

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

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

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE  
INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CELDAS PARABÓLICAS CON  
ALMACENAMIENTO TÉRMICO, PARA CALENTAMIENTO DE UN  
INVERNADERO DE 40m<sup>2</sup>**

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

**RUBÉN PATRICIO TAIPE SANVACHE  
CRISTIAN HERNÁN ACOSTA CRIOLLO**

**DIRECTOR: ING. ADRIÁN PEÑA.  
CODIRECTOR: ING. ROBERTO GUTIÉRREZ.**

**Sangolquí, 2006**

# **CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

**El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CELDAS PARABÓLICAS CON ALMACENAMIENTO TÉRMICO, PARA CALENTAMIENTO DE UN INVERNADERO DE 40m<sup>2</sup>”, fue realizado en su totalidad por Rubén Patricio Taipe Sanvache y Cristian Hernán Acosta Criollo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.**

---

**Ing. Adrián Peña**

**DIRECTOR**

---

**Ing. Roberto Gutiérrez**

**CODIRECTOR**

**Sangolquí, 2006**

# **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MODELO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CELDAS PARABOLICAS CON ALMACENAMIENTO TERMICO, PARA CALENTAMIENTO DE UN INVERNADERO DE 40m<sup>2</sup>”**

**ELABORADO POR**

---

**Patricio Taipe**

---

**Cristian Acosta**

**CARRERA DE INGENIERIA MECANICA**

---

**ING. JUAN DIAZ**

**COORDINADOR DE CARRERA**

## **DEDICATORIA**

La culminación de mi carrera quiero dedicarlo a mi Familia, hermanos/as, cuñada/os, sobrinos, especialmente con todo mi amor a mis PADRES, por el sacrificio que realizaron por darme el apoyo económico, porque nunca me negaron nada, por sus consejos, pero sobre todo por el apoyo moral y por ayudarme hacer una persona responsable y de bien para la sociedad.

## **PATRICIO**

A toda mi familia, en especial a mis padres, por haberme inculcado la ética de trabajo, superación y brindarme su apoyo incondicional, además por ser artífices de mi formación personal y profesional.

**CRISTIAN**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a todas aquellas personas que de alguna manera han colaborado en el desarrollo de este proyecto y de manera muy especial a nuestros directores, sin olvidar a nuestros amigos con los que hemos compartido todo este tiempo de triunfos y fracasos.

# INDICE DE CONTENIDOS

	<b>pág.</b>
<b>CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO</b>	ii
<b>LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO</b>	iii
<b>DEDICATORIA</b>	iv
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	v
<b>INDICE DE CONTENIDOS</b>	vi
<b>INDICE DE TABLAS</b>	xi
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	xii
<b>NOMENCLATURA</b>	xiv
<b>RESUMEN</b>	xviii
<b>CAPITULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DE PROYECTO</b>	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del Problema	2
1.3 Objetivos	4
1.3.1 General	4
1.3.2 Específicos	4
1.4 Alcance	5
1.5 Justificación e importancia	5

<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.</b>	<b>7</b>
2.1 Radiación solar.	7
2.1.1 El Sol.	7
2.1.2 La constante solar.	7
2.1.3 Variación de la radiación solar extraterrestre	8
2.1.4 Radiación solar en la superficie terrestre.	9
2.1.4.1 Radiación Solar Directa	10
2.1.4.2 Radiación Solar Difusa	10
2.1.5 Trayectoria del sol	11
2.1.5.1 Eclíptica	11
2.1.5.2 Sistema de coordenadas horizontales	12
2.1.6 Cálculo de la radiación solar.	17
2.1.6.1 Dirección de la radiación solar directa	17
2.1.6.2 Estimación de la radiación solar	19
2.2 Calentamiento con energía solar	25
2.2.1 Sistemas activos.	25
2.2.2 Sistemas pasivos	25
2.3 Celdas.	27
2.3.1 Tipos de celdas.	28
2.3.2 Celda parabólica	30
2.3.2.1 Componentes del concentrador y sus características	31
2.3.2.2 Funcionamiento	33
2.3.2.3 Balances de energía	35
2.4 Almacenamiento térmico	40
2.4.1 Tipos de almacenamiento térmico	42
2.4.2 Almacenamiento en lecho de rocas	44
2.4.2.1 Modos de operación de almacenamientos termicos.	44
2.4.2.2 Componentes	47
2.4.2.3 Funcionamiento	48
2.4.2.4 Dimensionamiento	50

<b>CAPITULO 3: SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE INVERNADEROS</b>	<b>53</b>
3.1 Sistemas de calefacción convencional.	53
3.2 Climatización de invernaderos durante períodos fríos	53
3.2.1. Sistemas de calefacción	54
3.2.1.1. Calefacción por agua caliente.	55
3.2.1.2. Calefacción por aire caliente.	56
3.3 Parámetros a considerar en el control climático.	57
3.3.1 Pérdidas de calor.	57
3.3.1.1 Temperatura.	58
3.3.1.2 Pérdidas por conducción y convección.	59
3.3.1.3 Perdidas por radiación.	59
3.3.1.4 Pérdidas por infiltración de aire.	60
3.3.2 Calor requerido por el invernadero.	61
3.3.3 Flujo másico de aire.	61
3.3.4 Capacidad del equipo.	62
<b>CAPÍTULO 4: DISEÑO TERMICO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.</b>	<b>63</b>
4.1 Parámetros del diseño	63
4.1.1 Cálculo del calor requerido por el invernadero	63
4.1.2 Flujo másico de aire.	70
4.1.3 Radiación solar directa	72
4.2 Diseño del almacenamiento térmico.	81
4.2.1 Masa de piedras para el almacenamiento de calor	81
4.2.2 Dimensionamiento del almacenamiento térmico	82
4.2.3 Calor requerido para el almacenamiento térmico	84
4.3 Diseño de las celdas parabólicas	87
4.3.1 Dimensionamiento de la celda parabólica	87
4.3.2 Calor útil concentrado por una celda parabólica	89
4.3.3 Seguimiento de la trayectoria del sol.	95

<b>CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.</b>	97
5.1 Hojas y diagramas de procesos	101
5.1.1 Elaboración de diagramas de procesos.	102
5.1.2 Elaboración de hojas de procesos.	103
5.2 Guía de ensamble.	103
5.2.1 Ensamble	103
5.3 Pruebas de funcionamiento del modelo.	106
5.3.1 Procedimiento	106
5.3.2 Eficacia y eficiencia del modelo	110
5.3.2.1 Eficacia	110
5.3.2.2 Eficiencia	110
5.3.2.3 Ejemplo de cálculos	110
5.3.3 Descarga de la energía almacenada	119
<b>CAPÍTULO 6: ASPECTO ECONÓMICO - FINANCIERO</b>	121
6.1 Costos directos.	121
6.1.1 Materia prima directa	121
6.1.2 Mano de obra directa	122
6.2 Costos indirectos	123
6.3 Gastos administrativos	124
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	126
7.1 Conclusiones.	126
7.2 Recomendaciones.	128
<b>CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS.</b>	129
8.1 Bibliografía.	129
8.2 Anexos	131
8.2.1 Anexo A: Selección de ventilador.	132
8.2.2 Anexo B: Diagramas de proceso	138

8.2.3 Anexo C: Hojas de procesos o planos de construcción	158
8.2.4 Anexo D: Guía de ensamble en 3D.	170
8.2.5 Anexo E: Plano conjunto del modelo en 3D	172
8.2.6 Anexo F: Fotos y video.	174
8.2.7 Anexo G: Carta de conformidad	178

## INDICE DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 2.1	Día representativo de cada mes.....15
Tabla 4.1	Radiación solar extraterrestre y diaria promedio para todo el año .....74
Tabla 4.2	Ángulos horarios desde las 6 hasta las 18 horas..... 77
Tabla 4.3	Radiación solar global, difusa y directa por hora para el día..... 80
Tabla 4.4	Puntos de la parábola..... 88
Tabla 4.5	Ángulos de incidencia de la radiación solar directa y de variación para el seguimiento.....96
Tabla 5.1	Materia prima para la construcción del modelo.....100
Tabla 5.2	Partes del modelo.....101
Tabla 5.3	Códigos de las partes del modelo que se construyen.....102
Tabla 5.4	Datos de las pruebas de funcionamiento del modelo.....107
Tabla 5.5	Tiempo de descarga de la energía.....109
Tabla 5.6	Energías calculadas en el modelo.....115
Tabla 5.7	Eficacias del modelo.....117
Tabla 5.8	Eficiencia del modelo.....119
Tabla 5.9	Energía de descarga.....120
Tabla 6.1	Materia prima y precios.....121
Tabla 6.2	Remuneración de la mano de obra directa.....123
Tabla 6.3	Costos indirectos.....124
Tabla 6.4	Remuneración del personal administrativo.....124
Tabla 6.5	Gastos Administrativos.....125
Tabla 6.6	Costo total de la construcción del modelo.....125

# INDICE DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1.1	Esquema de la instalación del proyecto.....3
Figura 2.1	Relación geométrica entre la Tierra y el Sol..... 8
Figura 2.2	Variación de la radiación solar extraterrestre con la época del año.....9
Figura 2.3	Radiación directa.....10
Figura 2.4	Radiación difusa.....10
Figura 2.5	Trayectoria aparente del Sol: Eclíptica.....12
Figura 2.6	Sistema de coordenadas horizontales.....13
Figura 2.7	Ángulo latitud.....13
Figura 2.8	Ángulo declinación.....14
Figura 2.9	Dirección de la radiación solar directa.....17
Figura 2.10	Relación entre la radiación solar difusa diaria y la radiación diaria total, de Liu y Jordan.....22
Figura 2.11	Variación de la radiación solar incidente en una superficie horizontal a lo largo de un día despejado, para la ciudad de Quito.....23
Figura 2.12	Algunas configuraciones de sistemas de concentración.....29
Figura 2.13	Concentradores cilíndrico-parabólicos.....30
Figura 2.14	Concentrador cilíndrico parabólico típico.....31
Figura 2.15	Componentes de un concentrador cilíndrico parabólico.....32
Figura 2.16	Características del CCP.....33
Figura 2.17	Parámetros para la ecuación de la parábola.....35
Figura 2.18	Distribución de calores.....36
Figura 2.19	Parámetros que intervienen en el tubo absorbedor.....37

Figura 2.20	Almacenamiento de agua en sistemas de concentradores solares.....	43
Figura 2.21	Modos de operación.....	45
Figura 2.22	Unidad de almacenamiento de lecho compacto.....	46
Figura 2.23	Almacenamiento de calor durante el día.....	48
Figura 2.24	Distribución del calor en la noche.....	49
Figura 2.25	Dimensionamiento de la caja del almacenamiento térmico.....	52
Figura 4.1	Dimensiones del invernadero.....	63
Figura 4.2	Invernadero.....	64
Figura 4.3	Proceso de calentamiento de la masa de aire.....	70
Figura 4.4	Distribución de la masa de piedras dentro del almacenamiento térmico.....	82
Figura 4.5	Dimensionamiento de la caja del almacenamiento térmico.....	84
Figura 4.6	Parábola del CCP.....	88
Figura 4.7	Dimensiones del CCP.....	94
Figura 5.1	Diagrama de ensamble del modelo.....	105

## NOMENCLATURA

$G(n)$	Variación de la radiación solar extraterrestre que incide en una superficie perpendicular a los rayos del Sol, $[W/m^2]$
$I_{sc}$	Constante solar, $[W/m^2]$
$n$	Número de día del año
$\delta$	Ángulo declinación, $[^\circ]$
$\phi$	Ángulo latitud, $[^\circ]$
$\omega$	Ángulo horario, $[^\circ]$
$\omega_s$	Ángulo de ocaso
$\theta$	Ángulo de incidencia de la radiación solar directa, se mide entre la normal y la radiación.
$\delta$	Declinación solar
$\gamma$	Ángulo azimut de la superficie
$\beta$	Ángulo de inclinación de la superficie con respecto a la horizontal
$H_{av}$	Radiación solar diaria sobre una superficie horizontal
$H_0$	Radiación solar extraterrestre en una superficie horizontal
$a, b$	Constantes que dependen de la ubicación
$\frac{hel}{T_D}$	Relación entre las horas de brillo solar y la duración teórica del día en horas
$H_{Dif}$	Radiación solar difusa por minuto
$H_{Dif, Diaria}$	Radiación difusa diaria, $\left[ \frac{J}{m^2 \cdot día} \right]$
$r_d$	Relación entre la radiación solar difusa por minuto y la difusa diaria.
$r_g$	Radiación global diaria.
$H_g$	Radiación global por minuto
A	Ancho del cilindro parabólico.

