

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE POTENCIA  
SOLAR DE 500W UTILIZANDO ESPEJOS CON DISTRIBUCIÓN  
PARABÓLICA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**REALIZADO POR:**

**ROBERTO PAÚL CALVOPÍÑA TAPIA**

**RUBÉN HERNÁN SALINAS SALINAS**

**DIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA**

**CODIRECTOR: ING. JOSÉ PÉREZ**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**Julio del 2008**



## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

El proyecto “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE POTENCIA SOLAR DE 500W CON ESPEJOS CON DISTRIBUCIÓN PARABÓLICA**” fue realizado en su totalidad por los señores: Rubén Hernán Salinas y Roberto Paúl Calvopiña, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

**Ing. José Guasumba**

**DIRECTOR**

---

**Ing. José Pérez**

**CODIRECTOR**

**Sangolquí, 2 de Julio del 2008**

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE POTENCIA SOLAR DE 500 W UTILIZANDO ESPEJOS CON DISTRIBUCIÓN PARABÓLICA”.**

**ELABORADO POR:**

---

**Roberto Calvopiña**

---

**Rubén Salinas**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS EN LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

---

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE  
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Ing. Juan Díaz T.**

**Sangolquí, 2 de Julio del 2008**

## DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis abuelos, Sergio y Hermelinda (+), Enrique y Digna, porque gracias a su esfuerzo y dedicación tuve la dicha de tener a dos grandes personas que me han apoyado toda mi vida, mis padres Luis y Elba, quienes con su amor, comprensión y apoyo han hecho de mi la persona que soy ahora, a mi hermana Karina, por su apoyo incondicional en los momentos buenos y malos. A mis tíos, primos, amigos, todos ellos aportando con su granito de arena para ayudar a que consiga llegar al objetivo propuesto. Gracias de todo corazón.

Roberto Paúl Calvopiña Tapia

A Dios, por darme unos padres maravillosos, pero sobre todas las cosas el gusto de tenerles a mi lado y poder disfrutar muchas alegrías y tristezas, que nos tiene reservada en el transcurso de esta vida.

A mí querido padre, Rubén

A mí querida madre, Elsa

Quienes a base de amor, sacrificio, esfuerzo, han sabido enseñar y pregonar a través del ejemplo, con valores como, el respeto, la honestidad, la responsabilidad, la solidaridad, la humildad, la valentía.

A mis hermanos; Lucy por estar siempre en las buenas y en las malas, por ayudarme cuando lo necesitaba; Pablo por haber crecido y superado casi iguales, fuimos a las misma escuela, al mismo colegio, y en la misma universidad; Gaby y Daya, las pequeñas de la casa, siempre han sabido dar ese golpe de aliento, para seguir adelante sin flaquear. A mi linda sobrinita, Paula Isabela por ser esa luz.

A mis abuelitos, Tobías (+), Eloísa (+); Vicente (+) y Evangelina; a mis tíos y tías, a mis primos; de manera especial para Javier, Jorge y Diego.

Rubén Hernán Salinas

## **AGRADECIMIENTO**

“Gracias a la vida que me ha dado tanto” (Mercedes Sosa). Es la frase que lo resume todo. Agradezco a Dios por hacer posible que tenga vida y salud, a mis padres Luis y Elba por haberme cuidado y formado, a mi hermana Karina, mi amiga de toda la vida, a mis abuelos por haberme apoyado en los momentos buenos y malos, en sus sabias palabras siempre encontré consuelo para mis aflicciones, a mi director y codirector de tesis, gracias a su guía logramos el objetivo, a mi amigo Rubén por haberme apoyado y haber logrado conformar un buen equipo de trabajo. A mis tíos, primos y amigos, siempre preocupados por mi y apoyándome en las buenas y malas.

Paúl Calvopiña

A mis padres, Rubén y Elsa, por el apoyo incondicional brindado durante mi formación académica pero sobretodo en la formación como persona, a través del conocimiento, de la sabiduría y del ejemplo, impartido sin escatimar esfuerzos.

A la Escuela Politécnica del Ejercito por haberme dado la oportunidad de formarme como un profesional con vastos conocimientos, a través de los profesores que supieron impartir sus conocimiento a través de esta difícil travesía pero muy placentera; de manera muy especial al Ingeniero José Gusumba y José Pérez, quienes han dado todo de sí, brindando toda su capacidad como profesionales durante el desarrollo del proyecto de grado.

A Paúl, compañero y amigo, con quien se ha llegado a cumplir los objetivos propuestos, debido al ímpetu, empeño y ganas en el desarrollo del proyecto.

Rubén Hernán Salinas

# ÍNDICE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.3 OBJETIVOS .....	4
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	4
1.5 ALCANCE .....	6
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>7</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
2.1 DEFINICIONES .....	7
2.2 NATURALEZA DE LA LUZ .....	10
2.3 ÓPTICA DE CONCENTRADORES .....	20
2.4 PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LOS MATERIALES .....	28
2.5 TRANSFERENCIA DE CALOR EN SISTEMAS DE ALTA TEMPERATURA .....	29
<b>CAPITULO 3</b> .....	<b>47</b>
<b>RECURSO SOLAR</b> .....	<b>47</b>
3.1 LEYES DE LA RADIACIÓN .....	47
3.2 RADIACIÓN SOLAR .....	55
3.3 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LA IRRADIANCIA .....	57
3.4 ENERGÍA DISPONIBLE .....	80
<b>CAPITULO 4</b> .....	<b>81</b>
<b>TECNOLOGÍA DE LOS CONCENTRADORES</b> .....	<b>81</b>
4.1 CONCENTRADORES CILÍNDRICO – PARABÓLICOS (CCP) .....	82
4.2 PARABOLOIDES DE REVOLUCIÓN .....	94
4.3 TORRE DE POTENCIA .....	100
4.4 HORNO SOLARES .....	117
4.5 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS .....	122
<b>CAPITULO 5</b> .....	<b>123</b>
<b>DISEÑO DEL SISTEMA</b> .....	<b>123</b>

5.1 DISEÑO TÉRMICO .....	123
5.2 DISEÑO MECÁNICO .....	130
5.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	134
5.4 SISTEMAS ÓPTICOS .....	142
5.5 SISTEMA DE ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO.....	151

## **CAPÍTULO 6 ..... 157**

<b>PRUEBA Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO .....</b>	<b>157</b>
6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	157
6.2 TOMA DE DATOS.....	157
6.3 TABULACIÓN DE DATOS .....	159
6.4 RESULTADOS OBTENIDOS .....	161

## **CAPÍTULO 7 ..... 167**

<b>ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO .....</b>	<b>167</b>
7.1 COSTO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	167
7.2 COSTO GENERADOR ELÉCTRICO .....	168
7.3 REPORTE DE GASTOS REALIZADOS.....	169
7.4 ANÁLISIS FINANCIERO .....	170

## **CAPÍTULO 8 ..... 173**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>173</b>
8.1 CONCLUSIONES.....	173
8.2 RECOMENDACIONES .....	175

## **CAPÍTULO 1 ..... 1**

<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.3 OBJETIVOS .....	4
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	4
1.5 ALCANCE .....	6

## **CAPITULO 2 ..... 7**

<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1 DEFINICIONES.....	7
2.2 NATURALEZA DE LA LUZ.....	10



2.3	ÓPTICA DE CONCENTRADORES.....	20
2.4	PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LOS MATERIALES.....	28
2.5	TRANSFERENCIA DE CALOR EN SISTEMAS DE ALTA TEMPERATURA.....	29

## **CAPITULO 3..... 47**

<b>RECURSO SOLAR.....</b>	<b>47</b>
3.1 LEYES DE LA RADIACIÓN.....	47
3.2 RADIACIÓN SOLAR.....	55
3.3 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LA IRRADIANCIA.....	57
3.4 ENERGÍA DISPONIBLE.....	80

## **CAPITULO 4..... 81**

<b>TECNOLOGÍA DE LOS CONCENTRADORES.....</b>	<b>81</b>
4.1 CONCENTRADORES CILÍNDRICO – PARABÓLICOS (CCP).....	82
4.2 PARABOLOIDES DE REVOLUCIÓN.....	94
4.3 TORRE DE POTENCIA.....	100
4.4 HORNOS SOLARES.....	117
4.5 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	122

## **CAPITULO 5..... 123**

<b>DISEÑO DEL SISTEMA.....</b>	<b>123</b>
5.1 DISEÑO TÉRMICO.....	123
5.2 DISEÑO MECÁNICO.....	130
5.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	134
5.4 SISTEMAS ÓPTICOS.....	142
5.5 SISTEMA DE ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO.....	151

## **CAPÍTULO 6..... 157**

<b>PRUEBA Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.....</b>	<b>157</b>
6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	157
6.2 TOMA DE DATOS.....	157
6.3 TABULACIÓN DE DATOS.....	159
6.4 RESULTADOS OBTENIDOS.....	161

## **CAPÍTULO 7..... 167**

<b>ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.....</b>	<b>167</b>
7.1 COSTO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	167
7.2 COSTO GENERADOR ELÉCTRICO.....	168
7.3 REPORTE DE GASTOS REALIZADOS.....	169

7.4 ANÁLISIS FINANCIERO .....	170
-------------------------------	-----

**CAPÍTULO 8 .....173**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 173**

8.1 CONCLUSIONES.....	173
-----------------------	-----

8.2 RECOMENDACIONES .....	175
---------------------------	-----

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
2.1	Ecuaciones para convertir el día del mes, en día juliano....	13
2.2	Longitud de onda de acuerdo al color.....	23
2.3	Índices de refracción.....	25
2.4	Velocidad del sonido en algunos medios.....	25
2.5	Reflectividad global de algunos materiales.....	27
2.6	Propiedades Termofísicas a $T=300^{\circ}$ K.....	29
2.7	Número de Prandtl para algunos fluidos.....	38
3.1	Tipos de instrumentos de medición y sus usos.....	58
3.2	Características de los piranómetros.....	59
3.3	Validez de la ecuación 3.9.....	65
3.4	Valores de las constantes a y b. ....	65
3.5	Albedo de algunas superficies comunes.....	66
3.6	Mediciones de Constante Solar – Froehlich y Brusa.....	80
4.1	Tipo de receptores de diversas características operativas con distintos fluidos de trabajo.....	104
4.2	Receptores - Condiciones de operación.....	107
4.3	Pérdidas en el Sistema de Torre de Potencia.....	108
4.4	Principales opciones tecnológicas en sistemas de receptor central.....	113
4.5	Tecnologías de generación de energía solar termoeléctrica.	122
5.1	Eficiencia de la junta.....	132
5.2	Efectos que ocasionan un estado límite.....	134
5.3	Factores de reducción.....	135
5.4	Factores de mayorización de carga.....	136
5.5	Errores frecuentes en los helióstatos.....	141
5.6	Selección de turbinas.....	153
5.7	Selección del número de álabes.....	154
5.8	Parámetros diseño turbina .....	155
7.1	Costo de Generadores.....	168
7.2	Comparación de costo de venta de energía.....	170

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
2.1	Ciclo diario del sol . . . . .	14
2.2	Inclinación del eje de la Tierra . . . . .	15
2.3	Angulo Cenital y Acimutal . . . . .	16
2.4	Proyecciones estereográficas del movimiento aparente del Sol. . . . .	18
2.5	Efecto invernadero . . . . .	19
2.6	Espectro Electromagnético . . . . .	20
2.7	Propiedades de la Luz - Reflexión . . . . .	21
2.8	Propiedades de la Luz - Refracción . . . . .	22
2.9	Propiedades de la Luz - Transmisión . . . . .	23
2.10	Relación ángulos incidencia, reflexión y de refracción . . . . .	24
2.11	Dirección del flujo del calor por conducción y gradiente de temperatura . . . . .	31
2.12	Esquema de los flujos de calor entre el cuerpo y el entorno . . . . .	34
2.13	Semejanza Eléctrica – Suma de dos resistencias . . . . .	35
2.14	Semejanza Eléctrica – Resistencia equivalente . . . . .	36
2.15	Representación de las variables del número de Nusselt . . . . .	37
2.16	Modelo de transferencia de calor . . . . .	41
2.17	Motor de turbina a vapor . . . . .	43
2.18	Diagrama del Ciclo Rankine . . . . .	44
3.1	Esquema de la ley de Beer . . . . .	54
3.2	Espectro de radiación . . . . .	54
3.3	Piranómetro . . . . .	60
3.4	Pirheliómetro Primario . . . . .	60
3.5	Pirheliómetro Secundario sobre un seguidor de sol . . . . .	61
3.6	Pirheliógrafo . . . . .	61
3.7	Actinógrafo . . . . .	62

<b>FIGURA</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
3.8	Heliógrafo . . . . .	63
3.9	Piranómetro con banda de sombra para la medición de radiación difusa . . . . .	63
4.1	Principio de funcionamiento de un colector cilíndrico parabólico. . . . .	82
4.2	Esquema de un tubo absorbente. . . . .	85
4,3	Seguimiento solar típico de un Concentrador Cilíndrico Parabólico. . . . .	85
4.4	Estructura metálica - tipo espacial. . . . .	86
4.5	Elementos de un Concentrador Cilíndrico Parabólico. . . . .	87
4.6	Pérdidas geométricas debidas a sombras entre filas paralelas. . . . .	88
4.7	Corte longitudinal de un CCP, mostrando el ángulo de incidencia. . . . .	89
4.8	Pérdidas ópticas en un CCP. . . . .	90
4.9	Diagrama de pérdidas y rendimientos de un CCP. . . . .	94
4.10	Diagrama de pérdidas y rendimientos de un CCP. . . . .	95
4.11	Sistemas de discos parabólicos con concentrador de facetas discretas (izquierda); y con concentrador de membrana pensionada (derecha) . . . . .	96
4.12	Esquema de un sistema disco parabólico - turbina de gas con recuperación e hibridación . . . . .	98
4.13	Pérdidas y rendimientos en el Sistema de Disco Parabólico EuroDish. . . . .	99
4.14	Principio de funcionamiento de un sistema de receptor central. . . . .	100
4.15	Helióstato de vidrio-metal de 90 m2 de superficie reflexiva. . .	101

<b>FIGURA</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
4.16	Evolución de las principales tecnologías de construcción de helióstatos. . . . .	102
4.17	Disposición de helióstatos alrededor del receptor. . . . .	103
4.18	Esquema de receptores. . . . .	106
4.19	Pérdidas por factor coseno, sombras y bloqueos. . . . .	109
4.20	Curva de reflectividad espectral y valor medio ponderado por el espectro solar. . . . .	110
4.21	Perdidas por desbordamiento. . . . .	111
4.22	Diagrama de un balance energético. . . . .	112
4.23	Sistema de accionamiento eléctrico. . . . .	115
4.24	Esquema de un horno solar. . . . .	118
5.1	Transferencia de Calor en Superficies Cilíndricas. . . . .	124
5.2	Módulo de elasticidad en función de la temperatura. . . . .	137
5.3	Posición de los ángulos de ataque y de guiñada. . . . .	139
5.4	Componentes del vector. . . . .	144
5.5	Geometría de la Parábola. . . . .	145
5.6	Imagen solar sobre un plano tangente al receptor. . . . .	147
5.7		149

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ORDEN</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>CÓDIGO</b>
1.	Tabla de carta estereográfica.....	A-1
2.	Datos de heliofanía.....	A-2
3.	Mapa de radiación.....	A-3
4.	Análisis mecánico del receptor – SolidWorks.....	A-4
5.	Análisis estructural de la torre – SAP 2000.....	A-5
6.	Análisis estructural del helióstato – SAP 2000.....	A-6
7.	Protocolo de pruebas.....	A-7
8.	Análisis económico.....	A-8
9.	Tabulación de datos.....	A-9
10.	Análisis en MathCad.....	A-10
11.	Planos Constructivos.....	A-11
12.	Diagramas de procesos.....	A-12
13.	Fotos.....	A-13
14.	Tabla de Presiones – Agua Saturada.....	A-14

## NOMENCLATURA

a:	Absortancia
g:	Aceleración de la gravedad
$\beta_s$ :	Ángulo acimutal
$\theta_s$ :	Ángulo cenital
$\varphi$ :	Ángulo de incidencia
$\tau$ :	Ángulo horario
A:	Área
$Q_i$ :	Calor
$C_p$ :	Calor específico
E:	Cantidad de energía
Q:	Caudal
k:	Coefficiente de conductividad térmica
$\beta$ :	Coefficiente de expansión volumétrica
h:	Coefficiente de transferencia de calor por convección
U:	Coefficiente global de Transferencia de Calor
$\sigma$ :	Constante de Stefan - Boltzmann
$\delta$ :	Declinación
$\rho$ :	Densidad
n:	Día Juliano
$\alpha$ :	Difusividad térmica
F:	Distancia focal
$\eta$ :	Eficiencia



$\varepsilon$ :	Emitancia
$h_f$ :	Entalpía
s:	Entropía
Lc:	Espesor de placa plana
$\gamma$ :	Factor de intercepción
$\phi$ :	Factor de resistencia
$H_{on}$ :	Flujo de radiación extraterrestre
m:	Flujo másico
$\lambda$ :	Longitud de onda
m:	Masa
Gr:	Número de Grashof
N:	Número de horas de brillo solar teórico
Nu:	Número de Nusselt
Pr:	Número de Prandtl
Ra:	Número de Rayleigh
Re:	Número de Reynolds
W:	Potencia de diseño
P:	Presión
H:	Radiación en la superficie terrestre
r:	Reflectancia
T:	Temperatura
t:	Transmitancia
Uf:	Velocidad de flujo del fluido
c:	Velocidad de la luz
$\nu$ :	Viscosidad cinemática

## **RESUMEN**

El presente estudio se desarrolla en ocho capítulos, en los mismos que se exponen la teoría que permite explicar las variables que se utilizan para el diseño de la Torre de Potencia Solar, realizar los cálculos de ingeniería, planos de construcción y determinar los gastos generados durante el desarrollo del presente proyecto.

Se plantea también un análisis económico-financiero del proyecto, que permite establecer los costos de producción de energía utilizando medios alternos como es el caso de la energía solar.

Este equipo se ha instalado en el laboratorio de Energías No Convencionales del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (DECEM) de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE), con el propósito de que sea de utilidad para estudiantes e investigadores.

## INTRODUCCIÓN

La energía utilizada en la época contemporánea corresponde básicamente a la hidráulica, derivados del petróleo, carbón vegetal, carbón mineral, y también se obtiene de manera artificial como es el caso de la energía nuclear, alguna de estas provienen de recursos NO RENOVABLES y CONTAMINANTES, lo que ocasiona que la producción de energía sea un proceso perjudicial y peligroso para la salud y el medio ambiente.

A través de la evolución de la ciencia y tecnología se ha buscado en las últimas décadas producir energía utilizando recursos RENOVABLES, como el viento, el sol, el mar, geotérmica, etc.; mismas que hasta la época presente tienen un alto costo. Esta situación ha ocasionado que en los últimos años mejor eficiencia, gracias al empleo de materiales resistentes y económicos.

Con el desarrollo experimental del proyecto de Torre de Potencia Solar, se quiere aprovechar el recurso solar existente en nuestro país para la generación de energía mecánica, que permita su utilización para la generación de energía eléctrica, sistemas de calefacción, sistemas de enfriamiento, tecnología que se utiliza en otros países de Europa y Norte América.



## **CAPÍTULO 1**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 ANTECEDENTES**

A partir del año 2006 se crea el Laboratorio de Energías no Convencionales, con el propósito de fortalecer las labores de formación académica de los alumnos de la Carrera de Ingeniería Mecánica (CIME), en el ámbito de las energías renovables. Con el apoyo del CICTE se han desarrollado equipos solares térmicos tales como concentradores parabólicos, sistemas de combustión de biomasa, refrigeración solar, entre otros. Sin embargo, es necesario seguir mejorando la infraestructura del laboratorio con tecnología y conocimientos propios, debido a que la adquisición de estos sistemas no se encuentra dentro de las posibilidades económicas de inversión de la institución.

En países como Estados Unidos, Alemania, España e Israel se ha desarrollado un crecimiento muy acelerado en el número de instalaciones que aprovechan la energía solar de manera directa o indirecta; los estudios realizados por

CENSOLAR, EnviroMission y a SolarMission Technologies Inc., se consigue una mayor disminución del efecto invernadero, produciendo electricidad sostenible verde y limpia, por lo que con esta tecnología se ha evitado la emisión al medio ambiente más de 14 millones de toneladas de gases tóxicos por cada 2000 MW generados en una típica central eléctrica.

Las aplicaciones más usuales en las instalaciones de media temperatura, es la producción de vapor para la aplicación en procesos industriales y la generación de energía eléctrica, como los proyectos que se han realizado en La Plataforma de Solar de Almería en España, o como la instalada al sur de California en Estados Unidos.

Las instalaciones de alta temperatura utilizadas en la producción de energía eléctrica, debido a la alta concentración solar generada en el receptor, los generadores solares disco-parabólico para la producción de electricidad, considerados también como motor Stirling o turbinas Brayton.

La Central Termoeléctrica de Receptor Central, integrada por una vasta superficie cubierta de grandes espejos que reflejan la radiación del Sol, que se concentra en un pequeño punto. Son los denominados helióstatos. Provistos de mecanismos específicos conectados a un ordenador, estos espejos direccionales se van moviendo según dos ejes de giro, de manera que en todo momento se encuentran en la posición idónea para recibir la máxima intensidad de la radiación solar y para concentrarla de modo eficaz en el receptor central. Generalmente el punto receptor se dispone sobre una caldera situada en lo alto de una torre; en este caso, se trata de instalaciones solares de tipo central. En la caldera, la energía calorífica de la radiación solar reflejada es absorbida por un fluido térmico, que va a parar a un generador de vapor, de allí se transfiere hasta un segundo fluido, que se encarga de poner en movimiento los álabes del grupo turbina-alternador, para generar energía eléctrica.

Las perspectivas de costo de la tecnología de media temperatura son mayores que las de las centrales de torre o los paraboloïdes, debido en gran parte a la baja concentración solar y por tanto a las bajas temperaturas y eficiencia.

La Central de Torre es apropiada para proyectos de gran tamaño conectados a la red, en el rango de 10 – 200 MW, mientras que los sistemas disco-parabólicos, son modulares y pueden ser usados en aplicaciones individuales o en grandes proyectos, esta central alcanza mayores eficiencias y menores costos de operación que las plantas con colectores cilindro-parabólicos, pero quedan incertidumbres sobre el tiempo en el que estas tecnologías alcanzarán la necesaria reducción de costos de inversión y la disponibilidad de mejoras.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Debido al alto costo de los equipos, se ha contemplado la necesidad de dotar al Laboratorio de Energías no Convencionales del DECEM, un equipo en el cual se pueda realizar análisis y estudios, de modo que se pueda cuantificar los parámetros que inciden sobre nuestro país.

En el Ecuador no existen estudios estadísticos sobre la aplicación del sistema de torre de potencia, que puedan servir de referencia a fin de implementar nuevas tecnologías para generar electricidad.

Para la generación de energía eléctrica, con una central típica, se utiliza combustibles fósiles los cuales al completar su reacción química liberan gases generando el denominado efecto invernadero.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 GENERAL**

Aprovechar el recurso solar de media y alta temperatura, mediante el desarrollo de una torre de potencia solar con capacidad de 500 W.

### **1.3.2 ESPECÍFICOS**

- Determinar el recurso solar existente en las inmediaciones de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).
- Desarrollar el sistema de concentración de la radiación solar, utilizando espejos planos.
- Realizar las pruebas de operación.
- Contribuir al mejoramiento de las prestaciones del laboratorio de Energías no Convencionales.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Durante muchos años el hombre ha utilizado combustibles fósiles para generar electricidad, todos los gases producidos son arrojados a la atmósfera, lo cual ha ocasionado un incremento en la temperatura del medio ambiente, denominado calentamiento global, esto ha generado una serie de cambios climatológicos que nos afectan a todos.

La energía generada por la utilización de combustibles fósiles es deficitaria, debido a que las máquinas utilizadas para la transformación de energía mecánica en eléctrica no son eficientes, como muestra podemos citar que los motores de



combustión interna transforman aproximadamente el 20% de la energía generada por la ignición del combustible en energía disponible para realizar un trabajo.

Los países industrializados, conscientes de los daños que se ocasiona al medio ambiente, acordaron una serie de medidas para reducir las emisiones contaminantes que afectan al mismo. Estas medidas fueron recopiladas en el denominado "Protocolo de Kyoto", en el cual todos los países industrializados a excepción de Estados Unidos, se comprometieron a desarrollar fuentes de generación de energía alternativa, obtenidas de fuentes naturales como son solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, entre otras. Por lo expuesto, en éstos países se ha producido un incremento en la investigación para obtener energía de estas fuentes naturales, cada vez con mejores resultados en eficiencia.

En el Ecuador el 76.23% de la energía utilizada, proviene de derivados del petróleo<sup>1</sup> y el 16.79% de la energía eléctrica se compra a los países vecinos, razón por la cual se prevé la necesidad de implementar nuevas fuentes para la generación de energía, como la que podemos obtener de la Torre Solar, que aprovecha la irradiación solar, para lo cual con esta investigación, se pretende realizar un prototipo de este sistema, el cual servirá para estudios en el Laboratorio de Energías no Convencionales del DECEM; y, para posteriores estudios experimentales que permitan el desarrollo de otros tipos de aplicaciones energéticas.

El Plan de Construcción de una Torre de Potencia, tiene por objeto el contribuir al estudio de una alternativa para la generación eléctrica a partir de la energía solar, mediante la aplicación tecnológica de campo de helióstatos, torre y sistema de almacenamiento; para continuar con los objetivos de la ESPE conjuntamente con el DECEM, en los estudios y análisis de las distintas formas para generar energía eléctrica a partir de la energía solar, de acuerdo a las variables existentes en el Ecuador. El mismo que se espera sea beneficioso y óptimo para una posterior

---

<sup>1</sup> Fuente: Balance Energético del Ecuador 2005, Ministerio de Energía y Minas

implementación de una torre a escala real y contribuir al desarrollo económico y social, ya que reducía significativamente en los costos de producción de la energía, atraerá importantes inversiones y propiciará el incremento de fuentes de empleo.

Aprovechar el recurso de la energía solar de alta y media temperatura, para producir electricidad mediante vía termodinámica, basada en principios análogos a los que pueden contemplarse en una central eléctrica convencional que quema carbón o petróleo.

## **1.5 ALCANCE**

Disponer de un equipo solar térmico para aplicaciones de media y alta temperatura, que pueda ser utilizado por los alumnos, profesionales e investigadores, que tengan acceso al DECEM, tanto a nivel de pregrado y postgrado.

El banco de pruebas podrá ser analizado de acuerdo al día del año, hora, latitud y longitud, la relación altura con respecto al radio y la forma en que están dispuestos los helióstatos, para lo cual se implementará una hoja de recopilación de datos.

## CAPITULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 DEFINICIONES

El sistema de torre es un concentrador estacionario que tiene una concentración mayor que uno y menor que diez, por lo que no se requiere de un mecanismo servomotor para realizar un seguimiento preciso de la posición del sol, es necesario ajustar ocasionalmente la dirección de los espejos que conforman el heliostato para obtener una alta concentración de radiación solar en el concentrador ubicado en lo alto de la torre.

Conceptos y definiciones que ayudarán a explicar de mejor manera la terminología utilizada durante el desarrollo del proyecto:

**Radiación Solar.-** Es la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que recibe una superficie.

**Radiación solar directa.-** Es aquella que recibe una superficie directamente desde el sol sin sufrir desviaciones al atravesar la atmósfera.

**Radiación difusa.-** Es aquella que se recibe del sol, después de haber sido desviada al atravesar la atmosfera.

**Radiación terrestre.-** Es aquella que proviene de objetos terrestres, por ejemplo la que se refleja de una pared blanca, un lago, entre otros.

**Irradiancia.-** Es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie por unidad de área.

**Irradiación.-** Es la cantidad de energía por unidad de área que incide durante un período de tiempo.

**Razón de concentración.-** Es la relación entre el área efectiva de apertura y el área del receptor.

**Helióstato.-** Conjunto de espejos distribuidos para concentrar la radiación solar directa en un punto fijo.

**Concentrador.-** Elemento que recibe la radiación solar concentrada por el helióstato. Es aquí donde se realiza la transformación de energía solar en energía térmica.

**Absorbedor.-** Elemento encargado de absorber la mayor cantidad de energía, y evitar la disipación de la misma.

**Área de Absorbedor.-** Área de captación de la radiación solar.

**Ángulo de aceptación.-** Es el ángulo de apertura del concentrador.

**Ángulo de incidencia.-** Es el ángulo formado por la radiación solar directa que incide sobre el plano de apertura del colector y la normal a dicho plano de apertura.

**Ángulo de borde.-** Es el ángulo formado por el eje que pasa por el foco de la parábola y la línea imaginaria que une el borde del helióstato con el foco.

**Día Juliano.-** Es el día del año contado a partir del 1ro de enero.

**Latitud.-** Es el desplazamiento angular por encima o por debajo de la línea Ecuatorial, medido desde el centro de la Tierra. Se considera positiva al Norte del Ecuador.

**Ángulo Horario.-** Es el ángulo que tiene que girar la tierra para colocar el meridiano que pasa por un punto directamente bajo del sol.

**Declinación.-** Es la posición angular del Sol al mediodía solar, respecto al plano del Ecuador terrestre; el valor de este ángulo, se suele tomar todos los días, al mediodía solar.

**Ángulo Cenital.-** Es el ángulo que forma la radiación directa del Sol y la vertical del lugar, en un punto cualquiera de la Tierra. Este ángulo varía continuamente a lo largo del día y depende también de la latitud del lugar y de la declinación, varía entre  $0^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ .

**Ángulo Acimutal.-** Es el ángulo que forma la componente horizontal de la radiación solar directa, con la dirección Norte-Sur, en el hemisferio norte. Se mide sobre el plano horizontal que pase por el lugar, varía entre  $0^{\circ}$  y  $360^{\circ}$

**Ángulo Horario.-** Es el desplazamiento angular del Sol, respecto al mediodía, que es el instante en que el Sol se encuentra más alto en el cielo y se corresponde con un ángulo cenital solar mínimo, es decir un ángulo horario igual a cero.

## 2.2 NATURALEZA DE LA LUZ

El sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión (dos átomos de hidrógeno que producen helio o uno de helio y uno de hidrógeno que producen litio), éstas se realizan dentro del núcleo.

La intensidad del sol que llega a la tierra equivale a 10.000 veces el consumo mundial de energía, es capaz de hacernos llegar grandes cantidades de energía radiante, la cual tarda algo más de 8 minutos en llegar a nuestro planeta. Se puede decir que solo la mitad de la radiación solar llega a la superficie de la tierra, la restante se pierde por reflexión y absorción en la capa de aire.

La generación de energía proviene de la pérdida de la masa del sol, esta se convierte en energía de acuerdo a la ecuación de Einstein, como se expresa en la ecuación 2.1.

$$E = m \cdot c^2 \quad (2.1)$$

Donde:

E: es la cantidad de energía liberada

m: es la masa

c: es la velocidad de la luz c.

El núcleo solar corresponde al 15% del volumen total del sol, pero contiene el 40% de su masa, es aquí donde se genera el 90% de la energía, su temperatura es de  $10^7$  °K, y su densidad es de  $10^5$  kg/m<sup>3</sup>.

La capa externa del sol recibe el nombre de fotosfera, ésta emite la mayor parte de radiación solar hacia el espacio. El sol presenta en su constitución una masa gaseosa que se extiende desde el núcleo hasta su superficie, es decir no presenta una superficie física como la que tiene la tierra.

### 2.2.1 CONSTANTE SOLAR

Es el flujo de energía proveniente del Sol que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de la propagación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre.<sup>2</sup>

Algunos estudios indican que la variación de emisión de energía del sol es menor del 1% a lo largo de un ciclo solar cuya duración es de 22 años.

Dentro de la atmósfera terrestre incide una cantidad de radiación solar casi constante.

El recurso energético solar está mucho más ligado, en la superficie terrestre a las variaciones meteorológicas que a las solares.

La constante solar es un flujo de energía porque se refiere a una cantidad de la misma, que incide instantáneamente sobre una superficie de área unitaria, esta superficie es perpendicular a la dirección de la propagación de la luz, en caso de encontrarse en posición oblicua recibiría menor flujo de energía. Esta superficie se encuentra a una distancia media de la Tierra al Sol.

La superficie se ubica fuera de la atmósfera para evitar la disminución de radiación causada por diversidad de fenómenos que se presentan en la atmósfera.

La Tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de  $1,73 \times 10^{14}$  kW/m<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> [www.solartronic.com](http://www.solartronic.com)

La constante de radiación solar tiene un valor de:

$$H_o = 1367 \text{ Wm}^{-2}$$

El valor de la constante solar, expresado en otras unidades es:

$$H_o = 1940 \text{ cal/cm}^2\text{min}$$

$$H_o = 428 \text{ BTU/pie}^2\text{hr}$$

$$H_o = 4871 \text{ MJ/m}^2\text{hr}$$

## 2.2.2 RADIACIÓN NORMAL EXTRATERRESTRE

Es la radiación extraterrestre que incide sobre la Tierra, está sujeta a las variaciones geométricas y a las condiciones del Sol.

La transferencia de la radiación, desde el núcleo del sol hacia la superficie exterior, es realizada por medio de fenómenos convectivos y radiativos, a pesar de la manera compleja del sol se puede adoptar un modelo mucho más simplificado, considerando al sol como un cuerpo negro que irradia energía a la temperatura de 5.762 °K, ya que la distribución de energía para cada longitud de onda que se puede aprovechar en los procesos térmicos y fototérmicos, es básicamente la misma que la de un cuerpo negro.

La ecuación con la que se puede calcular el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación extraterrestre es:

$$H_{on} = H_{sc} \left( 1 + 0,033 \times \text{Cos} \left( \frac{360 \times n}{365} \right) \right) \quad (2. 2)$$



Donde:

$H_{on}$ : flujo de radiación extraterrestre

n: número del día del año – Día Juliano

**Tabla 2.1** Ecuaciones para convertir el día del mes, en día juliano

<b>Meses</b>	<b>“n” para el i-ésimo día del mes</b>
enero	$i$
febrero	$31 + i$
marzo	$59 + i$
abril	$90 + i$
mayo	$120 + i$
junio	$151 + i$
julio	$181 + i$
agosto	$212 + i$
septiembre	$243 + i$
octubre	$273 + i$
noviembre	$304 + i$
diciembre	$334 + i$

**Fuente:** [www.solartronic.com](http://www.solartronic.com)

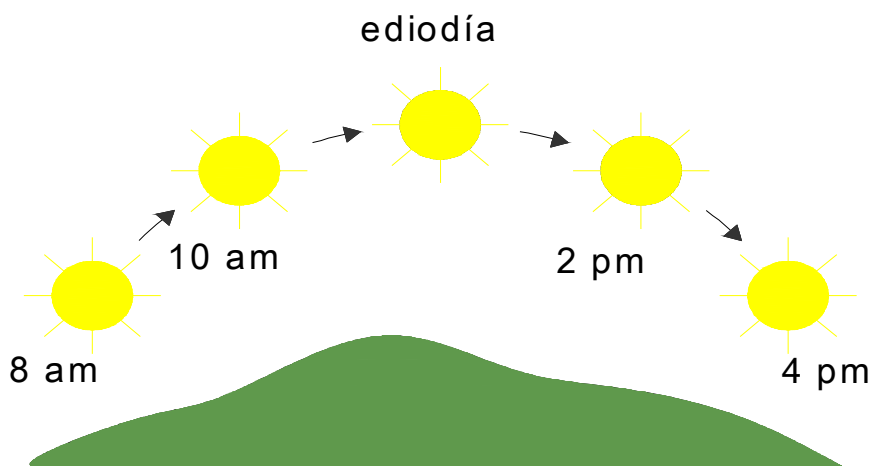
## Ciclos del Sol

El movimiento del Sol genera dos ciclos, uno diario y otro anual, lo que hace que la intensidad de radiación varíe.

### a) *Ciclo diario del sol*

Es producido por la rotación de la Tierra sobre su eje, por lo que el Sol aparenta seguir un arco en el cielo a lo largo del día, saliendo por el oriente y ocultándose por el occidente.

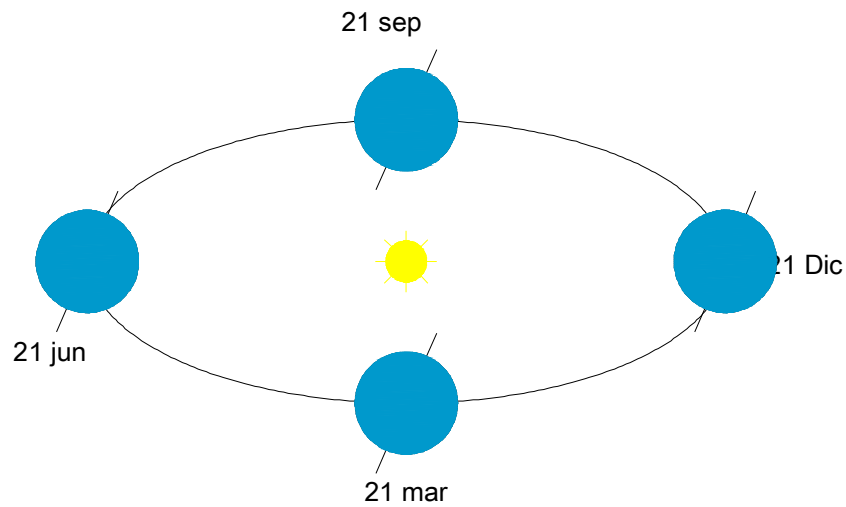
La variación de su altura, hace que la radiación sea más intensa durante el medio día, y es menor durante la madrugada y tarde.



