990). *Conversión Térmica de la Radiación Solar*. Argentina: Biblioteca Mosaico.
2. Coz P., Vera, J. (1982). *Concentradores Solares*. Lima: UNI.
3. Duffie, J., Beckman,W. (1990). *Solar engineering of thermal processes*. New York: John Wiley & Sons.
4. Fernandez,A. (2006,09). *Sener parabolic trough collector design and testing*. SolarSpaces, pp. 1-8.
5. Forristall, R. (2003). *Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver*. Colorado - EEUU: National Renewable Energy Laboratory.
6. Jurgens,B., Hek, A.,Herrero, V., Lobo,G. (2010). *Electricidad Termosolar*. Andalucía: Coria Gráfica.
7. Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering: processes and systems*. United States of America: ELSEVIER.
8. Kalogirou,S. (2004). *Solar thermal collectors and applications*. Progress in Energy and Combustion Science, 30, 231-295.

9. Martinez, D. (2002). *Tecnología de discos parabólicos y motor stirling*. Almeria: CIEMAT.
10. Polo, C. (2006). *Guía de laboratorio de procesos térmicos solares*. Tacna: UNJBG.
11. Price, H., Lupfer, E. (2002). *Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology*. Journal of Solar Energy Engineering, 124, 109-125.
12. Richter, C., Teske, S., Nebrera, J. (2009). *Energía Solar Térmica de Concentración: Perspectiva Mundial 2009*. ESPAÑA: CSP.
13. Romero, M., Zarza, E. (2007). *Concentrating Solar Thermal Power*. Almeria: CIEMAT.
14. Vanek, F., Albright, L. (2008). *Energy Systems Engineering: Evaluation and implementation*. USA: The McGraw-Hill.