L	Largo del cilindro parabólico.
Dt	Diámetro del tubo receptor
Dc	Diámetro de la cubierta.
R	Factor que controla la distancia del tubo focal a la superficie de apertura.
B	Apertura de la boca (m)
C	Profundidad de la parábola en el centro (m).
CCP	Concentrador cilíndrico parabólico.
F	Foco de la parábola.
Qu	Calor útil que absorbe el fluido de trabajo (w)
Qef	Calor radiante efectivo que llega al fluido de trabajo (w).
Qpr	Calor perdido por radiación (w)
$\eta_o$	Eficiencia óptica.
A <sub>a</sub>	Área de apertura.
$\sigma_d$	Radiación solar.
$\rho_r$	Reflejancia del espejo.
$\tau$	Transmitancia de la cubierta.
$\alpha$	Absortancia del absorbedor.
$\gamma$	Factor de forma que depende de los errores en la pendiente del espejo y de la dispersión que sufre la radiación solar.
F	Error en el seguimiento.
f <sub>t</sub>	Fración de la apertura no sombreada por soportes y absorbedor.
At	Área por metro lineal del tubo del absorbedor (m <sup>2</sup> )
$\sigma$	Coefficiente de Stefan Boltzman (w/m <sup>2</sup> *k)
F1-2	Factor de orientación para dos cilindros concéntricos.
$\epsilon_t$	Emitancia del tubo absorbedor.
$\epsilon_c$	Emitancia de la cubierta.
cpp	Calor específico de la piedra.
qs	Flujo de calor sensible.
T2	Temperatura a la que puede ser calentada una placa negra expuesta al sol.
T1	Temperatura ambiente.

mp	Masa de piedras.
$\rho_p$	Densidad de la piedra.
Vp	Volumen de lecho de piedras.
l	Lado del volumen.
lt	Lado total de la caja del lecho de rocas.
h	Altura y el ancho de la caja del almacenamiento térmico.
Lc	Largo de la caja.
R	Resistencia térmica de la pared.
Qc	Pérdidas de calor por conducción
he	Coefficiente de convección exterior.
hi	Coefficiente de convección interior.
Xl	Espesor de la pared.
Kl	Conductividad térmica de la pared.
A	Area de paredes y cubierta.
tpi	Temperatura interior.
tpc	Temperatura exterior.
hpr	Coefficiente de transferencia de calor por radiación.
$\xi$	Emisividad.
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzman.
Tm	Temperatura media.
A	Área de paredes y cubierta.
Qpt	Pérdidas totales de calor.
Qpi	Calor requerido por el invernadero.
Hser	Horas de servicio que va a proporcionar el equipo en las noches.
ma	Flujo másico de aire.
cp	Calor específico del aire.
Ts	Temperatura de suministro al invernadero.
Ti	Temperatura interna del invernadero.
Qe	Calor requerido por el equipo.
Te	Temperatura externa del invernadero.

tpi	Temperatura interior.
tpe	Temperatura exterior.
Q <sub>piso</sub>	Pérdidas de calor por el piso.
Q <sub>pat</sub>	Calor perdido por las paredes del almacenamiento térmico.
a <sub>1</sub>	Ancho del invernadero.
b <sub>1</sub>	Longitud del invernadero.
c	Ancho de la cubierta del invernadero.
h <sub>1</sub>	Altura del invernadero.
A <sub>v</sub>	Area de ventana descubierta.
I <sub>v</sub>	Infiltración en ventana.
Q <sub>si</sub>	Calor sensible por infiltración de aire.
T <sub>d</sub>	Duración teórica del día.
hel	Horas de brillo soplar para el Ecuador.
sep	Separación entre los lechos de piedra.
dis	Separación entre la caja del lecho de piedras y la caja del almacenamiento térmico.
Q <sub>nat</sub>	Calor necesario para el almacenamiento térmico.
V <sub>ve</sub>	Velocidad del aire exterior
V <sub>vi</sub>	Velocidad del aire interior.
k <sub>1n</sub>	Coefficiente de conductividad térmica de la lana de vidrio.
x <sub>at</sub>	Espesor del almacenamiento térmico.
Pr <sub>at</sub>	Resistencia al paso de calor por la pared.
NC	Número de concentradores.
Q <sub>a</sub>	Energía que gana el aire.
Q <sub>d</sub>	Energía de descarga.
ε <sub>a</sub>	Eficacia del almacenamiento.
ε <sub>c</sub>	Eficacia de los concentradores.
η	Eficiencia del modelo.

## RESUMEN

El proyecto de tesis planteado: “Diseño y construcción de un modelo de intercambiador de celdas parabólicas con almacenamiento térmico, para calentamiento de un invernadero de 40m<sup>2</sup>”, para la Carrera de Ingeniería Mecánica, nace como una necesidad de realizar nuevas investigaciones dentro del campo agrícola, la aplicación de este tipo de proyectos, ayudará decisivamente a la implementación de una solución innovadora, en el ámbito de la calefacción alternativa que es una de las dificultades presentadas en el sector antes mencionado; para poder realizar este proyecto, se demandara de una extensa investigación, la misma que principalmente utilizará la energía solar, la transferencia de calor y el almacenamiento del recurso solar. La finalidad de este proyecto es concentrar la energía solar directa durante todo el día por medio de celdas parabólicas, las cuales van a ir calentando aire que circula a través de un tubo absorbedor, este aire caliente se almacena en la caja de almacenamiento térmico por medio del lecho de piedras; esta energía almacenada durante el día es descargada en la noche a través de un extractor logrando que la temperatura interna del invernadero no baje de 7 °C, siendo esta temperatura la mínima permitida para el cultivo de rosas y obteniendo así una calefacción adecuada

Para tal efecto se realizó el diseño, comenzando por el cálculo del calor o energía requerida por el invernadero, esta energía depende de las pérdidas de calor que se producen en el invernadero y por ende del área del mismo, luego se procedió a calcular la radiación solar directa, siendo esta el promedio de el día mas representativo de cada mes del año, el calculo de esta radiación es muy importante ya que las celdas parabólicas solo pueden concentrar la radiación solar directa.

Con el calor requerido por el invernadero, se procede a diseñar el almacenamiento térmico y se parte del cálculo de la masa de piedras necesarias para el lecho de las mismas, luego obteniendo el volumen de la caja del almacenamiento y el calor necesario en el almacenamiento térmico.

De acuerdo a la materia prima disponible en el mercado nacional, se procede a imponer medidas para el área de apertura de las celdas parabólicas, obteniendo el calor o energía que concentra una celda; para obtener el número de los concentradores simplemente se relaciona la energía requerida por el almacenamiento térmico y la energía que concentra cada uno de estos.

El aire que circula por el tubo absorbedor es proporcionado por medio de un ventilador, el cual depende de las pérdidas de presión por la fricción con el tubo y la cantidad de aire que se necesita para almacenar la energía requerida por el invernadero.

La construcción realizada es un modelo a escala del diseño real para el invernadero de 40 m<sup>2</sup>.

El proceso de pruebas de funcionamiento se realizaron durante una semana, haciendo la medición de varios parámetros como: la temperatura ambiente o de entrada a los concentradores, la temperatura de salida de los concentradores, la temperatura de las piedras, la temperatura del tubo absorbedor, la temperatura de salida del almacenamiento térmico, la masa de las piedras, el tiempo de descarga de aire al invernadero, el caudal de ingreso de aire y el caudal de salida de aire.

Los resultados obtenidos satisfacen los objetivos del diseño planteados para el proceso de calentamiento del invernadero durante las noches, así como los parámetros de funcionalidad, fiabilidad y costo bajo de construcción.

# CAPITULO 1

## DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

### 1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad, la tecnología demanda de nuevas propuestas, las mismas que necesariamente no son aplicables al ámbito industrial sino también en el campo agrícola.

Este ultimo, posee grandes necesidades como es el diseño y construcción de un prototipo de un intercambiador de calor de celdas parabólicas con almacenamiento térmico, para el calentamiento de invernaderos de 40m<sup>2</sup>, son muy pocos los trabajos realizados en este campo los mismos que carecen de un verdadero valor científico, razón por la cual los proyectos con los que se disponen no son totalmente eficientes.

La aplicación de este tipo de proyectos, ayudará decisivamente a la implementación de una solución innovadora, en el ámbito de la calefacción alternativa que es una de las dificultades presentadas en el sector antes mencionado; para poder realizar este proyecto, se demandara de una extensa investigación, la misma que principalmente utilizará la energía solar, la transferencia de calor y el almacenamiento del recurso solar.

La simplicidad de su operación es una de las ventajas, debido a que cualquier persona que una capacitación adecuada puede operar a una maquina como la que se desea diseñar y construir.

Actualmente, la energía solar representa una importante alternativa energética para contribuir a reducir el déficit de la energía a escala global donde se pueden obtener importantes aplicaciones como:

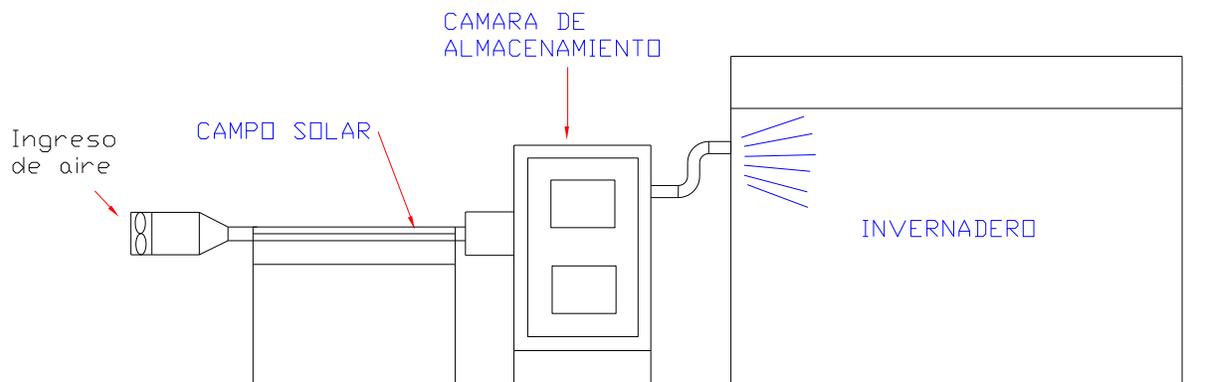
- Paneles solares fotovoltaicos.
- Colectores solares.
- Energía solar térmica de baja, media y alta temperatura..
- Energía solar fotovoltaica.
- Calefacción.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente se tiene un consumo medio muy elevado de energía en cada una de las máquinas para climatización instaladas en nuestro medio, es así que surge el problema y la necesidad de crear o diseñar nuevas técnicas que nos permitan poseer mayores alternativas para lograr un mayor ahorro de energía en la climatización de invernaderos. Es por eso que una de las mejores alternativas es utilizar la energía solar como fuente de trabajo para contribuir a reducir el déficit de la energía, que actualmente en nuestro país es muy elevado.