**Figura 2.1** Ciclo diario del sol

### b) *Ciclo Anual del Sol*

Es producto de la inclinación de la tierra y la rotación alrededor del sol, esto hace que se posicione más alto en cielo durante el verano que en el invierno, por lo que la radiación es más intensa en el verano. Este fenómeno es poco apreciable en países que están ubicados cerca de la línea ecuatorial.



**Figura 2.2** Inclinación del eje de la Tierra

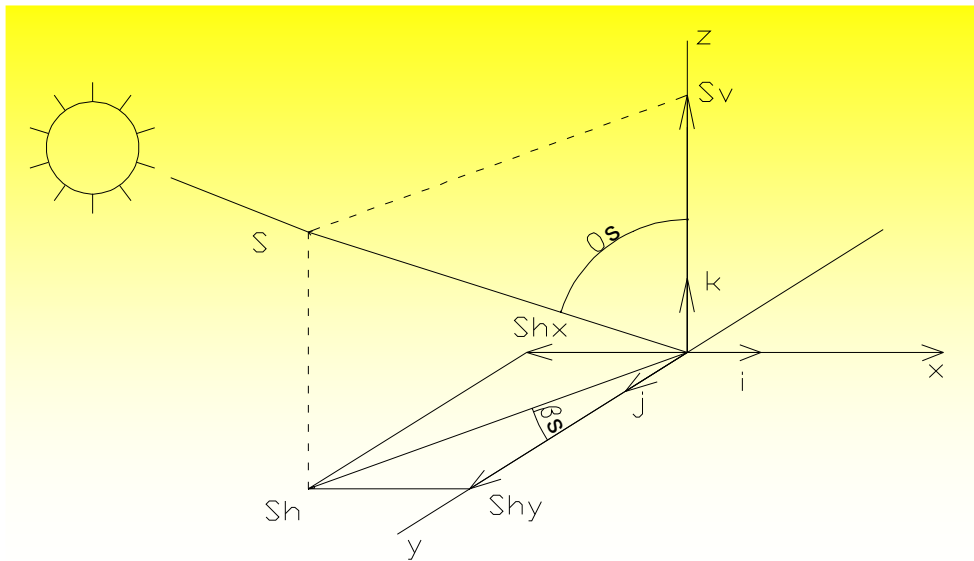
### Movimiento Aparente del Sol

El movimiento aparente del sol con relación a un lugar de la superficie terrestre se determina mediante tres parámetros:

- Posición del sol
- Día del año
- Hora del día

Estos parámetros son definidos por tres ángulos que representan la latitud ( $\lambda$ ) del lugar donde vamos a ubicar el concentrador, la declinación media del día ( $\delta$ ) y el ángulo horario ( $\tau$ ).

La posición del sol viene representada por el vector  $\vec{s}$ , que se encuentra definido por otros dos ángulos, uno cenital ( $\theta_s$ ) que se mide desde la vertical del campo, y otro acimutal ( $\beta_s$ ) medido con respecto a la dirección (Norte-Sur).



**Figura 2.3** Angulo Cenital y Acimutal

### Ángulo Cenital <sup>3</sup>

$$\cos(\theta_s) = \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\lambda) + \cos(\delta) \cdot \cos(\lambda) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\tau) \quad (2.3)$$

### Ángulo Acimutal

$$\text{Sen}(\beta_s) = \frac{\text{Sen}(\tau) \cdot \text{Cos}(\delta)}{\text{Sen}(\theta_s)} \quad (2.4)$$

### Declinación

$$\delta = 23,45 \cdot \text{Sen}\left(360 \frac{284 + n}{665}\right) \quad (2.5)$$

<sup>3</sup> Ecuación Bendford y Bock,  $\psi=0$

## Día del año

Es el día, contado a partir del 1 de enero, como se puede observar en la tabla 2.1.

## Ángulo Horario

$$\tau = 15 \times (Hr - 12) \quad (2.6)$$

Donde:

Hr: hora del día

La fórmula 2.6, se obtiene resultados positivos antes de las 12 horas, es decir en la mañana, y resultados negativos después del medio día, es decir en la tarde.

El Vector  $\vec{s}$ , en coordenadas cartesianas viene expresado en la ecuación 2.7.

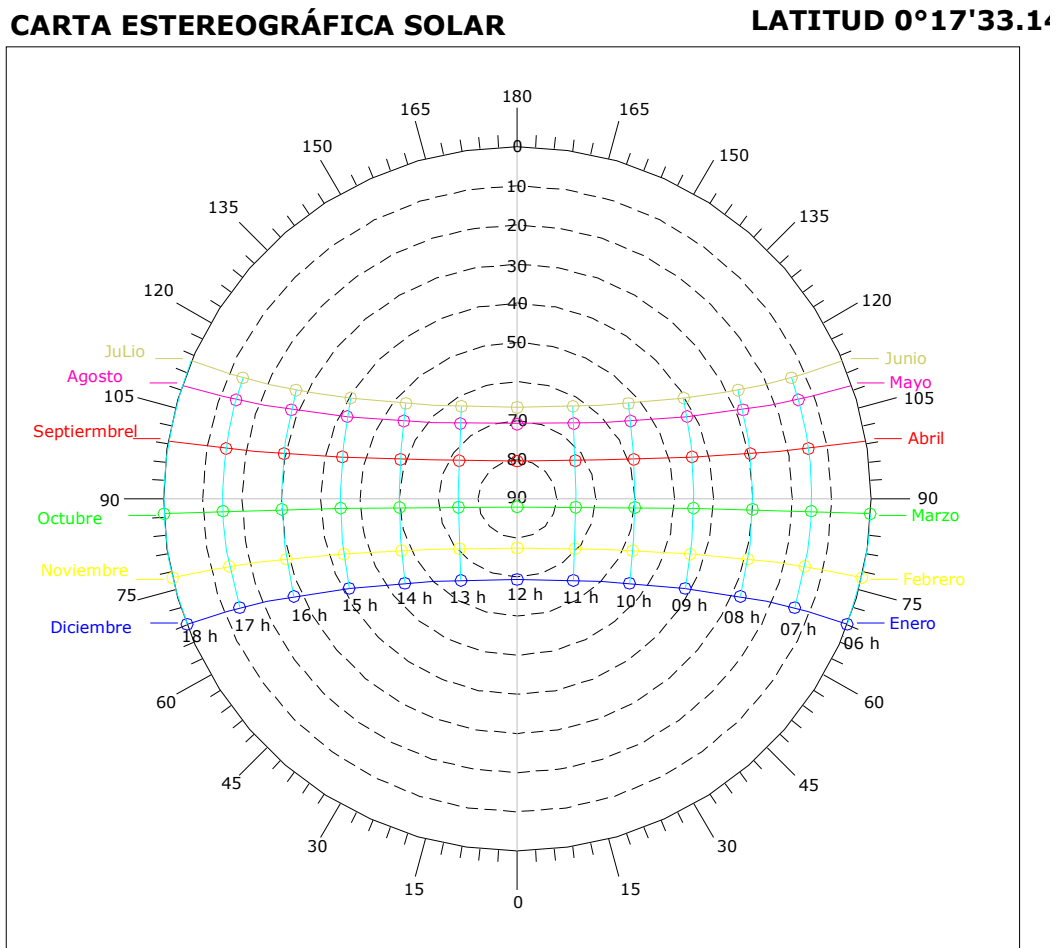
$$\vec{s} = (-\text{sen}\theta_s \cdot \text{sen}\beta_s) \vec{i} + (-\text{sen}\theta_s \cdot \text{cos}\beta_s) \vec{j} + \text{Cos}\theta_s \vec{k} \quad (2.7)$$

De los datos de los ángulos cimutal y acimutal obtenemos gráficas que representan la proyección estereográfica del movimiento del Sol en el terreno en el que se ha ubicado los helióstatos, representado en la figura 2.4, para el cual en cada instante, solamente uno de los espejos tendrá su normal vertical a lo largo del día, ésta proyección estereográfica nos permitirá conocer que espejos van a coincidir con dicho lugar geométrico en ese día.

Para generar la carta estereográfica solar de la figura 2.4, se requiere la elaboración de una tabla en Excel, y, mediante la aplicación de la ecuación 2.5 y del día representativo de cada mes, se determina la posición del sol en cada hora durante su recorrido por el cielo. Para esto ubicamos los puntos en el programa Autocad, en el cual el ángulo acimutal se grafica a partir de la línea vertical,

tomando en cuenta que hacia la derecha se dibujarán los ángulos negativos y hacia la izquierda los ángulos cuyos valores son positivos. Estos valores se intersecan con la coordenada del ángulo de altitud solar, valor que es igual a 90 grados, menos el valor del ángulo cenital, quedando definido el punto donde se ubicará el sol a una hora determinada.

Los datos con los que se generó la figura 2.4 se encuentran descritos en el anexo1.



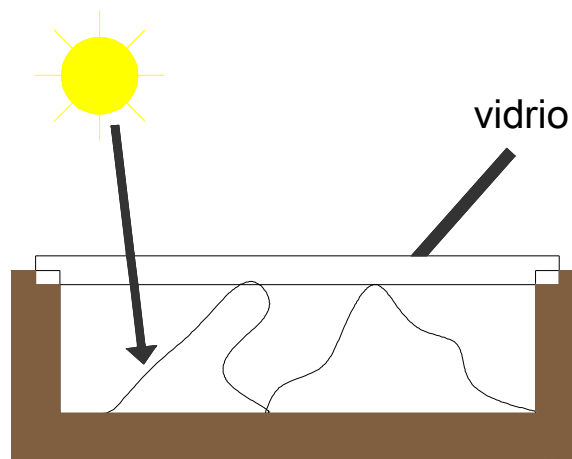
**Figura 2.4** Proyecciones estereográficas del movimiento aparente del Sol

### 2.2.3 EFECTO INVERNADERO

Es un fenómeno por el cual un vidrio u otro material transparente, permite que la luz del Sol entre a un espacio cerrado, e impida la emisión de calor hacia el exterior, esto sucede ya que es transparente para la luz visible pero no para la radiación de onda larga.

También se presenta a escala global, porque la mezcla de vapor de agua y  $\text{CO}_2$ , actúan como un vidrio en la atmósfera, permitiendo que la radiación llegue a la tierra y mantenga el calor. Sin este efecto, en la tierra no existiría vida.

Sin embargo, la combustión de fósiles ha incrementado las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y otros gases que ocasionan que la temperatura del medio ambiente global aumente, provocando un proceso de calentamiento global.<sup>4</sup>



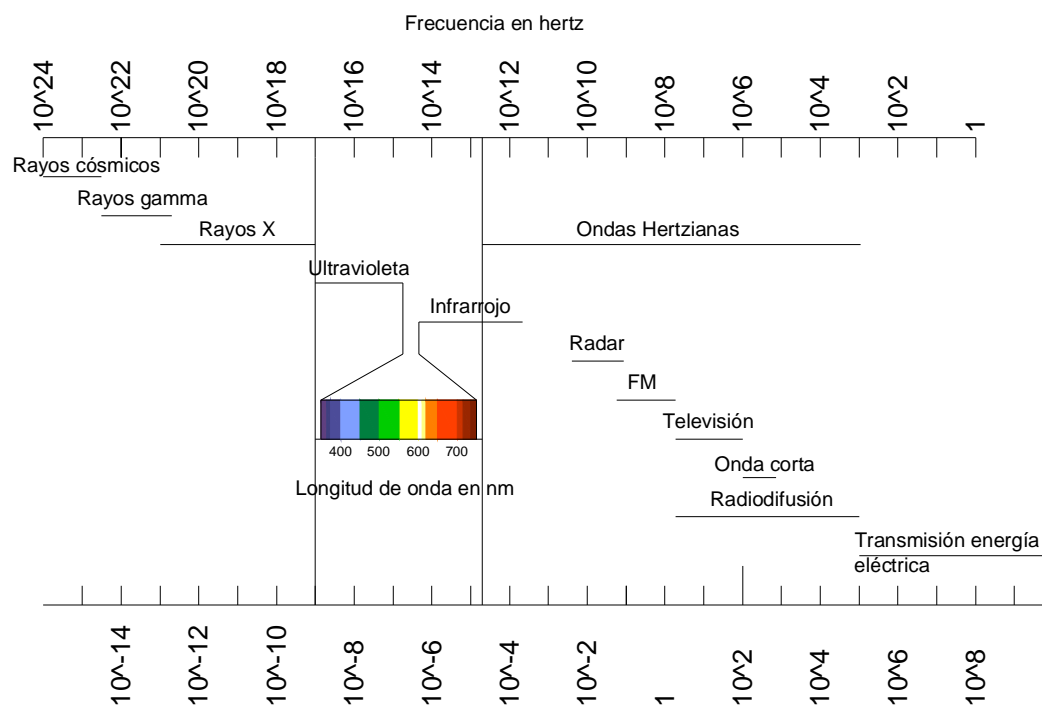
**Figura 2.5** Efecto invernadero

---

<sup>4</sup>BIOMASS USERS NETWORK, Manuales sobre energía renovable, BUN-CA, 2002, Primera Edición

## 2.3 ÓPTICA DE CONCENTRADORES

La luz, que podemos visualizar no es más que un pequeño conjunto de radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda, que están comprendidas, entre los 380 nm y los 770 nm, como se puede observar en la figura 2.6, en la cual se ha seleccionado el espectro de luz visible.



**Figura 2.6** Espectro Electromagnético

La luz forma parte del espectro electromagnético que comprende tipos de ondas tan dispares como los rayos cósmicos, los rayos gamma, los ultravioletas, los infrarrojos y las ondas de radio o televisión entre otros.

Cada uno de estos tipos de onda comprende un intervalo definido por una magnitud característica que puede tener, la longitud de onda ( $L$ ) o la frecuencia ( $f$ ), que se relacionan en la ecuación 2.8.



$$L = \frac{c}{f} \quad (2.8)$$

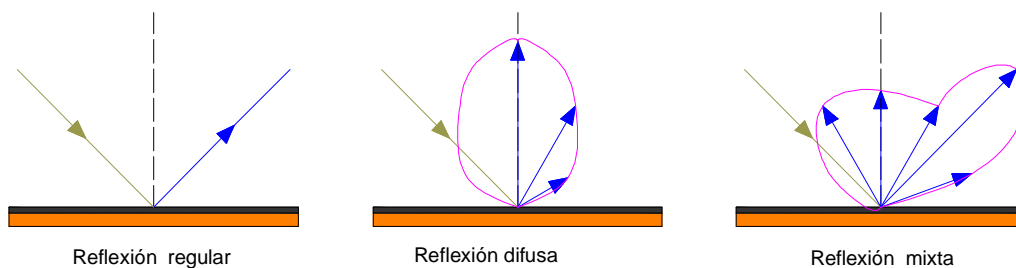
## Propiedades de la luz

### i. Reflexión

Es un fenómeno ocasionado por el choque de la luz contra la superficie de separación de dos medios diferentes, ya sean gases como los que existen en la atmósfera, también pueden ser sólidos o líquidos como el caso del agua.

La dirección en la que se refleja la luz depende del tipo de superficie.

- **Reflexión regular.**- Cuando la superficie es brillante o pulida, se produce la reflexión regular en que toda la luz sale en una única dirección.
- **Reflexión difusa.**- Cuando la superficie es mate, la luz sale dispersada en todas direcciones.
- **Reflexión mixta.**- Superficie en la que predomina una dirección sobre las demás. Esto ocurre en superficies metálicas sin pulir, barnices, papel brillante, etc.

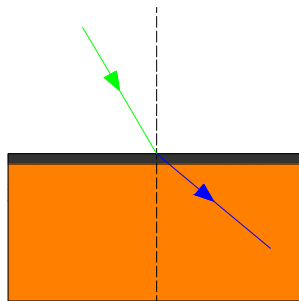


**Figura 2.7** Propiedades de la Luz - Reflexión

## ii. Refracción

Se produce cuando un rayo de luz es desviado de su trayectoria, al atravesar una superficie de separación entre medios diferentes.

Esto se debe a que la velocidad de propagación de la luz, en cada uno de ellos es diferente.

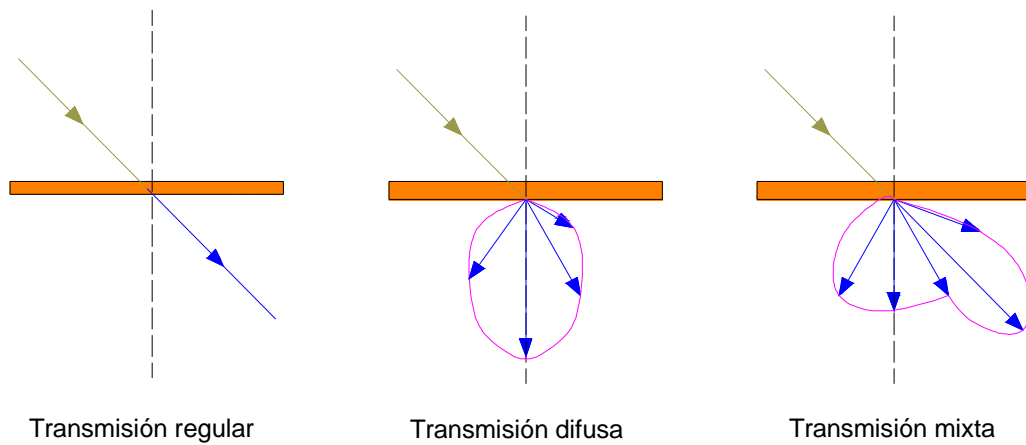


**Figura 2.8** Propiedades de la Luz - Refracción

## iii. La transmisión

Es considerada como una doble refracción; es regular cuando el rayo de luz no es desviado de su trayectoria, como ocurre con el vidrio transparente; es difusa, cuando la reflexión se difunde en todas las direcciones, como ocurre en los vidrios translúcidos. Cuando predomina una dirección sobre las demás tenemos la transmisión mixta como ocurre en los vidrios orgánicos o en los cristales de superficie labrada.

Los tres fenómenos de transmisión se puede apreciar, en la en la figura 2.9.



**Figura 2.9** Propiedades de la Luz - Transmisión

#### iv. La absorción

Es un proceso que depende del color, el ojo humano sólo es sensible a las radiaciones pertenecientes a un pequeño intervalo del espectro electromagnético.

Son los colores, que mezclados forman la luz blanca. Su distribución espectral aproximada es como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 2.2** Longitud de onda de acuerdo al color

Tipo de radiación	Longitudes de onda (nm)
Violeta	380-436
Azul	436-495
Verde	495-566
Amarillo	566-589
Naranja	589-627
Rojo	627-770

**Fuente:** <http://edison.upc.edu>

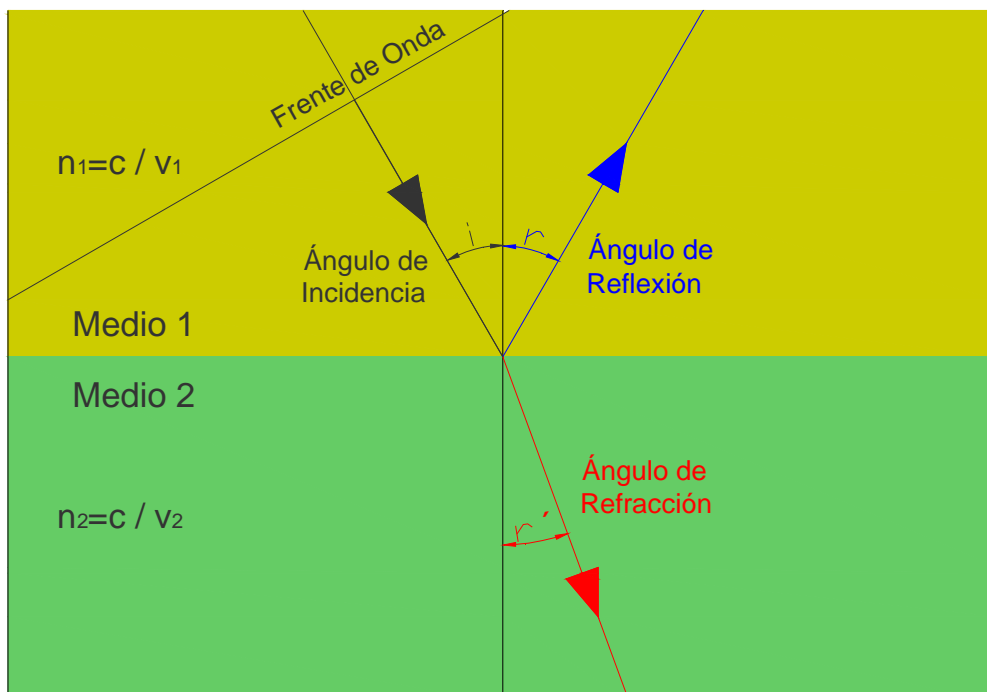
La razón, entre el seno del ángulo de incidencia y seno del ángulo de refracción, es igual a la razón entre las velocidades de la onda, en cada medio respectivamente, esto se conoce como la ley de refracción o la denominada Ley de Snell, como se aprecia en la ecuación 2.9, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

$$n_1 \text{Sen } \theta_1 = n_2 \text{Sen } \theta_2 \quad (2.9)$$

Donde:

- $n_1$ : índice de refracción del primer medio
- $\theta_1$ : ángulo de incidencia
- $n_2$ : índice de refracción del segundo medio
- $\theta_2$ : ángulo de refracción

En el gráfico 2.10 se observa, como se relacionan los ángulos de incidencia con los de reflexión y de refracción.



**Figura 2.10** Relación ángulos incidencia, reflexión y de refracción

El índice de refracción es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío “c”, y la velocidad que tiene la luz en ese medio “v”, este índice es adimensional y mayor que la unidad siendo una característica de cada medio, como se expresa en la ecuación 2.10.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.10)$$

Donde:

- n: índice de refracción
- c: velocidad de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8$  m/s)
- v: velocidad de la luz del medio en cuestión

En la tabla 2.3, se establece una relación entre los índices de los medios  $n_2$  y  $n_1$ , y en la tabla 2.4, la velocidad del sonido en algunos materiales.

**Tabla 2.3** Índices de refracción

<b>Substancias</b>	Aire	Agua	Plexiglás	Diamante
<b>Índices de refracción</b>	1,00029	1,333	1,51	2,417

**Fuente:** <http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es>

**Tabla 2.4** Velocidad del sonido en algunos medios

<b>Material</b>	Aire	Vapor de agua	Agua dulce	Agua de mar	aluminio
<b>Velocidad del sonido m/s</b>	331	401	1493	1513	5104

**Fuente:** <http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es>

### 2.3.1 REFLECTANCIA

Es la relación entre el flujo luminoso reflejado y el flujo luminoso incidente, puede ser dirigida o difusa.<sup>5</sup>

### 2.3.2 ABSORTANCIA

Es la relación entre el flujo luminoso o radiante absorbido y el flujo incidente, también denominado factor de absorción.

### 2.3.3 TRANSMITANCIA

Es la relación entre el flujo luminoso transmitido y el flujo luminoso incidente.<sup>6</sup>

De acuerdo a la ley de la conservación de la energía, la absorptancia (a), la transmitancia (t) y la reflectancia (r), se relacionan entre sí, como se expresa en las ecuaciones 2.11 y 2.12.

$$a + r + t = 1 \quad \text{para cuerpos transparentes } a + r + t = 1 \quad (2.11)$$

$$a + r = 1 \quad \text{cuerpos opacos } t = 0 \quad (2.12)$$

Estas propiedades dependen de la longitud de onda, interesando especialmente los valores que se encuentran en la zona del espectro solar entre 0,2 y 3 nm.

Otra propiedad importante, es la emisividad que representa la parte de la máxima radiación que puede emitir un cuerpo a una temperatura. Su valor es inferior a 1.

---

<sup>5</sup> <http://arquitecturainteligente.wordpress.com>

<sup>6</sup> <http://arquitecturainteligente.wordpress.com>

En la captación solar térmica propiamente dicha, lo que interesa es tener un valor alto de la absorción y un valor bajo de reflectancia, con cero para la transmitancia en las longitudes de onda del espectro solar y bajo de la emisividad en las longitudes de onda correspondientes a la temperatura del receptor.<sup>7</sup>

Los materiales reflectivos para los concentradores solares, aporta con información sobre la reflectancia de distintos materiales, el estudio de la reflectancia espectral de los materiales, permite aplicar una mayor precisión al balance térmico, seleccionando adecuadamente los materiales. Entre el acero galvanizado, inoxidable y el aluminio, el producto de la reflectancia espectral por el espectro solar es máximo para el aluminio.

**Tabla 2.5** Reflectividad global de algunos materiales

<b>PVC blanco</b>	0,871	<b>fibra de vidrio pintada de blanco</b>	0,709
<b>aluminio de alta reflectividad (verde)</b>	0,839	<b>espejo de vidrio de 2 mm</b>	0,795
<b>aluminio de alta reflectividad (rosado)</b>	0,853	<b>espejo de vidrio de 3 mm</b>	0,754
<b>aluminio de alta reflectividad (celeste)</b>	0,820	<b>espejo de vidrio de 4 mm</b>	0,712
<b>chapadur prepintado blanco</b>	0,741	<b>acero inoxidable</b>	0,572
<b>chapa galvanizada</b>	0,588	<b>Mylar</b>	0,833
<b>chapa pintada de blanco nueva</b>	0,582	<b>papel de aluminio</b>	0,799
<b>chapa pintada de blanco envejecida</b>	0,656		

**Fuente:** N. Di Lalla, R. Tarulla, R. Echazú - ASADES 2001.  
(CONICET Dep. de Materiales CAC-CNEA, CITEFA, INENCO – UNAS)

<sup>7</sup> [www.villarrubiadelosojos.com](http://www.villarrubiadelosojos.com)

Se requieren relaciones de  $\alpha/\varepsilon$  del orden de 5; el color negro mate posee una emisividad térmica muy alta, y no tiene la suficiente resistencia a las altas temperaturas, por lo cual no resulta una alternativa conveniente.

## 2.4 PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LOS MATERIALES

Existen dos categorías distintas, en las cuales se analizan las propiedades de transporte y las termodinámicas.

Las propiedades de transporte incluyen coeficientes de la velocidad de difusión ( $k$ ), conductividad térmica y viscosidad cinemática ( $\nu$ ). Las propiedades termodinámicas se relacionan con el estado en equilibrio de un sistema e incluyen propiedades como la densidad ( $\rho$ ), el calor específico ( $c_p$ ), son algunas de las propiedades que se utilizan en el análisis termodinámico.

La difusividad térmica es la razón entre la conductividad térmica y la capacidad térmica, se expresa en la ecuación 2.13, definida en unidades de  $m^2/s$ .

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2.13)$$

Los materiales de difusividad térmica grande, responden rápidamente a cambios en su medio térmico y aquellos de difusividad térmica pequeño responden más lentamente y tardan más en alcanzar una condición de equilibrio. En la tabla 2.6, se indican las propiedades termofísicas de algunos materiales.



**Tabla 2.6** Propiedades Termofísicas<sup>8</sup> a T=300° K

Composición	Punto de fusión (°K)	P (Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kg °K)	K (W/m °K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)
Acero	1810	7870	447	80,2	23,1
Acero al Carbón	1810	7854	434	60,5	17,7
AISI 304	1670	7900	477	14,9	3,95
AISI 316	1670	8238	468	13,4	3,48
Aluminio	933	2702	903	237	97,1
Aluminio 2024-T6	775	2770	875	177	73,0
Cobre	1358	8933	385	401	177
Manta y fibra de Vidrio		16	--	0,046	
Ladrillo de Cromita	473	3010	835	2,3	
Vidrio Pyrex	300	2225	835	1,4	
Teflón	300	2200		0,35	

## 2.5 TRANSFERENCIA DE CALOR EN SISTEMAS DE ALTA TEMPERATURA

El sistema de torre central, es un sistema más complejo de colector solar con concentración, se puede conseguir elevadas temperaturas, con lo cual se obtiene energía calorífica aplicable a la transformación de la energía mecánica.

Debido a los altos flujos de radiación incidente, permite trabajar a altas temperaturas e integrar en ciclos más eficientes, desde ciclos Rankine con vapor de agua sobrecalentado hasta su integración en ciclos Brayton con turbinas de gas, admiten fácilmente el funcionamiento híbrido en una gran variedad de opciones y tienen el potencial de generar electricidad, con altos factores de

<sup>8</sup> INCROPERA, F., Transferencia de Calor, Apéndice A.

capacidad mediante el uso de almacenamiento térmico, pudiéndose plantear ya en la actualidad sistemas que han superado las 4500 horas equivalentes al año.

## 2.5.1 FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

### a) Conducción

Es el transporte de energía de un medio debido a un gradiente de temperatura y el mecanismo físico es el de la actividad aleatoria atómica o molecular.

La relación existente entre la velocidad de transferencia térmica por conducción y la distribución de temperaturas depende de las características geométricas y las propiedades de los materiales que lo constituyen, obedeciendo la denominada Ley de Fourier, como se expresa en las ecuaciones 2.14 y 2.15.

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.14)$$

$$Q = -\lambda \cdot \Delta T \quad (2.15)$$

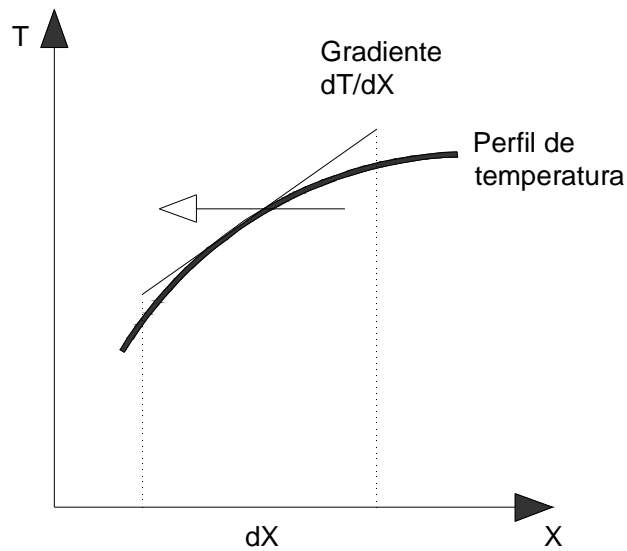
El signo menos se debe a que el calor siempre se transfiere en la dirección que la temperatura decrece, y viene expresado en unidades de  $W/m^2$ .

Es una expresión que define una propiedad importante del material, en este caso se ha definido como **conductividad térmica**.

La transmisión en régimen estacionario es originada cuando el cuerpo se encuentra en equilibrio termodinámico, esto sucede si el flujo de calor y la temperatura en cada punto del mismo permanece constante; este flujo de calor está en función de la propiedad de los materiales denominada conductividad.

Cuando el sistema no ha llegado a estabilizarse, se encuentra en un régimen transitorio, caracterizado porque la temperatura en cada punto varía con el transcurso del tiempo.

Una consecuencia de la variación de temperatura en el interior del receptor es la acumulación del calor, debido a la propiedad de los materiales de absorber o de disipar energía cuando varía su temperatura.



**Figura 2.11** Dirección del flujo del calor por conducción y gradiente de temperatura

## b) Convección

Es la transferencia de energía entre una superficie y un fluido que se mueve sobre esta.

En este caso cuando el aire de un ambiente se pone en contacto con la superficie del receptor a una temperatura distinta, la convección puede darse de tres maneras.

### **Convección libre**

El movimiento del fluido, se debe a las fuerzas de empuje dentro de este.

### **Convección forzada**

Es el movimiento del fluido, se debe a fuerzas de empuje externas.

### **Convección Mixta**

Es ocasionada cuando se superponen los dos tipos de fuerza, al ser magnitudes semejantes.

Para cualquiera de los casos, se puede evaluar mediante la Ley de Newton del enfriamiento, con la ecuación 2.16, que se expresa en unidades de  $W/m^2$ .

$$Q = -h \cdot \Delta T \quad (2.16)$$

Donde:

h: coeficiente de transferencia de calor por convección

$\Delta T$ : variación de temperatura entre la superficial y la del fluido.

### **c) Radiación**

Es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, la energía del campo de radiación se transporta por ondas electromagnéticas o por fotones, la radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío.

Todas las superficies opacas emiten energía en forma de radiación en una magnitud proporcional a la cuarta potencia su temperatura absoluta  $T$ , y en un rango de longitudes de onda inversamente proporcional a su temperatura absoluta. Por lo que los cuerpos emiten radiaciones de onda larga, correspondiente al espectro infrarrojo lejano, procedente de sus superficies a temperaturas típicas del ambiente, en función de una propiedad superficial

denominada *emitancia*, y de forma simultánea absorben radiaciones similares emitidas por las superficies visibles de su entorno, en un proceso denominado *irradiación*, como se expresa en la ecuación 2.17.

$$Q_{\text{radiación}} = e \cdot s \cdot T^4 \quad (2.17)$$

En la ecuación 2.18, se puede considerar la presencia de radiaciones de onda corta, que procede de fuentes de elevada temperatura como el caso del sol y el alumbrado artificial, en estos casos se comporta como absorbentes.

$$Q_{\text{absortancia}} = \alpha \cdot Q_{\text{incidente}} \quad (2.18)$$

### **Mecanismos combinados de transmisión del calor**

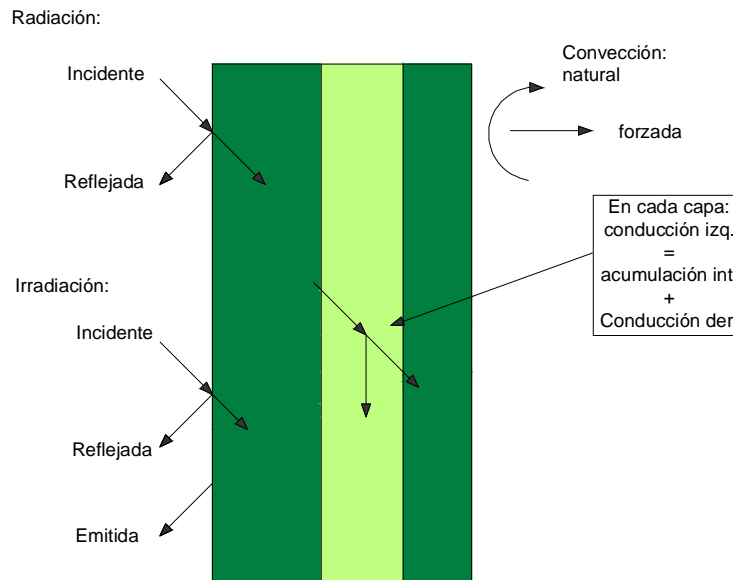
En la naturaleza los tres fenómenos se presentan de forma conjunta, razón por la cual no podemos estudiarlos por separado y sin prescindir de uno de ellos.

Al ser un cálculo bastante complejo se recurre a determinar un coeficiente global de transferencia de calor, de fácil aplicación en casos simplificados como en normas oficiales de aislamiento térmico, expresado por la ecuación 2.19.

$$Q = (h_{\text{convexión}} - h_{\text{radiación}}) \cdot \Delta T \quad (2.19)$$

La conducción a través de los cuerpos se considera que éste está constituido por varias capas con propiedades físicas diferentes, por lo cual debemos calcular su resistencia total ( $R_{\text{total}}$ ) como la suma de varias resistencias en serie, haciendo una semejanza con la resolución de circuitos eléctricos dispuestos en serie, y que las temperaturas interiores resultantes en régimen estacionario tendrá un gradiente diferente en cada capa.

En la figura 2.12 se puede observar los mecanismos de transmisión de calor, entre el cuerpo y el entorno.



**Figura 2.12** Esquema de los flujos de calor entre el cuerpo y el entorno

El único mecanismo para transmitir calor en medios sólidos opacos a través de la conducción, debido al gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura debido al contacto directo entre las moléculas del medio.

## 2.5.2 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

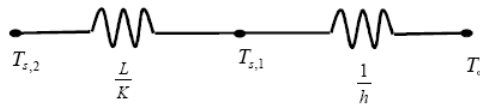
Para poder trabajar y manipular los sistemas compuestos es conveniente utilizar un coeficiente global de transferencia de calor, como se utiliza en la ecuación 2.20, el cual se define haciendo analogía con la Ley de enfriamiento de Newton.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.20)$$

Donde:

U: Coeficiente Global de Transferencia de calor  $W/m^2 \cdot ^\circ K$ .

A través de la analogía eléctrica, determinaremos el coeficiente global de transferencia de calor.



**Figura 2.13** Semejanza Eléctrica – Suma de dos resistencias

Las resistencias que ofrecen cada medio, depende específicamente del coeficiente de transferencia de calor en un área determinada, como se puede observar en las ecuaciones 2.21 y 2.22

$$R_1 = \frac{1}{U_1 \cdot A} \quad (2.21)$$

$$R_2 = \frac{1}{U_2 \cdot A} \quad (2.22)$$

La resistencia total es igual a la suma de los medios que intervienen durante el proceso de transferencia de calor en un medio determinado, como se observa en la ecuación 2.23.

$$R_{\text{total}} = \sum R_i \quad (2.23)$$

Esta resistencia total, es igual a variación de temperatura multiplicado por el inverso de del calor, como se observa en la ecuación 2.24,

$$R_{total} = \frac{\Delta T}{q} \quad (2.24)$$

En la figura 2.18, se observa una resistencia equivalente, la cual se expresa a través de la ecuación 2.41, que se analiza como que si fuese un medio único, que tiene un coeficiente de transferencia de calor y un área de sección propia para el caso que se desea analizar.