El presente proyecto está dirigido directamente al cultivo de rosas bajo invernadero, pero también puede ser utilizado en otros productos, solamente se tendrían que ajustar las necesidades que cada producto tenga.

Con el cultivo de flores bajo invernadero se consigue producir en épocas y lugares en los que de otra forma no sería posible, para ello, estos invernaderos deben cumplir unas condiciones mínimas: la transmisión de luz debe ser adecuada, la altura tiene que ser considerable y la ventilación en los meses calurosos debe de ser buena, además, es recomendable la calefacción durante el invierno, junto con la instalación de mantas térmicas para la conservación del calor durante la noche. El proyecto que se realizará se basa justamente en la calefacción del invernadero en las noches, es así como se solucionará uno de los mayores problemas que tienen los invernaderos, y es mantener o conservar el calor durante la noche, como se indica en la Figura 1.1.



**Figura 1.1 Esquema de la instalación del proyecto.**

Para la mayoría de los cultivos de rosa, las temperaturas óptimas de crecimiento son de 17 °C a 25 °C, con una mínima de 7 °C durante la noche y una máxima de 28 °C durante el día<sup>1</sup>. Pueden mantenerse valores ligeramente inferiores o superiores durante períodos relativamente cortos sin que se produzcan serios daños, pero una temperatura nocturna continuamente por debajo de 7 °C retrasa el crecimiento de la planta, produce flores con gran número de pétalos y deformes, en el caso de que abran. Temperaturas excesivamente elevadas también dañan la producción, apareciendo flores más pequeñas de lo normal, con escasos pétalos y de color más cálido.

---

<sup>1</sup> Datos proporcionados por DENMAR: Empresa dedicada al cultivo de rosas bajo invernaderos.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 GENERAL**

Diseñar y construir un modelo de un intercambiador de calor de celdas parabólicas con almacenamiento térmico, para calentamiento de un invernadero de 40m<sup>2</sup>.

### **1.3.2 ESPECÍFICOS**

- Analizar las diferentes alternativas tecnológicas existentes para el aprovechamiento óptimo del recurso solar de media temperatura con aplicación al calentamiento de invernaderos.
- Determinar los parámetros característicos y funcionamiento del intercambiador de calor.
- Realizar las pruebas de funcionamiento.
- Determinar la aplicación del intercambiador de calor en diferentes tipos de productos agrícolas que requieran de un invernadero para su crecimiento y manutención.

## **1.4 ALCANCE**

Con la correcta ejecución de este diseño y su posterior implementación se pretende que la temperatura dentro del invernadero durante las noches no disminuya de 7 °C lo que favorecerá al normal crecimiento de las rosas y disminuir los costos de su producción, lo que directamente elevará el prestigio de la industria nacional ante la perspectiva mundial, debido a que se posicionará en el mercado internacional un producto más competitivo, lo que consecuentemente significará un mayor ingreso de divisas al país para entonces poder decir que la agroindustria ecuatoriana participa activamente del fenómeno de globalización.

Para lograr los objetivos planteados de este proyecto, se aprovechará la Radiación solar como fuente de energía, concentrándola por medio de celdas parabólicas y almacenando el calor durante el día en una cámara de almacenamiento térmico, para posteriormente ser distribuido en las noches a un invernadero.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Con el desarrollo del presente proyecto se pretende fortalecer el crecimiento institucional mediante el fomento a la investigación científica, la innovación y el desarrollo tecnológico; y de esta manera contar con experiencias y conocimientos técnicos que vinculados a los sectores productivos permitan potencializar el desarrollo y la mejora continua de los incipientes procesos agrícolas e industriales que aún se mantienen dentro de un proceso de transformación.

Por otra parte, a escala global se viene enfrentando el déficit energético donde los limitados recursos energéticos basados en los combustibles fósiles cada vez son más escasos y causan irreversibles impactos sobre el medio ambiente. Es por estas razones que se deben enfocar al fortalecimiento de la investigación para la obtención de

dispositivos que utilicen energías renovables para la generación de energía térmica que pueda ser utilizada en calefacción, con énfasis al sector agrícola.

Se dispone del recurso humano, la infraestructura y los conocimientos necesarios para el desarrollo del proyecto que permitirá obtener un modelo de utilidad que sirva para otras potenciales aplicaciones y de esta manera se logre fomentar la cooperación entre la Universidad, Empresa privada y Sociedad.

## CAPITULO 2

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 RADIACIÓN SOLAR

##### 2.1.1 EL SOL

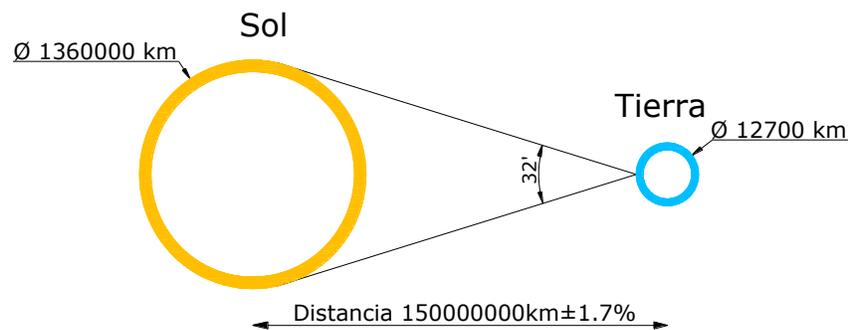
El Sol es un cuerpo celeste formado por materia gaseosa intensamente caliente, con un diámetro de aproximadamente  $1.39 \times 10^6$  [km], y una masa estimada de  $2.2 \times 10^{27}$  [Ton]. Su distancia promedio de la Tierra es  $1.5 \times 10^8$  [km]. La temperatura efectiva en la superficie del Sol es de 5762 [K], mientras que en las regiones internas las temperaturas varían desde  $8 \times 10^6$  a  $40 \times 10^6$  [K], con una densidad de 80 a 100 veces la densidad del agua. El Sol emite energía en forma de luz y radiación térmica a razón de  $3.7 \times 10^{26}$  [W].<sup>1</sup>

El Sol es un gran reactor de fusión en el que los gases están contenidos por medio de intensas fuerzas gravitatorias. El proceso más importante de generación de energía está en la combinación de cuatro átomos de hidrógeno para formar uno de helio. La masa del átomo de helio es menor que la de cuatro de hidrógeno; de acuerdo con la hipótesis de Einstein de equivalencia de masa y energía, la masa perdida en la reacción es transformada en energía y luego irradiada al espacio.

## 2.1.2 LA CONSTANTE SOLAR

La órbita terrestre alrededor del Sol es elíptica, con una excentricidad de un 3%. A la distancia promedio desde la Tierra, el Sol subtende un ángulo de 32' (treinta y dos minutos). Esto se ilustra en la figura 2.1.

<sup>1</sup> <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/solar/PDFs/Solar1.pdf>



**Figura 2.1 Relación geométrica entre la Tierra y el Sol**

La constante solar es la cantidad de energía por unidad de tiempo, recibida por unidad de área en una superficie perpendicular a los rayos solares, ubicada en el exterior de la atmósfera a la distancia promedio entre la Tierra y el Sol. El valor de la constante solar se ha determinado por medio de mediciones satelitales y extrapolaciones de mediciones terrestres:

$$I_{sc} = 1353 \quad [W/m^2]$$

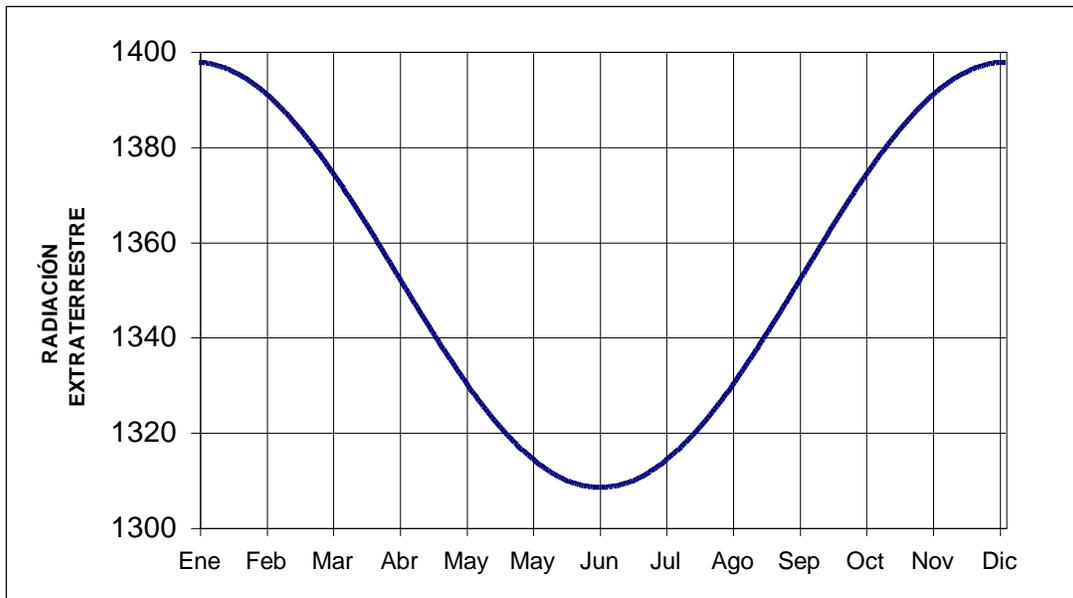
$$I_{sc} = 428 \quad [Btu/(ft^2 \cdot hr)] \quad (2.1)$$

$$I_{sc} = 4871 \quad [kJ/(m^2 \cdot hr)]$$

### 2.1.3 VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE

La intensidad de la energía solar varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la Tierra y el Sol<sup>2</sup>. Al cambiar esta distancia a lo largo del año, la radiación solar extraterrestre varía como muestra la figura 2.2:

<sup>2</sup> Referencia 7



**Figura 2.2 Variación de la radiación solar extraterrestre con la época del año**

Analíticamente, la variación de la radiación solar extraterrestre está expresada por:

$$G(n) = I_{sc} \left( 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (2.2)$$

En donde:

$G(n)$  Variación de la radiación solar extraterrestre que incide en una superficie perpendicular a los rayos del Sol,  $[W/m^2]$

$I_{sc}$  Constante solar,  $[W/m^2]$

$n$  Número de día del año ( $1 < n < 365$ )

## 2.1.4 RADIACIÓN SOLAR EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

Una vez que llega la radiación solar a la Tierra, ésta tiene que atravesar la atmósfera para poder llegar a la superficie terrestre. En la atmósfera existen factores como polvo, vapor de agua, etc., que afectan a la intensidad de la radiación solar que incidente en la superficie.