**Figura 2.14** Semejanza Eléctrica – Resistencia equivalente

$$R_{total} = \frac{1}{U \cdot A} \quad (2.25)$$

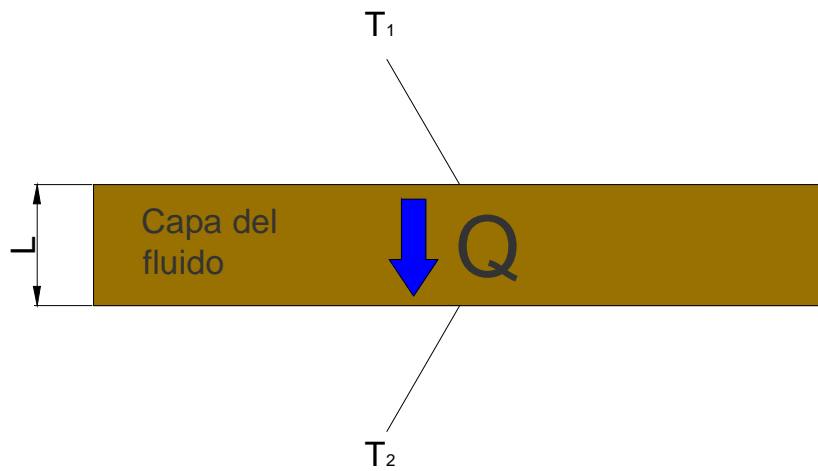
### 2.5.3 NÚMEROS ADIMENSIONALES

Son expresiones que no tienen unidades las cuales modelan los mecanismos de tal manera que se agrupan las variables para generar los números adimensionales.

#### a) Número de Nusselt (Nu)

Es la relación entre el calor transferido por convección, a través del fluido y la que podría transferir en caso de existir conducción.





**Figura 2.15** Representación de las variables del número de Nusselt

Donde:

$L$ : espesor de la capa de fluido.

$T_1$  y  $T_2$  son temperaturas,  $T_1 > T_2$

$$N_u = \frac{\dot{q}_{convección}}{\dot{q}_{conducción}} = \frac{h \cdot \Delta T}{k \cdot \frac{\Delta T}{L}} \quad (2.26)$$

$$N_u = \frac{h \cdot L}{k} \quad (2.27)$$

Donde:

$L$ : espesor de la barra.

$D$ : diámetro interior, reemplaza a  $L$ , cuando sea un tubo de sección circular.

Mientras mayor sea el número de Nusselt, es más eficaz el fenómeno de convección.

Cuando Nu es 1, representa una transferencia de calor a través de conducción y carece de convección.

Es empleado tanto en convección normal como en convección forzada.

### b) Número de Prandtl

Es la relación entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor o entre el espesor de la capa límite de velocidad y la capa límite térmica, se utiliza tanto en la convección normal como forzada.

$$P_r = \frac{V}{\alpha} \quad (2.28)$$

$$P_r = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (2.29)$$

**Tabla 2.7** Número de Prandtl para algunos fluidos

Fluido	Pr
Metales líquidos	> 0,01
Aceites pesados	< 100.000
Agua	10
Gases	1

**Fuente:** Salinas R., Calvopiña P.

Cuando  $Pr \ll 1$  el calor se difunde con mucha rapidez; y, con mucha lentitud, cuando  $Pr \gg 1$ , en relación con la cantidad de movimiento. La capa límite térmica es mucho más gruesa para los metales líquidos y mucho más delgada para los aceites, en relación con la capa límite de velocidad, cuanto más grueso sea la capa límite térmica con mayor rapidez se difundirá el calor en el fluido.

### c) Número de Reynolds

Es la relación existente, entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre un elemento de volumen de un fluido, esto diferencia si un fluido tiene flujo laminar o turbulento, se utiliza solo en convección forzada.

$$R_e = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{U_f \cdot L_c}{\nu} \quad (2.30)$$

$$R_e = \frac{\rho \cdot U_f \cdot L_c}{\mu} \quad (2.31)$$

Donde:

$U_f$ : es la velocidad del flujo del fluido, a una distancia lo suficientemente alejada de la superficie.

$L_c$ : es el espesor para una placa plana, para un tubo de sección circular,  $L_c$  es igual al Diámetro (D), para un tubo de sección circular.

$\nu$ : es la viscosidad cinemática

En caso de que el número de Reynolds sea elevado, nos indica un régimen turbulento, si el mismo es bajo indica régimen laminar.

### Número crítico de Reynolds

- Placa plana  $Re_{\text{crítico}} = 5 \cdot 10^5$ .
- Tubo
  - $Re < 2300$  el flujo es laminar.
  - $2300 < Re < 10000$  el flujo es de transición.
  - $Re > 10000$  el flujo es turbulento

### d) Número de Grashof (Gr)

Es la relación entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas que actúan en un fluido. Se lo utiliza en convección natural, es el equivalente al número de Reynolds en convección forzada.

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_f) \cdot L_c}{\nu} \quad (2.32)$$

Donde:

g: aceleración de la gravedad

$\beta$ : coeficiente de expansión volumétrica

Lc: espesor de una placa plana. Lc es igual al Diámetro (D), para un tubo de sección circular.

$\nu$ : Viscosidad cinemática

## Número de Rayleigh (Ra)

Es el resultado de multiplicar el número de Grashof por el de Prandtl, es utilizado en el proceso de convección natural.

$$R_a = G_r \cdot P_r \quad (2.33)$$

### 2.5.4 MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En este sistema de potencia solar, la transferencia de calor se lo realiza a través de dos procesos, los mismos que se aprecian en la figura 2.16.

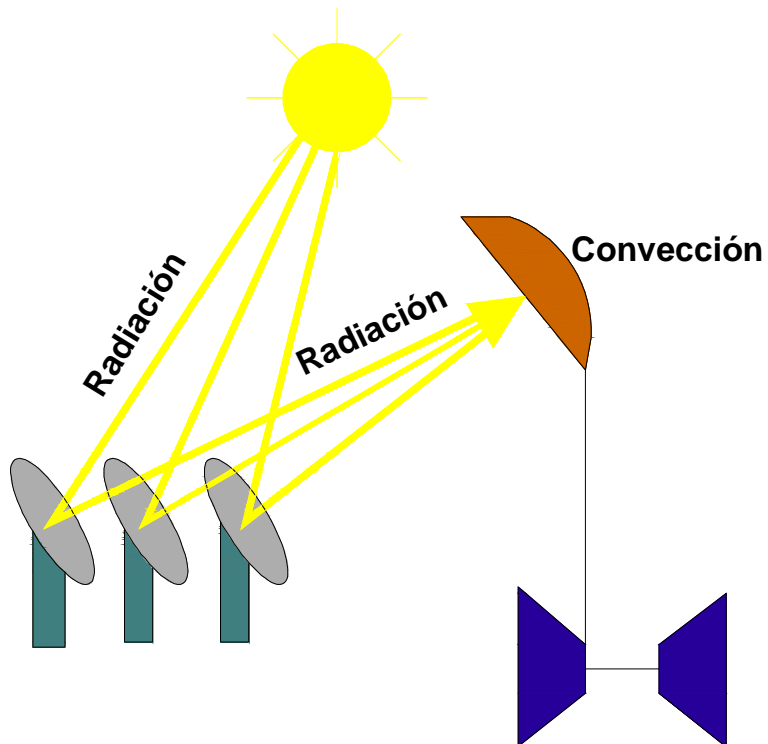


Figura 2.16 Modelo de transferencia de calor

En la torre de potencia se transfiere calor a través de la radiación y de la conducción, la transferencia de calor por radiación, es producto de la acción de la radiación ultravioleta que proviene del Sol, esta viaja a través del espacio, ingresa por nuestra atmósfera e incide en el helióstato, que redirecciona y concentra esta radiación en un solo punto, al que llamamos concentrador.

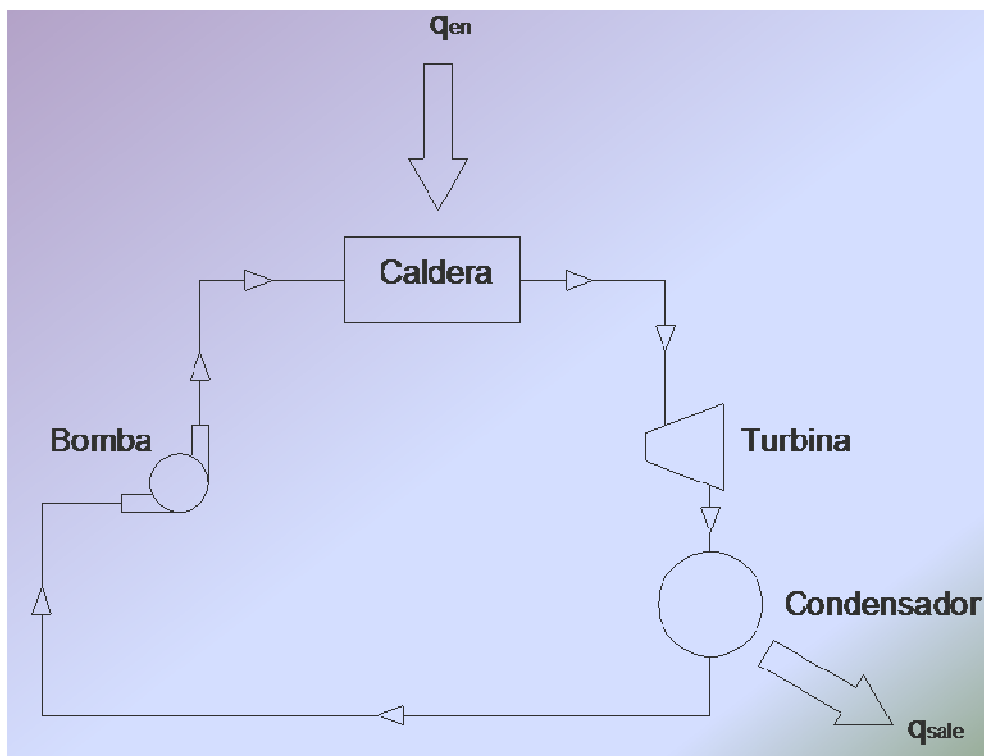
El fenómeno de conducción se produce cuando la radiación solar es redireccionada por el helióstato, se proyecta en pared del receptor, ésta aumenta su temperatura y es conducida por medio del material del que se encuentra fabricado el concentrador hacia el interior del mismo, donde tenemos almacenado nuestro fluido de trabajo, que en este caso es agua, con lo cual aumenta su temperatura, lo que ocasiona que cambie de estado líquido a gaseoso. La rapidez con la que se realiza esta transferencia de calor depende de la temperatura de la radiación solar que incide sobre la placa negra, y del coeficiente de transferencia de calor que posea el material del receptor, este coeficiente posee un valor característico para cada material.

Una vez que el fluido de trabajo realiza su cambio de estado, es necesario realizar un sobrecalentamiento para eliminar todo rastro de líquido antes de utilizarlo en el movimiento del generador para la producción de electricidad. Esta es una aplicación del ciclo termodinámico Rankine.

No se presenta el modelo de convección para este sistema de potencia, debido a que el receptor se encuentra aislado del medio externo, a través de un aislante, que en este caso es la lana de vidrio, ésta evita las pérdidas de calor, tanto por convección natural como forzada.

## CICLO RANKINE<sup>9</sup>

Es el ciclo ideal para plantas de potencia de vapor, en el cual el vapor es sobrecalentado en la caldera y se condensa por completo en el condensador, como se muestra en la figura 2.17.



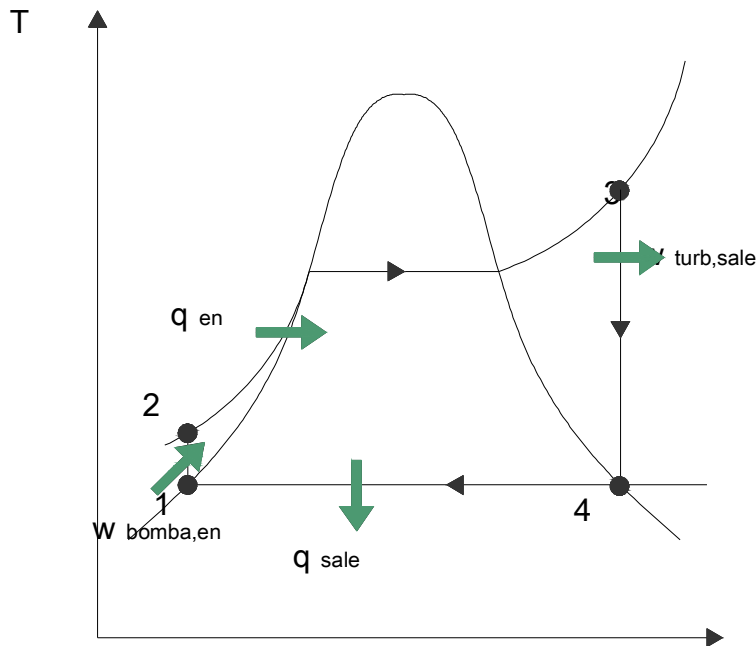
**Figura 2.17** Motor de turbina a vapor

El ciclo ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto por los siguientes cuatro procesos.

---

<sup>9</sup> CENGEL Y, Termodinámica

- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador



**Figura 2.18** Diagrama del Ciclo Rankine

El agua entra a la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se le aplica una compresión isoentrópica hasta la presión de operación de la caldera, la temperatura del agua aumenta ligeramente durante este proceso de compresión isoentrópica, debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua.

El agua entra a la caldera como un líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3, este vapor entra a la turbina donde se expande isoentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un



generador eléctrico. La presión y la temperatura disminuyen hasta un estado 4 donde el vapor entra al condensador, aquí puede ser una mezcla saturada líquido-vapor con una calidad alta, el vapor se condensa a presión constante, en un intercambiador que rechaza calor hacia un medio de enfriamiento como un río o a la atmósfera, el vapor abandona el condensador como líquido saturado y entra a la bomba, completando el ciclo.

El área bajo la curva de proceso en un diagrama t-s representa la transferencia de calor para procesos internamente reversibles, el área bajo la curva del proceso 2-3 representa el calor transferido al agua en la caldera y el área bajo la curva de proceso 4-1 es el calor rechazado en el condensador. La diferencia entre estas dos es el trabajo neto producido durante el ciclo.

Previo al cálculo de la potencia que genera nuestro ciclo de trabajo, es necesario determinar los valores de la calidad de vapor del proceso, mediante la ecuación 2.34

$$x = \frac{s_g - s_f}{s_{fg}} \quad (2.34)$$

En esta ecuación, los valores de  $s_f$  y  $s_{fg}$  se los ubica a la presión de salida del sistema. De no encontrarse de manera directa en las tablas termodinámicas, se procede a interpolar para encontrar dichos valores.

El valor de  $s_g$  se determina a la presión a la que se encuentra el recipiente, de no encontrar la presión exacta realizamos el proceso de interpolación.

Ahora podemos calcular el valor de la entalpía  $h_4$  que se calcula de acuerdo a la ecuación 2.35

$$h_4 = h_f + x * h_{fg} \quad (2.35)$$

La manera de encontrar la potencia que entrega el receptor se expresa por medio de la ecuación 2.36

$$Q_{turbina} = \dot{m} * \Delta h \quad (2.36)$$

Donde:

$\dot{m}$ : Flujo másico

$\Delta h$ : Diferencia de entalpías ( $h_3 - h_4$ )

Para determinar el rendimiento térmico del sistema es necesario calcular el valor de Q que sale del sistema y el Q que entra al sistema. Esto se lo expresa por medio de la ecuación 2.35

$$\eta_t = \frac{Q_{turb}}{Q_{solar}} \quad (2.35)$$

## CAPITULO 3

### RECURSO SOLAR

#### 3.1 LEYES DE LA RADIACIÓN

Las leyes de la radiación las podemos enumerar a continuación:

1.- Todos los objetos con temperatura mayor a 0°K emiten energía radiante, por ejemplo: el Sol, la Tierra, la atmósfera, las personas, etc.

2.- Los objetos con mayor temperatura, radian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos. Por ejemplo, el Sol con una temperatura media de 5.800°K en su superficie emite aproximadamente 64 millones W/m<sup>2</sup>, 165.000 veces más energía que la Tierra (la cual emite cerca de 390 W/m<sup>2</sup>), con una temperatura media en superficie de 288°K, cifra obtenida al utilizar la ley de Stefan-Boltzmann relacionando estas temperaturas (5.800/288) elevadas a la cuarta potencia.

3.- Los cuerpos con mayor temperatura emiten un máximo de radiación en longitudes de ondas, más cortas. Por ejemplo, el máximo de energía radiante del Sol se produce en  $\lambda \sim 0,5 \mu\text{m}$ , mientras que para la Tierra en  $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$ .

Para poder entender el fenómeno de la radiación que se presenta en superficies reales, es muy útil mencionar el concepto de cuerpo negro. Este nos dice que: El cuerpo negro es una superficie ideal que tiene las siguientes propiedades:

- a) Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda ni la dirección
- b) Para una temperatura y longitud de onda establecida, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro.
- c) Aunque la radiación emitida por un cuerpo negro es una función de la longitud de onda y la temperatura, es independiente de la dirección. Es decir, el cuerpo negro es un emisor difuso.<sup>10</sup>

El cuerpo negro nos sirve como patrón para comparar las propiedades que presentan los cuerpos en situaciones reales. Pero hay que aclarar que ninguna superficie tiene exactamente las mismas propiedades que un cuerpo negro. Una aproximación se puede observar en una cavidad, su superficie interna se encuentra a una temperatura uniforme. Si la radiación ingresa por una pequeña cavidad, ésta realizará múltiples reflexiones antes de resurgir. Es por esto que es casi absorbida por la cavidad y se asemeja al comportamiento del cuerpo negro.

### 3.1.1 DISTRIBUCIÓN DE PLANCK

La distribución espectral de emisión de un cuerpo negro es muy conocida, como podemos observar en la ecuación 3.1.

$$I_{\lambda,\beta}(\lambda,T) = \frac{2hc_o^2}{\lambda^5 [\exp(hc_o / \lambda KT) - 1]} \quad (3.1)$$

---

<sup>10</sup> INCROPERA, DeWITT, Fundamentos de transferencia de calor.

Donde:

h:	$6.6256 \times 10^{-34}$	[J.s]	Constante de Planck
k:	$1.3805 \times 10^{-23}$	[J/K]	Constante de Boltzmann
$c_0$ :	$2.998 \times 10^8$	[m/s]	Velocidad de la luz en el vacío
T:		[°K]	Temperatura absoluta del cuerpo negro

Su potencia emisiva es de la forma detallada en la ecuación 3.2.

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi d_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda K T) - 1]} \quad (3.2)$$

Donde:

$$C_1 = 2\pi^5 h c_0^2 = 3.742 \times 10^8 \text{ [W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2\text{]}$$

$$C_2 = (h c_0 / k) = 1.439 \times 10^4 \text{ [\mu m} \cdot \text{K]}$$

La ecuación 3.2 es conocida como la Distribución de Planck, en la cual deben considerarse varias características:

- La radiación emitida varía de forma continua con la longitud de onda.
- En cualquier longitud de onda la magnitud de la radiación emitida aumenta al ascender la temperatura.

- La región espectral en la que la radiación se concentra depende de la temperatura, dándose comparativamente más radiación que aparece para longitudes de onda más pequeñas a medida que aumenta la temperatura.
- Una fracción significativa de la radiación emitida por el sol, que se puede aproximar como un cuerpo negro a 5800 °K, está en la región visible del espectro. Por el contrario, para  $T \leq 800$  °K, la emisión está de manera predominante en la región infrarroja y no es visible para el ojo humano

### 3.1.2 LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN

La distribución espectral del cuerpo negro tiene un máximo de longitud de onda, y este depende de la temperatura, cuya expresión es la que consta en la ecuación 3.3.

$$\lambda_{\max} T = C_3 \quad (3.3)$$

Donde:

$$C_3 = 2897.8 \text{ } [\mu\text{m.K}]$$

Esta ecuación es conocida como la Ley de Desplazamiento de Wien, genera un lugar geométrico que describe una línea. La potencia emisiva espectral máxima se desplaza a longitudes de onda más cortas al aumentar la temperatura. Se encuentra a la mitad del espectro visible ( $\approx 0.5 \mu\text{m}$ ) para radiación solar, porque el sol emite, como cuerpo negro aproximadamente a 5800 °K. Para un cuerpo negro a 1000 °K, la emisión pico ocurre a  $2.90 \mu\text{m}$ , algo de su radiación se hace visible y de color rojizo.

### 3.1.3 LEY DE STEFAN - BOLTSMAN

Mediante esta ley realizamos el cálculo de la cantidad de radiación emitida, en todas las direcciones y sobre todas las longitudes de onda, como se observa en la ecuación 3.4.

$$Q_R = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma (T_A^4 - T_B^4) \quad (3.4)$$

Donde:

- $\sigma$ : constante de Stefan Boltzman,  $5.6697 \times 10^{-8}$  [w/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>]
- $\varepsilon$ : emitancia, fluctúa entre 0 y 1.

La ecuación 3.4 se establece para casos ideales, en caso de ser un cuerpo negro se establece una emitancia igual a 1. Esta ecuación se multiplica por un factor de forma debido a la geometría de los cuerpos, como se puede observar en la ecuación 3.5.

$$Q_R = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot F_d (T_A^4 - T_B^4) \quad (3.5)$$

Donde:

- $F_d$ : Factor de forma debido a la geometría de los cuerpos.

### Emisión de banda

A veces es necesario conocer la fracción de emisión total de un cuerpo negro que se encuentra dentro de cierto intervalo de longitud de onda o banda. Viene expresado por la integral que se encuentra descrita en la ecuación 3.6.

$$F_{(0 \rightarrow \lambda)} = \int_0^{\lambda T} \frac{E_{\lambda, b}}{\sigma T^5} d(\lambda T) = F(\lambda T) \quad (3.6)$$

### 3.1.4 LEY DE BEER

Es una relación empírica y exponencial, entre la transmisión de la luz al atravesar una sustancia y la concentración de la misma. Puede expresarse de otra manera, como la relación entre la transmisión y la longitud del cuerpo que esta atraviesa, descrita en la ecuación 3.7

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\kappa_\alpha \cdot \ell \cdot c} \quad (3.7)$$

Donde:

- $I_0$ : Intensidad de luz incidente. [W/M<sup>2</sup>]
- $I_1$ : Intensidad de la luz después de atravesar el medio. [W/M<sup>2</sup>]
- $\ell$ : Distancia que la luz atraviesa por el cuerpo
- $c$ : Concentración de la sustancia absorbente en el medio
- $\kappa_\alpha$ : Coeficiente de absorción de la sustancia

El valor del coeficiente de absorción  $\kappa_\alpha$  varía según los materiales absorbentes y con la longitud de onda de cada material en particular, como se observa en la ecuación 3.8. Esta ley tiende a no ser válida para concentraciones muy elevadas, en especial si el material en cuestión dispersa demasiada luz. Basa su funcionamiento en la espectroscopia para poder determinar la composición de las sustancias.

$$\kappa_\alpha = \frac{4\pi \cdot k}{\lambda} \quad (3.8)$$

Donde:

- $\kappa_\alpha$ : Coeficiente de absorción de la sustancia
- $\lambda$ : Longitud de onda del haz de luz
- $k$ : Coeficiente de extinción



La absorción del material se determina de acuerdo al coeficiente de absorción del material, al espesor y a la concentración del material, como se expresa en la ecuación 3.9.

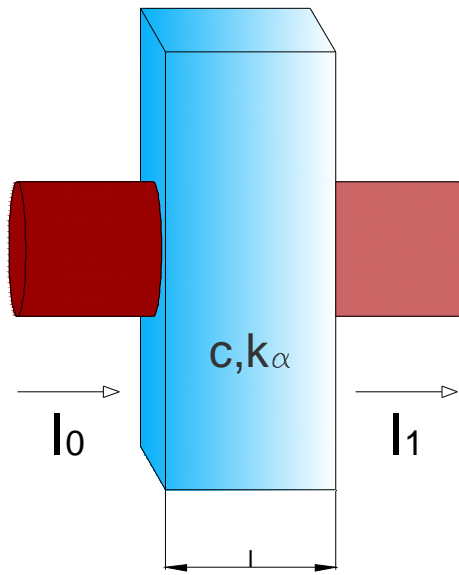
$$\alpha = K_{\alpha} \cdot \ell \cdot C \quad (3.9)$$

Donde:

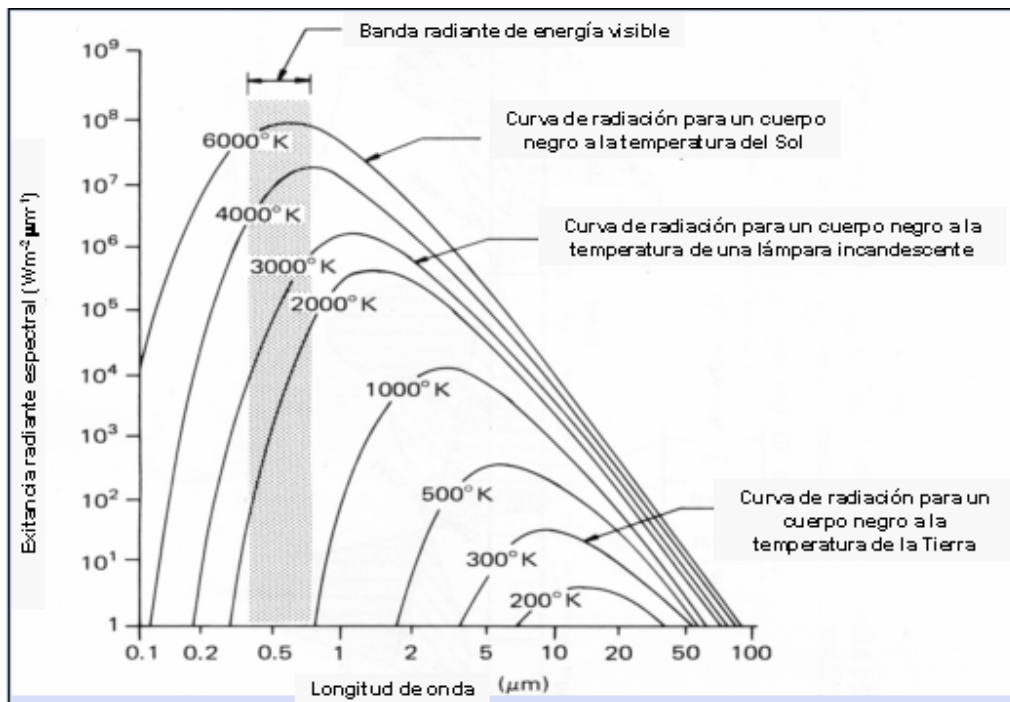
- $\alpha$ : Absorción
- $\ell$ : Distancia que la luz atraviesa por el cuerpo
- $c$ : Concentración de la sustancia absorbente en el medio
- $K_{\alpha}$ : Coeficiente de absorción de la sustancia

También se puede determinar de acuerdo a la diferencia logarítmica de las intensidades de salida con respecto a la de ingreso, como se observa en la ecuación 3.10.

$$\alpha = -\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \quad (3.10)$$



**Figura 3.1** Esquema de la ley de Beer



**Figura 3.2** Espectro de radiación

## 3.2 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar nos llega en forma de radiación electromagnética o luz de onda corta, son producidas por la oscilación o aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas no requieren de algún material para realizar su propagación.

Los distintos colores que posee la luz, tienen en común ser radiación electromagnética que se desplaza con la misma velocidad, su diferencia radica en la longitud de onda y frecuencia en la que se desplazan.

Las ondas ultravioletas, más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera, especialmente por el ozono. Podemos determinar la cantidad de radiación que llega a la Tierra a través de la irradiancia, que es la energía por unidad de tiempo y área. Se la mide en  $[W/m^2]$ .

### 3.2.1 DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR

Si aplicamos la Ley de Planck al sol con una temperatura de  $6000\text{ }^\circ\text{K}$ , obtenemos que el 99% de la radiación emitida se encuentra entre las longitudes de onda de  $0.15\text{ }\mu\text{m}$  y  $4\text{ }\mu\text{m}$ , y si  $1\text{ \AA}$  equivale a  $10^{-10}$  micras, tenemos que el sol emite en un rango de  $1500\text{ \AA}$  hasta  $4000\text{ \AA}$ , la luz visible se extiende desde  $4000\text{ \AA}$  a  $7400\text{ \AA}$ . La radiación ultravioleta va desde los  $1500\text{ \AA}$  a  $4000\text{ \AA}$  y la radiación infrarroja va desde las  $0.74\text{ }\mu\text{m}$  a las  $4\text{ }\mu\text{m}$ .

La atmósfera de la tierra actúa como un filtro que hace posible que no podamos observar la radiación con una longitud de onda de  $0.29$  micras, debido a que el ozono y oxígeno que se encuentran presentes en la misma realizan un fuerte

trabajo de absorción, nos protege de la radiación ultravioleta, que es nociva para la salud, y de cualquier radiación superior a las 0.24 micras.

La radiación electromagnética puede ser ordenada en un espectro de diferentes longitudes de onda, que se extiende en longitudes de onda corta y frecuencia muy alta (en billonésimas de metro) como los rayos gamma, hasta longitudes de onda de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas) como las ondas de radio. A menor longitud de onda, mayor contenido energético.

### **Efectos de la radiación solar sobre los gases atmosféricos**

- Fotoionizar la capa externa de electrones de un átomo
- Excitar los electrones de un átomo a una capa superior
- Disociar una molécula
- Hacer rotar una molécula

### **Efectos sobre la salud**

Gracias al trabajo de la atmósfera, que filtra la radiación UV-B y UV-C (este tipo de radiación es la más peligrosa) en su gran mayoría, es por esto que el 99% de la radiación que llega hasta la Tierra es del tipo UV-A.

Una exposición prolongada a la radiación solar es perjudicial para la salud, el ser humano, por sus múltiples ocupaciones es vulnerable cada vez más a la influencia de esta radiación, aumentando el riesgo de contraer enfermedades como el cáncer de piel.

#### **- Radiación UV-A (entre 315 y 400 $\mu\text{m}$ )**

Esta radiación es menos dañina de la radiación que llega a la tierra, es causante de la inmunosupresión y lesiones crónicas producidas por la luz, como el envejecimiento de la piel. Ocasionando daños permanentes en la piel.

- **Radiación UV-B (entre 280 y 315  $\mu\text{m}$ )**

Esta radiación es dañina, porque reduce el crecimiento de las plantas, y su exposición prolongada a este tipo de radiación causa daños a la salud de los seres humanos, como: cataratas, inflamaciones oculares, quemaduras de piel, cáncer de piel, reducción de la eficiencia del sistema inmunológico, rugosidades en la piel, etc.

- **Radiación UV-C (entre 100 y 280  $\mu\text{m}$ )**

Es la más dañina de toda la radiación ultravioleta, pero es absorbida por el oxígeno y el ozono.

La exposición a la radiación UV, también es beneficiosa para la salud, ya que ayuda en la producción de vitamina D.

### **3.3 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LA IRRADIANCIA**

Para realizar la medición de la radiación solar podemos recurrir a ciertos instrumentos diseñados para el efecto, llamados radiómetros, éstos realizan la medición de forma indirecta utilizando modelos matemáticos de estimación y correlacionan la radiación con el brillo solar. Nos ayudan a determinar la radiación solar incidente global, la directa, difusa, neta y el brillo solar.

**Tabla 3.1** Tipos de instrumentos de medición y sus usos

<b>Tipo de Instrumento</b>	<b>Parámetro de Medida</b>
Piranómetro	i) Radiación Global ii) Radiación directa, iii) Radiación difusa iv) Radiación solar reflejada.
Piranómetro Espectral	Radiación Global en intervalos espectrales de banda ancha
Pirheliómetro Absoluto	Radiación Directa
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación Directa en bandas espectrales anchas
Actinógrafo	Radiación Global
Pirgeómetro	Radiación Difusa
Radiómetro neto ó piranómetro Diferencial	Radiación Neta
Heliógrafo	Brillo Solar

Fuente.- [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)

### **a) PIRANÓMETRO**

Este instrumento sirve para medir la radiación normal y difusa que se puede medir en una superficie horizontal en un ángulo de 180 grados. La medición se realiza mediante el calentamiento de un disco pintado de negro y blanco alternadamente,

este calor genera una diferencia de potencial entre las zonas pintadas de negro y blanco, que puede ser medida mediante instrumentación, esta medición es proporcional a la radiación solar incidente. Puede presentarse variación en la lectura de la temperatura por la acción de agentes externos como viento, lluvia y las pérdidas térmicas de la radiación al ambiente, es por esto que el piranómetro tiene instalado una cúpula de vidrio transparente que protege el detector, nos sirve para filtrar la radiación que oscila entre 280 y 2800  $\mu\text{m}$ .

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), los piranómetros se clasifican por la ISO 9060 en: Patrones secundarios, de primera y de segunda clase. Los de primera clase y los patrones secundarios utilizan una termopila como elemento de detección. Los de segunda clase lo hacen con fotocélulas como elementos de detección, son menos costosos que los anteriores, pero su medición es restringida al espectro visible. Los piranómetros de primera clase y los patrones secundarios se utilizan para medir la radiación solar global.

**Tabla 3.2** Características de los piranómetros

<b>Características</b>	<b>Patrón Secundario</b>	<b>1ª Clase</b>	<b>2ª Clase</b>
Sensibilidad ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$\pm 1$	$\pm 5$	$\pm 10$
Estabilidad (% año)	$\pm 0.8$	$\pm 1.8$	$\pm 3$
Temperatura (%)	$\pm 2$	$\pm 4$	$\pm 8$
Selectividad (%)	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$
Linearidad (%)	$\pm 0.5$	$\pm 1$	$\pm 3$
Constante de tiempo.	< 15s	< 30s	< 60s
Respuesta coseno (%)	$\pm 0.5$	$\pm 2$	$\pm 5$

Fuente: [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)



**Figura 3.3** Piranómetro

### **b) PIRHELÍOMETRO**

Es utilizado para medir la radiación solar directa, la OMM los clasifica como Primarios y Secundarios:

- **Pirheliómetro de Cavity Absoluta (Primario).**- Posee dos cavidades idénticas, una externa, que se encuentra expuesta a la radiación solar, la otra, ubicada en el interior del instrumento, ésta última es calentada por medio de una resistencia eléctrica hasta que las temperaturas de ambas cavidades sean iguales, se asigna el valor de la energía eléctrica consumida como el valor de la radiación solar incidente.



**Figura 3.4** Pirheliómetro Primario



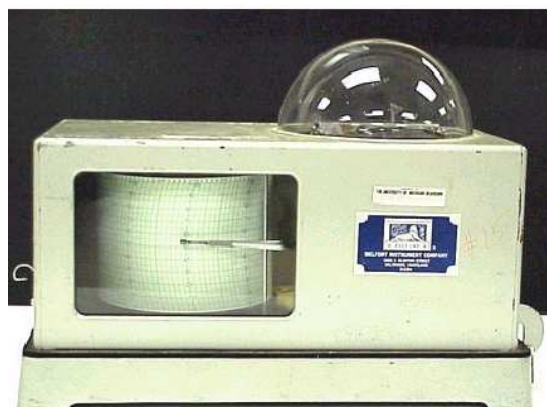
- **Pirheliómetro secundario.**- Mide la radiación solar directa, son calibrados con el pirheliómetro de cavidad absoluta, requiere de un dispositivo para seguir la trayectoria solar, es muy estable.



**Figura 3.5** Pirheliómetro Secundario sobre un seguidor de sol

### c) PIRHELIOGRAFO

Es utilizado para medir la radiación solar directa, registra la radiación en un ángulo sólido pequeño e incide en una superficie plana normal al eje de dicho ángulo.



**Figura 3.6** Pirheliógrafo

#### **d) ACTINÓGRAFO**

Registra la radiación global mediante un sensor termomecánico, que se encuentra cubierto por una cúpula de vidrio. Es un arreglo bimetálico que posee dos superficies, una pintada de negro para absorber las ondas electromagnéticas de la radiación solar, y otra de blanco que hace que refleje la radiación. Esto ocasiona que la placa realice una curvatura y, mediante un mecanismo realice la grafica de la curva con valores de la radiación global. Su precisión es de  $\pm 8\%$ .



**Figura 3.7** Actinógrafo

#### **e) RADIÓMETRO NETO**

Sirve para medir la diferencia de la radiación ascendente y descendente gracias a una superficie horizontal. Determina la radiación diurna y nocturna como un indicador de estabilidad.

#### **f) HELIÓGRAFO**

Registra las horas de sol efectivo durante el día. Focaliza la radiación solar mediante una esfera de vidrio que actúa como un lente convergente, en una cinta graduada con horas, éste se quema formando líneas y su longitud nos indica en número de horas de exposición solar.



**Figura 3.8** Heliógrafo

Para medir la radiación solar indirecta se utiliza un piranómetro cuyo sensor es sombreado por una banda o disco, esto impide el paso de radiación solar directa.