### 2.1.4.1 Radiación Solar Directa

Es la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre sin ningún cambio en su dirección y sin haber sido dispersa por la atmósfera. Esta radiación es capaz de ser enfocada, y es la que produce sombra.



**Figura 2.3 Radiación directa**

### 2.1.4.2 Radiación Solar Difusa

Es la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre después de que su dirección ha sido modificada debido a la dispersión ocasionada por el polvo, pequeñas gotitas de agua o por los gases existentes en la atmósfera. Esta radiación no puede ser enfocada.



**Figura 2.4 Radiación difusa**

## **2.1.5 TRAYECTORIAS DEL SOL**

### **2.1.5.1 ECLÍPTICA**

La Tierra posee varios movimientos, entre los más importantes se encuentran el de rotación en torno a su eje, traslación alrededor del Sol, precesión<sup>3</sup> y nutación<sup>4</sup>.

El movimiento de rotación tarda aproximadamente 24 horas, y ocasiona el día y la noche ya que causa que un punto sobre la Tierra se vea iluminado de forma periódica por el Sol. Este movimiento se produce en dirección Oeste – Este, es decir, en sentido contrario al de las agujas del reloj.

El segundo movimiento, siguiendo una trayectoria elíptica tarda alrededor de 365 días. Debido a la excentricidad del recorrido terrestre alrededor del Sol, la distancia entre estos dos cuerpos celestes varía a lo largo del año, dando lugar a la existencia de las estaciones.

La forma de la Tierra, achatada en los polos y ensanchada en la zona ecuatorial, provoca un lentísimo balanceo durante el movimiento de traslación. Este movimiento se conoce como precesión, y se produce en sentido inverso al movimiento de rotación. Gracias a la presencia de este movimiento, el eje de rotación terrestre describe un cono de 47° de abertura, cuyo vértice se encuentra en el centro de la Tierra.

Los movimientos de nutación son las variaciones periódicas de la inclinación de la eclíptica con respecto al ecuador. Se deben a la oscilación del eje de la Tierra alrededor de una posición media, que es la que verdaderamente describe la superficie cónica indicada en la precesión. En resumen, la suma de los movimientos de precesión y nutación causan la inclinación del eje de rotación terrestre.

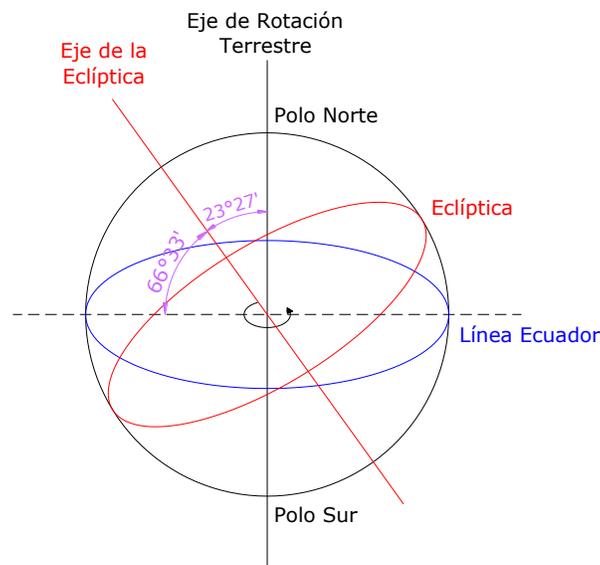
Las trayectorias aparentes del Sol sobre la Tierra son producto de la combinación de todos estos movimientos. La eclíptica es la proyección del movimiento aparente del Sol con respecto a la Tierra. El eje terrestre forma un ángulo con el plano de la eclíptica de  $66^{\circ} 33'$ , lo que causa que las zonas de los paralelos terrestres se iluminen desigualmente.

---

<sup>3</sup> **M**ovimiento retrógrado de los puntos equinociales o de intersección del ecuador celeste con la eclíptica.

<sup>4</sup> Oscilación periódica del eje de la Tierra causada por la inclinación de este mismo eje y el efecto de la órbita lunar, inclinada respecto a la eclíptica.

De esta manera se origina la distinta duración de los días y las noches, más pronunciada en las zonas templadas y polares de la Tierra. En la figura 2.5 se aprecia la trayectoria aparente del Sol, conocida como eclíptica.



**Figura 2.5 Trayectoria aparente del Sol: Eclíptica**

Para el trazado del camino aparente del Sol se considera que el punto sobre el cual se desea conocer la trayectoria se encuentra fijo, y que es el Sol el que se mueve. La posición del Sol en el cielo puede ser representada por dos sistemas de coordenadas. El primero es el denominado ecuatorial, y el segundo es el sistema horizontal.

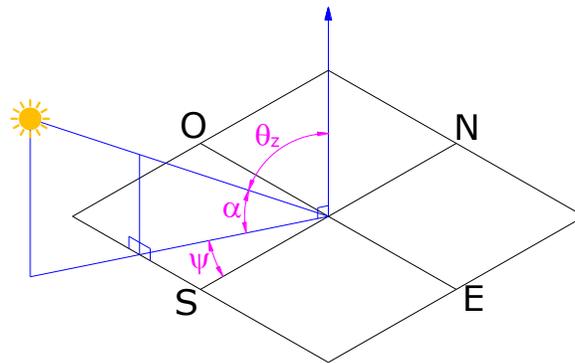
### 2.1.5.2 SISTEMA DE COORDENADAS HORIZONTALES

Con el fin de representar la posición aparente del Sol en un determinado día del año, se emplea un sistema de coordenadas horizontales. Éste se encuentra constituido por el plano horizontal y el plano normal al mismo. Para un observador, apoyado en un plano horizontal, se puede definir la posición del Sol por dos variables, la altura solar y el azimut solar<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Las siguientes formulas se encuentran en la referencia 8

En la figura 2.6 se ilustran las variables que permiten determinar la posición del Sol, el observador se encuentra sobre el plano horizontal en el centro del sistema geográfico.

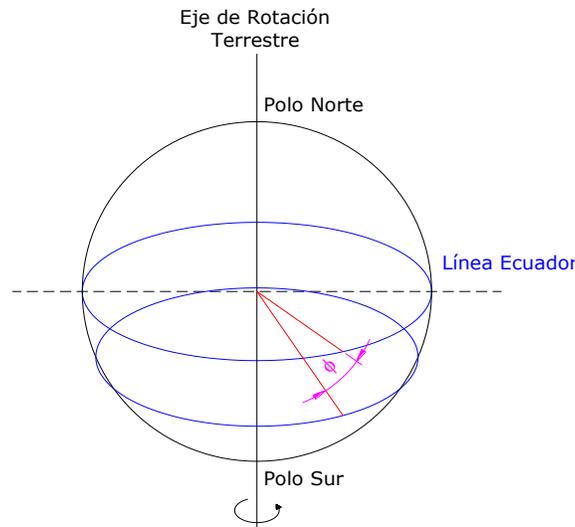


**Figura 2.6 Sistema de coordenadas horizontales**

Para encontrar expresiones que permitan determinar los valores de los ángulos que definen la posición aparente del Sol, es necesario conocer los ángulos latitud, declinación y ángulo horario.

#### 2.1.5.2.1 Latitud

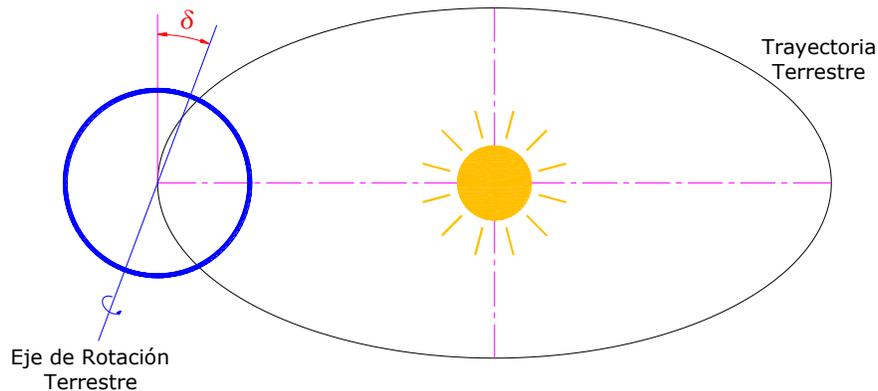
Se denomina latitud al ángulo formado por la línea que une el centro de la Tierra con un punto sobre la superficie de la misma y el plano del ecuador. Este ángulo varía entre los valores de  $\pm 90^\circ$  en los que se encuentran los polos, y su valor es positivo si el punto se encuentra hacia el Norte. La figura 2.7 ilustra el ángulo latitud para un punto localizado al Sur de la Línea Ecuador.



**Figura 2.7 Ángulo latitud**

#### 2.1.5.2.2 Declinación

La Tierra gira alrededor del Sol sobre una trayectoria elíptica contenida en un plano. La normal a este plano y el eje de rotación de la Tierra forman un ángulo variable ( $\delta$ ), que se denomina declinación solar. En la figura 2.8 se observa este ángulo.



**Figura 2.8 Ángulo declinación**

La declinación es la posición del Sol en el medio día solar con respecto al plano del ecuador, es una función de la época del año. La declinación se puede encontrar de la ecuación:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[ 360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right] \quad [^\circ] \quad (2.3)$$

En donde

$n$  = Día del año

En la tabla 2.1 se muestra el día representativo de cada mes, es decir, el día cuyo valor de declinación representa el valor promedio mensual.

**Tabla 2.1 Día representativo de cada mes**

<b>MES</b>	<b>FECHA</b>	<b>DÍA</b>	<b>DECLINACIÓN (°)</b>
<b>Enero</b>	17	17	-20,917
<b>Febrero</b>	15	46	-13,289
<b>Marzo</b>	17	77	-1,613
<b>Abril</b>	15	106	9,783
<b>Mayo</b>	15	136	19,031
<b>Junio</b>	11	163	23,153
<b>Julio</b>	18	200	20,825
<b>Agosto</b>	17	229	13,122
<b>Septiembre</b>	15	259	1,815
<b>Octubre</b>	15	289	-9,966
<b>Noviembre</b>	14	319	-19,148
<b>Diciembre</b>	12	347	-23,242

#### 2.1.5.2.3 Ángulo Horario

El ángulo horario es el ángulo de desviación con respecto al mediodía, para la medición de este ángulo, se considera al mediodía como  $0^\circ$ , cada hora equivale a  $15^\circ$ . Este ángulo es positivo para la mañana, y para la tarde negativo, por ejemplo a las  $11h00$  este ángulo equivale de  $15^\circ$ , a las  $15h00$ , es igual a  $-45^\circ$ . Generalizando para todo el día, este ángulo se obtiene con la expresión:

$$\omega = 15^\circ \cdot \left( 12 - \frac{\text{Tiempo}}{60} \right) \quad [^\circ] \quad (2.4)$$

En esta expresión, la variable *Tiempo* se encuentra en minutos.

Una vez encontrados los ángulos latitud, declinación y ángulo horario, es posible ahora determinar la posición aparente del Sol.

#### 2.1.5.2.4 Ángulo Cenit

El cenit,  $\theta_z$ , es el ángulo formado entre una línea vertical y la radiación solar directa, como se muestra en la figura 2.6. Se obtiene de la siguiente manera:

$$\cos \theta_z = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega \quad (2.5)$$

Siendo:

$\delta$     Ángulo declinación,  $[^\circ]$

$\phi$     Ángulo latitud,  $[^\circ]$

$\omega$     Ángulo horario,  $[^\circ]$

#### 2.1.5.2.5 Ángulo Altitud Solar

Altitud solar,  $\alpha$ , es el ángulo que se eleva perpendicularmente desde el plano horizontal hacia la posición del Sol, es el complemento del cenit. Este ángulo está expresado por:

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad [^\circ] \quad (2.6)$$

#### 2.1.5.2.6 Ángulo Azimut Solar

El ángulo azimut solar,  $\psi$ , es el ángulo formado por un plano vertical que pasa por el observador de Norte a Sur (meridiano local) y otro plano vertical que pasa por el observador y el Sol. Este ángulo, como se indica en la figura 2.6, se mide desde el Sur,

hacia el Este es positivo y al Oeste negativo, varía entre  $\pm 180^\circ$ . Este ángulo se encuentra con la expresión:

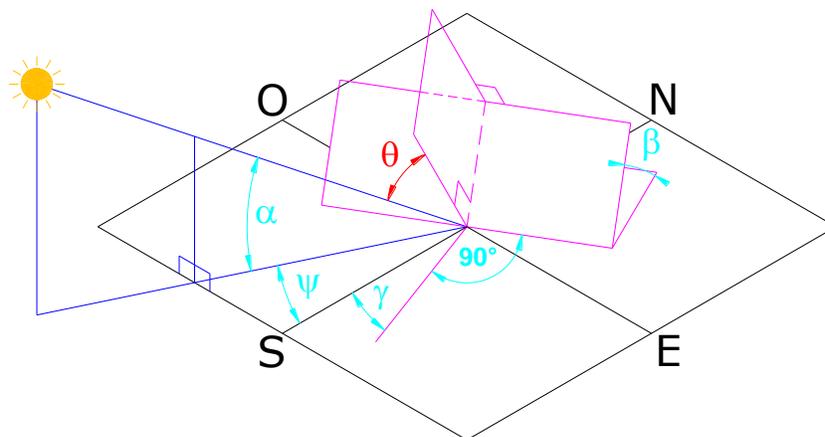
$$\text{sen}\psi = \frac{\text{cos}\delta \cdot \text{sen}\omega}{\text{cos}\alpha} \quad (2.7)$$

El Sol, debido a la conjunción de todos estos movimientos y ángulos, no sale exactamente por el Este ni se pone por el Oeste, excepto en los equinoccios, que son los puntos en los cuales la Tierra se encuentra más cerca del Sol. Los puntos de salida y puesta del Sol se encuentran desviados hacia el Norte o hacia el Sur, hasta llegar a sus puntos de máxima desviación, los solsticios, puntos en los que la Tierra se encuentra más alejada del Sol.

## 2.1.6 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR

### 2.1.6.1 DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA

En la figura 2.9 se observa un plano con una orientación  $\gamma$ , y una inclinación  $\beta$ . También se encuentran los ángulos de altitud y azimut solar  $\alpha$  y  $\psi$ , además la dirección de la radiación solar directa,  $\theta$ , que es el ángulo formado entre la radiación, y plano normal al plano inclinado<sup>6</sup>.



**Figura 2.9 Dirección de la radiación solar directa**

### 2.1.6.1.1 Azimut

El ángulo azimut,  $\gamma$ , es aquel formado entre la normal a un plano y el meridiano local, el punto cero se encuentra hacia el Sur, es positivo hacia el Este y negativo hacia el Oeste. Este ángulo se encuentra entre los valores de  $\pm 180^\circ$ .

---

<sup>6</sup> <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/solar/PDFs/Solar1.pdf>

### 2.1.6.1.2 Duración Teórica del Día

La duración teórica del día,  $\omega_s$ , es el ángulo que se forma con las posiciones del Sol entre el mediodía y su puesta, se determina con la siguiente expresión:

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \cdot \tan \delta \quad (2.8)$$

La duración teórica del día, en horas, está expresada por:

$$T_d = \frac{2}{15^\circ} \arccos(\omega_s) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad [h] \quad (2.9)$$

El ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre una superficie se encuentra con la ecuación:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \operatorname{sen} \delta \cdot \operatorname{sen} \phi \cdot \cos \beta - \operatorname{sen} \delta \cdot \cos \phi \cdot \operatorname{sen} \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega \\ & + \cos \delta \cdot \operatorname{sen} \phi \cdot \operatorname{sen} \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \operatorname{sen} \beta \cdot \operatorname{sen} \gamma \cdot \operatorname{sen} \omega \end{aligned} \quad (2.10)$$

Donde:

$\theta$  = Ángulo de incidencia de la radiación solar directa, se mide entre la normal y la radiación

$\phi$  = Latitud del lugar

$\delta$  = Declinación solar

$\gamma$  = Ángulo azimut de la superficie

$\omega$  = Ángulo horario

$\beta$  = Ángulo de inclinación de la superficie con respecto a la horizontal

Como se puede observar, todos estos ángulos, así como los ángulos azimut solar, cenit y altitud solar son dependientes de la época del año, de la hora del día y de la ubicación dada por la latitud.

## **2.1.6.2 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR**

En Ecuador, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología –INAMHI–, realiza mediciones diarias en sus estaciones ubicadas en distintas localidades del país, de una serie de parámetros que sirven para determinar la cantidad de radiación solar incidente sobre una superficie. Entre los datos medidos se encuentran heliofanía<sup>7</sup>.

Además, se tienen algunos modelos de relaciones empíricas para la predicción de la cantidad de radiación solar, basándose en datos meteorológicos disponibles. Entre estos modelos se encuentran la ecuación de Reddy, la ecuación de Sabbagh, la ecuación de Swartman y Ogundale, y la ecuación de Page.

### **2.1.6.2.1 Ecuación de Page**

Para la estimación de la radiación solar se empleará la ecuación de Page. Con esta expresión se obtiene un promedio mensual de la cantidad de energía solar diaria incidente en una superficie horizontal. Este método está basado en la radiación solar extraterrestre

incidente sobre la Tierra, y en el número de horas de brillo solar (heliofanía), relacionados por la ecuación:

$$H_{av} = H_0 \left( a + b \frac{hel}{T_D} \right) \left[ \frac{J}{m^2 \cdot día} \right] \quad (2.11)$$

---

<sup>7</sup> Número de horas de brillo solar, nubosidad, radiación solar global, radiación solar directa.

Siendo:

$H_{av}$  = Radiación solar diaria sobre una superficie horizontal

$H_0$  = Radiación solar extraterrestre en una superficie horizontal

$a$ ,  $b$  = Constantes que dependen de la ubicación

$\frac{hel}{T_D}$  = Relación entre las horas de brillo solar y la duración teórica del día en horas

La radiación extraterrestre,  $H_0$ , es la cantidad de energía solar que recibe una superficie horizontal que se encuentra fuera de la atmósfera, en una ubicación de latitud  $\phi$ . Esta cantidad de irradiación solar depende de la época del año, y se calcula con la siguiente expresión:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \cdot 3600 \cdot I_{sc} \left[ \left( 1 + 0.033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \left( \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} \omega_s + \frac{2\pi \cdot \omega_s}{360} \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \delta \right) \right] \left[ \frac{J}{m^2 \cdot día} \right] \quad (2.12)$$

En donde  $\delta$ ,  $\phi$ ,  $\omega_s$  ya fueron definidos anteriormente,  $I_{sc}$ , constante solar, es

$1353 [W/m^2]$ , y  $n$  es el número de día del año.

Como ejemplo, se tiene que las constantes de Page,  $a$  y  $b$ , para la ciudad de Quito, obtenidas en un trabajo previo de ajuste de la ecuación por el método de los mínimos cuadrados, son<sup>8</sup>:

$$a = 0.25$$

$$b = 0.48$$

---

<sup>8</sup> Referencia 16.

#### 2.1.6.2.2 Radiación Solar Directa en una Superficie Inclinada

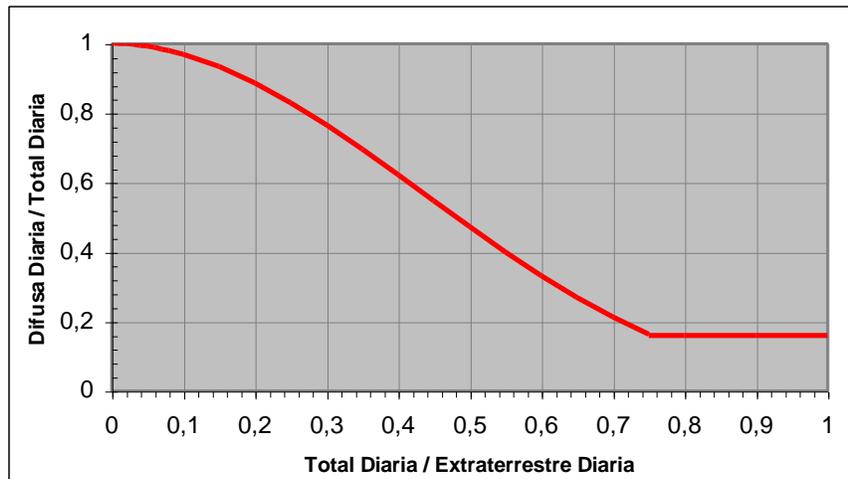
Es necesario determinar la relación entre la radiación solar sobre una superficie con un ángulo de inclinación  $\beta$  y la radiación sobre una superficie horizontal. Para este objeto, se cita el método de Hottel y Woertz, para superficies inclinadas.

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \operatorname{sen}(\phi - \beta) \cdot \operatorname{sen} \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \operatorname{sen} \phi \cdot \operatorname{sen} \delta} \quad (2.13)$$

En donde  $R_b$  es la relación entre la radiación solar directa incidente sobre una superficie inclinada y la recibida por una superficie horizontal.

#### 2.1.6.2.3 Estimación de la Radiación Solar Difusa Diaria

Una vez obtenido el promedio diario de la radiación solar global incidente en una superficie horizontal, es necesario definir sus componentes directa y difusa. Con el fin de estimar la cantidad de radiación difusa incidente en la superficie terrestre, se debe en primer lugar conocer las radiaciones extraterrestre y global. Liu y Jordan desarrollaron una relación entre estas cantidades de energía y la radiación difusa diaria. En la figura 2.10 se muestra la relación entre la radiación difusa diaria y diaria total, con respecto a la relación entre la radiación diaria total y la radiación extraterrestre.



**Figura 2.10 Relación entre la radiación solar difusa diaria y la radiación diaria total, de Liu y Jordan**

Las componentes diarias de radiación directa y difusa dependen del porcentaje de radiación difusa con respecto a la global, obtenido de la curva anterior.

#### 2.1.6.2.4 Estimación de la radiación solar por minuto

Como se mencionó anteriormente, con el método de Page se obtiene una estimación de la radiación total diaria, y con la ayuda de la curva de la figura 2.10 es posible determinar sus componentes difusa y directa. Pero, la cantidad de calor incidente sobre una superficie horizontal no permanece constante a lo largo del día, sino que varía principalmente con respecto a la hora del día, además, su valor depende de condiciones meteorológicas como la nubosidad. En la figura 2.11 se aprecia la variación de la cantidad de radiación solar global sobre una superficie horizontal medido para la ciudad de Quito, en un día despejado.