**Figura 3.9** Piranómetro con banda de sombra para la medición de radiación difusa

### 3.3.1 TEOREMA DE ANGSTROM

#### Regresión Angstrom-Page<sup>11</sup>

Desde los inicios del siglo XX, el hombre ha intentado determinar la radiación solar basándose en datos meteorológicos. Angstrom propuso una ecuación que fue modificada en 1940, a la misma que se la llamó la regresión de Angstrom-Page, cuya forma es:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \frac{n}{N} \quad (3.11)$$

Donde:

- H: Radiación en la superficie terrestre
- H<sub>0</sub>: Radiación fuera de la superficie terrestre
- n: Número de horas de brillo solar real
- N: Número de horas de brillo solar teórico
- a: 0.23
- b: 0.56

Es la relación de la transmitancia con la hora de sol relativa, (cociente entre las horas del sol medidas y las horas de sol máxima para la localización del estudio).

Según los estudios realizados a esta regresión, esta presenta cierta validez:

---

<sup>11</sup> [www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co)

**Tabla 3.3** Validez de la ecuación 3.9

<b>Validez</b>	<b>Latitud</b>
95%	- 2° < L < 2°
90%	- 4° < L < 4°

**Fuente:** CARRASCO F. Apuntes de clase

A la relación  $\frac{H}{H_0}$  se la conoce también como Índice de Claridad ( $k_i$ ), para el cual se requiere determinar la radiación durante un período de tres años.

Esta relación puede tomar valores de entre 0.3, en lugares donde el clima es abierto o nublado hasta 0.8 localidades que son muy soleadas.

La determinación de los coeficientes **a** y **b** se lo realiza en base a experimentación, los valores determinados para el territorio ecuatoriano son los que constan en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Valores de las constantes a y b.

<b>Región</b>	<b>A</b>	<b>b</b>
Sierra	0.25	0.45
Costa	0.28	0.54

**Fuente:** INAMHI

### 3.3.2 USO DE SOFTWARE: ISOL, SENSOLAR

#### I. Programa Isol

Isol, es un programa que se ejecuta bajo el sistema operativo DOS, desarrollado por el Centro de Investigación Hábitat y Energía, de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires, versión realizada en julio de 1995.

Es de fácil entendimiento y aplicación, para lo cual es necesario ubicar y conocer ciertos conceptos y valores que nos ayudarán a obtener resultados reales y aplicables al lugar a ejecutarse el proyecto.

El **albedo** es la capacidad de reflexión o fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie. Esta energía se pierde y no es parte del proceso de calentamiento de la atmósfera.

**Tabla 3.5** Albedo de algunas superficies comunes

<b>SUPERFICIE</b>	<b>ALBEDO %</b>
Nieve fresca	80-85
Arena	20-30
Pasto	20-25
Bosque	5-10
Suelo seco	15-25
Agua (sol cerca del horizonte)	50-80
Agua (sol cerca del cenit)	3-5
Nube gruesa	70-80
Nube delgada	25-30
Tierra y atmósfera global	30

**Fuente:** [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)

Tomando en cuenta estos valores, podemos ubicar los datos requeridos por el programa, que corresponden al lugar donde se realizarán las pruebas del concentrador parabólico, y la posición en la que ubicaremos al mismo. El menú del programa nos preguntará por los siguientes datos:

- Latitud
- Mes (1 a 12)
- Día
- Azimut (orientación)
- Pendiente (inclinación)
- Albedo (reflexión del suelo)
- Claridad de la atmósfera (kt)
- Número de vidrios

Con estos datos ingresados al computador, podemos obtener resultados como los que se indican en las figuras siguientes.



**Figura 3.10** Pantalla principal del programa Isol

La figura 3.10, indica la pantalla principal del programa ISOL, la cual nos indica las diferentes opciones que podemos seleccionar para iniciar nuestro estudio previo.

Al seleccionar la opción 1 del menú principal, iniciamos el programa ISOL.

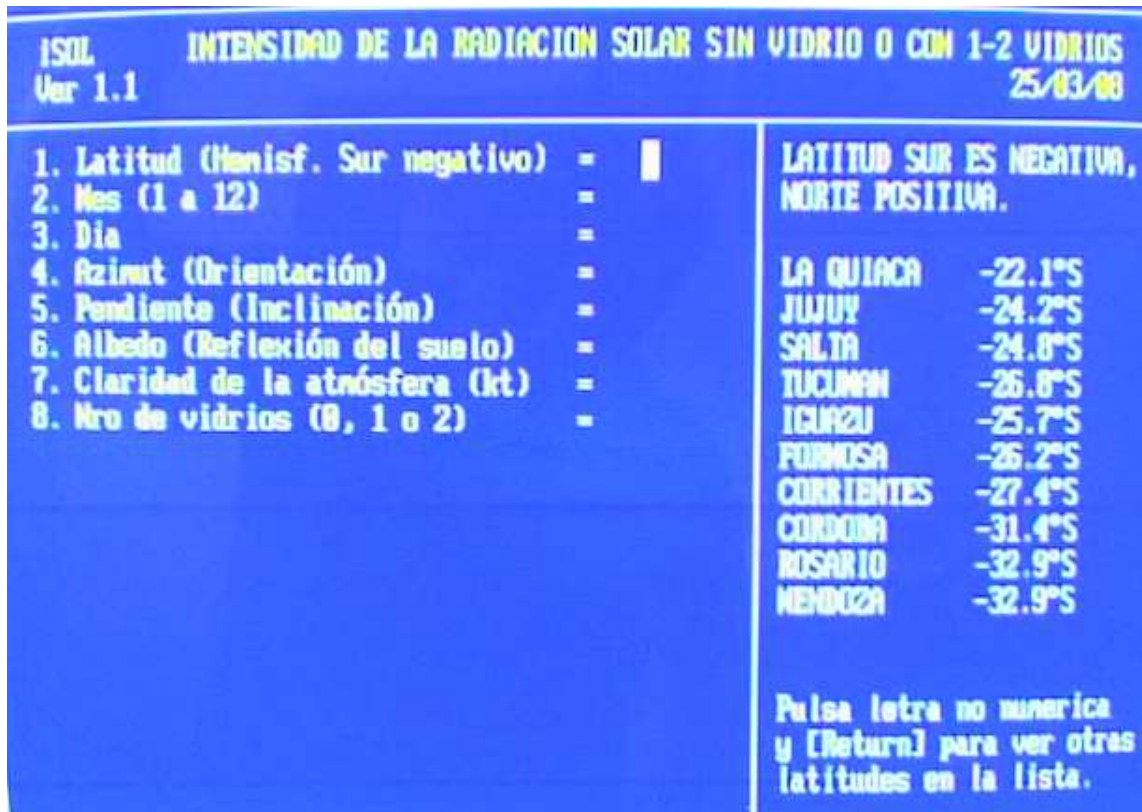


Figura 3.11 Pantalla donde se ingresan los datos

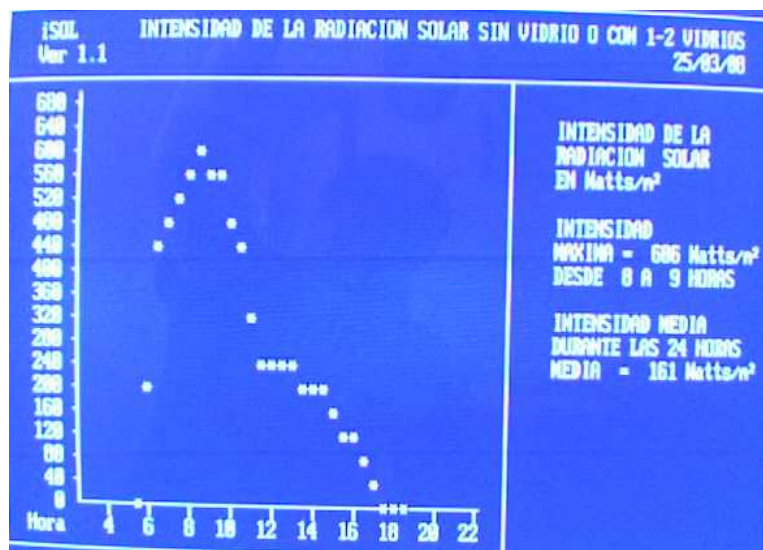
En la figura 3.11, se ingresan los datos correspondientes al lugar donde vamos a realizar las pruebas de nuestro equipo, los mismos que deben estar preestablecidos. Una vez ingresados los datos requeridos, el programa realiza el cálculo de la intensidad de la radiación solar en el sitio de las pruebas.



¡SOL INTENSIDAD DE LA RADIACION SOLAR SIN VIDRIO O CON 1-2 VIDRIOS					25/03/00	
Ver 1.1						
Hora	Total	Dir	Dif	Ref	Latitud	= -1758
6.0-7.0	444.86	413.95	22.87	7.24	Fecha	= 25 / 3
7.0-8.0	558.11	466.65	67.08	24.39	Declinación	= +1.21
8.0-9.0	686.28	456.18	186.71	43.31	Días acun.	= 04
9.0-10.0	569.11	368.80	139.07	61.24	Horas de sol	= 11.8
10.0-11.0	448.81	282.78	161.96	75.27	Albedo	= .2
11.0-12.0	269.49	12.72	173.88	82.97	Pendiente	= 90
12.0-13.0	256.78	0.00	173.88	82.97	Orientación	= 90
13.0-14.0	237.23	0.00	161.96	75.27	Claridad ats	= .74
14.0-15.0	200.32	0.00	139.07	61.24	Vidrios	= 1
15.0-16.0	150.82	0.00	106.71	43.31	Rad sin atmos	= 38.3
16.0-17.0	91.47	0.00	67.08	24.39	Rad horiz Ht	= 28.4
17.0-18.0	38.11	0.00	22.87	7.24	Total = Radiación Total	
Total 24 hrs = 168.54 W/m2 = 3853 Wh/día					Dir = Rad Directa	
					Dif = Rad Difusa	
					Ref = Rad Reflejada	
					WJ/día.m2	= 13.9

**Figura 3.12** Tabla que muestra la intensidad de la radiación solar

La figura 3.12, nos indica la tabla de intensidad de la radiación solar por hora para las condiciones ingresadas anteriormente, además presenta valores de radiación solar total, directa, difusa y reflexiva. En esta pantalla, se presentan opciones que podemos utilizar, para poder modificar los datos que anteriormente se ingresaron, imprimir los datos, además se puede generar una gráfica con los datos de la intensidad de la radiación.



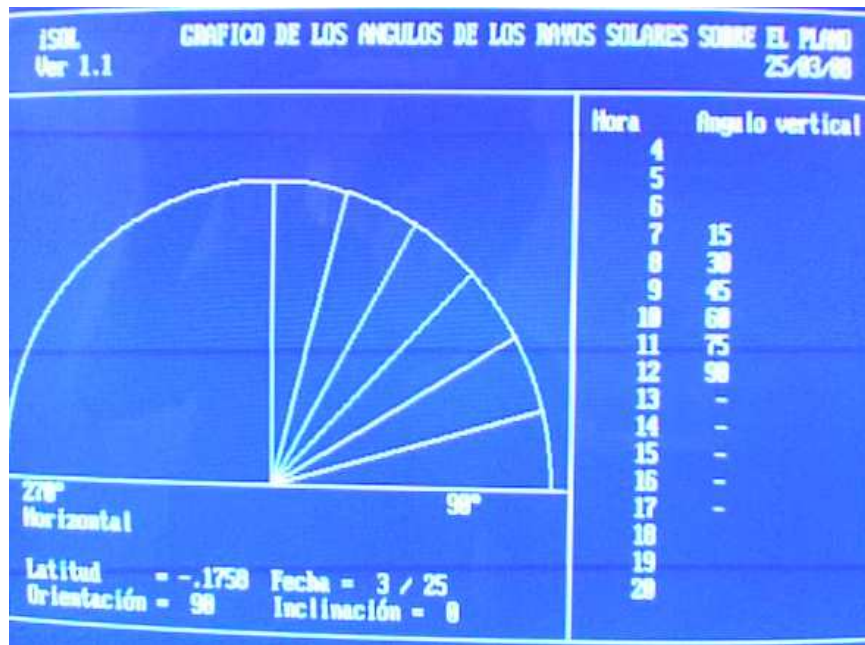
**Figura 3.13** Gráfica de la intensidad de la radiación solar

En la figura 3.13, se presenta la grafica de la intensidad de la radiación solar, otra de las opciones que podemos observar en la pantalla que se indica en la figura 3.12, es la de generar una tabla con los valores de los diferentes ángulos que se presentan durante el recorrido del sol en el cielo, como se puede apreciar en la figura 3.14.

ISOL Ver 1.1		GRAFICO DE LOS ANGULOS DE LOS RAYOS SOLARES SOBRE EL PLANO			25/03/08	
HORA SOLAR	ANGULO ALTURA	AZIMUT 0-360°	ANGULOS DE SOMBRA VERTICAL	HORIZONTAL		
4.0	-	-	-	-	Latitud = -.1758	
5.0	-	-	-	-	Fecha = 25 / 3	
6.0	-	-	-	-	Declinación = +1.21	
7.0	15°	88.7°	15.0	-1.3	Dias acun. = 84	
8.0	38°	88.5°	38.0	-1.5	Pendiente = 0	
9.0	45°	88.1°	45.0	-1.9	Orientación = 90	
10.0	60°	87.3°	60.0	-2.7	Salida del sol	
11.0	75°	84.7°	75.0	-5.3	6 horas 0 minutos	
12.0	89°	8.8°	90.0	-90.0	Horas máximas de sol	
13.0	75°	275.3°	255.0	-174.7	12 horas 50 minutos	
14.0	60°	272.7°	240.0	-177.3	El ángulo de sombra	
15.0	45°	271.9°	225.0	-178.1	horizontal es el ángulo	
16.0	38°	271.5°	210.0	-178.5	entre el rayo del sol y	
17.0	15°	271.3°	195.0	-178.7	una línea perpendicular	
18.0	-	-	-	-	a la superficie en el	
19.0	-	-	-	-	plano horizontal:	
20.0	-	-	-	-	-ivo = a la derecha	
21.0	-	-	-	-	+ivo = a la izquierda	

**Figura 3.14** Tabla de los ángulos de los rayos solares

En figura 3.15, nos muestra la pantalla de la gráfica de los valores de ángulos que varían durante el recorrido del sol en el cielo.



**Figura 3.15** Gráfico de los ángulos de los rayos solares

También se puede generar un gráfico de los ángulos de los rayos solares sobre el plano, así como los valores de los mismos que adoptan durante el transcurso del día.



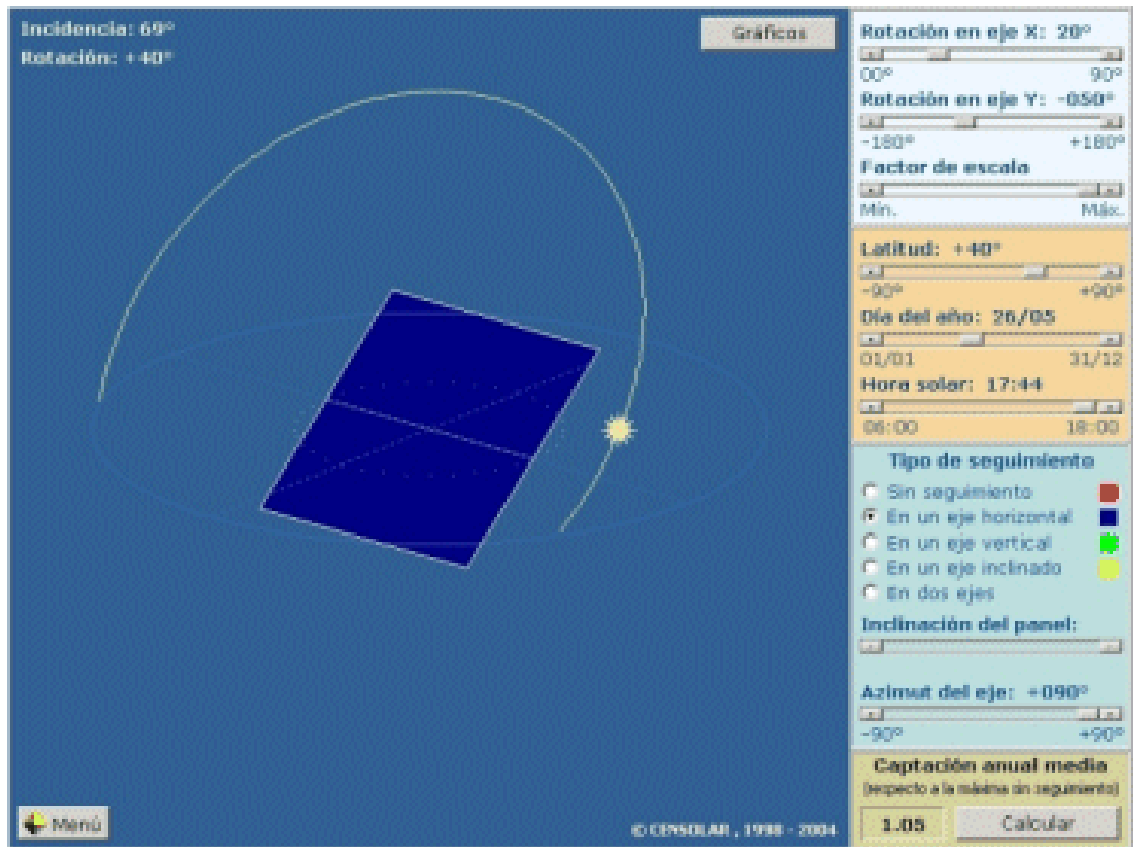
**Figura 3.16** Gráfico de los ángulos de los rayos solares sobre el plano

El programa ISOL, nos sirve para poder determinar de mejor manera, los días en los que se presentan valores de radiación solar, lo que nos ayudará en el diseño del proyecto.

## **II. Programa Censol**

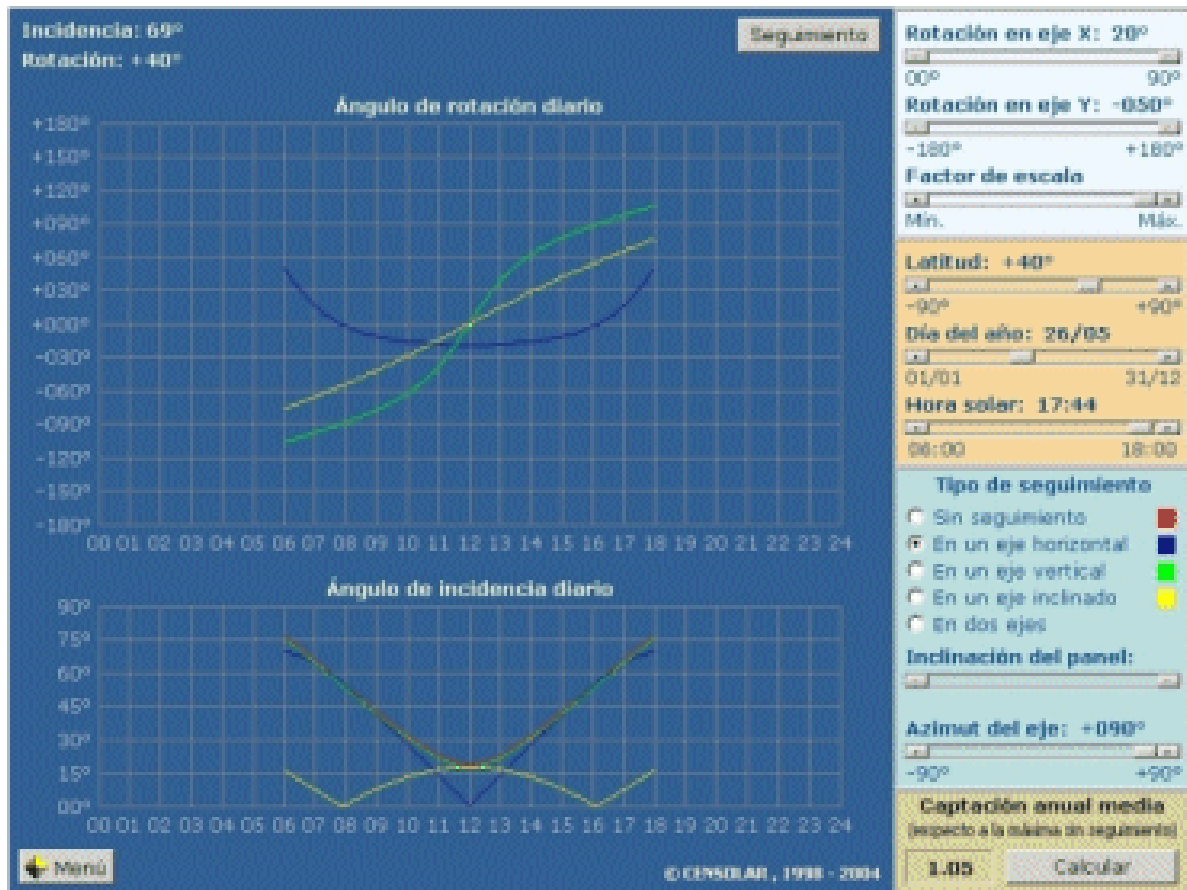
Este programa es creado por el Centro de Estudios de la Energía Solar -Censolar, que contiene varias opciones como:

- Solar fotovoltaica
- Solar térmica (A.C.S)
- Solar térmica (piscinas)
- Análisis económicos
- Geometría solar
- Seguimiento solar
- Sombras
- Pérdidas por posición
- Pérdidas por sombreado
- Soleamiento
- Iluminación de la tierra
- Base de datos de radiación



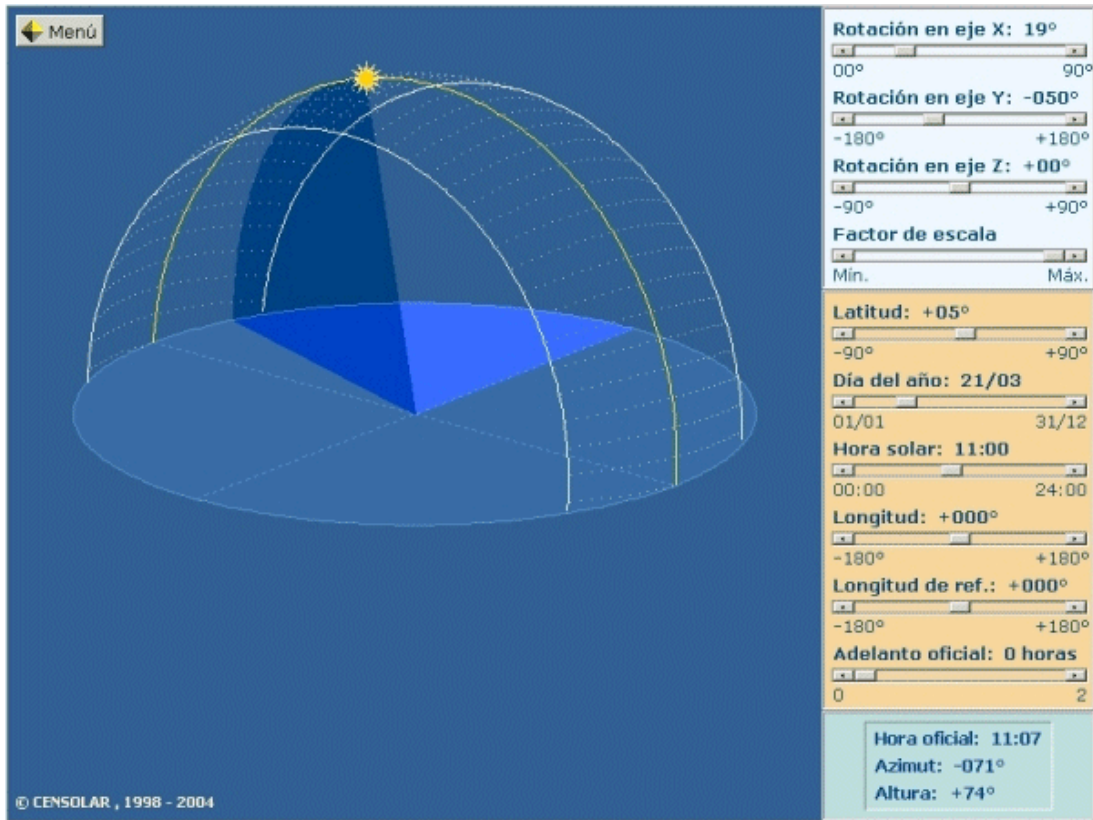
**Figura 3.17** Interfaz gráfica del módulo “Seguimiento Solar”

En la figura 3.17, indica la pantalla en la cual podemos modificar los datos mediante barras deslizantes, en la que podemos modificar las condiciones, generando una animación en la cual podemos observar el comportamiento del sol bajo las condiciones requeridas durante el estudio.



**Figura 3.18** Interfaz gráfica del módulo “Seguimiento solar”

En la figura 3.18, se aprecia el desplazamiento del sol, y por consecuencia la variación de los ángulos que influyen en los cálculos inmersos en desarrollo del proyecto, como son los de rotación diaria, de incidencia diaria.



**Figura 3.19** Interfaz del módulo “Geometría Solar”

En la figura 3.19, se identifica la variación de los ángulos que conforman la geometría solar. Se puede variar los diferentes parámetros utilizando las barras deslizantes.

ALEMANIA	FINLANDIA	MOZAMBIQUE	CIUDAD REAL (+39.0°)
ANGOLA	FRANCIA	NAMIBIA	CORDOBA (+37.9°)
ANTARTIDA	GHANA	NICARAGUA	CUENCA (+40.1°)
ARGELIA	GRAN CAIMAN	NIGERIA	GERONA (+42.0°)
ARGENTINA	GRANADA	NUOVA ZELANDA	GRANADA (+37.2°)
ARTICO	GRECIA	PAKISTAN	GUADALAJARA (+40.6°)
AUSTRALIA	GUATEMALA	PANAMA	GUIPUZCOA (+43.3°)
AUSTRIA	GUINEA	PARAGUAY	HUELVA (+37.3°)
AZORES	GUINEA PORTUGUESA	PERU	HUESCA (+42.1°)
BARBADOS	GUYANA	PORTUGAL	JAEN (+37.8°)
BELGICA	HAITI	REPUBLICA DOMINICANA	LA CORUÑA (+43.4°)
BELIZE	HONDURAS	REUNION	LA RIOJA (+42.5°)
BIRMANIA	HUNGRIA	RUMANIA	LAS PALMAS (+28.2°)
BOLIVIA	INDIA	RUSIA	LEON (+42.6°)
BOTSWANA	IRAK	SANTA LUCIA	LERIDA (+41.7°)
BRASIL	IRAN	SANTO TOME Y PRINCIPE	LUGO (+43.0°)
BULGARIA	IRLANDA	SENEGAL	MADRID (+40.4°)
CABO VERDE. ISLAS	ISLANDIA	SINGAPUR	MALAGA (+36.7°)
CANADA	ISRAEL	SOMOA AMERICANA	MELILLA (+35.3°)
CHAD	ITALIA	SRI LANKA	MURCIA (+38.0°)
CHECOSLOVAQUIA	JAMAICA	SUDAFRICA	NAVARRA (+42.8°)
CHILE	JAPON	SUDAN	ORENSE (+42.3°)
CHINA	JORDANIA	SURINAM	PALENCIA (+42.0°)
COLOMBIA	KENIA	TAILANDIA	PONTEVEDRA (+42.4°)
CONGO	KUWAIT	TAIWAN	SALAMANCA (+41.0°)
COREA	LIBANO	TANZANIA	SEGOVIA (+41.0°)
COSTA RICA	MACAO	TRINIDAD-TOBAGO	SEVILLA (+37.4°)
CUBA	MADAGASCAR	TUNEZ	SORIA (+41.8°)
DOMINICA	MADEIRA. ISLAS	TURQUIA	STA.C.TENERIFE (+28.5°)
ECUADOR	MALASIA	UGANDA	TARRAGONA (+41.1°)
EGIPTO	MALTA	URUGUAY	TERUEL (+40.4°)
EL SALVADOR	MALVINAS. ISLAS	VENEZUELA	TOLEDO (+39.9°)
ESPAÑA	MARRUECOS	VIRGENES. ISLAS	VALENCIA (+39.5°)
ESTADOS UNIDOS	MARTINICA	ZAIRE	VALLADOLID (+41.7°)
ETIOPIA	MAURITANIA	ZAMBIA	VIZCAYA (+43.3°)
FJI. ISLAS	MEXICO	ZIMBAWE	ZAMORA (+41.5°)
FILIPINAS	MONGOLIA		ZARAGOZA (+41.7°)

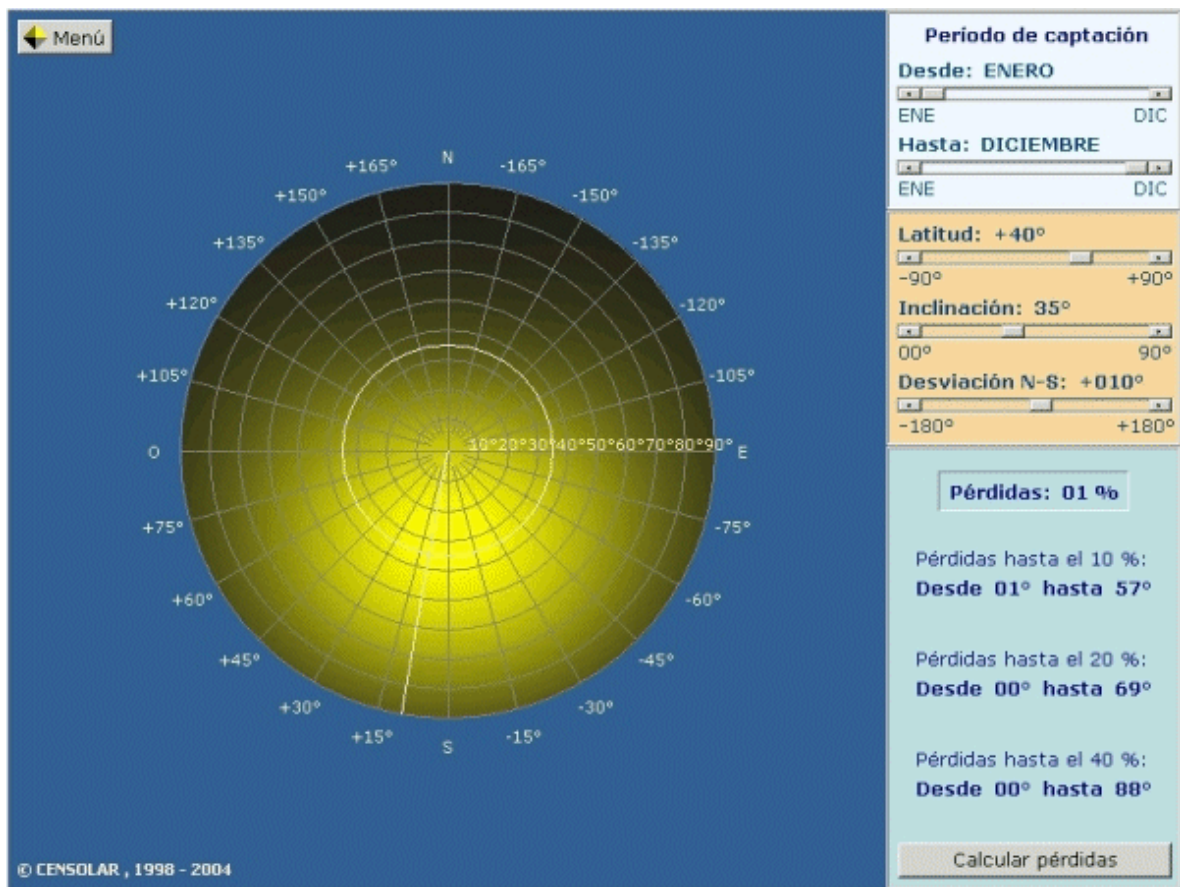
  

© CENSOLAR , 1998 - 2004	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
MJ/m <sup>2</sup> :	07.3	10.9	14.4	19.2	22.4	24.3	24.9	23.0	17.9	12.3	08.8	06.9	16.0
kW·h/m <sup>2</sup> :	2.0	3.0	4.0	5.3	6.2	6.7	6.9	6.4	5.0	3.4	2.4	1.9	4.5

**Figura 3.20** Interfaz del módulo “Base de datos de Radiación”

En la figura 3.20, se presenta una tabla con la radiación, del país seleccionado (cuadro azul), luego se genera otra tabla con las ciudades de las que tenemos registros de radiación (parte blanca), junto al nombre de la ciudad podemos observar los datos de latitud de la misma, y en la parte inferior (color anaranjado) se presentan los datos de radiación solar presente en dicha ciudad.





**Figura 3.21** Interfaz del módulo “Pérdidas por posición”

En la figura 3.21, se observa las pérdidas por posición, donde se varían los diferentes parámetros que permiten el cálculo, en el círculo podemos determinar las zonas del cielo donde se producen pérdidas de radiación y nos indica las partes del cielo en las que podemos aprovechar de mejor manera la radiación solar.

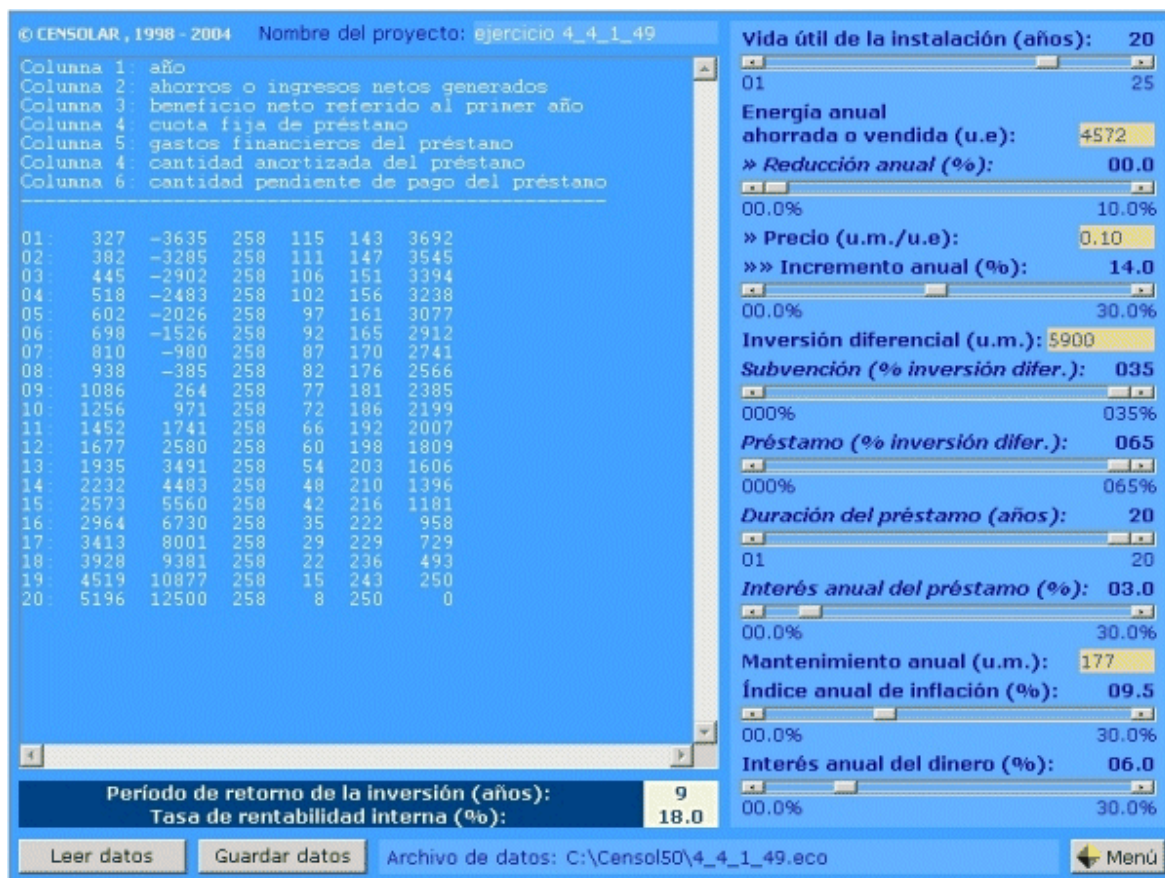


Figura 3.22 Interfaz del módulo “Análisis Económico”

En la figura 3.22, podemos ver la interfaz de análisis económico, obteniendo el análisis de una posible instalación de energía solar, en la cual ingresamos los datos de vida útil de la instalación, duración del préstamo, interés del préstamo, inflación, etc. Donde se observa los ahorros, beneficios netos, cuota fija, gastos del préstamo, cantidad amortizada del préstamo, cantidad de pago del préstamo, además del tiempo de retorno de la inversión.

### **3.3.3 ESTADÍSTICAS**

La entidad encargada de registrar los datos de heliofanía dentro del territorio ecuatoriano, es el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI, datos que se presentan en el anexo 2.

Estos antecedentes son registrados por estaciones de medición, que están ubicados en zonas estratégicas del Ecuador, la estación más cercana al lugar donde va a ser instalado el proyecto es la “La Tola”, que se encuentra dentro de las instalaciones de la Facultad de Veterinaria de la Universidad Central ubicado en Uyumbicho al Suroriente de Quito, la cual registra los datos desde 1980 hasta 2006.

Para el cálculo de la radiación fue necesario considerar la heliofanía promedio mensual, este resultado lo dividimos para el número de días de cada mes, para obtener las horas de heliofanía promedio diaria. Finalmente para el cálculo de la radiación aplicamos la regresión de Angstrom-Page, con lo que obtuvimos la radiación promedio mensual, la misma que nos sirve de referencia.