**Figura 2.11 Variación de la radiación solar incidente en una superficie horizontal a lo largo de un día despejado, para la ciudad de Quito**

Estimación de la Radiación Solar Difusa por Minuto

Liu y Jordan, proponen que la radiación solar difusa incidente sobre una superficie horizontal se distribuye a lo largo del día de igual manera que lo hace la radiación extraterrestre. Por esto definen el coeficiente  $r_d$ :

$$r_d = \frac{\pi}{1440} \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s} \quad (2.14)$$

El coeficiente  $r_d$ , representa la relación entre la radiación solar difusa por minuto y la difusa diaria. Las variables  $\omega$  y  $\omega_s$  son los ángulos horario y duración del día, encontrados con las expresiones (1.4) y (1.8), dependientes del tiempo, de la latitud, y de la época del año. La radiación difusa por minuto a partir de la difusa diaria es entonces:

$$H_{Dif} = H_{Dif, Diaria} \cdot r_d \left[ \frac{J}{min \ m^2} \right] \quad (2.15)$$

En donde:

$H_{Dif}$  = Radiación solar difusa por minuto

$H_{Dif, Diaria}$  = Radiación difusa diaria,  $\left[ \frac{J}{m^2 \cdot día} \right]$

#### 2.6.2.4.2 Estimación de la Radiación Solar Directa por Minuto

Corrales y Rabl desarrollaron una expresión similar a  $r_d$  para el cálculo de la distribución a lo largo del día de la radiación global incidente en una superficie horizontal, a partir de la radiación global diaria,  $r_g$ .

$$r_g = r_d \cdot (a_g + b_g \cdot \cos \omega) \quad (2.16)$$

En esta expresión los coeficientes  $a_g$  y  $b_g$  se calculan con las siguientes ecuaciones<sup>25</sup>:

$$\begin{aligned} a_g &= 0.409 + 0.5016 \cdot \text{sen}(\omega_s - \pi/3) \\ b_g &= 0.6609 - 0.4767 \cdot \text{sen}(\omega_s - \pi/3) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Entonces se obtiene que la radiación global por minuto es:

$$H_g = H_{av} \cdot r_g \left[ \frac{J}{\text{min } m^2} \right] \quad (2.18)$$

Donde:

$H_{av}$  Radiación diaria total, obtenida con la ecuación de Page,  $\left[ \frac{J}{m^2 \cdot día} \right]$

Una vez obtenidas las radiaciones global y difusa por minuto es posible determinar la cantidad de radiación solar directa:

$$H_{Dir} = H_g - H_{Dif} \left[ \frac{J}{\text{min } m^2} \right] \quad (2.19)$$

En estas expresiones  $H_g$  es la radiación global por minuto y  $H_{Dir}$  es la radiación directa por minuto incidentes en una superficie horizontal.

## **2.2 CALENTAMIENTO CON ENERGÍA SOLAR**

La energía solar está siendo ampliamente investigada y utilizada como elemento principal de diseño. Existen dos formas de diseñar construcciones aptas para la utilización de la energía solar. Estos dos sistemas son:

- Sistemas activos
- Sistemas pasivos

### **2.2.1 SISTEMAS ACTIVOS**

El diseño de sistemas activos contempla el empleo de paneles y colectores solares, tanques o recipientes de almacenamiento de energía, mecanismos de transferencia de energía y sistemas de distribución de energía. Este tipo de sistemas siempre utilizan uno o más fluidos de trabajo, los mismos que se encargan de recolectar, transferir, almacenar y distribuir la energía solar recolectada en los paneles. El movimiento de estos fluidos es generado por elementos mecánicos como ventiladores o bombas.

Una de las principales desventajas de un sistema activo, radica en que la mayor parte de paneles o colectores solares funcionan con radiación solar directa, por lo que el rendimiento de este sistema se ve disminuido en condiciones en las cuales el brillo del Sol es intermitente, o, cuando el clima provoca una mayor dispersión de la radiación solar.

### **2.2.2 SISTEMAS PASIVOS**

La principal característica del diseño de sistemas pasivos, es que la recolección y almacenamiento de la radiación solar la realizan los materiales que forman parte de una construcción, por lo que resulta innecesaria la utilización de colectores solares para el propósito de ambientar una vivienda. Una de las ventajas de este sistema es que no solo recolecta radiación directa, sino también la radiación difusa.

Todas las construcciones son pasivamente calentadas por el Sol, ya que, en un determinado lapso de tiempo reciben cierta cantidad de radiación solar, ya sea directa o difusa. Una vivienda que ha sido concebida de tal manera que optimice el uso de la energía solar, y a su vez, esta energía contribuye sustancialmente con sus requerimientos energéticos, es una casa pasivamente diseñada.

En la mayoría de ocasiones son necesarios algunos elementos auxiliares para el correcto funcionamiento de un sistema pasivo. Entre estos se encuentran los aislantes móviles, que dependiendo de la época del año, impiden el paso de la energía hacia o desde el interior de la vivienda. Uno de los aislantes más comunes son las cortinas, presentes en casi todas las viviendas.

## 2.3 CELDAS

Para construir concentradores<sup>9</sup> reflectores es necesario emplear superficies ópticas de grandes dimensiones. Los sistemas dióptricos, lentes de cristal, no se utilizan a causa de su fragilidad, peso y precio. Sin embargo existen colectores constituidos por un gran número de prismas de cristal de reflexión total de pequeño espesor, (sistemas catadióptricos), con un factor de reflexión del 95%; la reflectividad global es del orden del 90%, superior a la de los mejores espejos y no experimentan degradación con el paso del tiempo.

Los colectores de concentración utilizan sistemas ópticos reflectores y en algunos casos muy particulares, refractores, para aumentar la intensidad de la radiación solar que se dirige sobre una superficie receptora que la absorbe, (lentes Fresnel y lentes de líquido).

Contra mayor sea el flujo solar sobre esta superficie, menor será la zona necesaria para conseguir el mismo efecto térmico sobre un fluido, lo que supone una reducción de las pérdidas térmicas. Sin embargo aparecen otros tipos de pérdidas como son el que estos colectores funcionan únicamente con la componente directa de la radiación, (no se aprovecha la difusa) y que aparecen pérdidas ópticas por defectos de enfoque y dirección; asimismo aparecen otros problemas, como:

- a) *Una mayor complicación de las características ópticas de los concentradores, por cuanto precisan de sistemas de orientación y seguimiento del Sol, que permiten aprovechar al máximo la radiación solar incidente.*
- b) *La existencia de flujos no estacionarios en los fluidos que circulan por el receptor.*
- c) *Grandes variaciones tanto en la forma y diseño, como en las temperaturas y pérdidas Térmicas de las superficies receptoras absorbentes. La amplia gama de configuraciones permiten la manipulación de una serie de nuevos parámetros de diseño.*
- d) *Una mayor complejidad con la introducción de factores ópticos adicionales, que complican los balances energéticos.*
- e) *Una mayor calidad en los sistemas ópticos, ya que tienen que trabajar durante largos períodos de tiempo, lo que implica el que deben mantener inalterables sus propiedades ópticas contra la suciedad, erosión, oxidación, condiciones climáticas, etc.*

---

<sup>9</sup> Las celdas son llamadas también concentradores

Todo esto supone un mayor coste del colector lo que introduce algunas restricciones en su utilización, aunque la aplicación de nuevos materiales reflectantes y mejoras en los sistemas de seguimiento, les confieren una cierta importancia práctica. La intensidad de la radiación en las superficies receptoras puede llegar a ser del orden de 4 a 1000 veces el valor de  $I_0$  lo que puede implicar temperaturas relativamente elevadas y una mayor precisión en los mecanismos de seguimiento del Sol y enfoque en la superficie receptora, lo que encarece el equipo.

Un colector reflector de media temperatura se compone de dos partes fundamentales, el concentrador y el receptor. El concentrador es la parte del colector que refleja (o refracta) la radiación solar incidente sobre el mismo, dirigiéndola hacia el receptor, que la absorbe y transmite a un fluido térmico que circula por el mismo.

Al ser el Sol la fuente de energía, es muy importante conocer la imagen del mismo reflejada sobre el receptor. El ángulo con el que el Sol se ve desde la Tierra es de aproximadamente  $32'$  y este dato hay que tenerle presente, (aparte de otros propios motivados por errores de seguimiento y reflexión, así como de la dispersión de la radiación por la superficie reflectora originados por defectos de fabricación, etc), a la hora de diseñar el dimensionamiento, tanto del concentrador, como del receptor.

### **2.3.1 TIPOS DE CELDAS**

Una característica fundamental para la clasificación es el llamado índice de concentración ( $A_a/A_r$ ), que es la relación entre el área de la superficie de abertura del concentrador y el área de la superficie receptora.

Existe una amplia variedad de medios que permiten concentrar la radiación solar sobre un receptor pudiéndose clasificar teniendo en cuenta una serie de factores, como:

- a) El que sean lentes o reflectores*
- b) Por el sistema de montaje y modelo de orientación*
- c) Por la magnitud de la concentración de radiación que son capaces de conseguir*
- d) Por los materiales utilizados en su construcción*
- e) Por los fluidos térmicos que se van a utilizar que dependen de sus aplicaciones, etc.*

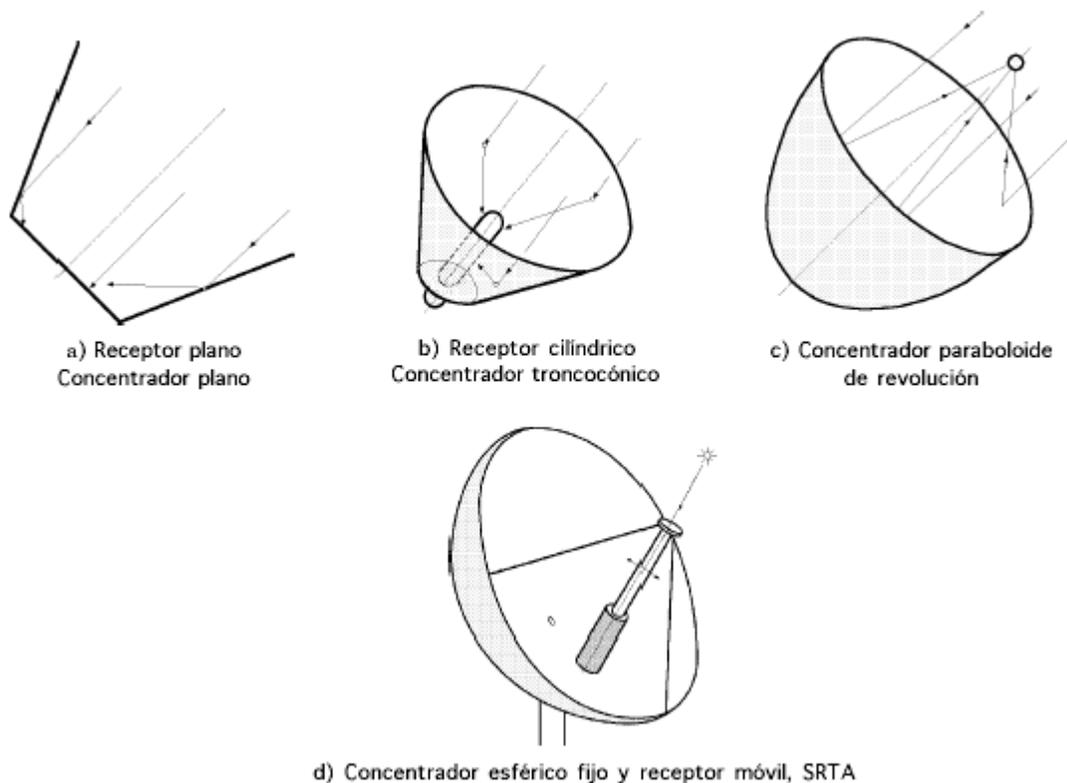
En la Figura 2.12 se muestran cuatro secciones de sistemas de colectores de concentración; en cualquiera de ellos se enfoca la radiación con más o menos nitidez sobre un receptor que puede ser puntual o tener una geometría determinada por las características del concentrador; el índice de concentración para colectores de revolución es mucho mayor que para colectores cilíndricos.

**1) Receptor plano y concentrador-reflector plano.-** Tiene un bajo índice de concentración, inferior a 4; se aprovecha en el receptor parte de la componente solar difusa incidente sobre el colector.

**2) Receptor cilíndrico y concentrador-reflector cónico.-** Se mejoran las características de concentración del caso anterior.

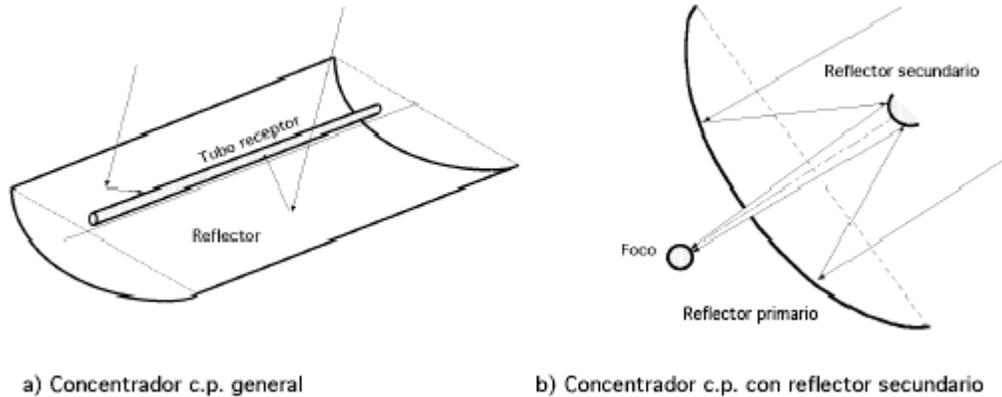
**3) Receptor cilíndrico y concentrador-reflector esférico.-** Se mejoran las características de concentración de los casos anteriores.

**4) Concentrador-reflector tipo paraboloide de revolución.-** Permite obtener relaciones de concentración muy elevadas, lo que a su vez implica elevadas temperaturas; una modificación del mismo introduce un segundo reflector que permite llevar al foco a otra posición más conveniente.



**Figura 2.12 Algunas configuraciones de sistemas de concentración**

5) *Colector con concentrador-reflector cilíndrico parabólico y receptor tubular.*- Es el modelo más usado y en el que el tubo receptor se encuentra a lo largo de todas las posiciones focales. La temperatura alcanzada en el mismo puede llegar a ser del orden de los 300°C, suficiente para muchas aplicaciones. En la Fig 2.13.a se representa un concentrador cilíndrico parabólico, y en la Fig 2.13.b un concentrador cilíndrico parabólico con reflector secundario.



**Figura 2.13 Concentradores cilíndrico-parabólicos**

Para este proyecto se va a centrar el estudio en los concentradores cilíndricos parabólicos<sup>10</sup>, debido a que es uno de los modelos mas utilizados, porque es de fácil construcción y manejo; además su costo de fabricación no es muy elevado.

### 2.3.2 CELDA PARABÓLICA

En estos concentradores la radiación solar es concentrada en una línea que es exactamente igual de largo que el concentrador, a la que se llama foco lineal, en la cual posicionamos un tubo absorbedor , por el cual circula el líquido a calentar, dicho colector es de material reflectante y el absorbedor de cobre , aluminio , u otro material de propiedades semejantes , deberá estar pintado de negro mate selectivo y tendrá que seguir al Sol , este seguimiento lo hará en una coordenada y en ellos se pueden lograr temperaturas de hasta 300°C o 400°C<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> A la celda parabólica también se la conoce con el nombre de concentrador cilíndrico parabólico.

<sup>11</sup> [http://www.electroindustria.com/aplicacion.asp?inf\\_id=788](http://www.electroindustria.com/aplicacion.asp?inf_id=788)

La Figura 2.14 muestra un concentrador cilíndrico parabólico típico y el mecanismo de concentración y transformación de la radiación solar en este tipo de captador solar.



**Figura 2.14 Concentrador cilíndrico parabólico típico**

Como cualquier otro captador de concentración, los CCP<sup>12</sup> solo pueden aprovechar la radiación solar directa, lo que exige que el colector vaya modificando su posición durante el día. Este movimiento se consigue mediante el giro alrededor de un eje paralelo a su línea focal.

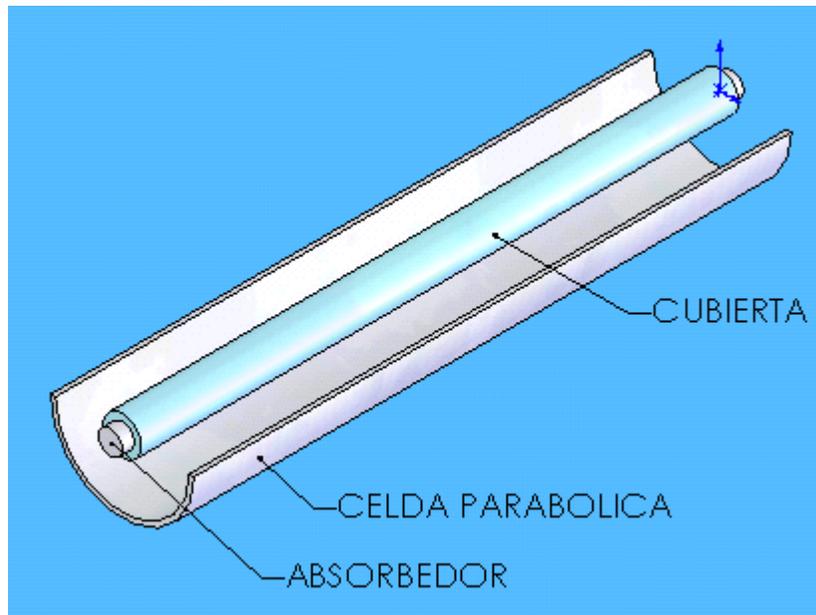
### **2.3.2.1 Componentes del concentrador y sus características**

El concentrador cilíndrico parabólico se compone de dos partes fundamentales, el concentrador y el receptor, pero éste a su vez está compuesto de un tubo absorbente y una cubierta transparente. El concentrador es la parte del colector que refleja (o refracta) la radiación solar incidente sobre el mismo, dirigiéndola hacia el receptor, que la absorbe y transmite a un fluido térmico que circula por el mismo.

En la Figura 2.15 se muestran los componentes del concentrador.

---

<sup>12</sup> CCP: Concentrador Cilíndrico Parabólico.



**Figura 2.15 Componentes de un concentrador cilíndrico parabólico**

Los CCP tienen características geométricas muy conocidas<sup>13</sup>.

En la figura 2.16 se muestran las principales características que debe tener un concentrador cilíndrico parabólico:

a: Ancho del cilindro parabólico.

L: Largo del cilindro parabólico.

b: Distancia focal donde va colocado axialmente el tubo receptor.

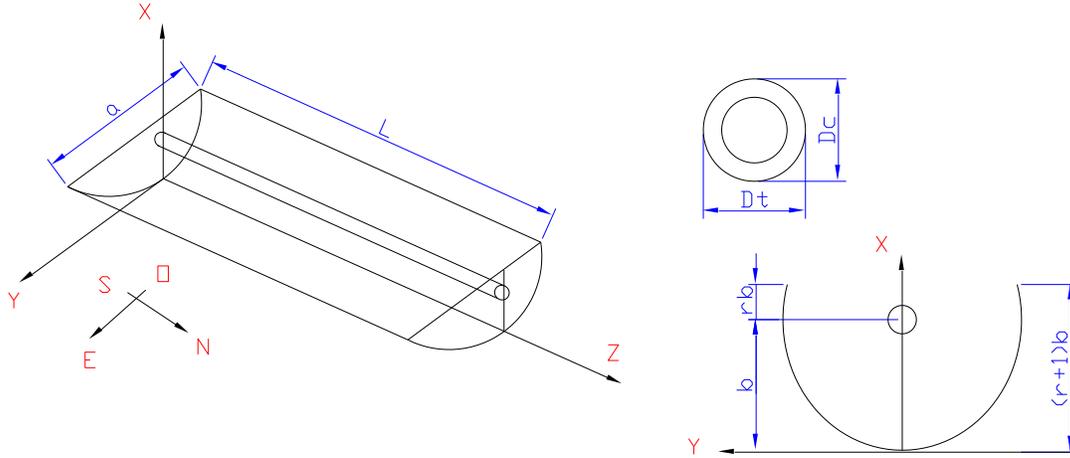
Dt: Diámetro del tubo receptor

Dc: Diámetro de la cubierta.

r: Factor que controla la distancia del tubo focal a la superficie de apertura.

---

<sup>13</sup> Referencia 6



**Figura 2.16 Características del CCP**

Como se muestra en la figura 2.16, el sistema del colector concentrador que se estudia es un cilindro parabólico con plano paralelo al eje  $yz$ . El tubo sobre el cual concentra la energía se coloca de manera que sea coaxial con el eje focal del cilindro.

El factor  $r$  es un parámetro libre con el cual se puede trabajar el diseño previo a la construcción del sistema; igual cosa ocurren con los parámetros  $D_t$  y  $D_c$ .

El concentrador cilíndrico parabólico se coloca de modo que el eje focal esté en la dirección norte - sur, como se muestra en la Figura 2.16. Con una posición como la indicada, los rayos solares tendrán una dirección con solo dos componentes una en la dirección  $x$  y otra en la dirección  $z$ .

### 2.3.3.3 Funcionamiento

El objetivo del presente trabajo es calentar al aire que circula por el tubo absorbedor, para cuyo efecto es diseñado el concentrador solar. El fluido de trabajo será suministrado por medio de un ventilador, para que este sea calentado en el momento que está circulando por el concentrador.

Los rayos solares son concentrados en el eje focal del cilindro parabólico. Este eje<sup>14</sup> está constituido por un tubo de cobre negreado el cual va a estar dentro de otro tubo de vidrio que hace de cubierta y lógicamente de mayor diámetro. Entre el tubo absorbedor y el de vidrio se crea un vacío con el fin de eliminar en la medida de lo posible la pérdida de energía por convección entre el medio exterior y el tubo focal.

El aire pasa por el interior del tubo y es calentado por los concentradores, esto se lo realiza durante todo el día aprovechando la radiación solar, para posteriormente ser enviado al almacenamiento térmico<sup>15</sup>.

Una vez que el aire se ha almacenado en el día, este era enviado al invernadero en la noche logrando mantener la cantidad de calor requerida por el producto dentro del invernadero.

En la Figura 1.1 se indicó el esquema de instalación y funcionamiento del proyecto.