### **3.3.4 MAPAS DE RADIACIÓN**

En el anexo3, se puede apreciar las zonas de mayor radiación solar que existen en el Ecuador e identificar las zonas que reciben mayor radiación, entre las que se encuentran las ciudades de: Otavalo, Quito, Sangolquí, Latacunga, Ambato, Pelileo, Guamote, Azogues, Lago Agrio, Shushufindi, y la Joya de los Sachas que tienen un rango de 5 a 5.5 Kw/h.m<sup>2</sup>.

### 3.4 Energía disponible

El Ecuador se ha caracterizado por tener días muy calurosos y soleados durante la mayor parte del año.

Las mediciones de la constante más actuales, realizada por Froehlich y Brusa ha resultado en la referencia radiométrica mundial WRR, World Radiometric Reference, del WRC, World Radiation Center, como se puede observar en la tabla 3.6, con sus respectivas equivalencias.

**Tabla 3.6** Mediciones de Constante Solar – Froehlich y Brusa

<b>CONSTANTE SOLAR</b>				
$W/m^2$	$cal/(cm^2 \cdot min)$	Langley/min	Btu/(h·pie <sup>2</sup> )	KJ/(h·m <sup>2</sup> )
1367	1.96	1.960	433.3	4921

**Fuente:** Salinas R., Calvopiña P.

De acuerdo a las estadísticas y mediciones realizadas, se ha podido determinar que existe una desviación estándar de  $1.6 W/m^2$  y una desviación máxima de  $\pm 7 W/m^2$ . La diferencia entre este valor y el Standard NASA es de 1%.

La localización geográfica para la aplicación de este proyecto es en la provincia de Pichincha, cantón Rumiñahui, parroquia San Pedro, en la Av. El Progreso, ESPE.

La energía solar global ha sido medida durante algunos años, en 10 estaciones del país, sin embargo esta información no es confiable ya que fue medida con los viejos actinógrafos. La única estación que registra la radiación global con instrumental nuevo es en Sangay.

## **CAPITULO 4**

### **TECNOLOGÍA DE LOS CONCENTRADORES**

La tecnología de los concentradores sirve para obtener elevadas temperaturas, para lo cual se recurre a colectores especiales, ya que con los planos es imposible.

Estos colectores son los de concentración, que consiste en aumentar la radiación por unidad de superficie. Esto se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie absorbente, que debe ser pequeña comparada con la del dispositivo óptico.

En el absorbedor se puede tener densidades de energía que van desde 1.5 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico, con los colectores concentradores de energía solar, se pueden obtener temperaturas entre 100 y 500°C si se usan colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500°C si el sistema óptico de los colectores tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500°C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

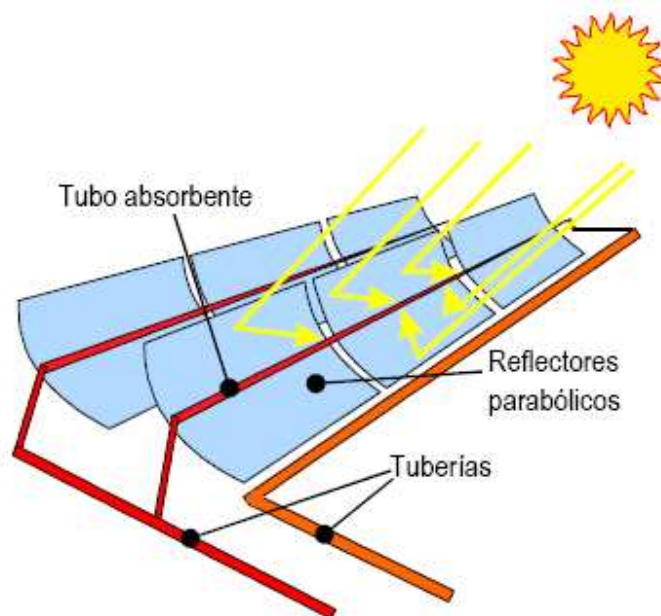
Existen diversas formas y sistemas, pero la parte común a todos es que necesitan orientación respecto del ángulo de incidencia solar. Además debe destacarse que el acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico debe ser de buena calidad y debe mantener sus propiedades por largos períodos de tiempo sin ser deterioradas por el polvo, lluvia y medio ambiente, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos.

Esta tecnología se ha desarrollado bajo tres conceptos principales, entre ellos los concentradores cilíndrico-parabólicos, paraboloides de revolución o discos parabólicos; y los sistemas de torre de potencia y los hornos solares.

#### 4.1 CONCENTRADORES CILÍNDRICO – PARABÓLICOS (CCP)

El colector cilindro parabólico, está compuesto por un espejo cilindro parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor colocado en la línea focal de la parábola.

La radiación solar concentrada produce el calentamiento, o sea tiene un aumento de energía termodinámica del fluido que circula por el interior del tubo receptor.



**Figura 4.1** Principio de funcionamiento de un colector cilindro parabólico

Los colectores solares de concentración con foco lineal, que pueden operar eficientemente hasta temperaturas del orden de 450 °C.

#### **4.1.1 COMPONENTES DE UN CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO**

##### **a) El reflector cilindro-parabólico**

El reflector cilindro parabólico refleja y concentra sobre el tubo absorbente la radiación solar directa que incide sobre su superficie.

En definitiva es un espejo curvado en una de sus dimensiones con forma de parábola, que concentra sobre su línea focal toda la radiación solar que atraviesa su plano de apertura.

##### **– Chapa metálica.**

Generalmente se utilizan chapas de aluminio pulido, debido a su alta reflectividad especular y que actúa a la vez de elemento reflexivo. La ventaja de esta opción es el bajo costo, y una desventaja es la baja durabilidad, ya que la superficie del aluminio se deteriora con cierta rapidez, deteriorando sus propiedades de reflectividad, por estar expuesto a la intemperie, por lo que los reflectores de chapa de aluminio tienen limitaciones en el uso industriales y de larga duración.

##### **– Vidrio.**

El es vidrio de bajo contenido en hierro, sobre su cara posterior se deposita una fina película de plata protegida mediante una película de cobre y otra de pintura epoxi.

De acuerdo al espesor del vidrio sobre el que se deposita la película reflexiva de plata, se tienen dos tipos diferentes de espejos: de vidrio grueso ( $e = 3\text{mm}$ ) y de vidrio delgado ( $e = 1,5\text{ mm}$ ).

## – Plástico

El reflector es de lámina de material plástico sobre la que se deposita una película de plata o aluminio, siendo una fina lámina de plástico reflectante que puede pegarse sobre cualquier substrato, estas láminas plásticas adoptan la forma parabólica de acuerdo a la forma de la estructura.

El principal problema de estas láminas reflectantes es su baja durabilidad en la intemperie, ya que se deteriora debido a las partículas que circulan por el aire, estas las rayan y erosionan su superficie, lo que a su vez resulta en una pérdida de especularidad, estas superficies reflexivas presentan un grado de ensuciamiento mayor que los espejos de vidrio, y su limpieza es más delicada, debido al deterioro que puede sufrir la película reflectante.

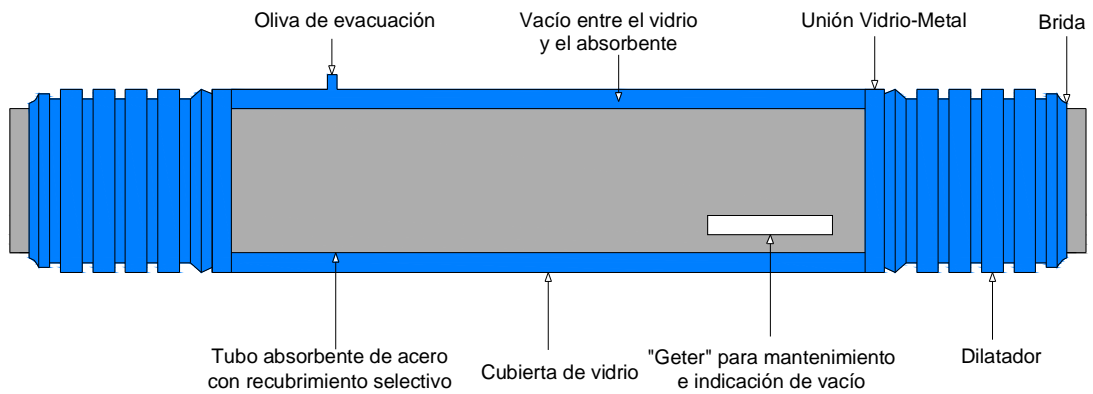
### **b) El tubo absorbente**

Es uno de los elementos fundamentales de este sistema, ya que del tubo depende del rendimiento global del colector, puede constar de un tubo o, frecuentemente, de dos tubos concéntricos; en el caso de tubos concéntricos, el tubo interior es por el cual circula el fluido que se calienta, de material metálico y el tubo exterior es de cristal.

El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorción mayor al 90% y una baja emisividad en el espectro infrarrojo menor al 30%, lo que le proporciona un elevado rendimiento térmico.

El tubo de cristal que rodea al tubo interior metálico tiene la doble misión de reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo metálico y de proteger de las inclemencias meteorológicas su recubrimiento selectivo, este tubo de cristal suele llevar también un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmitancia de la radiación solar y, consiguientemente, el rendimiento óptico del colector.

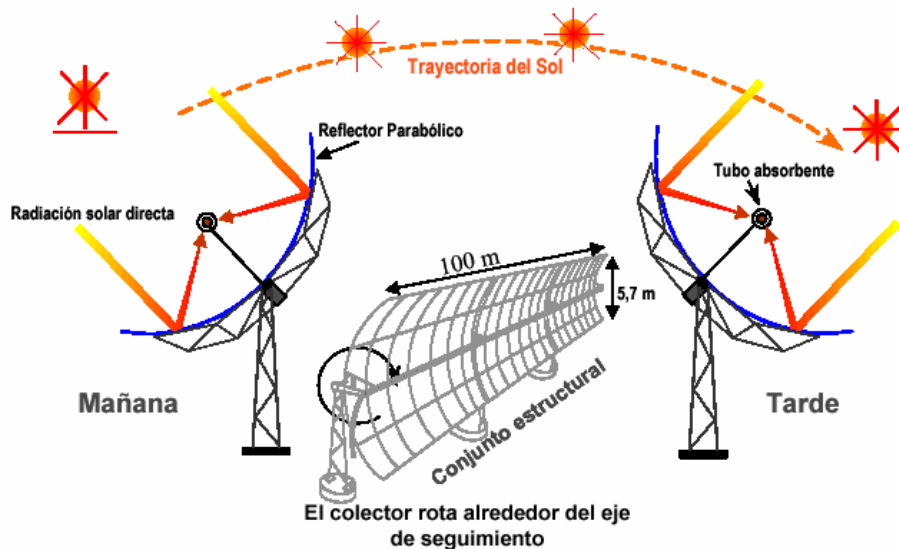




**Figura 4.2** Esquema de un tubo absorbente

### c) El sistema de seguimiento del sol

El sistema de concentrador cilíndrico parabólico puede aprovechar la radiación solar directa por lo que es necesario proveer de un mecanismo de seguimiento solar que lo siga la trayectoria del sol a lo largo del día. El sistema de seguimiento solar consiste en un dispositivo que gira a los reflectores cilindro-parabólicos del colector alrededor de un eje, la Figura 4.3 muestra esquemáticamente el seguimiento solar.



**Figura 4.3** Seguimiento solar típico de un Concentrador Cilíndrico Parabólico

#### d) La estructura metálica

La estructura del colector da la rigidez al conjunto de elementos que lo componen, a la vez que actúa y se relaciona con la fundación del colector, como se puede observar en la figura que se indica a continuación.



**Figura 4.4** Estructura metálica - tipo espacial<sup>12</sup>

#### 4.1.2 BALANCE ENERGÉTICO

Los parámetros básicos de un colector cilindro parabólico son la razón de concentración y el ángulo de aceptación. La razón de concentración geométrica,  $C$ , es el cociente entre el área de apertura del colector y el área total del tubo absorbedor.

$$C = \frac{4 \cdot A}{L \cdot \pi \cdot D^2} \cdot T \quad (4.1)$$

---

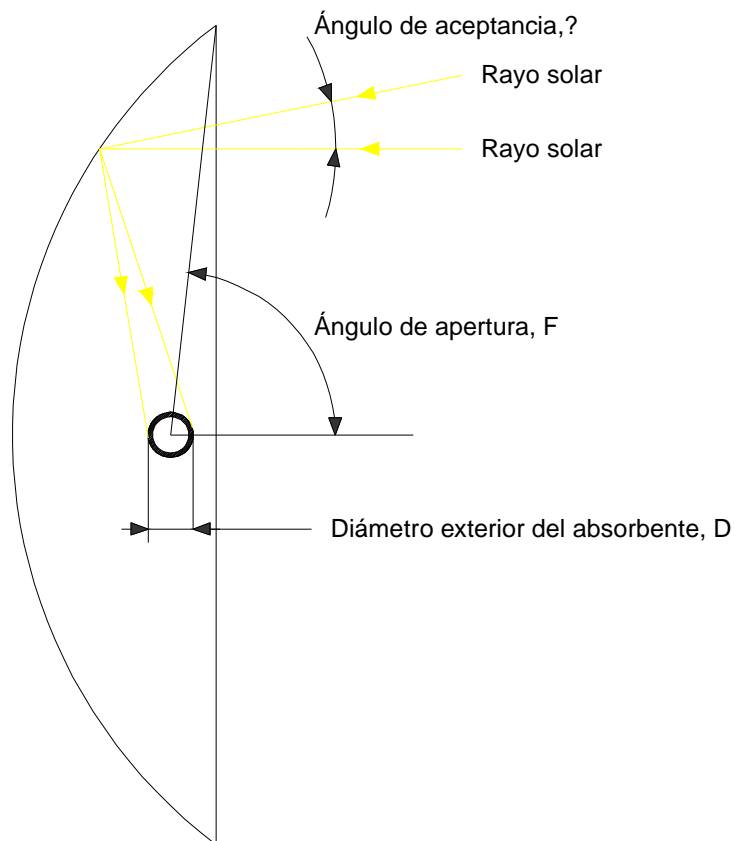
<sup>12</sup> Colector EUROTROUGH

Donde:

- A: La apertura del colector
- D: El diámetro del tubo receptor
- C: Longitud del concentrador

El ángulo de aceptación  $\theta$ , es el ángulo máximo que pueden formar dos rayos en un plano transversal de la apertura del colector de tal manera que los rayos reflejados intercepten el tubo absorbente, como se detalla en la figura 4.5.

Los valores usuales de la razón de concentración están alrededor de 20, aunque el valor máximo teórico está en torno a 220.



**Figura 4.5** Elementos de un Concentrador Cilíndrico Parabólico

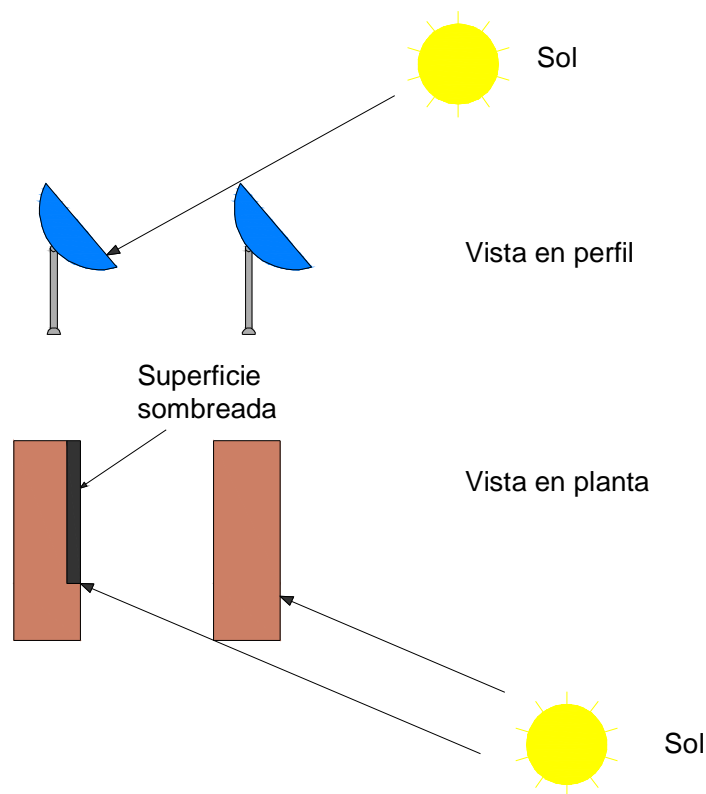
- **Pérdidas en un Colector Cilíndrico Parabólico**

La radiación solar que llega a la superficie de un colector parabólico, se desaprovecha una cantidad importante de ella debido a diferentes factores, las pérdidas pueden ser geométricas, térmicas desde el tubo receptor al ambiente y las ópticas.

- i. *Pérdidas geométricas*

Provocan una disminución del área efectiva de captación de los colectores, estas pérdidas dividen en dos grupos.

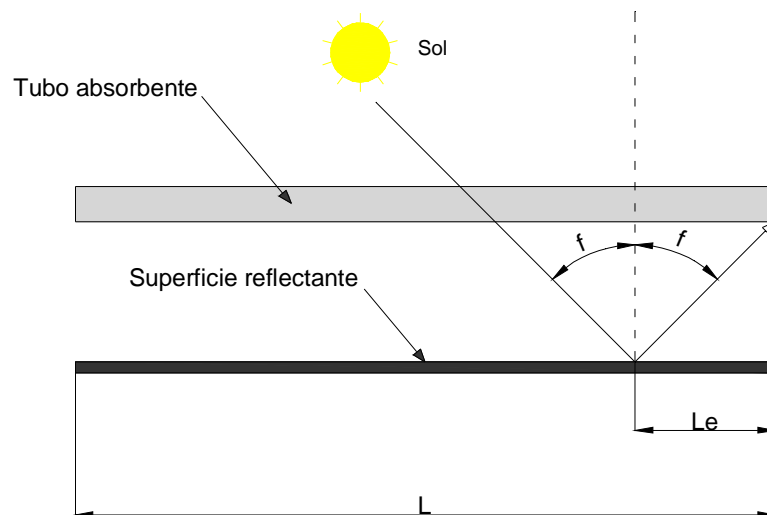
- a. Por la posición relativa de los colectores entre sí que generan sombras parciales, la Figura 4.6 describe este tipo de pérdidas geométricas por sombra.



**Figura 4.6** Pérdidas geométricas debidas a sombras entre filas paralelas.

- b. Las pérdidas de cada colector son causadas por el hecho de que los colectores están previstos de un sistema de seguimiento solar en un solo eje, dando lugar a la existencia del llamado ángulo de incidencia.

En la figura 4.7 se indica un corte longitudinal de un colector cilíndrico parabólico, en la cual se indica que la radiación reflejada por el tramo de superficie reflectiva de longitud  $L_e$ , no puede interceptar el tubo absorbente.



**Figura 4.7** Corte longitudinal de un CCP, mostrando el ángulo de incidencia

Donde:

- L: longitud del concentrador parabólico
- $\varphi$ : ángulo de incidencia
- F: distancia focal

El área de colector  $S_E$  que se pierde por la radiación reflejada, viene dado por la ecuación 4.2.

$$S_E = A \cdot L_E = A \cdot F_m \cdot \tan(\varphi) \quad (4.2)$$

$$F_M = F + \left( \frac{F \cdot A^2}{48 \cdot F} \right) \quad (4.3)$$

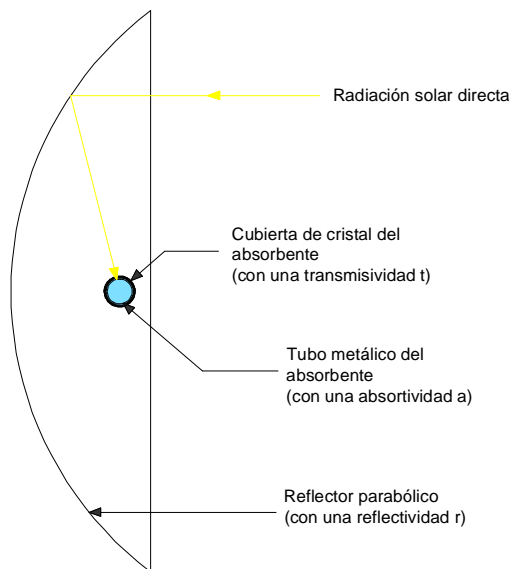
Donde:

- A: ancho del concentrador cilindro parabólico.
- L: longitud del concentrador cilindro parabólico.
- F: distancia focal de la parábola.
- F<sub>m</sub>: distancia media entre la superficie de la parábola y el absorbente.
- φ: ángulo de incidencia de la radiación solar directa.

### iii. Pérdidas ópticas

La superficie reflexiva del concentrador no es perfecta, el vidrio que cubre al tubo absorbente metálico no es totalmente transparente.

En la figura 4.8, se indican los parámetros que intervienen en las pérdidas ópticas.



**Figura 4.8** Pérdidas ópticas en un CCP

La *reflectancia* de la superficie del concentrador parabólico ( $r$ )

Está alrededor del 90%, estos valores disminuyen progresivamente conforme aumenta la suciedad<sup>13</sup> en la superficie.

El *factor de intercepción* ( $\gamma$ ).

Un valor típico de este parámetro óptico es 95%.

La *transmitancia de la cubierta de cristal* ( $t$ ).

Tiene un valor alrededor del 90 y 95%, dependiendo de que el cristal tenga o no un tratamiento anti-reflexivo o no.

La *absortancia de la superficie selectiva* ( $a$ )

Tiene un valor alrededor del 90% y 96%.

El rendimiento óptico es producto de los cuatro parámetros, como se detalla en la ecuación 4.4.

$$\eta_{\text{óptico}} = r \cdot a \cdot t \cdot \gamma \quad (4.4)$$

*iv. Pérdidas térmicas.*- se producen principalmente en dos lugares: en el tubo absorbedor y en las tuberías de fluido térmico, siendo más considerables las del tubo absorbente.

En la práctica las pérdidas térmicas globales  $Q_L$ , se calculan mediante un coeficiente global de pérdidas térmicas desde el tubo absorbente al ambiente,  $U_L$ , como se talla en la ecuación 4.5, el coeficiente global de pérdidas viene dado por unidad de área del tubo absorbente y sus unidades son ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).

---

<sup>13</sup> La reflectividad de los colectores parabólicos de la Plataforma Solar de Almería, es 92% cuando los colectores están limpios, disminuyen a un razón de 0.26% por día, debido a la suciedad progresiva de los espejos.

$$Q_L = Q_{\text{abs radiación}} + Q_{\text{abs convección}} = U_L \cdot \pi \cdot D_o \cdot L \cdot (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}}) \quad (4.5)$$

Donde:

$T_{\text{abs}}$ : temperatura media del tubo absorbente metálico.

$T_{\text{amb}}$ : temperatura ambiente.

$D_o$ : diámetro exterior del tubo metálico absorbente.

$L$ : longitud de dicho tubo (la longitud del CCP).

#### ▪ Rendimiento de un Concentrador Cilíndrico Parabólico

En un concentrador cilíndrico parabólico podemos encontrar rendimientos como:

- *Rendimiento óptico*  $\eta_{\text{opt}_0^\circ}$

Son las pérdidas ópticas que tienen lugar en el colector con un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ .

- *Rendimiento térmico*  $\eta_{\text{th}}$

Son todas las pérdidas térmicas que tienen lugar en el colector.

- *Rendimiento global*  $\eta_{\text{global}}$ .

Son las pérdidas, tanto ópticas como geométricas y térmicas, que tienen lugar en el colector.

- *Modificador por ángulo de incidencia*  $K$ .

Se toma en cuenta todas las pérdidas ópticas y geométricas que tienen lugar en el colector para un ángulo de incidencia  $\phi \neq 0^\circ$  y que no se tienen en cuenta en  $\eta_{\text{opt}_0^\circ}$



K depende directamente del ángulo de incidencia,

$$K=1 \rightarrow \varphi = 0^\circ, \text{ y}$$

$$K=0 \rightarrow \varphi = 90^\circ.$$

La energía solar incidente sobre un colector cilindro parabólico viene dada por la ecuación 4.6.

$$Q_{\text{sol}} = S_c \cdot I \cdot \text{Cos}(\varphi) \quad (4.6)$$

Donde:

$Q_{\text{sol}}$ : energía solar incidente sobre el colector (W)

$S_c$ : área de apertura de la superficie reflexiva del colector (m<sup>2</sup>)

I: radiación solar directa (W/m<sup>2</sup>)

$\varphi$ : ángulo de incidencia

La energía térmica útil suministrada por el colector viene dada, en términos del incremento entálpico que experimenta el fluido de trabajo en el colector, en la ecuación 4.7.

$$Q_{\text{útil}} = q_m \cdot (h_{\text{sale}} - h_{\text{entra}}) \quad (4.7)$$

Donde:

$Q_{\text{útil}}$ : energía térmica útil suministrada por el colector (W).

$q_m$ : caudal másico del fluido de trabajo (kg/s).

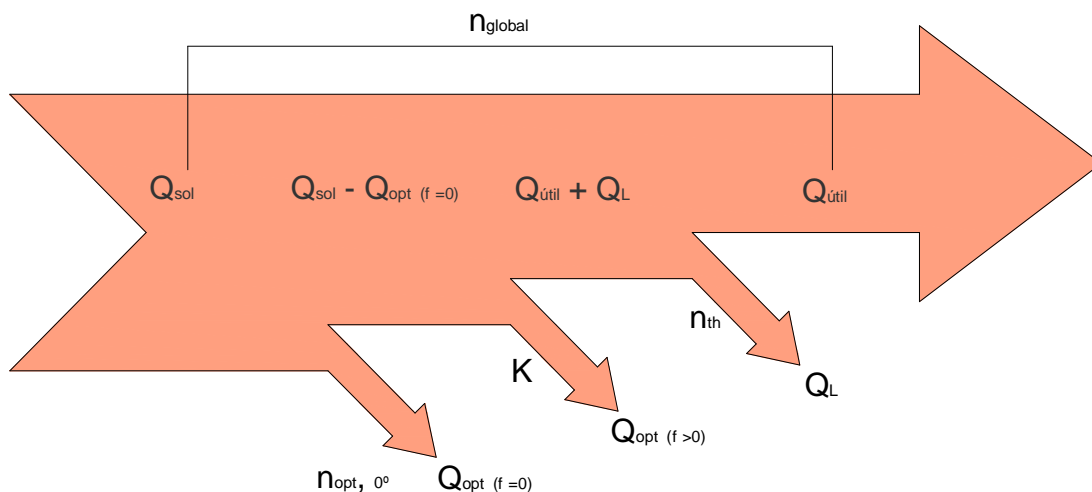
$h_{\text{sal}}$ : entalpía del fluido de trabajo a la entrada al colector (J/kg).

$h_{\text{ent}}$ : entalpía del fluido de trabajo a la salida del colector (J/kg).

El rendimiento global del colector, es el cociente entre la energía térmica útil suministrada por el colector y la energía solar incidente sobre el colector, se expresa en la ecuación 4.8.

$$\eta_{\text{global}} = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{sol}}} \quad (4.8)$$

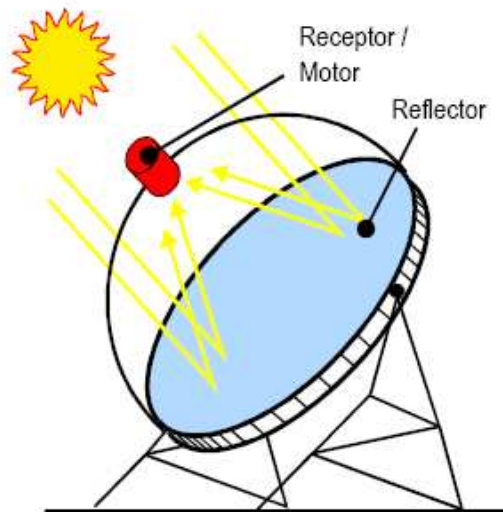
En la figura 4.9, se representa el balance energético, en el que intervienen los rendimientos y el modificador por ángulo de incidencia, que actúan en un sistema concentrador cilíndrico parabólico.



**Figura 4.9** Diagrama de pérdidas y rendimientos de un CCP

## 4.2 PARABOLOIDES DE REVOLUCIÓN

El sistema de concentración de discos parabólicos, se componen de un reflector o un conjunto de reflectores que tienen la forma de paraboloide de revolución, un receptor situado en el foco de dicho paraboloide y un sistema de generación eléctrica compacto, que suele formar un solo bloque con el receptor.



**Figura 4.10** Diagrama de pérdidas y rendimientos de un CCP

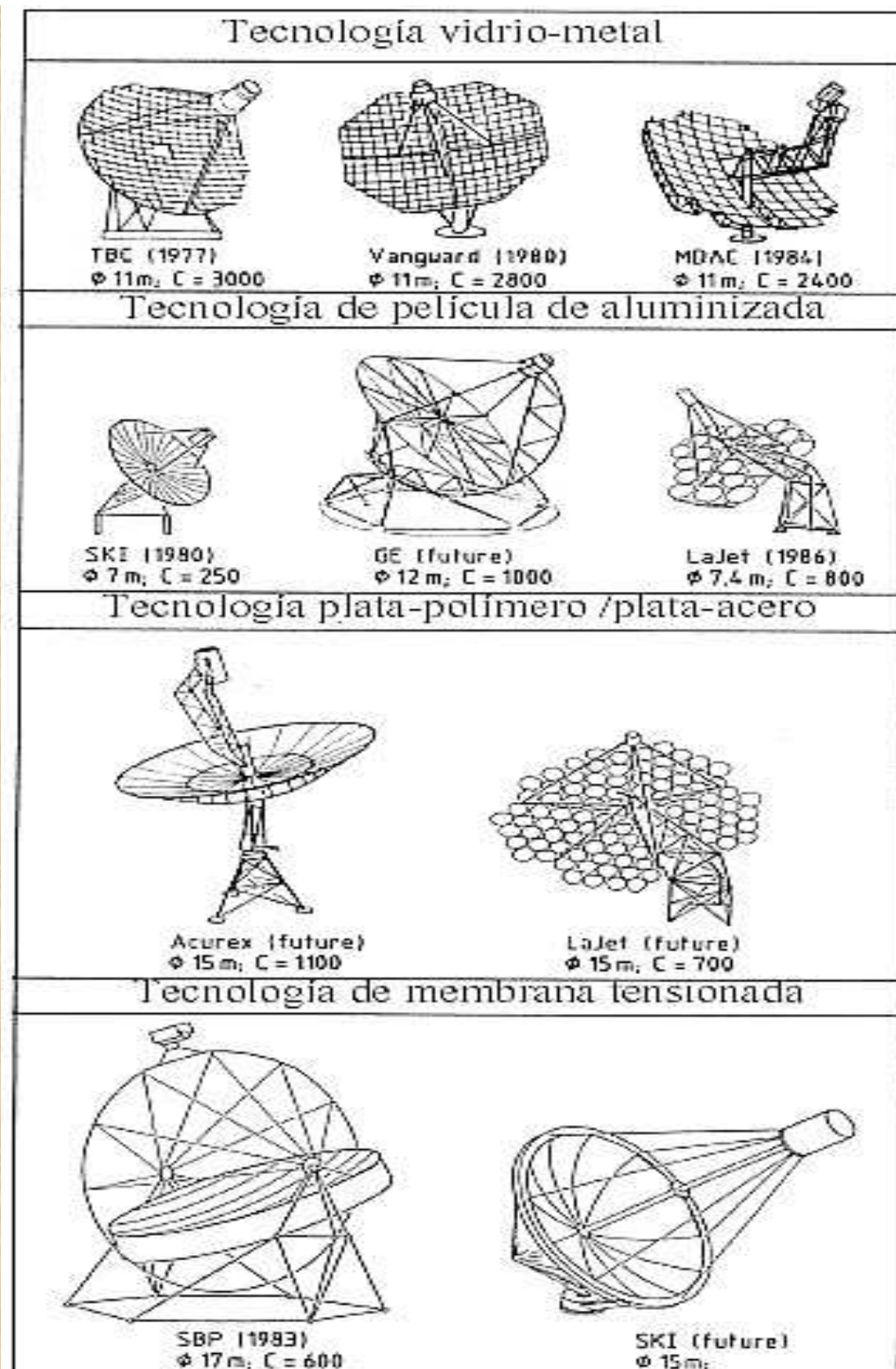
La radiación solar que es concentrada por el paraboloide incide sobre el receptor, en el cual se convierte en energía térmica que permite generar electricidad, previo a un trabajo mecánico, se caracteriza por un alto rendimiento, modularidad y autonomía.

#### **4.2.1 COMPONENTES DE UN DISCO PARABÓLICO**

##### **a) Concentrador**

Tiene la forma de un paraboloide de revolución, el tamaño del concentrador depende de la potencia nominal y de la energía que se requiere generar en un periodo de tiempo en determinadas de radiación solar y rendimientos de los elementos que constituyen el sistema.

Los discos parabólicos son construidos de forma que se aproximen a la geometría del paraboloide, esta superficie reflexiva se consigue a base de espejos de vidrio o de películas reflectante, en la figura 4.11, se ilustran distintos tipos de concentradores.



**Figura 4.11** Sistemas de discos parabólicos con concentrador de facetas discretas (izquierda); y con concentrador de membrana pensionada (derecha)

## **b) Estructura y sistema de seguimiento**

Este sistema dispone de una estructura soporte y un mecanismo de seguimiento al sol en dos ejes, con objeto de seguir la posición del sol en todo momento.

Tipos de montaje empleados

- **Seguimiento en acimut-elevación.**- En el que el movimiento se realiza según dos ejes, vertical y horizontal.
- **Seguimiento polar.**- El movimiento en un eje es muy lento, pues sólo debe seguir las variaciones estacionales del sol, y el movimiento en el otro eje es a velocidad constante.

## **c) Receptor**

El receptor de un sistema de discos parabólicos tiene dos funciones fundamentales:

- Absorber la radiación solar reflejada por el concentrador.
- Transferir la energía absorbida al fluido de trabajo de la máquina térmica asociada.

Los receptores de cavidad se emplean generalmente para sistemas de alta temperatura; el empleo de receptores externos, presenta algunas ventajas para sistemas de baja temperatura, en los que la radiación concentrada entra por una apertura que se encuentra situada en el foco del paraboloide incidiendo posteriormente sobre el absorbedor, de tal manera que se disminuyen las pérdidas radiactivas y convectivas, así como homogenizan el flujo radiante incidente sobre el absorbedor y reduce su valor máximo.

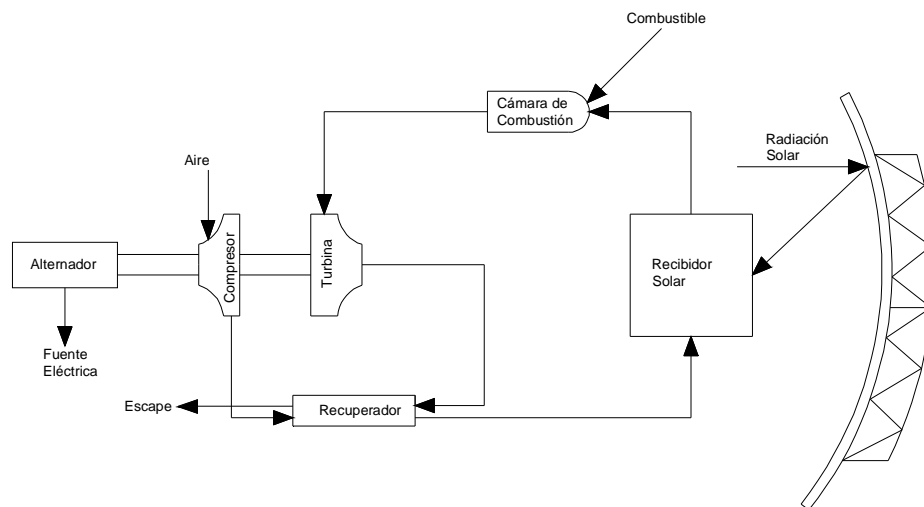
Se han empleado dos tipos de receptores para los sistemas de discos parabólicos.

- Receptores de tubos directamente iluminados los que permiten una adaptación directa del calentador de los motores Stirling.
- Receptores de reflujo emplean un fluido intermedio para la transmisión del calor.

#### d) Sistema generador

Está constituido por un ciclo termodinámico de potencia o máquina térmica y el generador propiamente dicho, que transforma la energía mecánica en electricidad, el desarrollo de los sistemas de discos parabólicos ha estado muy ligado a los motores Stirling, en la actualidad se comienza a emplear también ciclos de turbinas de gas.

Las potencias de estos motores o turbinas suelen oscilar entre los 5 y los 25 Kw, con rendimientos entre el 30% y el 40%.



**Figura 4.12** Esquema de un sistema disco parabólico - turbina de gas con recuperación e hibridación <sup>14</sup>

<sup>14</sup> Tiene la posibilidad de utilizar un combustible fósil, para alternar con la energía solar.

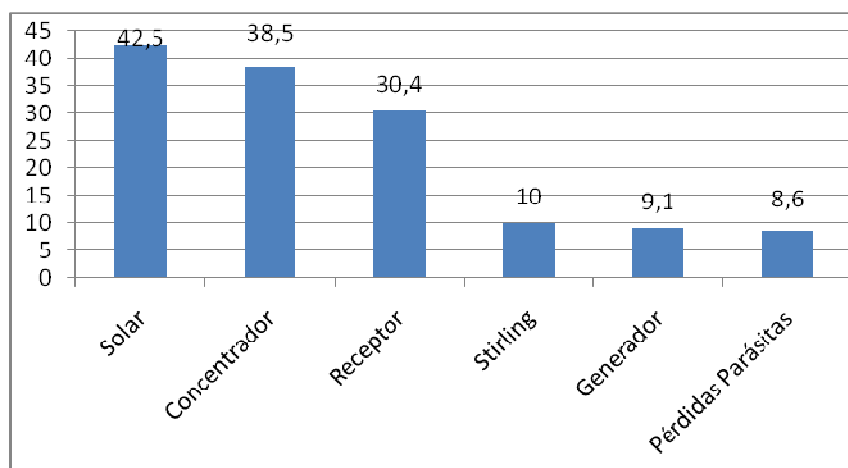
## 4.2.2 BALANCE ENERGÉTICO

Los parámetros que caracterizan el concentrador son los siguientes:

- Área de apertura del concentrador  $A_{pp}$ .
- Área de apertura del receptor,  $A_{rec}$
- Fracción del área de apertura no sombreada,  $E$ .
- Reflectividad de la superficie,  $\rho$ .
- Fracción de intercepción<sup>15</sup>  $\varphi$ .

El receptor, así como la máquina térmica o ciclo de potencia y el generador, vienen caracterizados por sus respectivos rendimientos energéticos, definidos como cocientes entre las potencias de salida y entrada a cada uno de estos componentes.

En la figura 4.13, se observa las pérdidas y rendimiento de un concentrador Cilíndrico Parabólico, de cada uno de los componentes, del 100% de la energía solar recibida, el concentrador tiene un 81%; el receptor tiene 68,9%; el disco Stirling 22,6%; y el generador 91% de rendimiento y un 19.5% lo que respecta a las pérdidas por diversas circunstancias.

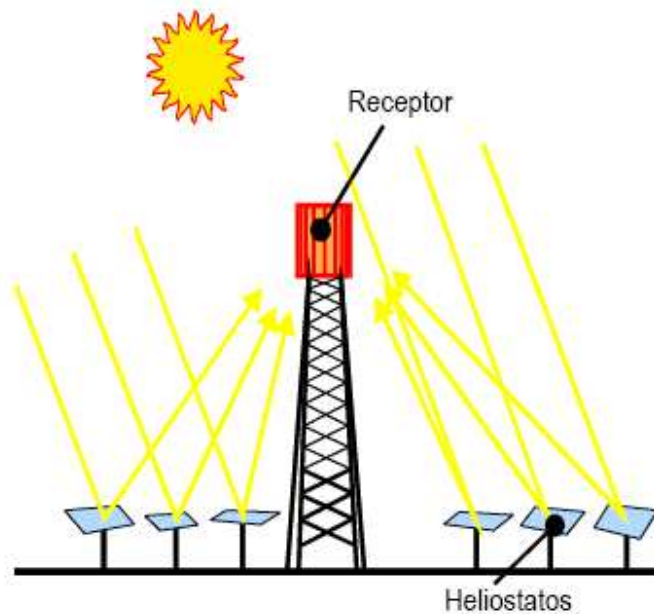


**Figura 4.13** Pérdidas y rendimientos en el Sistema de Disco Parabólico EuroDish

<sup>15</sup> Fracción de la energía reflejada por el concentrador que entra en el receptor, cuando alcanza la superficie absorbadora.

### 4.3 TORRE DE POTENCIA

Es un sistema que está compuesto por varios concentradores individuales llamados helióstatos, que dirigen la radiación solar concentrada hacia un receptor central, normalmente situado a una cierta altura sobre el suelo en una torre, este sistema de torre de potencia concentra la radiación solar en tres dimensiones, por lo que pueden alcanzar un valor elevado de la razón de concentración y, por tanto, operar eficientemente hasta elevadas temperaturas, arriba de los 1000 °C.



**Figura 4.14** Principio de funcionamiento de un sistema de receptor central

#### 4.3.1 COMPONENTES DE UNA TORRE DE POTENCIA

##### a) La torre

Es el lugar donde va ubicado y soporta al receptor, ya que debe estar situado a una cierta altura sobre el nivel del campo de helióstatos, para reducir las sombras y bloqueos entre éstos y los diferentes elementos auxiliares como los sistemas de medida.



Las torres más comunes son las de estructura metálica, se han realizado de hormigón, y también se puede utilizar la cúspide de una montaña si en las faldas de esta, se puede ubicar el campo de heliostatos.

### **b) El heliostato**

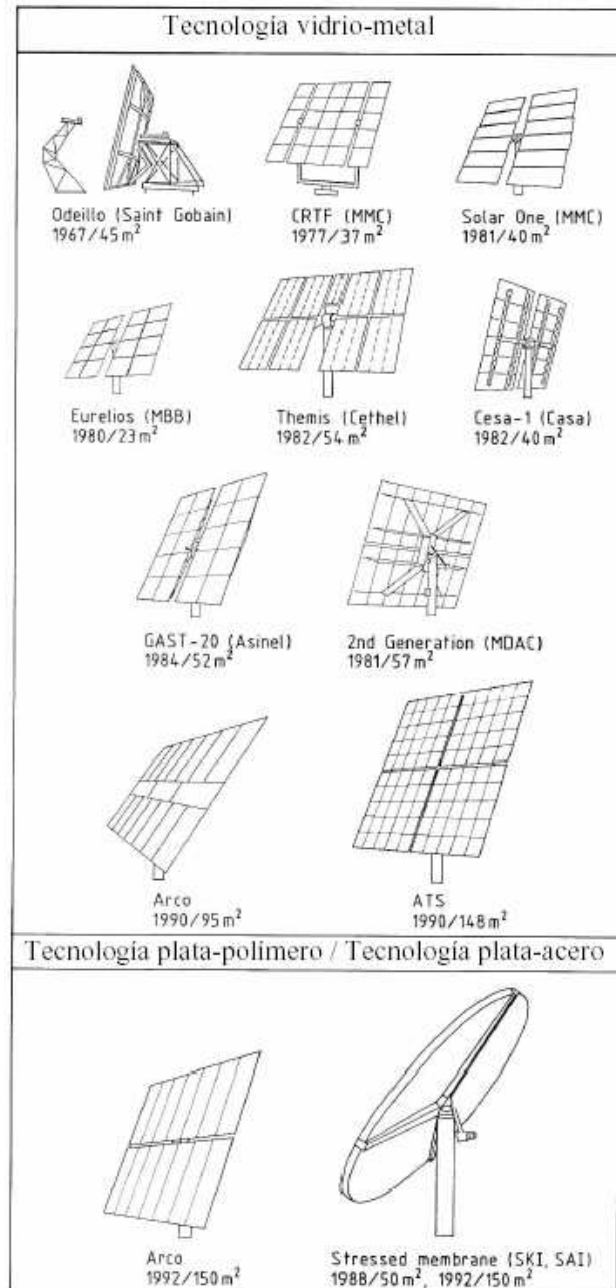
El heliostato es una serie de espejos que están distribuidos alrededor de la torre, los mismos que están encargados de captar la radiación solar y redirigirla hacia el receptor que se encuentra en la torre, estos representan una fracción muy significativa de hasta el 60% del costo del sistema de torre solar, al utilizar el sistema automatizado de seguimiento.



**Figura 4.15** Heliostato de vidrio-metal de 90 m<sup>2</sup> de superficie reflexiva

Un heliostato está compuesto básicamente por una superficie reflectante, una estructura soporte, mecanismos de movimiento y un sistema de control, las superficies reflectantes más empleadas hasta hoy son a base de espejos de vidrio, también se han empleado superficies reflectantes a base de películas poliméricas de alta reflectividad. El mayor inconveniente para la introducción de esta última tecnología es su menor durabilidad.

La superficie reflexiva por heliostato ha ido evolucionando hacia tamaños cada vez mayores, como se puede observar en la figura 4.16, partiendo de unos 40 – 50 m<sup>2</sup> para los heliostatos de las primeras plantas hasta llegar a los 150 m<sup>2</sup> de algunos desarrollos recientes.

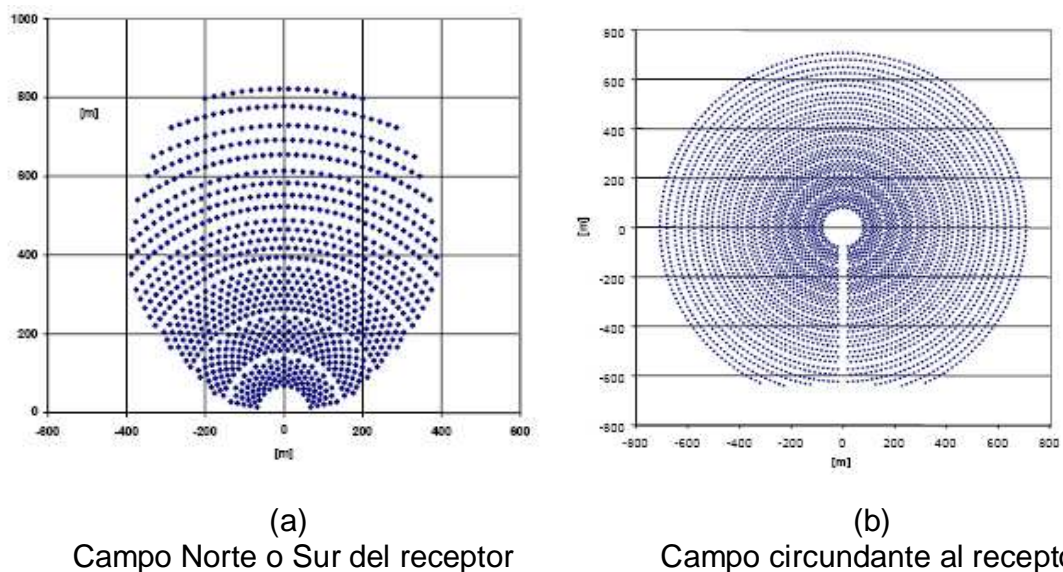


**Figura 4.16** Evolución de las principales tecnologías de construcción de heliostatos

En la actualidad se están utilizando helióstatos de tamaño pequeño, debido a simplificación y abaratamiento de los procesos de transporte, instalación y puesta en servicio.

La disposición del campo de helióstatos en relación al receptor está condicionada en gran medida por las características del terreno disponible, por el tamaño de la planta y por la posición del receptor.

Una disposición clásica de los espejos es la disposición alrededor del receptor o campo circundante, o aquella que está dispuesta a un lado de la torre, puede ser en el campo Norte o en el campo Sur, de acuerdo a la latitud del emplazamiento de una torre, sobre la cual se sitúa el receptor, como se muestra en la Figura 4.17, sin embargo se han propuesto otras disposiciones, con las cuales se aprovecha la orografía del terreno.



**Figura 4.17** Disposición de helióstatos alrededor del receptor

### c) El receptor

El receptor es un dispositivo donde se produce la conversión de la radiación solar concentrada en energía térmica, en la cual aumenta de entalpía del fluido.

A continuación se detalla, en la tabla 4.1, diferentes tipos de receptores utilizados en los diversos proyectos y el respectivo fluido de trabajo con el cual funcionan.

**Tabla 4.1** Tipo de receptores de diversas características operativas con distintos fluidos de trabajo

Punto de vista	Tipo de receptor		Proyecto
Geometría	De cavidad		CESA 1 SOLGAS
	Extremos	Planos	SSPS ASR Phoebus TSA
		Cilíndricos	Solar One Solar TWO
		Semicilíndricos	PS10
Transferencia de Calor	Absorción directa		
	Absorción indirecta	los tubulares	Solar One Solar Two CESA-1 ASR GAST
		los de placa	RAS
		los volumétricos	Atmosféricos o presurizados
Fluido de trabajo	Agua-Vapor	Evaporación y sobrecalentamiento	Solar One CESA-1
		Solo evaporación	SOLGAS Colón Solar STEOR
	Aire		Phoebus TSA GAST
	Sales fundidas		Solar Two
	Sodio fundido		SSPS ASR
	Partículas sólidas		

**Fuente.-** Realizado por Rubén Salinas y Paúl Calvopiña

Los receptores pueden ubicarse en el centro del campo especular o también desplazados como se observa en la figura 4.19; el receptor debe estar ubicado en el campo visual de los espejos, mientras se encuentre a mayor altura que los espejos, se evitarán problemas de interferencia y solapamiento.

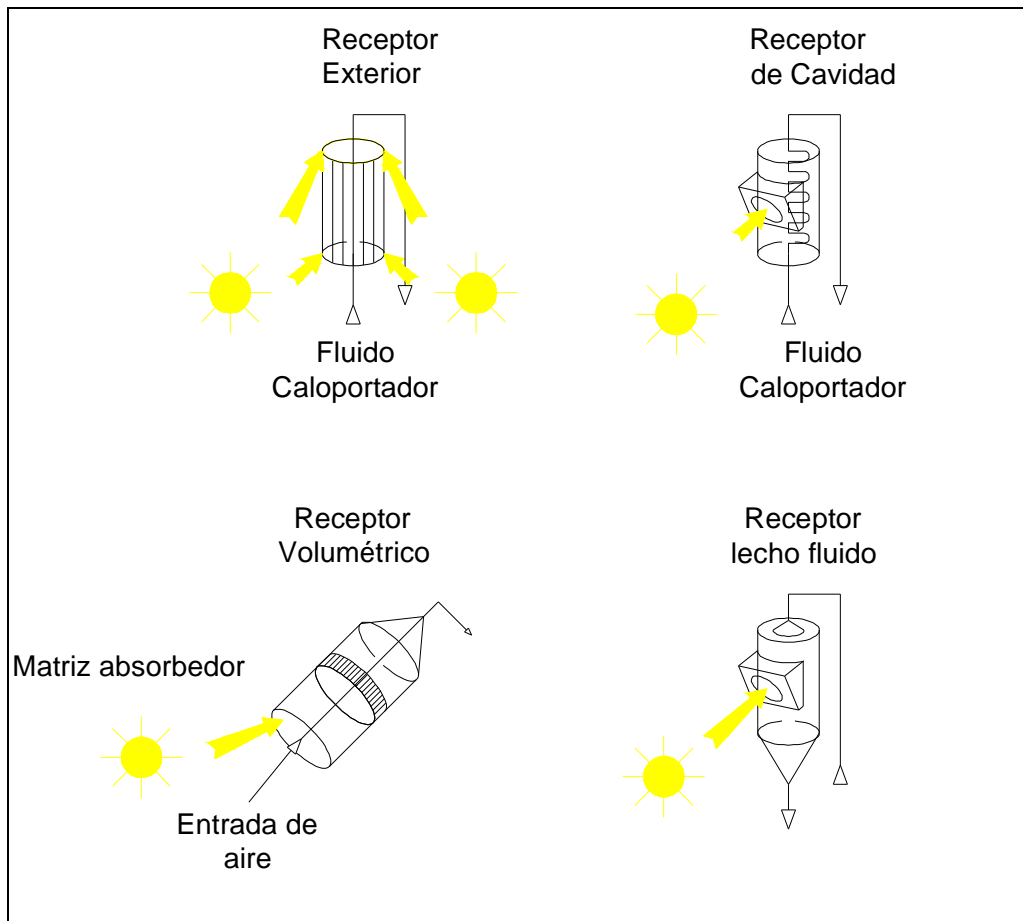
De acuerdo a la manera en que se absorbe la energía, los receptores pueden ser de dos tipos:

- a) De cavidad
- b) De recepción energética exterior

Los receptores de cavidad suelen tener un eje vertical o uno horizontal, poseen una abertura por la cual penetran los rayos solares, mismos que tienen dimensiones mayores que los espejos más alejados, tomando en cuenta aspectos como la dispersión de la luz reflejada. Dentro de esta cavidad podemos obtener una absorción de luz de hasta un 95% y, relaciones de concentración comprendidas entre 300 y 3500  $\text{kw/m}^2$ .

Los receptores de cavidad de eje horizontal ofrecen mayores ventajas cuando la altura de la torre sea relativamente pequeña y, cuando la torre se ubica muy cerca a los helióstatos se utiliza cavidades de eje vertical.

Los receptores que absorben la energía solar desde su parte exterior son diseñados generalmente como volúmenes de revolución, siendo los ejes de simetría, tanto verticales como horizontales, estos dependen de la forma del campo de helióstatos.



**Figura 4.18** Esquema de receptores

No se ha podido determinar que tecnología de receptor es mejor que otra, ya que la elección de una u otra depende no solo de factores técnicos, sino también de política industrial, mientras la industria estadounidense apuesta por la tecnología de sales fundidas, la europea se inclina hacia los receptores volumétricos de aire, ya sean atmosféricos o presurizados, o los receptores de vapor de agua.

**Tabla 4.2** Receptores - Condiciones de operación

Tipo Absorbente	Tubos		Absorción directa	Volumétrico	
Tipo de fluido	Agua/vapor	Sodio líquido	Sales fundidas	Metálico	Cerámico
				Aire	
<b>Flujo (MW/m<sup>2</sup>)</b>					
<b>Promedio :</b>	0,1 – 0,3	0,4 – 0,5	0,4 – 0,5	0,5 – 0,6	0,5 – 0,8
<b>Pico :</b>	0,4 – 0,6	1,4 – 2,5	0,7 – 0,8	0,8 – 1,0	0,9 – 1,6
<b>Temperatura de salida Fluido(C)</b>	490 – 525	540	540 - 565	700-800	800-1200

Fuente.- <http://www.uib.es>

#### 4.3.2 BALANCE ENERGÉTICO

El balance energético de un campo solar de un sistema de receptor central, tiene los principales procesos.

- Captación de la radiación solar por el campo de helióstatos.
- Transmisión de la radiación solar a través de la atmósfera hasta el receptor.
- Captación de la radiación solar concentrada por el receptor.
- Conversión fototérmica.
- Conversión de la energía térmica en energía mecánica.
- Generación de electricidad.

Durante la transición y el transcurso del de un proceso a otro, cada uno trae consigo pérdidas asociadas, como se puede observar en la tabla 4.3, esto depende de la capacidad de captación, factores atmosféricos, la factores termodinámicos, que atenúan con la capacidad y eficiencia del sistema.

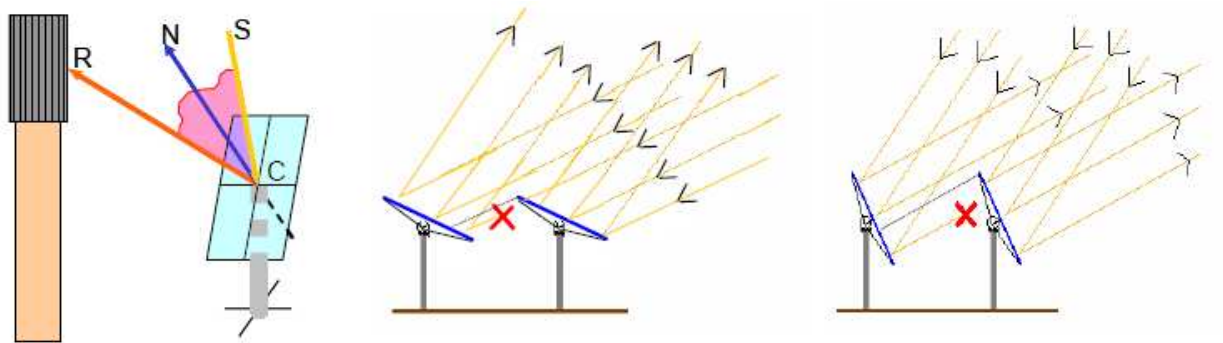
**Tabla 4.3 Pérdidas en el Sistema de Torre de Potencia**

PÉRDIDAS		CAUSAS	
Perdidas por captación	Pérdidas Geométricas	Reducción del área proyectada visible para el sol	Inclinación del eje óptico del heliostato, respecto rayos solares. Factor coseno. Figura 4.20
		Por sombras	Ocasionados por los heliostatos y elementos que lo conforman
		Por bloqueos	Fracción solar reflejada por los heliostatos. Reducción del área útil reflexiva
	Pérdidas por reflectividad	los heliostatos no reflejan en su totalidad la radiación solar	reflectividad - Longitud de onda
Transmisión a través de la atmósfera	Atenuación	absorción y dispersión	aumenta proporcional a la distancia que recorre la radiación reflejada
Captación de la radiación solar concentrada por el concentrador. Figura 23.	Imperfecciones	Factor de desbordamiento o spillage.	Imperfecciones en superficies reflexivas. Direccionamiento de heliostatos
Conversión Fototérmica	Radiación	Reflexión	Absorbidad emisión depende de la temperatura y emisividad de la superficie absorbedora
	Convección	Natural	viento (receptor)
		Forzada	
Conducción	desde el receptor hacia los elementos		
Parte convencional		Generadores de vapor (en caso de existir)	intercambiadores de calor
			Turbinas
			Alternador

**Fuente:** Rubén Salinas y Paúl Calvopiña

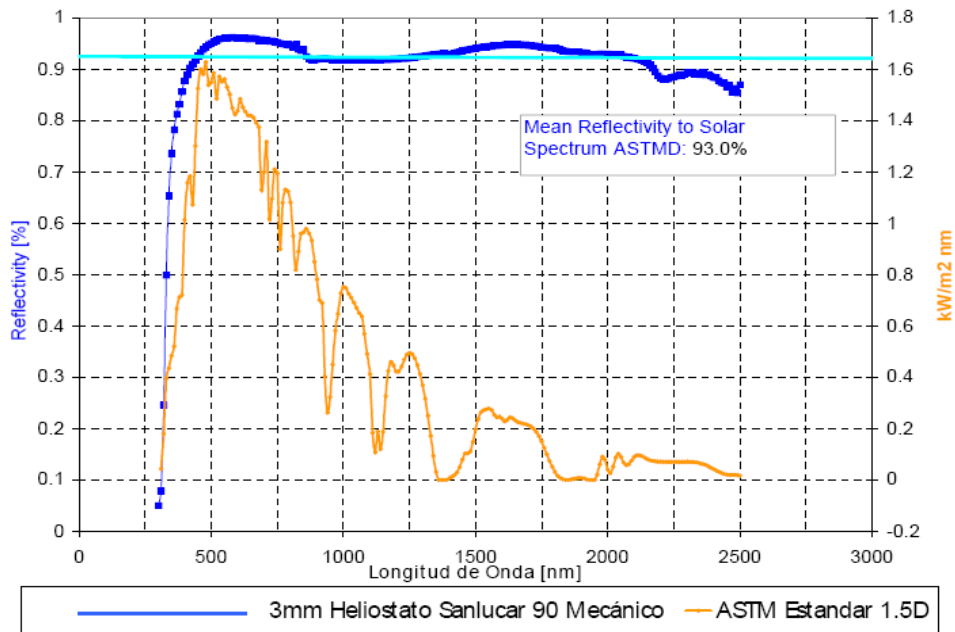


Las pérdidas por captación son principalmente debido a la geometría del campo solar en el cual se ubican los helióstatos, la torre, y receptor, además de la posición del sol; dependiendo fundamentalmente del tiempo, las pérdidas debido a las sombras y bloqueos, que se cuantifican en un solo factor denominado factor de sombras y bloqueos, como se puede observar en la figura 4.19, la cual ilustra las pérdidas.



**Figura 4.19** Pérdidas por factor coseno, sombras y bloqueos

Las pérdidas por reflectividad debido a que parte de la radiación es absorbida por el conjunto conformado por los helióstatos, para la cuantificación de este factor se emplea un valor medio ponderado establecido en el espectro solar, como se puede observar en la figura 4.20, una curva de reflectividad espectral para un espejo de plata de 3mm.



**Figura 4.20** Curva de reflectividad espectral y valor medio ponderado por el espectro solar

Las pérdidas en la transmisión a través de la atmósfera debido a que la radiación solar reflejada por el heliostato sufre una atenuación, ocasionada por los procesos de absorción y dispersión, las pérdidas en la captación por la radiación solar concentrada por el receptor son consecuencia de las imperfecciones de las superficies reflexivas, de agrupamiento de la longitud focal de las facetas por motivos de fabricación, entre otros, una parte de la radiación reflejada por el campo de heliostatos que llega a las inmediaciones del receptor no alcanza su superficie absorbedora, como se puede observar en la figura 4.21, la cual se encuentra iluminada al exterior de la cavidad.



**Figura 4.21** Perdidas por desbordamiento.

La conversión de la energía radiante en energía térmica tiene lugar en el receptor, donde se producen una serie de pérdidas por radiación ocasionado por la absorptancia y las pérdidas por emisividad, las pérdidas por convección son debido al viento y es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie absorbidora y el ambiente, y las pérdidas por conducción desde el absorbedor hacia los elementos estructurales y auxiliares en contacto con el receptor, estas pérdidas son proporcionales a la diferencia de temperatura entre el absorbedor y estos elementos.

Estos factores de pérdidas conllevan a un rendimiento global, en el cual se relaciona entre la energía o potencia de salida y la potencia o energía aportada al proceso, la Figura 4.22 representa el punto de diseño en condiciones nominales, a partir del balance energético para un sistema de receptor central.

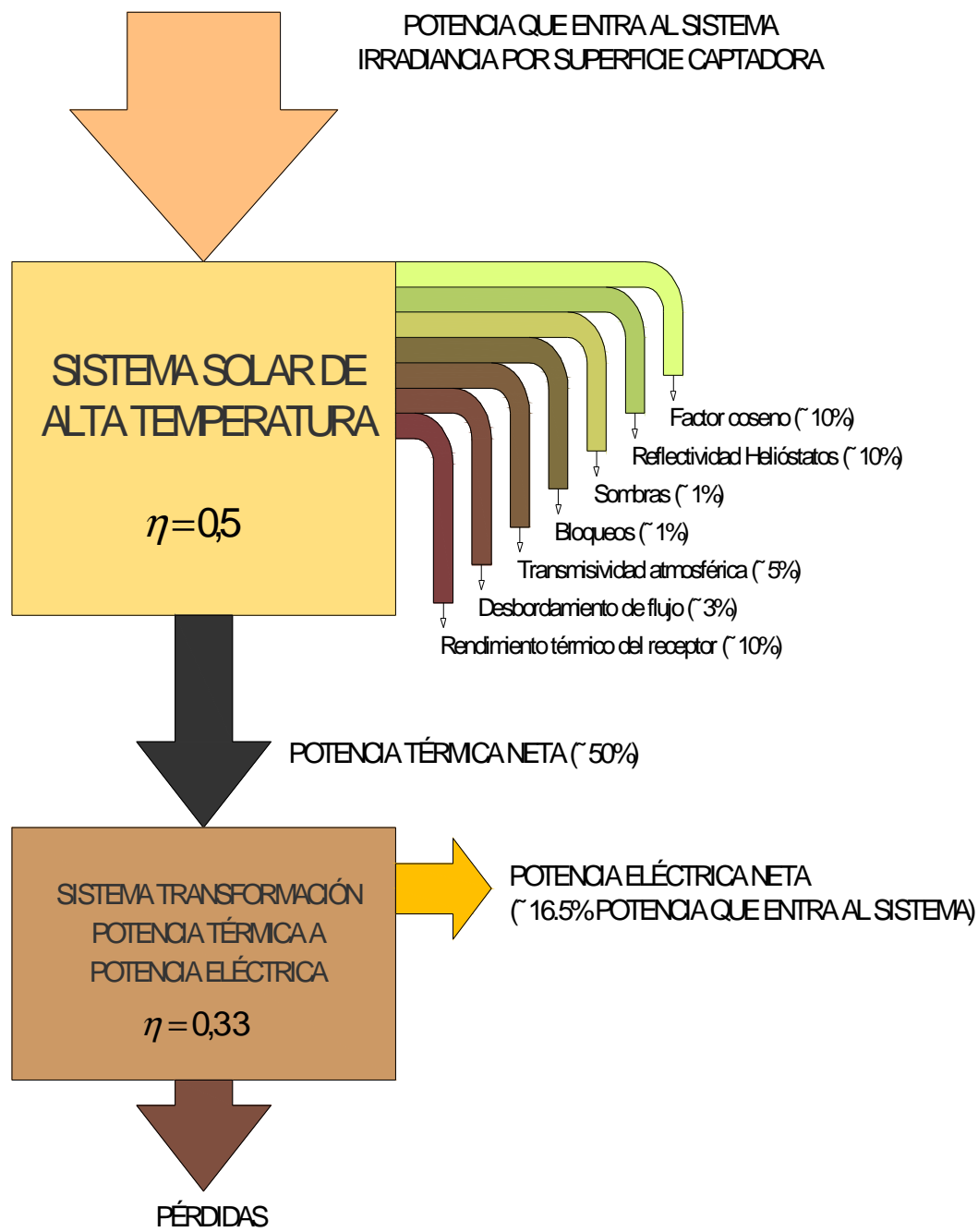


Figura 4.22 Diagrama de un balance energético

En la tabla 4.4, que se detalla las diversas formas y variaciones, que se puede utilizar en el diseño, construcción y montaje de un sistema de torre de potencia, de acuerdo a pruebas realizadas y a estudios efectuados en los distintos proyectos efectuados hasta la actualidad.

**Tabla 4. 4** Principales opciones tecnológicas en sistemas de receptor central

Sistema colector	Helióstatos	Vidrio – metal Membrana tensa o estirada con película reflectante Superficie de 40 a 150 m <sup>2</sup>
	Geometría:	Cavidad Externo plano (campo norte / sur) Externo semicilíndrico (campo norte sur) Externo cilíndrico (campo circular)
Receptor	Transferencia de calor	Tubular Volumétrico Absorción directa
	Fluido de trabajo	Agua Aire Sales fundidas: Sodio, Partículas.
Concentración secundaria	Trompeta SCOT	
Ciclo de potencia	Turbina de vapor Turbina de gas	
Sistema de almacenamiento	Aceite térmico Sales fundidas Sodio Rocas elementos cerámicos	

Fuente.-Salinas, R. y Calvopiña, P.

## **Sistema seguimiento automático del helióstato**

El helióstato de una Torre de Potencia Solar requiere de un preciso posicionamiento en dos ejes para enviar y mantener el rayo reflejado por el espejo guiado hacia el receptor conocido y definido por tres coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

A través de un control local se podrá realizar funciones de cálculo, para guiar a los ejes del helióstato manteniendo constantemente iluminado al foco durante el transcurso del día, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

El helióstato conformado por vidrio y metal, es una superficie reflectante con dos ejes de movimiento conocidos como giro acimutal y giro de elevación, el cual es manipulado por un control local, el cual es activado por un sistema de alimentación ininterrumpida mediante una placa fotovoltaica y una batería, el cual es capaz de pilotar a los motores de corriente continua con el objeto de cumplir con el seguimiento normal al sol, obteniendo una mayor captación de energía fotovoltaica.

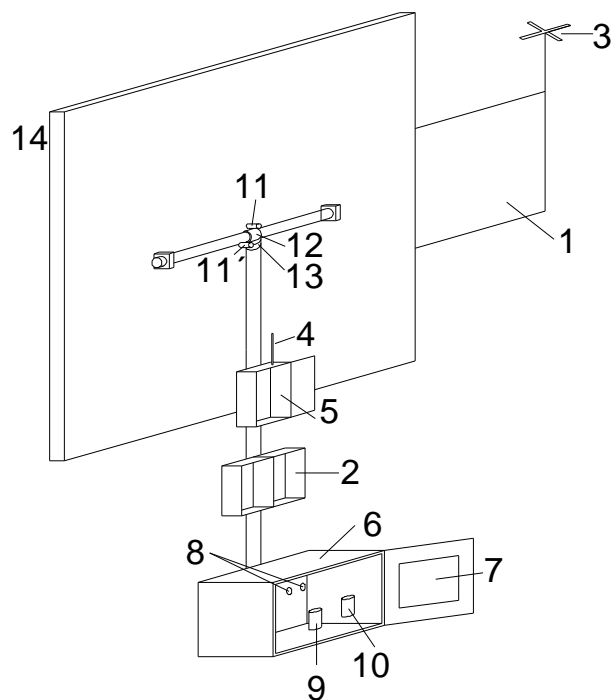
Para la eliminación total del cableado externo, el helióstato es comunicado a la sala de control, mediante un radio modem de tal manera que sea una comunicación segura a través de frecuencias en el rango de los 400 a 800Mhz, de manera que se asegure los mensajes entre control local y el control central.

La información meteorológica recibida por los helióstatos, se lo realiza mediante un pequeño anemómetro e interruptor de viento, un sensor de luz y un sensor de temperatura.

El micro controlador que se incorpora a la tarjeta de control empleada, es asistido por un reloj con calendario, el cual calcula el vector solar a través de un algoritmo el cual disminuye el error de seguimiento, siendo menor a 0,5 minutos.

El control local permite la memorización permanente y modificación de los parámetros del helióstato, para facilitar las estrategias operativas, realiza una supervisión continua del funcionamiento midiendo los consumos y valores eléctricos, de tal manera que se genera un auto diagnóstico en caso de avería.

La tarjeta de control realiza un posicionamiento preciso de los ejes del helióstato gracias a la lectura de codificadores angulares incrementales y al manejo de varias velocidades del motor. Conocida la posición del sol y la de los ejes del helióstato los motores son pilotados para conseguir mantener el foco donde está ubicado el receptor, empleando una relativamente baja velocidad, aproximada entre 2° y 7° por minuto.



**Figura 4.23** Sistema de accionamiento eléctrico

## **Partes que conforman el sistema de accionamiento eléctrico del helióstato**

1. Placa fotovoltaica
2. Baterías
3. Sensor meteorológico
4. Antena de radiomodem
5. Radiomodem local
6. Control local
7. Tarjeta de control
8. Control de motores
9. Regulador de carga de baterías
10. Convertidor cc/cc
11. Motor de movimiento de elevación
- 11'. Motor de movimiento acimutal
12. Codificadores incrementales
13. Finales de carrera
14. Superficie reflectante

Para el presente no se ha implementado un sistema de accionamiento eléctrico, debido al elevado costo que involucra, ya que al ser un proyecto experimental, en el cual se realizaran pruebas de funcionamiento y no de operación constante.

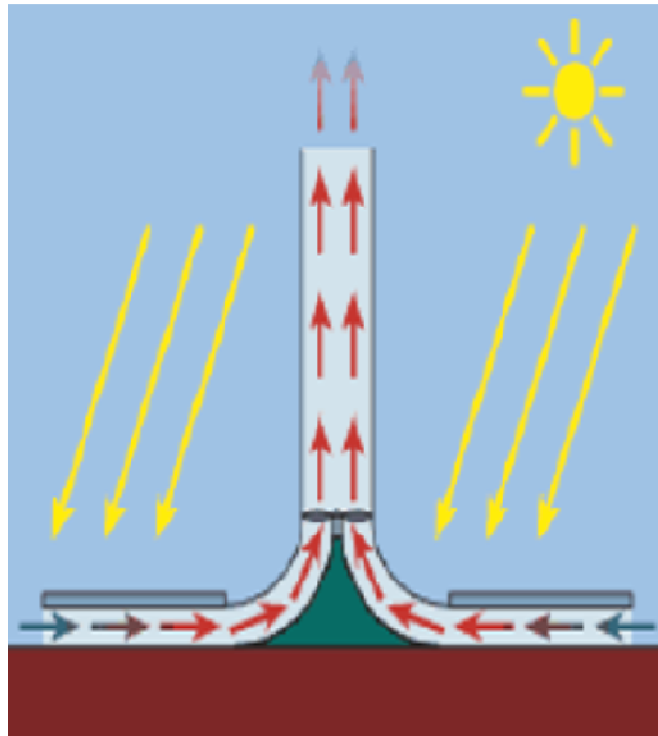


## **4.4 HORNOS SOLARES**

El horno solar es una máquina cuya función es generar viento artificial, es cual consiste en enfriar el aire seco caliente de la atmósfera alta para producir viento. Es un tubo largo vertical donde el aire seco caliente es enfriado en la parte más alta, el aire frío desciende por la torre y alcanza altas velocidades en la base de la torre. Antes que el viento abandone la torre, éste tiene que pasar por unos generadores para la producción de electricidad.

### **4.4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

Es una torre que posee una abertura en el fondo, donde son colocados los generadores. Para generar un viento fuerte y sostenido, se pulveriza agua en lo alto de la torre, ésta se evapora y hace que el aire seco caliente ingrese a la torre por poseer un mayor peso que el que se encuentra en la parte inferior. El aire más pesado baja por la torre a una velocidad cercana a los 80 km/h, cuando esto sucede, el viento pasa por un conjunto de generadores. Todo el sistema se encuentra construido y probado por tecnología y materiales que han llegado a un punto de madurez. Este sistema no requiere de colectores artificiales para concentrar la radiación solar. La superficie de la torre actúa como colector solar, durante el día, esta superficie es calentada por la radiación de onda corta que proviene del sol, la radiación hace que el suelo también se caliente, como resultado, la superficie calienta al aire. El aire caliente asciende porque posee una menor densidad. Durante la noche, el suelo continúa caliente y sigue generando aire caliente, lo que implica que el horno solar puede operar las 24 horas del día. A menudo, la salida de energía varía durante el día y de manera más amplia durante la estación, depende también de las condiciones específicas del lugar donde se está operando.



**Figura 4.24** Esquema de un horno solar

El Sistema de almacenamiento del horno solar puede producir energía durante las 24 horas del día, por esto, un sistema de almacenamiento no es necesario, el calor, que se almacena en el terreno que rodea a la torre, no puede ser utilizado de manera controlada. Existe la posibilidad de controlarlo si se cubre el terreno con una especie de invernadero. De esta manera al abrir algunas ventanas podemos controlar el flujo de calor que se extrae de la tierra, parecido a una chimenea de gran área. Si se añade un sistema de almacenamiento, no se lo utiliza para almacenar el calor, sino para almacenar la potencia generada por el horno, esto es posible pero incrementaría los costos de la electricidad. La salida de potencia de la torre puede ser controlada también con la cantidad de agua pulverizada en lo alto de la torre.

La idea de un horno solar está basada en un artículo publicado en 1975 por el Dr. Philip Carlson, un físico de California, él observó las corrientes de viento que se produce durante las tormentas de lluvia y contempló la posibilidad de generar

energía en base al mismo fenómeno. En los 80's, en el Instituto Israelí de Tecnología (Technion), un equipo de ingenieros estudió los principios del horno solar por un período de más de una década. La búsqueda de este tipo de fuentes de energía fue la carencia de abundantes reservas de energía fósil en Israel. Esto, combinado por las tensas relaciones que mantiene con sus países vecinos fue el motivo detrás de la investigación de esta energía alternativa.

El instituto israelita Technion, quien se desarrolla y se encarga de la elaboración de equipos de diseño asociados con inversores extranjeros para crear Energy Tower LTD, que planificaron la construcción de la primera torre en Arava. A finales de 1996 se firmó un contrato para la construcción de una planta piloto a escala 1:7. Estaba planeada la construcción junto a un lago salino donde ésta agua podía ser usada. El pre-diseño continuó hasta el otoño de 1997. Según el cronograma de planificación, la planta piloto debía entrar en funcionamiento dentro del primer cuatrimestre de 1999, y la planta a escala completa estaba planificada para su construcción durante 1999 a 2002, así que la planta estaba planificada que entre en funcionamiento para los israelitas en el año 2003, estas fechas han sido aplazadas. Pero hoy en día ya podemos apreciarlas y su tecnología ya ha sido probada.

De este también se puede producir agua desalinizada que proviene del mar, si las unidades de desalinización se ubican después de los generadores. Esta es una opción interesante porque esta extensión de la planta ya no depende del agua local. El agua de mar es transportada por tuberías o canales, donde es usada para enfriar el aire caliente seco al ingreso al horno, después de pasar las turbinas, el aire húmedo es conducido a los elementos de desalinización, produciendo agua fresca.

Primeros estudios muestran que una planta de 338 MW con una salida de potencia de  $3.4 \times 10^9$  kWh produce  $200 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de agua que requiere  $700 \times 10^6$  kWh. Los ingresos por venta de potencia se reduce, pero los ingresos de la venta de

agua compensa esta pérdida, porque el agua tiene un mayor valor en zonas desérticas.

El diámetro de superficie terrestre que se requiere para la construcción de un horno solar debe ser calculado, al igual que la superficie de la torre, luego ambos valores deben ser sumados.

$$\text{Superficie de la torre} = \pi \cdot \frac{\text{Diámetro de la torre}^2}{2} \quad (4.9)$$

$$\text{Área total} = \text{Superficie de la torre} + \text{superficie del helióstato} \quad (4.10)$$

$$\text{Diámetro de terreno} = \sqrt{\frac{\text{Área total}}{n}} \quad (4.11)$$

Este sistema de concentración de energía solar posee ciertas características negativas como:

- Antiestético.- se estima que una torre de 400 metros de base puede ser observada desde 20 a 25 km de distancia, lo cual genera una contaminación visual del paisaje.
- Puede ser blanco de ataques terroristas.
- Ruido.- Las turbinas producen ruido, como el motor de un avión jet.
- Área de construcción.- durante la construcción de un proyecto de estas características, mucha de la superficie se la utiliza para la construcción de bodegas, talleres, oficinas, esto afectará el ecosistema que rodea al proyecto
- Caminos.- la intervención del hombre para la construcción de estos proyectos genera la remoción de tierra, esto afecta el ecosistema que rodea el proyecto.

- Contaminación salina.- si utilizamos agua salina para enfriar el aire y si se produce una fuga, los productos de la desalinización pueden contaminar otras fuentes de agua dulce, dejándola inservible para el consumo humano.
- Un horno solar es vulnerable en caso de un terremoto, por efecto de su altura. Una solución para esto es la construcción del horno solar en superficies geológicamente estables
- Efectos meteorológicos.- una torre alta puede generar microclimas alrededor de la misma, produciendo cambios en los vientos y humedad de la zona.

Una de las ventajas de estos hornos solares, es la producción de grandes cantidades de energía libres de CO<sub>2</sub>, se produce CO<sub>2</sub> durante la construcción de la planta, pero una vez que entra en funcionamiento la producción de este gas se detiene.

La producción de agua dulce en áreas desérticas provee una ventaja sobre aquellas torres de potencia que no la producen, considerando que el agua dulce es muy valiosa en las zonas desérticas.

No existe necesidad de utilizar acumuladores porque la tierra funciona como un colector de calor. Esto hace que su funcionamiento sea más simple, reduciendo el riesgo de fallas en el sistema.

Por otro lado este tipo de instalaciones requiere mayores montos de inversión, comparado con las que funcionan con energía fósil, e incluso comparado con los proyectos energéticos renovables, por motivo de su escala.

También es posible que cause cambios en los microclimas, patrones de viento, provocar contaminación visual, que son daños que se pueden presentar al ecosistema que rodea a este tipo de plantas, para lo cual es muy importante realizar estudios necesarios para que la afectación sea la menor posible.

## 4.5 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En este campo de actuación se contemplan cuatro tipos de sistemas solares: colectores cilindro-parabólicos, sistemas de receptor central/ centrales de torre, discos parabólicos y hornos solares. El primero de ellos pertenece al rango de aprovechamiento térmico denominado de media temperatura (125-450°C) y los tres últimos al que podíamos denominar de alta y/o muy alta temperatura (mayor a 450°C).

Adicionalmente, existen dispositivos sin concentración o de baja concentración que se emplean en el campo de la detoxificación solar (descontaminación de gases y aguas residuales) y la refrigeración por absorción (compresores térmicos) que, si bien pueden utilizar una tecnología similar a la mencionada previamente (colectores cilindro-parabólicos, PTC, y cilindro-parabólicos compuestos, CPC), su temperatura de operación es notablemente inferior (70-200°C).

**Tabla 4.5** Tecnologías de generación de energía solar termoeléctrica

	<b>Colectores cilindro-parabólicos</b>	<b>Receptores centrales</b>	<b>Discos parabólicos</b>
Tamaño	30-320 MW*	10-200 MW*	5-25 MW*
Temperatura de trabajo (°C)	390	565	750
Eficiencia neta anual	11(d)-16 %*	7(d)-20 %*	12-25 %*(e)
Grado de desarrollo	Comercial	Demostración a gran escala	Demostración de prototipos
Costos			
\$/ m <sup>2</sup>	630-275*	475-200*	3100-320*
\$/ W	4.0-2.7*	4.4-2.5*	12.6-1.3*

**Fuente.-** Departamento de Energía Americano, DoE

([www.eere.energy.gov/troughnet/pdfs/solar\\_overview.pdf](http://www.eere.energy.gov/troughnet/pdfs/solar_overview.pdf))

\* Variación entre los años 1997-2030.

(d) valores demostrados;

(e) valores estimados.

## CAPITULO 5

### DISEÑO DEL SISTEMA

#### 5.1 DISEÑO TÉRMICO

##### 5.1.1 CALOR PERDIDO POR CONDUCCIÓN

El análisis térmico del concentrador, se realiza un estudio de conducción en sistemas de sección circular, específicamente en sistemas cilíndricos, por experimentar un gradiente de temperatura en dirección radial, siendo la transmisión unidimensional.

En un cilindro hueco, tanto las superficies internas como externas están expuestas a fluidos que poseen diferentes temperaturas, donde, al aplicar la Ley de Fourier obtenemos la expresión 5.1

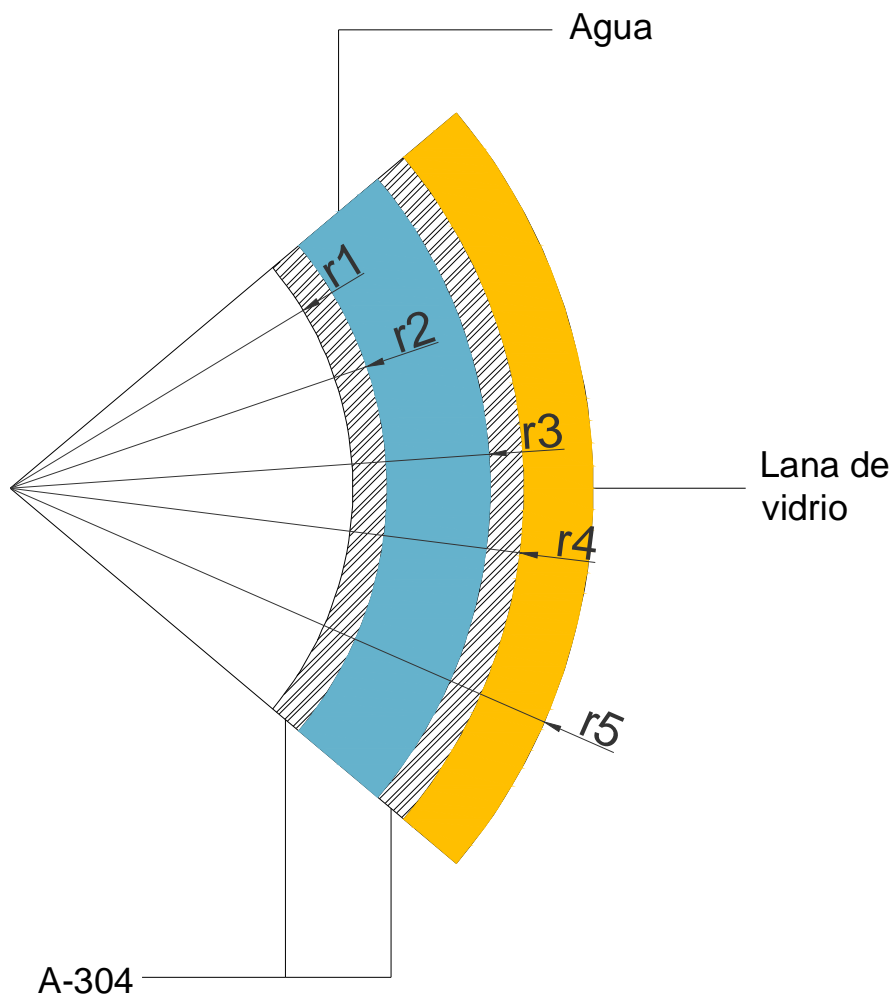
$$q_r = -KA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi \cdot r \cdot L) \cdot \frac{dT}{dr} \quad (5.1)$$

Donde:

A: área de la sección circular, ver ecuación 5.2

$$A = 2\pi \cdot r \cdot L \quad (5.2)$$

Para efectuar el cálculo de la transferencia de calor que se realiza en el concentrador debemos tomar en cuenta los datos que se presentan en el mismo, como se detalla en la figura 5.1



**Figura 5.1** Transferencia de Calor en Superficies Cilíndricas



Donde:

$$r_1 = 0.17 \text{ m}$$

$$r_2 = 0.173 \text{ m}$$

$$r_3 = 0.197 \text{ m}$$

$$r_4 = 0.2 \text{ m}$$

$$r_5 = 0.21 \text{ m}$$

$$k_1 = 31.784 \times 10^{-3} \quad \text{Coeficiente de conductividad térmica del aire a } 373^\circ\text{K}$$

$$h_1 = 25.48 \times 10^{-3} \quad \text{Coeficiente de conductividad térmica del aire a } 293^\circ\text{K}$$

$$k_A = 14.9 = k_C \quad \text{Coeficiente de conductividad térmica del acero A-304}$$

$$k_B = 680 \quad \text{Coeficiente de conductividad térmica del agua a } 373^\circ\text{K}$$

$$k_D = 0.038 \quad \text{Coeficiente de conductividad térmica de la lana de vidrio}$$

$$L = 0.3 \quad \text{Altura del concentrador}$$

$$T_{\infty 1} = 210^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura máxima de la pared del concentrador}$$

$$q_R \quad \text{Transferencia de calor}$$

En la ecuación 5.3, se aplica para obtener la transferencia de calor para el sistema de la figura 5.1

$$q_R = \frac{T_{\infty i} - T_{\infty s}}{\frac{1}{2\pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot k_A \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi \cdot k_B \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi \cdot k_C \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi \cdot k_D \cdot L} + \frac{1}{2\pi \cdot r_5 \cdot L \cdot h_5}} \quad (5.3)$$

Al reemplazar los datos en la ecuación 5.3, se obtiene una tasa de transferencia de calor de 1,7817 vatios por cada m2, grado kelvin, como se expresa a continuación.

$$q_R = 1.7817 \text{ [w/m}^2 \cdot \text{°K]}$$

### 5.1.2 CALOR PERDIDO POR LA RADIACIÓN DEL VIDRIO

Para determinar la radiación del cielo es necesario conocer la temperatura de cielo, aplicando la ecuación 5.4

$$T_{\text{cielo}} = 0.0522 \cdot T_{\text{amb}}^{1.5} \quad (5.4)$$

Donde:

$T_{\text{amb}}$ : Temperatura ambiente (21 °C)

$$T_{\text{cielo}} = 263.14 \text{ K}$$

El calor perdido por radiación del vidrio se calcula por medio de la ecuación 5.5

$$q_{rv} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot [T_v^4 - T_s^4] \quad (5.5)$$

Donde:

- $\varepsilon_v$ : Emitancia del vidrio (0.8)
- $\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8}$ )
- $T_v$ : Temperatura del vidrio [ $^{\circ}\text{K}$ ] (294 K)
- $T_{\text{cielo}}$ : Temperatura del cielo [ $^{\circ}\text{K}$ ] (263.14 K)

$$q_{rv} = 121.41 \left[ \frac{w - h}{\text{m}^2 - \text{día}} \right]$$

### 5.1.3 CALOR PERDIDO POR CONVECCIÓN DEL VIDRIO

Para calcular la pérdida de calor por convección del vidrio debemos utilizar la ecuación 5.6

$$q_{cv} = h_{cv} \cdot (T_v - T_{amb}) \quad (5.6)$$

Donde:

- $h_{cv}$ : Coeficiente de transferencia de calor convectivo del vidrio, expresado en la ecuación 5.7, que se encuentra en función de la velocidad del viento<sup>16</sup>.

$$h_{cv} = 2.8 + 3 \cdot w \quad (5.7)$$

Donde:

- w: Velocidad del viento (1,2 m/s)

---

<sup>16</sup> Velocidad del viento en la ESPE es 1,2 m/s.

El coeficiente de transferencia de calor convectivo es:

$$h_{cv} = 6,4 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

En la ecuación 5.3, reemplazamos el valor del coeficiente de transferencia de calor convectivo, obteniendo la pérdida por la convección en el vidrio.

$$q_{cv} = 124.8 \left[ \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día} \right]$$

#### 5.1.4 CALOR PERDIDO POR CONVECCIÓN NATURAL

Para el cálculo de las pérdidas ocurridas por la presencia de convección natural debemos emplear la ecuación 5.8

$$h_c = 0.884 \cdot \left( T_w - T_v + \frac{P_w - P_{wv}}{268.9 \times 10^3 - P_w} \cdot (T_w + 273) \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.8)$$

Donde:

$P_w$ : 57830 pascales (Presión de vapor de agua a 90 C)

$P_{wv}$ : 5628 pascales (Presión de vapor de agua a 35.5 C)

$$h_c = 4.568 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

También debemos tomar en cuenta el coeficiente de radiación efectivo  $h_r$ , para tener un modelo mucho más real, este coeficiente se lo calcula por medio de la ecuación 5.9.

$$h_r = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{sc}^4 - T_w^4)}{T_{sc} - T_w} \quad (5.9)$$

Donde:

- $\varepsilon$  Emitancia del acero inoxidable (0.19)<sup>17</sup>
- $T_{sc}$  Temperatura de la superficie del colector (373 K)

$$h_r = 2.105 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

Como podemos observar, el  $h_r < h_c$ , y se relacionan como se indica en la ecuación 5.10, para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección a partir de la ecuación 5.11.

$$h_T = h_c + \frac{3}{4} \cdot h_r \quad (5.10)$$

$$h_T = 6.146 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

Finalmente calculamos el calor perdido por convección natural aplicando la ecuación 5.7

$$q_{cn} = h_T \cdot (T_w - T_v) \quad (5.11)$$

$$q_{cn} = 305.148 \left[ \frac{W \cdot h}{m^2 \text{ día}} \right]$$

---

<sup>17</sup> INCROPERA, P, Fundamentos de Transferencia de Calor, Apéndice A. p 851

## 5.2 DISEÑO MECÁNICO

Se aplica el código ASME, Sección VII División1, “DISEÑO DE RECIPIENTES A PRESIÓN”, debido a que la intensidad de los esfuerzos existentes, son de debido a la presión interna a la cual va a ser sometida, el peso, el contenido, a los gradientes de temperatura; que depende de la geometría y de los componentes que conforman el recipiente, que originan esfuerzos de tensión y esfuerzos de compresión longitudinal, como se puede observar en las ecuaciones 5.12, y 5.13, respectivamente.

$$S_1 = \frac{P \cdot D}{4 \cdot t} \quad (5.12)$$

$$S_2 = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} \quad (5.13)$$

Donde:

P: Presión interna

D: Diámetro

t: espesor

En el diseño del recipiente, se requiere hacerlo a una presión de 150 PSI, por los requerimientos del sistema de torre de potencia, para comprobar este sistema se requiere realizar una prueba hidrostática, misma que será mayor que la presión de diseño y será llenada de agua a dicha presión hidrostática una vez que se haya

culminado por completo la construcción del recipiente con todos sus accesorios, esta presión hidrostática se calcula a partir de la ecuación 5.14.

$$P_H = 1,3 \cdot MAWP \cdot \frac{S_{\text{temperatura de prueba}}}{S_{\text{temperatura de diseño}}} \quad (5.14)$$

Donde:

- Ph: Presión de Prueba Hidrostática
- MAWP: Máxima Presión Admisible de trabajo
- S: Esfuerzo admisible a tensión

Para el cálculo del espesor del recipiente a presión nos basaremos en las fórmulas que se encuentran en términos de las dimensiones exteriores del código ASME, como se expresa en la ecuación 5.15.

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E + 0,4 \cdot P} + CA \quad (5.15)$$

Donde:

- P: Presión de diseño - PSI
- S: Esfuerzo admisible del material - PSI
- t: espesor de la pared – pulg.
- R: Radio exterior – pulg.
- CA: Corrosión admisible – pulg.
- E: Eficiencia de la junta

La eficiencia de la junta depende del tipo de unión y del grado de radiografiado, el que sea realizado en una junta a tope, como se indica en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1** Eficiencia de la junta

<b>RADIOGRAFIADO</b>		
<b><i>E</i></b>	<b><i>Type</i></b>	<b><i>Tipo</i></b>
1	FULL	TOTAL
0,85	SPOT	POR PUNTOS
0,7	NONE	NINGUNO

**Fuente:** Alcocer, J.

El código ASME, referente al Diseño de Recipientes a Presión, no estipula las restricciones en el diseño de recipientes cilíndrico hueco, para lo cual se determina un radio equivalente, para la aplicación del mismo.

A partir del área útil del receptor, siendo equivalente al área del recipiente cilíndrico de tal manera que se aplique el código ASME, y con las respectivas fórmulas determinar el espesor de la pared que resistirá a la presión de diseño.

La diferencia entre el área externa y el área interna, se determina un área equivalente como se expresa en la ecuación 5.16, y se obtiene un radio equivalente, a partir de la ecuación 5.17.

$$A_{equivalente} = \frac{\pi}{4} (R_e^2 - R_i^2) \quad (5.16)$$



$$R_e = 20 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ pie}}{30,48 \text{ cm}} = 0,656 \text{ pulg.}$$

$$R_i = 17 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ pie}}{30,48 \text{ cm}} = 0,557 \text{ pulg.}$$

$$A_{\text{equivalente}} = 0,3381 \text{ pulg}^2$$

$$R_{\text{equivalente}} = \frac{4 \cdot R_{\text{equivalente}}^2}{\pi} \quad (5.17)$$

$$R_{\text{equivalente}} = 0,656 \text{ pulg.}$$

El valor del radio equivalente se reemplaza en fórmula 5.15, de tal manera que se obtiene el espesor de la pared del material, con la cual se realizara la construcción del receptor.

$$t = 6,5353 \times 10^{-3} \text{ pies}$$

$$t = 1,99 \text{ mm}$$

## **ANÁLISIS MECÁNICO – SOLIDWORKS**

El análisis estructural en SAP 2000, de la torre se encuentra en el anexo4.

### 5.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

A través del método de elementos finitos bajo las condiciones de la norma LRFD (Load and Resistance Factor Design), se analizarán los helióstatos y la torre que conforman este sistema de potencia.

La norma LRFD es un procedimiento estadístico el cual se basa en las probabilidades el cual lleva a un estado límite en el cual la estructura puede cumplir su función, con lo cual se pretende que en la estructura estos efectos no sobrepasen éstos límites.

En la tabla 5.2 se puede apreciar los efectos que ocasionan un estado límite.

**Tabla 5.2** Efectos que ocasionan un estado límite

<b>Estado límite</b>	
<b>Resistencia</b>	<b>Servicio</b>
Máxima resistencia dúctil	Funcionalidad
Inestabilidad elástica	Deformación
Fatiga	Vibraciones
Fractura	Deformación permanente
Volteo	Rajaduras
Deslizamiento	

**Fuente.-** Salinas, R. y Calvopiña, P.

Al no poder conseguir un estado de riesgo cero, en el diseño se debe adoptar métodos de confiabilidad de momentos de primer y segundo orden, los cuales no sobrepasan la resistencia de los elementos que conforman la estructura, éstos métodos consideran que la carga Q y la resistencia R son variables aleatorias, el requerimiento de seguridad industrial, expresado en la inecuación 5.10; en la cual la resistencia del componente o del sistema en general es mayor o igual a la carga máxima esperada.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (5.18)$$

Donde:

$\Phi$ : factor de resistencia (resistencia de diseño)

$\varphi_i$ : cargas factorizadas

Según datos estadísticos tomados por los estándares ANSI, se expresan en la tabla 5.3, los factores de reducción y 5.4 los factores de mayorización. Los factores están relacionados con el tipo de carga y de acuerdo a la combinación de las mismas a ser consideradas.

**Tabla 5.3** Factores de reducción

Valor de $\Phi$	Caso
0.90	Fluencia por tracción
0.75	Fractura a la tracción
0.85	Compresión
0.90	Flexión
0.90	Fluencia por corte

**Fuente:** [www.eventos.fim.uclv.edu.cu](http://www.eventos.fim.uclv.edu.cu)

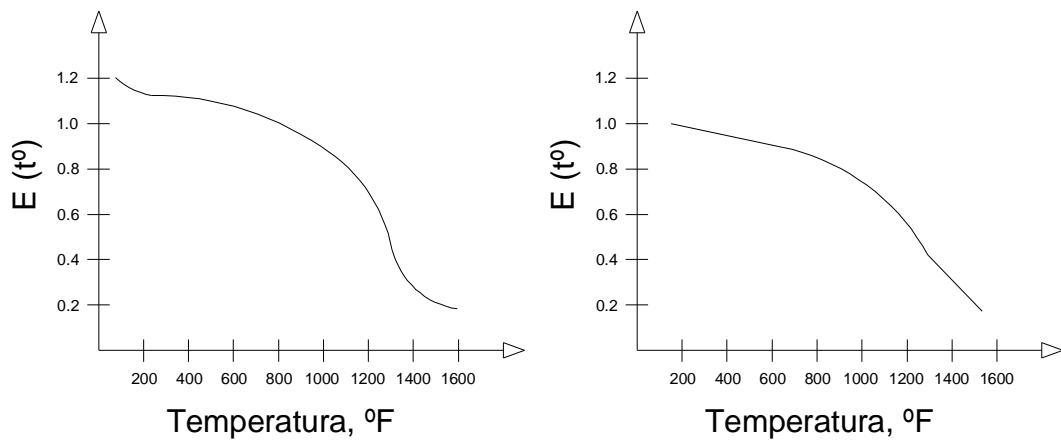
**Tabla 5.4** Factores de mayorización de carga

Combinación de carga	Máxima posibilidad de carga e la vida útil de 50 años
1.4D	Carga muerta D durante la construcción
1.2D+1.6L+0.5(Lr o S o R)	Carga viva L
1.2D+1.6(Lr o S o R)+(0.5L+0.8W)	Carga en el techo Lr
1.2D+0.5L+0.5(Lr o S o R)	Carga de viento W aditiva a la carga muerta
1.2D+1.5E+0.5L o 0.2S	Carga de sismo E aditiva a la carga muerta
0.9D+1.3W o 1.5E	W o E opuesta a la carga muerta
1.2D+1.6L+1.0E	S nieve, R agua o hielo

**Fuente:** Fernández, E.

- Carga muerta: es el peso propio de toda la estructura la cual depende de la densidad del material
- Carga viva: son las cargas que actúan de forma intermitente o no permanente como el caso del polvo, peso de personas.
- Carga de viento: la estructura se encuentra ubicada en el Laboratorio de Energías No Convencionales de la ESPE, el cual tiene una velocidad máxima de viento de 10 m/s
- Carga sísmica: es la carga que actúa sobre la estructura en caso de presentarse un fenómeno sísmico.
- Carga de nieve: es la carga que por el peso de nieve se adiciona al peso muerto de la estructura.
- Carga de agua o hielo: es la carga que por el peso del agua o del hielo se suman al peso de la estructura.

El material seleccionado para la construcción de la torre es el acero estructural A-36, debido a que el módulo de elasticidad a temperatura ambiente (21 °C) es de 200 GPa, y que varía en función de la temperatura, como se muestra en la figura 5.2. Si la temperatura del acero supera los 721 °C, los cambios de propiedades mecánicas se vuelven permanentes, por lo que no se debe exceder de 650 °C.



**Figura 5.2** Módulo de elasticidad en función de la temperatura

Debemos tomar en cuenta las condiciones de utilización, de duración, basadas en las características de las soldaduras y de los materiales utilizados, su resistencia a la intemperie, el fabricante debe garantizar las características mecánicas de la torre, así como el cumplimiento con las tablas de carga del servicio.

Esta estructura debe tener un tratamiento anticorrosivo y estar exenta de cualquier anomalía que afecte al comportamiento como deformaciones de los elementos que conforman la estructura, agrietamientos en las soldaduras, oxidación evidente.

### **5.3.1 TORRE**

En el diseño de la torre debemos tomar en cuenta aspectos importantes. La torre es de estructura metálica, la misma que está construida de tal manera que resista su peso y el peso del receptor.

Dentro de las características constructivas de las torres debemos tomar en cuenta las cargas de cálculo de los elementos estructurales como el dimensionado de los elementos de la estructura, las cargas horizontales, las cargas climáticas debidas al viento, la resistencia de la torre y los requisitos de las escaleras de acceso a la estructura y las protecciones perimetrales.

### **ANÁLISIS ESTRUCTURAL – SAP 2000**

El análisis estructural en SAP 2000, de la torre se encuentra en el anexo 5.

### **5.3.2 HELIÓSTATO**

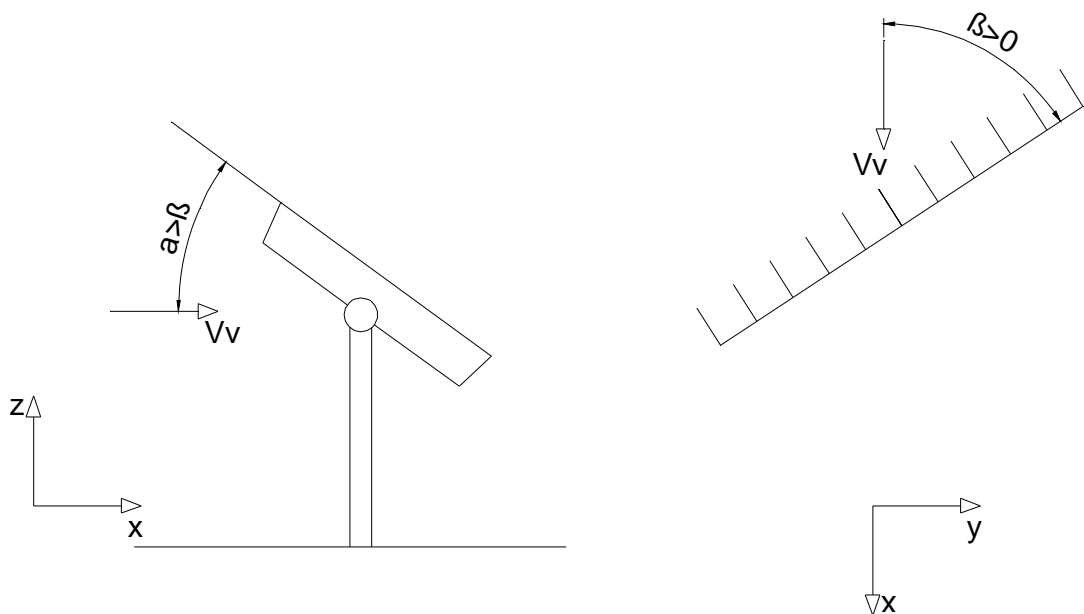
Para diseñar los helióstatos es necesario realizar un estudio aerodinámico, para determinar la mejor configuración de los espejos que será utilizado en la planta de potencia solar. Una de las maneras más utilizadas para esto es la utilización de modelos a escala, dentro de túneles de viento, para probar las diferentes opciones de formas de los helióstatos.

Los resultados obtenidos en los túneles de viento son validados por la mecánica de fluidos, a la que se conoce como semejanza dinámica, esto quiere decir que los fenómenos que se presentan en la realidad deben ser reproducidos a la mayor exactitud posible dentro del túnel de viento, en la cual tiende a conservar el valor

del Número de Reynolds lo más estable posible o demostrar la independencia de este parámetro.

Para esta prueba se toma en cuenta un sistema de referencia llamado de ejes viento. El viento debe recorrer de manera horizontal y paralelo al suelo, donde el eje X coincide con la dirección y sentido de desplazamiento del viento. El eje z es el eje vertical, cuyo sentido favorece la formación de un triedro de derecha.

La posición del helióstato queda determinada por dos ángulos, el ángulo de ataque  $\alpha$  (formado por el plano del helióstato con el suelo), y el de guiñada  $\beta$  (formado por el eje horizontal del helióstato con el viento). Estos ángulos podemos observarlos en la figura 5.3.



**Figura 5.3** Posición de los ángulos de ataque y de guiñada

Los helióstatos deben poseer un montaje con doble articulación para poder determinar los momentos, con esto podemos variar el ángulo de ataque y de guiñada. Dejamos bloqueada una de las articulaciones con el valor del ángulo deseado, mientras que el eje alrededor del cual es posible el movimiento se conecta a un sistema de palancas que permiten medir el momento.

Cuando se han determinado las cargas que afectan al helióstato, como su configuración básica, forma, el área de su superficie reflectante, y las dimensiones de su mecanismo de accionamiento, podemos empezar con el dimensionamiento y el cálculo de los diferentes elementos que lo conforman, tomando en cuenta como principales objetivos a cumplir los siguientes:

- Diseñar la estructura del helióstato.
- Comprobar que no se alcanza el límite de fluencia en ningún punto de la estructura.
- Robustez para soportar el peso propio y de los helióstatos, las cargas de viento.
- Precisión de posicionamiento.
- Resistencia a la intemperie y a los agentes atmosféricos.
- Facilidad de mantenimiento
- Minimizar costos de fabricación, materiales, instalación y mantenimiento del campo de helióstatos

Podemos determinar también los desplazamientos que se producen en la estructura, cuando se aplican estados de carga más desfavorables mediante el uso de programas de análisis de estructuras por medio de elementos finitos.



**Tabla 5.5** Errores frecuentes en los heliostatos

<b>Condiciones de operación</b>	<b>Causa de error</b>
Errores que aparecen en cualquier situación	Contorno de los espejos (ondulaciones, tolerancia de curvatura, etc.)
	Canteo en foco común
	Ajuste en ejes de rotación (desplome de ejes, no ortogonalidad, horizontalidad del asiento del pedestal).
	Control electrónico (ancho codificadores, resolución de bordes, cálculo demanda, posicionamiento de ejes, efectos atmosféricos, coordenadas del sol, etc.)
	Flexión del pedestal por calentamiento diferencial.
Errores debidos a fuerzas máxicas al girar el eje de elevación (entre 30° y 90°)	Flexión de pedestal
	Deformación de la estructura soporte
	Deformación de los espejos
	Elasticidad de los mecanismos
Errores debidos al viento	Flexión y torsión del pedestal
	Deformación de la estructura soporte
	Deformación de las facetas
	Tolerancia de los mecanismos
	Elasticidad de los mecanismos

### **ANÁLISIS ESTRUCTURAL – SAP 2000**

El análisis estructural del soporte del heliostato, realizado en SAP 2000, se encuentra en el anexo6.

## **5.4 SISTEMAS ÓPTICOS**

### **5.4.1 ORIENTACIÓN DE LOS HELIÓSTATOS**

En la transformación de la energía solar en eléctrica a través de un ciclo termodinámico, dependen de un adecuado ordenamiento de los helióstatos, los cuales se ubican en un terreno y dispuestos ordenadamente, de tal manera que reflejen la radiación solar directa incidente sobre cada uno de los helióstatos sobre el receptor, que se encuentra ubicado en lo alto de la torre, de tal manera que, toda la energía pueda ser reflejada por los helióstatos por medio de radiación.

En este ciclo termodinámico, para generar electricidad por medio de un fluido de trabajo, que en este caso es agua, se consideran dos partes fundamentales:

- a) El concentrador de energía solar
- b) El receptor de energía (caldera de ciclo termodinámico)

Lo más importante de este sistema de generación es que se utiliza tecnologías conocidas para la transformación, así; la conversión de energía térmica (vapor) en energía cinética de rotación (turbina) y posteriormente en energía eléctrica (generador), con lo cual evitamos errores.

Se puede considerar que la forma del concentrador tiene que imponer una simetría al receptor, de tal manera que se lo considere como un cuerpo de revolución además, su forma y tamaño dependerán de la distancia entre los helióstatos y la base de la torre.

Una condición ideal se presenta cuando la normal a la superficie del receptor coincide en todo momento con la dirección de los rayos solares reflejados por los helióstatos.

En todo momento los helióstatos deberán tener una orientación, la cual debe seguir la posición del sol de tal manera que se refleje la radiación solar directa hacia el receptor, por lo que la imagen solar reflejada estará siempre en un mismo punto.

Los concentradores de energía solar están diseñados para obtener máximas eficiencias, los principales aspectos que regulan la dirección de estos helióstatos deben satisfacer las leyes de reflexión y por lo tanto los ángulos de los rayos incidentes y reflejados con respecto a la superficie especular tienen que ser iguales.

La dirección de los rayos solares en un instante dado viene dado a través de un vector unitario  $s$ , descrito en la ecuación 2.7.

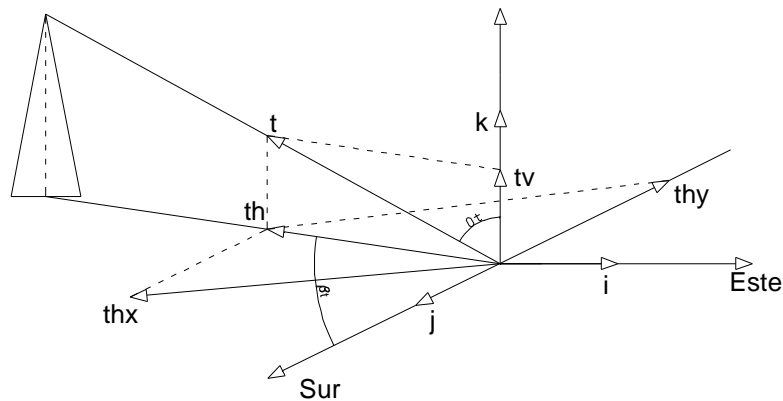
La localización de un espejo cualquiera  $E$  viene dada por el vector  $t$ , el cual coincide con la dirección de los rayos solares reflejados hacia el punto  $F$  que está situado en lo alto de la torre, como se expresa en la ecuación 5.19.

$$\vec{t} = (-\sin(\theta_i) \cdot \sin(\beta_i)) \vec{i} + (-\sin(\theta_i) \cdot \cos(\beta_i)) \vec{j} + \cos(\theta_i) \vec{k} \quad (5.19)$$

Donde:

$\theta_i$       Ángulo cenital

$\beta_i$       Ángulo acimutal



**Figura 5.4** Componentes del vector  $\vec{t}$

En la que el ángulo cenital corresponde a la distancia entre el foco y cualquier punto de la parábola definida por la ecuación y el ángulo acimutal se forma por la proyección horizontal  $\tau_h$  de la proyección de los rayos solares reflejados respecto a la dirección norte-sur como se observa en la figura 5.4.

La distancia entre el foco y cualquier punto de la parábola que pasa por el punto E y la altura H a la que se encuentra el punto F con respecto al plano del concentrador se expresa en la ecuación 5.20.

$$R = H \tan(\theta_t) \quad (5.20)$$

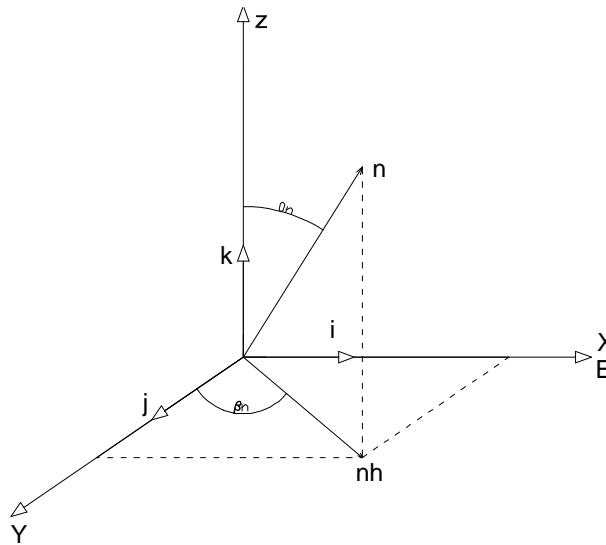
Cada espejo viene definido por su normal N como se indica en la figura 5.5, que está en función de dos ángulos,  $\theta_n$  que es el ángulo cenital que forma el vector n con la vertical del campo (ecuación 5.22), y  $\beta_n$  es el ángulo acimutal que forma el vector n con la dirección norte-sur (ecuación 5.23), como se expresa en la ecuación 5.24

$$N = \sqrt{2 \left( 1 + \cos(\theta_t) \left( \begin{array}{l} \sin(\lambda) \cdot \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\tau) + \\ \sin(\theta_t) \cdot \sin(\beta_t) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\tau) + \\ \sin(\theta_t) \cdot \sin(\beta_t) \cdot (\sin(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\tau) - \cos(\lambda) \cdot \sin(\delta)) \end{array} \right) \right)} \quad (5.21)$$

$$\theta_n = \arccos \left( \frac{1}{N \cdot (\sin(\lambda) \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cos(\delta) \cos(\tau) + \sin(\theta_t) + \cos(\theta_t))} \right) \quad (5.22)$$

$$\beta_n = \arctan \left( \frac{\sin(\theta_t) \cdot \sin(\beta_t) + \cos(\delta) \cdot \sin(\tau)}{\sin(\theta_t) \cdot \cos(\beta_t) + \sin(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\tau) + \cos(\lambda) \cdot \sin(\delta)} \right) \quad (5.23)$$

$$\vec{n} = (-\sin(\theta_n) \cdot \sin(\beta_n)) \vec{i} + (-\sin(\theta_n) \cdot \cos(\beta_n)) \vec{j} + \cos(\theta_n) \vec{k} \quad (5.24)$$



**Figura 5.5** Componentes del vector  $\vec{n}$

## 5.4.2 GEOMETRÍA DE LOS HELIÓSTATOS

Se ha procedido a calcular el área necesaria para poder generar los 500 vatios requeridos a partir de la radiación solar promedio recibida en el Ecuador.

$$I = 1000 \text{ [w/m}^2\text{]}^{18}$$

El área efectiva que emitirá la radiación requerida hacia el concentrador viene dada por la ecuación 5.25

$$A_{ef} = \frac{W}{I \cdot EC} \quad (5.25)$$

Donde:

W: Potencia de diseño

EC: Porcentaje con el cual se transforma la energía solar en eléctrica.

Esta área es la que proyecta el heliostato sobre un plano tangencial a la curvatura del mismo y está en dirección perpendicular a la normal del heliostato, ésta depende de las dimensiones geométricas del espejo.

La longitud de apertura del paraboloide está en directa relación entre el área afectiva y la longitud del espejo, como se expresa en la ecuación 5.26.

$$L_o = \frac{A_{ef}}{L_{espejo}} \quad (5.26)$$

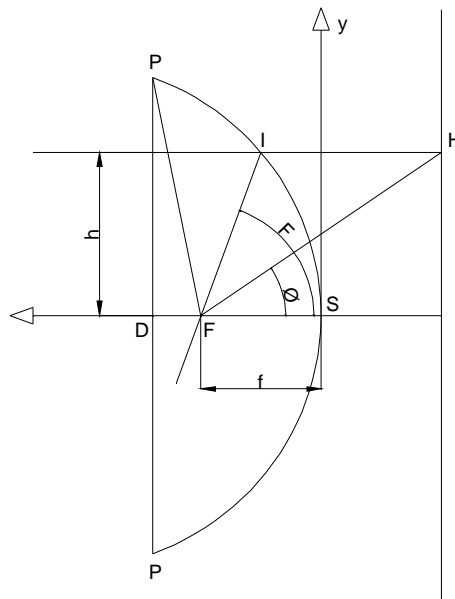
---

<sup>18</sup> CARRASCO F, Apuntes de clase

### 5.4.3 GEOMETRÍA DE LA PARÁBOLA

Siendo X-Y el origen de la distribución parabólica de los espejos, podemos expresarla a través de la ecuación 5.27.

$$y^2 = 4fx \quad (5.27)$$



**Figura 5.6** Geometría de la Parábola

El ángulo de apertura de la parábola está en función de la longitud de apertura y del foco y se encuentra expresado por la ecuación 5.28.

$$\varphi = 2 \cdot \arctan\left(\frac{L_o}{2f}\right) \quad (5.28)$$

La propiedad fundamental de un espejo parabólico es ser estigmático para el punto del infinito, por lo que el diámetro D de la imagen del disco solar es como se expresa en la ecuación 5.29.

$$D = f \cdot \varepsilon \quad (5.29)$$

Donde:

$$\varepsilon: \quad 0.01$$

Se obtiene una imagen nítida del Sol, si cumple la relación que se expresa en la ecuación 5.30.

$$\frac{D}{f} < 0,1 \quad (5.30)$$

La relación entre la distancia focal y la apertura de la parábola debe ubicarse entre ciertos valores que nos permiten determinar un buen nivel de concentración, tal como consta en la expresión 5.31.

$$0,25 < \frac{f}{L_o} < 0,6 \quad (5.31)$$

Por medio de la ley de cosenos podemos determinar el ángulo de apertura del concentrador, la cual se indica en la ecuación 5.32.

$$A_{\text{apertura}} = \arccos\left(\frac{2 \cdot R^2 - L_o^2}{2 \cdot R^2}\right) \quad (5.32)$$

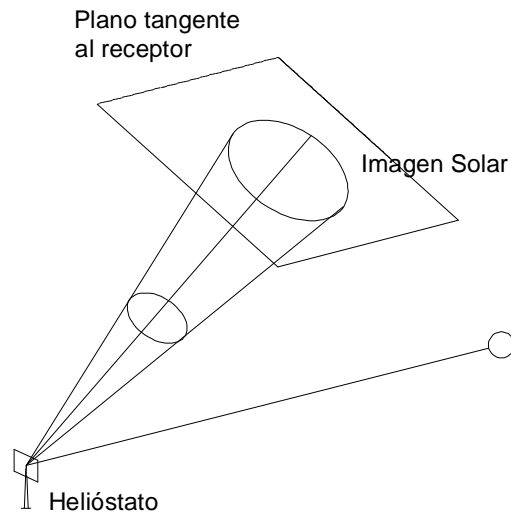
#### 5.4.4 GEOMETRÍA DEL CONCENTRADOR

- **Cálculo de la mancha solar**

Las dimensiones del receptor de potencia de una torre solar está condicionados, de acuerdo al ángulo  $2\xi = 32'$ , del cono solar incidente, los errores de fabricación de espejos se representan con un ángulo  $v_E$  y los errores de enfoque se representan por un ángulo  $v_D$ . Estos factores se expresan en un solo factor como se muestra en la ecuación 5.33



$$\varphi = 1 + \frac{v_E + v_D}{\xi} + \frac{1}{2 \cdot H \cdot \xi} \quad (5.33)$$



**Figura 5.7** Imagen solar sobre un plano tangente al receptor

El receptor se puede considerar en principio como un sólido, de geometría cualquiera, la única restricción es tener un eje de simetría vertical. Los helióstatos pueden ser considerados como superficies cuadradas, de dimensiones  $L \times L$ .

La distancia desde el espejo E al plano tangente del receptor viene, como se expresa en la ecuación 5.34.

$$\rho = \frac{1}{2 \cdot H \cdot \xi} \cdot \text{Cos}(\theta_i) \quad (5.34)$$

El diámetro de la imagen solar D normal a la dirección entre el espejo y el punto focal del receptor expresados por la expresión 5.35.

$$D = 2 \cdot (\xi + v_E + v_D) \rho + l \quad (5.35)$$

Donde:

$v_D$ : Ángulo de dirección de los espejos y es menor a  $0,1 \xi$

$v_E$ : Ángulo que reúne los defectos de construcción de los espejos y evita una dispersión del haz reflejado, no supera a  $2,9 \times 10^{-3}$  radianes.

- **Dimensiones del receptor cilíndrico vertical**

El diámetro del receptor se puede calcular a través de los valores de  $\xi$  y del factor de dispersión angular  $\varphi$ , dependiendo tan solo del factor  $\varphi$ , como se expresa en la ecuación 5.36.

$$d_{\text{receptor}} = 2 \cdot \varphi \cdot \xi \cdot \rho \quad (5.36)$$

Reemplazando la ecuación 5.35 en la 5.36, obtenemos la ecuación 5.37 que nos permitirá calcular el valor del diámetro mínimo del receptor, en función de los valores de  $H$  y  $\theta_t$ .

$$d_{\text{receptor}} = 9,3 \cdot 10^{-3} \frac{H}{\text{Cos}(\theta_t)} \cdot \varphi \quad (5.37)$$

La altura se obtendrá en función del cociente entre el diámetro del receptor y el seno del ángulo cenital, expresado en la ecuación 5.38.

$$h = \frac{D_{\theta_{tm}}}{\text{Sin}(\theta_{tm})} \quad (5.38)$$

- **Distribución del flujo solar sobre un receptor cilíndrico vertical**

Para determinar el calor que podemos recibir desde el helióstato en el concentrador, podemos aplicar la ecuación 5.39.

$$Q = \pi \cdot H^2 \cdot A^* \cdot I_0 \quad (5.39)$$

Y,  $A^*$  se determina por medio de la ecuación 5.40.

$$A^* = 2(\text{Sec}(\theta_{tm}) - \text{Sec}(\theta_{tm})) \quad (5.40)$$

Esta ecuación representa el calor recibido por un campo de helióstatos situados alrededor de la torre, es decir, cubre los 360 grados, en caso utilizar un sector circular del campo, es necesario multiplicar la expresión 5.30 por un factor equivalente al sector circular que se va a utilizar, como se expresa en la ecuación 5.41.

$$Q = \pi H^2 A^* I_0 \frac{\alpha_{abertura}}{360} \quad (5.41)$$

## 5.5 SISTEMA DE ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO

Para aprovechar la energía que genera el sistema de Torre de Potencia, se requiere diseñar los álabes, que será parte de la turbina, la que se encarga de transmitir la energía mecánica hacia la maquina eléctrica.

Para determinar el tipo de turbina que requerimos para una aplicación de generación eléctrica procedemos a calcular dos parámetros de selección:

- Velocidad específica por caudal ( $Nq$ ) cuya expresión se encuentra en la ecuación 5.42
- Velocidad específica por potencia ( $Ns$ ) cuya expresión se encuentra en la ecuación 5.43

Estos valores se determinan de acuerdo a las formulas

$$Nq = \frac{N^* \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (5.42)$$

$$Ns = \frac{N^* \sqrt{P_{cv}}}{H^{5/4}} \quad (5.43)$$

Donde:

- N: Número de revoluciones
- Q: Caudal
- H: Distancia de separación entre el inyector y los alabes
- $P_{cv}$ : Potencia requerida expresada en caballos de vapor

Al obtener estos valores debemos ubicar el rango en el que constan nuestros resultados, de esta manera podemos ubicar el tipo de turbina que requerimos. La selección la realizamos en la tabla 5.6

**Tabla 5.6** Selección de turbinas

		<b>Nq</b>	<b>Ns</b>
<b>Pelton</b>	1 inyector	0-9	0-30
	2 inyectores	4-13	14-42
	3 inyectores	5-22	17-73
<b>Flujo Cruzado</b>		18-60	60-200
<b>Francis</b>	Lentas	18-38	69-121
	Medias	38-68	125-225
	Rápidas	68-135	225-450
<b>Axiales – Kaplan</b>		105-300	350-1000

**Fuente:** Carrasco, F, Apuntes de clase

Determinamos el caudal y las RPM que requiere la turbina, y con éstos calculamos el diámetro externo del rodete mediante la ecuación 5.44

$$De = \frac{39.85 * \sqrt{H}}{N} \quad (5.44)$$

A continuación encontramos el ancho del inyector utilizando la ecuación 5.45

$$B = \frac{0.96 * Q}{De * \sqrt{H}} \quad (5.45)$$

Determinamos el radio de curvatura de los álabes mediante la ecuación 5.46

$$r = 0.163 * De \quad (5.46)$$

Y finalmente determinamos la separación entre cada álabe mediante la ecuación 5.47

$$s = \frac{De * \pi}{Z} \quad (5.46)$$

Donde Z es el número de álabes, los cuales se selecciona de acuerdo a la tabla 5.7

**Tabla 5.7** Selección del número de álabes

<b>De</b>	<b>Diámetro nominal</b>	<b>Número de álabes</b>
<b>Mm</b>	<b>Pulg.</b>	<b>N</b>
200	2 ½"	22
300	4"	24
400	5"	26
500	6"	28

**Fuente:** Carrasco, F., Apuntes de Clase

Una vez efectuados todos estos cálculos se determina la turbina que se requiere, con los parámetros que se indican a continuación.

**Tabla 5.8** Parámetros diseño turbina

<b>Elemento</b>	<b>Unidad</b>	<b>Longitud</b>
Diámetro rodete	mm	126
Ancho inyector	mm	4
Curvatura álabe	mm	20
Separación álabe	mm	14
Velocidad específica Caudal	RPM	6,98
Velocidad específica Potencia	RPM	1078,39

De acuerdo a los valores de velocidad específica por caudal ( $N_q$ ) y de velocidad específica por potencia ( $N_s$ ), obtenidos mediante los cálculos realizados, se puede optar por una turbina tipo Pelton de tres inyectores si la selección es por Velocidad específica por Caudal, y, si la elección de la turbina se realiza por Velocidad específica por Potencia, se requiere una turbina axial tipo Kaplan.

El generador requiere de 400 RPM (esta velocidad es baja en comparación con los generadores de corriente alterna) que servirá para generar 400 vatios de potencia, con corriente continua de 300v y amperaje de 1A, que son las características de salida, propias de la máquina.

En la selección del generador, es basado en las características mecánicas y termodinámicas del sistema de Torre de Potencia Solar, que ingresa al generador, por lo que se ha elegido una máquina eléctrica de marca ELMATEK, type 112-12, Cod. Class A, Temp. Class A.





## **CAPÍTULO 6**

### **PRUEBA Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO**

#### **6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS**

Se detalla e indica las características técnicas de la torre de potencia solar, para la correcta instalación y posterior funcionamiento del equipo, el cual servirá como respaldo para la correcta operación. El protocolo de pruebas que corresponde a este equipo consta en el anexo7.

#### **6.2 TOMA DE DATOS**

Constar los valores de medición entregados por el instrumental utilizado durante la operación de la torre de potencia, los cuales deben ubicarse de manera ordenada, de tal manera que facilite su empleo en la realización de los cálculos correspondientes, estos generarán los resultados que requerimos para su posterior análisis.

A continuación se detallan las variables que influyen en el funcionamiento, y que cuantifican en el desempeño de la Torre de Potencia Solar

- Temperatura ambiente
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Radiación solar
- Temperatura de la cavidad del receptor
- Temperatura cuerpo negro
- Temperatura interna del receptor (agua – vapor)
- Temperatura de los espejos
- Presión de vapor del recipiente
- Presión de vapor posterior al estrangulamiento
- Angulo de inclinación del helióstato
- Velocidad de salida del vapor sobrecalentado
- Tiempo de salida del vapor sobrecalentado

## 6.3 TABULACIÓN DE DATOS

Tabla 6.1 Tabulación de datos - 2008/06/13

TORRE DE POTENCIA SOLAR														
												Fecha:	13-jun	
												Condición: Soleado		
Hora	Temperatura Cuerpo Negro		Temperatura agua/vapor	Temperatura Espejos	Presión Recipiente	Presión Estrangulamiento	Irradiación Amperios	Humedad Relativa	Temperatura Ambiente	Velocidad Viento	Tipo de Radiación	Ángulo Elevación		
	Termómetro	Láser												
H:mm	°C	°C	°C	°C	PSI	PSI	mA	%	°C	m/s		°		
9:00	74	55,4	54	23,4	-	-	4,81	59	17,3	0,8	directa	38,55		
9:15	106	76,9	60	24,1	-	-	4,79	58	18	-	directa	38,55		
9:30	132	93,7	78	21,1	-	5	4,81	57	18,8	0,7	directa	38,55		
9:45	150	93,8	84	22,7	-	8	4,83	54	19,7	1,2	directa	39,62		
10:00	160	104,2	96	20,6	10	12	4,78	45	22,5	1	directa	41,12		
10:15	144	104,7	104	20,5	13	16	4,79	41	24,4	1,1	directa	41,12		
10:30	156	115,3	110	20,5	17	20	4,73	36	25,2	0,3	directa	41,12		
<b>10:45</b>	<b>156</b>	<b>115,3</b>	<b>118</b>	<b>19,3</b>	<b>21</b>	<b>25</b>	<b>4,76</b>	<b>34</b>	<b>25,8</b>	<b>0,3</b>	<b>directa</b>	<b>41,12</b>		
11:00	178	131,7	130	21,9	35	36	4,74	32	26,9	0,7	directa	43,58		
<b>11:15</b>	<b>196</b>	<b>150,4</b>	<b>136</b>	<b>21,4</b>	<b>30</b>	<b>34</b>	<b>4,78</b>	<b>31</b>	<b>25,6</b>	<b>0,5</b>	<b>directa</b>	<b>45,23</b>		
11:30	188	148,1	140	25,9	38	40	4,74	30	27,8	0,3	directa	45,24		
11:45	194	142,3	146	21,7	50	51	4,74	30	27,7	1,6	directa	45,24		
<b>12:00</b>	<b>204</b>	<b>156,5</b>	<b>150</b>	<b>22,3</b>	<b>55</b>	<b>58</b>	<b>4,76</b>	<b>28</b>	<b>28,4</b>	<b>0,3</b>	<b>directa</b>	<b>45,72</b>		
<b>12:15</b>	<b>206</b>	<b>155</b>	<b>152</b>	<b>27,3</b>	<b>60</b>	<b>64</b>	<b>4,71</b>	<b>27</b>	<b>28,1</b>	<b>0,3</b>	<b>directa</b>	<b>45,72</b>		
12:30	200	149,7	150	25,6	55	54	4,77	27	28	0,3	difusa	50,71		
12:45	206	152,5	146	27,5	50	51	4,72	28	26,7	1,7	difusa	46,42		
13:00	152	96,1	130	25,1	30	28	4,72	29	25,6	0,5	difusa	45,95		

Continuación tabla 6.1

Hora	Temperatura Cuerpo Negro		Temperatura agua/vapor		Temperatura Espejos		Presión Recipiente		Presión Estrangulamiento		Irradiación Amperios		Humedad Relativa		Temperatura Ambiente		Velocidad Viento		Tipo de Radiación		Ángulo Elevación	
	Termómetro	Láser	°C		°C		PSI		PSI		mA		%		°C		m/s		Radiación		°	
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	PSI	PSI	PSI	PSI	mA	mA	%	%	°C	°C	m/s	m/s	Tipo de Radiación	Tipo de Radiación	Ángulo Elevación	Ángulo Elevación
13:15	182	141,9	138	29,4	29,4	36	38	4,73	27	28,3	2,7	directa	44,76									
13:30	210	159,5	142	28,6	28,6	45	44	4,67	25	29,1	0,3	directa	44,76									
13:45	206	157,3	142	27,7	27,7	45	44	4,66	26	29,6	1,5	directa	44,76									
14:00	198	150,8	144	29,7	29,7	46	48	5,2	25	29,3	1,6	directa	44,76									
14:15	180	127,2	136	22,5	22,5	35	32	4,82	25	27,6	5,6	difusa	44,76									
14:30	150	113,4	128	27,2	27,2	25	26	4,74	25	28,8	2,5	directa	43,53									
14:45	152	117	124	27,4	27,4	20	22	4,6	25	28,9	2,3	directa	43,53									
15:00	158	111,4	122	27,3	27,3	20	22	4,99	27	26,4	1,3	directa	43,53									

Temperatura inicial del agua 18

Hora	H	11:00
Velocidad del vapor	m/s	10,8
Tiempo	S	60

Hora	H	15:00
Velocidad del vapor	m/s	15,8
Tiempo	S	45

## 6.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 6.2 Resultados - 13/06/08

Orden	Hora	Presión Recipiente	Presión Estrangulamiento	Radiación	Caudal	Flujo másico	Presión Recipiente	Entalpia		Potencia	
								kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	w/m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /min
	H:mm										W
3	9:30		3522,734	648,266	1,74E-04	0,174				82,06721	65,653767
4	9:45		5636,375	650,958	2,20E-04	0,220				103,9449	83,15588
5	10:00	7030,690	8454,562	644,228	1,10E-04	0,110	0,14196305	2690,94	204,385		163,5082
6	10:15	9139,897	11272,750	645,574	1,35E-04	0,135	0,16264732	2697,13	301,529		241,22317
7	10:30	11952,173	14090,937	637,498	1,35E-04	0,135	0,19022635	2704,31	352,424		281,93955
8	10:45	14764,449	17613,672	641,536	1,56E-04	0,156	0,21780538	2704,59	461,020		368,81597
9	11:00	24607,415	25363,687	638,844	8,05E-05	0,080	0,31433199	2727,42	327,995		262,39614
10	11:15	21092,070	23954,593	644,228	1,57E-04	0,157	0,2798582	2722,08	587,369		469,89527
11	11:30	26716,622	28181,875	638,844	1,12E-04	0,112	0,33501626	2730,36	476,521		381,21704
12	11:45	35153,450	35931,890	638,844	8,17E-05	0,082	0,41775334	2740,48	397,469		317,97517
13	12:00	38668,795	40863,718	641,536	1,37E-04	0,137	0,45222713	2744,02	677,765		542,21196
14	12:15	42184,140	45090,999	634,806	1,58E-04	0,158	0,48670092	2747,42	835,428		668,34248
15	12:30	38668,795	38045,531	642,882	7,31E-05	0,073	0,45222713	2744,11	372,045		297,63638
16	12:45	35153,450	35931,890	636,152	8,17E-05	0,082	0,41775334	2740,48	397,469		317,97517
17	13:00	21092,070	19727,312	636,152	1,08E-04	0,108	0,2798582	2722,07	405,554		324,44338
18	13:15	25310,484	26772,781	637,498	1,12E-04	0,112	0,32122674	2728,41	463,127		370,50156
19	13:30	31638,105	31000,062	629,422	7,39E-05	0,074	0,38327956	2736,58	342,291		273,83284
20	13:45	31638,105	31000,062	628,076	7,39E-05	0,074	0,38327956	2736,58	342,291		273,83284
21	14:00	32341,174	33818,249	700,76	1,12E-04	0,112	0,39017432	2737,41	526,421		421,13681
22	14:15	24607,415	22545,500	649,612	1,33E-04	0,133	0,31433199	2727,37	541,484		433,18724
23	14:30	17576,725	18318,218	638,844	7,97E-05	0,080	0,24538441	2716,01	269,420		215,53568
24	14:45	14061,380	15500,031	620	1,11E-04	0,111	0,21091063	2709,05	364,665		291,73174
25	15:00	14061,380	15500,031	672,494	1,11E-04	0,111	0,21091063	2709,05	364,665		291,73174

Tabla 6.3 Resultados - 13/06/08

Presión Recipiente	Presión Atmosférica		Sf	Sfg	Sg	Hf	hfg	x	h4
	Mpa	kPa							
0,1420		73	1,2032	6,2641	7,2429	380,878	2280,744	0,9642	2579,9192
0,1626		73	1,2032	6,2641	7,1973	380,878	2280,744	0,9569	2563,2989
0,1902		73	1,2032	6,2641	7,1556	380,878	2280,744	0,9502	2548,1120
0,2178		73	1,2032	6,2641	7,0991	380,878	2280,744	0,9412	2527,5532
0,3143		73	1,2032	6,2641	6,9766	380,878	2280,744	0,9217	2482,9433
0,2799		73	1,2032	6,2641	7,0153	380,878	2280,744	0,9278	2497,0470
0,3350		73	1,2032	6,2641	6,9553	380,878	2280,744	0,9183	2475,1909
0,4178		73	1,2032	6,2641	6,8819	380,878	2280,744	0,9065	2448,4694
0,4522		73	1,2032	6,2641	6,8792	380,878	2280,744	0,9061	2447,4831
0,4867		73	1,2032	6,2641	6,8307	380,878	2280,744	0,8984	2429,8094
0,4522		73	1,2032	6,2641	6,8549	380,878	2280,744	0,9022	2438,6457
0,4178		73	1,2032	6,2641	6,8819	380,878	2280,744	0,9065	2448,4694
0,2799		73	1,2032	6,2641	7,0153	380,878	2280,744	0,9278	2497,0470
0,3212		73	1,2032	6,2641	6,9690	380,878	2280,744	0,9204	2480,1608
0,3833		73	1,2032	6,2641	6,9103	380,878	2280,744	0,9111	2458,8222
0,3833		73	1,2032	6,2641	6,9103	380,878	2280,744	0,9111	2458,8222
0,3902		73	1,2032	6,2641	6,9044	380,878	2280,744	0,9101	2456,6529
0,3143		73	1,2032	6,2641	6,9766	380,878	2280,744	0,9217	2482,9433
0,2454		73	1,2032	6,2641	7,0597	380,878	2280,744	0,9349	2513,2085
0,2109		73	1,2032	6,2641	7,0564	380,878	2280,744	0,9344	2511,9852
0,2109		73	1,2032	6,2641	7,0564	380,878	2280,744	0,9344	2511,9852

A continuación se detalla un ejemplo de cálculo, para determinar la potencia generada en el sistema de Torre de Potencia Solar.

– **Cálculo de la irradiación**

Para determinar la radiación en  $W/m^2$ , recurrimos a la ecuación de la recta, que proporciona el fabricante del instrumento utilizado para determinar la irradiación, la ecuación es:

$$I = 6,73x + 0,84 \quad (6.1)$$

$$I = 6,73(20 * 4,76) + 0,84$$

$$I = 650,958 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

– **Transformar de unidades a las presiones, de sistema ingles a sistema internacional.**

$$P_{recipiente} = 10 \text{ PSI}$$

$$P_{recipiente} = 10 \frac{100^2}{9,8 \times 2,2 \times 2,54^2}$$

$$P_{recipiente} = 718,924 \frac{Kg}{m^2}$$

– **Cálculo del caudal**

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (6.2)$$

Donde:

A1 = área de la tubería de ½

A2 = área de la tubería de ¼

P1 = presión del estrangulamiento

P2 = presión del recipiente

$\rho$  = peso específico del agua

$$Q = 1,171 \times 10^{-5} \sqrt{\frac{2(862,710 - 718,925)}{1000 \left[ 1 - \left( \frac{1,171 \times 10^{-5}}{6,937 \times 10^{-5}} \right)^2 \right]}}$$

$$Q = 9,009 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

– **Cálculo del flujo másico**

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \tag{6.3}$$

Donde:

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\dot{m} = 9,009 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$



– **Cálculo de la calidad**

$$x = \frac{s_g - s_f}{s_{fg}} \quad (6.4)$$

$$x = \frac{6,8307 - 1,2032}{6,2641}$$

$$x = 0,8984$$

– **Cálculo de  $h_4$**

$$h_4 = h_f + (x * h_{fg}) \quad (6.5)$$

$$h_4 = 380,878 + (0,8984 * 2280,744)$$

$$h_4 = 2429,8094$$

– **Cálculo de la potencia**

$$Potencia = \frac{\dot{m} * (h_g - h_4) * 1000}{60} \quad (6.6)$$

$$Potencia = \frac{0,158 * (2747,42 - 2429,8094) * 1000}{60}$$

$$Potencia = 835,428 \quad \text{vatios}$$

– **La potencia del generador**

$$P_{\text{generador}} = Potencia * 0,80 \quad (6.6)$$

$$P_{\text{generador}} = 835,421 * 0,8$$

$$P_{\text{generador}} = 668,34248 \quad \text{vatios}$$



## CAPÍTULO 7

### ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

#### 7.1 COSTO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Para determinar el costo de producción del equipo, es necesario tener presente conceptos que nos facilitarán la clasificación y la determinación del mismo. Estos conceptos son:

- **Materia prima directa:** Son los costos de los materiales que intervienen o son parte directa del equipo, tales como tubos cuadrados, espejos, vidrio, etc.
- **Materia prima indirecta:** Son los costos de los materiales que intervienen en el proceso de construcción del equipo pero no son parte del mismo, como lijas, pintura, etc.
- **Mano de obra directa:** Son los costos de los procesos directos que son parte de la construcción del equipo, como servicio de corte, roscado, soldadura, etc.

- **Mano de obra indirecta:** Son los costos de los procesos indirectos que no forman parte de la construcción del equipo, como papel, pago a director y codirector, transporte, etc.
- **Imprevistos:** Este rubro nos sirve para cubrir cualquier eventualidad que se presente durante la realización del proyecto, y que no conste dentro de los campos anteriores, y es igual al 10% del valor máximo establecido entre la materia prima directa, indirecta, mano de obra directa, indirecta.

## 7.2 COSTO GENERADOR ELÉCTRICO

Para realizar la selección de los generadores es necesario tomar en cuenta dos parámetros: la potencia requerida y el costo/beneficio.

En la tabla 7.1, se muestra algunos valores referenciales de costos de generadores:

**Tabla 7.1** Costo de Generadores

Tamaño de la Turbina	Costo (\$/Kw) de la turbina	Costo (\$/m <sup>2</sup> )
0.2 Kw	13000	1000
0.4 Kw	5500	700
1 Kw	2500	430
2 Kw	2100	400
3.5 Kw	2000	390
4.5 Kw	1700	370
6.5 Kw	1500	350

**Fuente:** <http://www.cubasolar.cu>

En la tabla podemos observar que los costos de los generadores acá descritos disminuyen a medida que la potencia que generan aumenta. Esto se debe a que de esta manera los generadores se muestran competitivos con los sistemas fotovoltaicos, porque en éstos los costos se mantienen casi invariables.

### **7.3 REPORTE DE GASTOS REALIZADOS**

- **Depreciación**

Es la deducción anual del valor de la Torre de Potencia, es utilizado para dar a entender que la inversión permanente en este proyecto ha disminuido en potencial de servicio.

Se basa en criterios económicos, tomando en cuenta el tiempo productivo en el cual se hace uso del mismo.

En este caso se realizara a través del método decreciente, ya que nos permite hacer depreciaciones más altas durante los primeros años, y más bajo durante los últimos períodos.

Las variables en consideración para el caso se indican a continuación:

- **Mercado Potencial**

Está destinada al sector de generación de electricidad, para implementar en lugares donde el suministro de energía eléctrica es escaso o nulo, siendo orientado explícitamente al Ministerio de Energía No Renovables, organismo que está encargado de la generación y suministro de la energía eléctrica en el país.

El cuadro de gastos de mano de obra se encuentra detallado en el anexo8.

## 7.4 ANÁLISIS FINANCIERO

Para determinar la viabilidad de este proyecto, es necesario realizar un análisis de los costos de venta de la energía producida de diferentes maneras, como podemos observar en la tabla 7.2

**Tabla 7.2** Comparación de costo de venta de energía

<b>Tipo de Energía</b>	<b>Costo por Kwh (USD)</b>
Eólica	0,02
Hidráulica	0,07
Térmica	0,06
Solar fotovoltaica**	8,75
Mareomotriz*	0,11
Nuclear*	0,06
Torre de Potencia Solar	2,5 - 4,4

**Fuente:** Salinas, R, Calvopiña P.

\*Este tipo de energía no está disponible en Ecuador.

\*\*Energía utilizada en pequeñas aplicaciones dentro del territorio Ecuatoriano.

De la tabla anteriormente expuesta podemos observar, que la energía eólica es la que nos presenta el menor costo para el usuario, después de ella tenemos la Energía Nuclear, Térmica, Hidráulica, Mareomotriz, Torre de Potencia Solar y Solar Fotovoltaica.

El sistema de Torre de Potencia Solar es un sistema que produce energía a un precio alto, comparados con otros sistemas de producción de energía como hidráulica y eólica. Pero también debemos tomar en cuenta que es un sistema que se encuentra en etapa de prueba, lo que hace que la energía producida

sea de alto costo, pero, cuando se difunda su utilización, el costo de la energía producida se reducirá, como es usual cuando se utiliza alta tecnología en la producción de energía, como podemos observar en la energía fotovoltaica, que en sus inicios costaba miles de dólares por vatio, en los 80's su precios decrecieron hasta 30 dólares por vatio y así continúa hasta nuestros días, en la que el costo se encuentra entre 5 y 15 dólares por vatio.

Es por esto que en países que dedican fuertes sumas de dinero a la investigación de este tipo de energía se empieza a encontrar otros métodos para hacerla más eficiente, más barata y de mayor potencia, así como nuevas formas para almacenar el calor recibido durante el día y así, evitar que la producción de energía disminuya o se paralice durante la noche. Obviamente esto hace que los costos se incrementen por la investigación, pero cuando el conocimiento se masifique, hará que los precios disminuyan.





## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **8.1 CONCLUSIONES**

En el presente proyecto se desarrolló una Torre de Potencia Solar, con el cual se alcanzó una potencia máxima de 835,428 vatios, este resultado nos permite comprobar la funcionalidad y operatividad de este sistema de media y alta temperatura.

Las mediciones realizadas los días 12, 13, 16, 17, 18 y 19 de junio del 2008, en las instalaciones del Campus Politécnico de la ESPE, ubicado en Sangolquí, nos indican que el recurso solar es de  $643 \text{ w/m}^2$ , recurso que es aprovechado por el sistema de Torre de Potencia Solar para la generación de vapor para su posterior utilización en la producción de energía eléctrica.

A través de los conceptos básicos de reflexión, refracción y absorción se ha utilizado espejos planos, con una distribución parabólica para lograr la mayor captación de radiación que reflejan estos, en un punto denominado foco de la

parábola, en el cual se encuentra el receptor, sitio en el cual se concentra la mayor cantidad de energía solar, lo que hace posible la transformación de la energía solar en energía térmica.

Con este sistema se efectuaron las pruebas respectivas de operación y funcionamiento, con lo cual se ha determinado el recurso solar necesario para la generación de 500 w, así como también las influencias meteorológicas en el funcionamiento de la Torre de Potencia Solar.

El sistema de Torre de Potencia Solar, es un equipo que sirve para la implementación en el Laboratorio de Energías, con el cual se pueden realizar las prácticas, como complemento de la teoría impartida en las aulas, del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (DECEM)

Este sistema tiene un mejor desempeño en condiciones de radiación directa, pues se obtiene una mayor concentración en el receptor, obteniéndose temperaturas hasta 152 °C, con lo cual calentamos el fluido de trabajo, no cumple cuando se presenta condiciones de radiación difusa.

Las condiciones meteorológicas influyen en el rendimiento de la Torre de potencia, el viento contribuye al enfriamiento acelerado del receptor y de los espejos, esto va en decremento de la concentración de calor en el sistema, obteniendo así una disminución de la presión, temperatura y flujo de vapor.

La temperatura de los espejos es igual a la ambiental, debido a las propiedades propias, que hacen que el calor no se concentre en éstos y origina que se transfiera hacia el receptor en su mayor parte.

El costo de energía obtenido por este tipo de proyectos es alto, debido a que todavía se encuentra en etapas de investigación y desarrollo.

## 8.2 RECOMENDACIONES

La torre de potencia solar posee un mejor desempeño bajo condiciones de cielo despejado, y, haciendo las pruebas en este estado, es posible obtener igual o mejor producción de vapor, razón por la que es aconsejable la utilización del sistema dentro de estas condiciones climáticas.

Se recomienda que los espejos y el vidrio frontal del receptor sean limpiados antes de realizar las pruebas, de esta manera nos aseguraremos que no existan pérdidas de superficie reflectante en los espejos, y sombras que se proyecten en el receptor, en el vidrio frontal.

Se recomienda la utilización de equipo de protección para la vista, puesto que el haz de luz que se proyecta es muy fuerte y puede causar daño en la misma, así como quemaduras en la piel si se producen exposiciones prolongadas a la luz emitida por el helióstato.

El receptor es un recipiente sometido a presión, por lo que se recomienda tomar en cuenta las precauciones respectivas al manipular este tipo de calderas.

Para trabajos bajo condiciones de cielo parcialmente nublado, se recomienda adicionar un helióstato, y cuando el cielo se muestra nublado se adicionar dos helióstatos de igual dimensiones al diseñado, de esta manera se concentrará la mayor cantidad de radiación solar, realizándose una compensación por falta de radiación directa.

Invertir más tiempo y recursos en la investigación de este tipo de energías alternativas, de esta manera disminuirán los costos de fabricación y por consecuencia, los de producción, con esto los precios de esta energía serán competitivos con los de las energías convencionales.

Para la generación de electricidad , se debe seleccionar la máquina eléctrica en función de las necesidades y aplicaciones a la cual está expuesta, así es más económico elegir una máquina del tipo A, que una del tipo H, que depende fundamentalmente de la temperatura y condiciones de trabajo.

Se recomienda que el período de funcionamiento del sistema de Torre de Potencia Solar sea desde las 9 hasta las 15 horas, por ser en este intervalo de tiempo se tiene una mayor radiación solar.