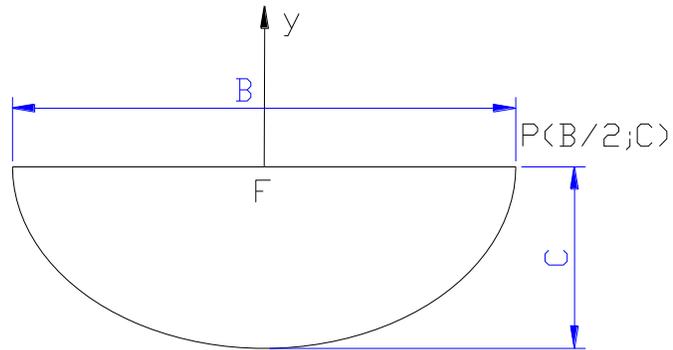
---

<sup>14</sup> El eje es el tubo absorbedor.

<sup>15</sup> Más adelante se hace un mayor análisis sobre este tema.

### 2.3.3.4 Balances de energía

Para realizar el balance de energía, primero se tiene que definir la ecuación de la parábola, en la Figura 2.17 se muestran los componentes.



**Figura 2.17 Parámetros para la ecuación de la parábola.**

$$x^2 = 4 \cdot F \cdot y \quad 16$$

$$y = \frac{x^2}{4 \cdot F}$$

$$C = \frac{\left(\frac{B}{2}\right)^2}{4 \cdot F}$$

$$C := \frac{B^2}{16 \cdot F} \quad (2.20)$$

$$F = \frac{B}{4} \quad 17 \quad (2.21)$$

---

<sup>16</sup> Referencia 14.

<sup>17</sup> Referencia 12.

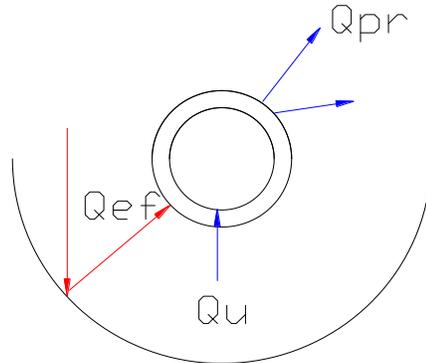
Donde:

B: Apertura de la boca (m)

C: Profundidad de la parábola en el centro (m).

F: Foco de la parábola.

Para realizar el balance de energía se debe establecer la distribución de calores que intervienen en el proceso, lo cual se muestra en la Figura 2.18.



**Figura 2.18**

### **Distribución de calores**

Eentra – Esale = Ealmacenada <sup>18</sup>

$$Q_u = Q_{ef} - Q_{pr} \quad (2.22)$$

Donde:

$Q_u$  : calor útil que absorbe el fluido de trabajo (w)

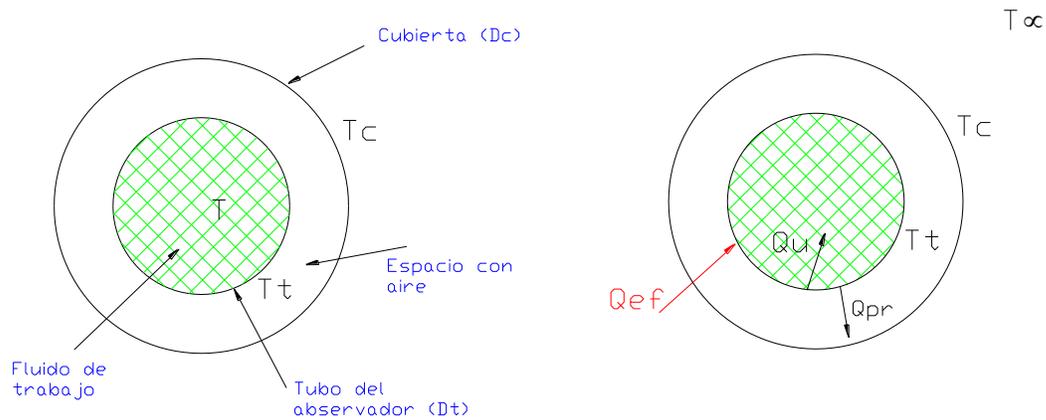
$Q_{ef}$  : calor radiante efectivo que llega al fluido de trabajo (w).

$Q_{pr}$  : calor perdido por radiación (w)

---

<sup>18</sup> Referencia 12

En el tubo absorbedor Fig. 2.19 se hace el balance de energía:



**Figura 2.19** Parámetros que intervienen en el tubo absorbedor

Realizando un balance de energía, se puede determinar que los concentradores son mas eficientes que los colectores planos. El calor útil entregado al fluido de proceso que puede ser agua, aceite térmico o aire, esta dado por la energía recibida por el absorbedor menos las pérdidas de calor al medio ambiente.

Donde el calor radiante efectivo que llega al absorbedor o al fluido de trabajo esta dado por<sup>19</sup>:

$$Q_{ef} = \eta_0 \cdot A_a \cdot H_{dir} \quad (2.23)$$

---

<sup>19</sup> Referencia 12

Donde:

$\eta_o$ : eficiencia óptica.

$A_a$ : área de apertura.

$\sigma_d$ : radiación solar.

Los concentradores cilíndricos parabólicos son los únicos que mantienen la distancia focal constante desde el vértice del propio espejo<sup>20</sup>.

La eficiencia óptica de un CCP es muy semejante al de un paraboloide de revolución y esta dada por:

$$\eta_o := \rho_r \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot F \cdot f_t \quad (2.24)$$

donde:

$\rho_r$ : reflejancia del espejo.

$\tau$ : transmitancia de la cubierta.

$\alpha$ : absortancia del absorbedor.

$\gamma$ : factor de forma que depende de los errores en la pendiente del espejo y de la dispersión que sufre la radiación solar.

$F$ : error en el seguimiento.

$f_t$ : fracción de la apertura no sombreada por soportes y absorbedor.

Todos estos parámetros son adimensionales y sus valores típicos son del orden de 0.90 a 0.95 con excepción de  $\delta_r$  cuyo valor está entre 0.75 a 0.85 según la calidad del reflector. Debido a que el área del absorbedor es reducida, las pérdidas térmicas son pequeñas y principalmente radiactivas; para limitar las pérdidas por convección ya se mencionó que se instala una cubierta en el absorbedor.

---

<sup>20</sup> El espejo es la superficie reflectora.

El área de apertura ( $A_a$ ) está dado por:

$$A_a := B \cdot L \quad (2.25)$$

Con lo que se obtiene el calor radiante efectivo que llega al fluido de trabajo.

Para completar el balance térmico, se tiene que calcular el calor perdido por radiación que esta dado por<sup>21</sup>:

$$Q_{pr} = A_t \cdot \sigma \cdot F_{1-2} \cdot (T_t^4 - T_c^4) \quad (2.26)$$

donde:

$A_t$  : Área por metro lineal del tubo del absorbedor (m<sup>2</sup>)

$L$  : Longitud del tubo = longitud de la celda parabólica.

$\sigma$  : Coeficiente de Stefan Boltzman (w/m<sup>2</sup>\*k)

$F_{1-2}$  : Factor de orientación para dos cilindros concéntricos.

El área está dada por:

$$A_t = \pi \cdot D_t \cdot L \quad (2.27)$$

El factor de orientación para dos cilindros concéntricos está dado por:

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_t} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \cdot \left( \frac{D_t}{D_c} \right)} \quad (2.28)$$

---

<sup>21</sup> Referencia 12

Donde:

$\epsilon_t$  : Emitancia del tubo absorbedor.

$\epsilon_c$  : Emitancia de la cubierta.

## 2.4 ALMACENAMIENTO TERMICO

El almacenamiento térmico remueve calor de un medio y lo añade a otro medio para usarse en otro tiempo. El almacenamiento térmico puede ser económicamente atractivo, si se aplica a una de las condiciones siguientes:

- Las energías son de duración corta.
- Las cargas son de naturaleza cíclica.
- Las cargas ocurre con una frecuencia determinada.

El almacenamiento de energía solar se tiene que realizar teniendo en cuenta:

- El tipo de colector solar
- Las unidades de almacenamiento
- Los aparatos de conversión (tales como acondicionadores de aire o motores), cargas, suministros de energía auxiliares o suplementarios, etc
- Los sistemas de control.

La capacidad de almacenamiento óptimo de la energía solar es función de su disponibilidad, que depende de:

- El tiempo
- La naturaleza de las cargas que se pueden esperar en el proceso
- La forma en que se suministra la energía auxiliar
- Un análisis económico que determina qué parte de las cargas totales de energía deben ser de tipo solar y qué otras partes procedentes de otras formas de energía.

## **Almacenamiento de energía en los procesos solares**

El almacenamiento de la energía solar se puede hacer:

- En forma de calor sensible, en el que el calor almacenado aumenta la temperatura de un medio líquido, sólido o gaseoso
- En forma de calor latente, como el calor de fusión en sistemas químicos
- En forma de calor sensible y latente, en el que el calor almacenado entraña una variación de temperatura y un cambio de estado del sistema receptor (sólido o líquido); la restitución del calor corresponde al cambio de estado inverso.
- En forma de energía química originada en algunas reacciones químicas
- En forma de energía mecánica que se puede transformar en energía potencial mediante el almacenamiento de fluidos a ciertas alturas
- En forma de sustancias obtenidas en procesos solares no energéticos, como el agua destilada en un alambique solar que se puede almacenar en depósitos para su utilización posterior.

La elección de los medios de almacenamiento de energía depende de la naturaleza del proceso.

- Para el calentamiento de agua, resulta lógico el almacenamiento de energía bajo forma de calor sensible.
- Si se usan colectores de calentamiento para acondicionamiento de aire, el almacenamiento puede ser tanto en forma de calor sensible como latente.
- Si se usan procesos fotovoltaicos o fotoquímicos, el almacenamiento es en forma de energía química.

### **2.4.1 TIPOS DE ALMACENAMIENTO TERMICO**

Los principales tipos<sup>22</sup> de almacenamiento térmico utilizados son:

### 1.- ESTRATIFICACIÓN:

Cuando un estanque acumulador de agua caliente, presente un perfil de Temperatura  $T = T(x)$ , a lo largo de él, se pueden definir "estratos" o capas a distintas temperaturas, esto implica que el acumulador presenta estratificación, esto lleva a una reserva de aire (o agua) a baja temperatura en la parte inferior del almacenador, para evitar que se mezclen y la temperatura se homogenice, las paredes interiores del acumulador deben ser construidas con materiales de baja conductividad.

### 2.-ALMACENAMIENTO PASIVO.

Los almacenamientos pasivos se usan generalmente en el acondicionamiento calorífico de edificios y tanto lo que sirve de colector como el sistema de almacenamiento se encuentran incorporados en los distintos componentes de mismo edificio, como: pisos, paredes, recipientes con agua y techos. El tipo de almacenamiento de energía utilizado en estos sistemas es generalmente por calor sensible (cambios de temperatura de los distintos componentes del edificio), que explicaremos más adelante. Debido a que en estos sistemas las temperaturas de almacenamiento son bajas, usualmente menores de 40 °C, se requiere de grandes volúmenes del material que sirve como almacén

### 3.- ALMACENAMIENTO ACTIVO

La característica principal de los almacenamientos activos es que estos utilizan un fluido de trabajo en movimiento que puede ser agua, aire, aceites o algún otro fluido. Los principales componentes que intervienen en estos sistemas son: el colector solar, la unidad

---

<sup>22</sup> <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/solar/PDFs/Solar5.pdf>

de almacenamiento, sistemas de conversión y control y el lugar donde se hace la descarga de energía. En este caso el almacenamiento de energía se puede dar por cualquiera de los

mecanismos antes mencionados (calor sensible, cambio de fase, reacciones químicas y estanques solares) y a continuación se presenta un análisis de cada uno de ellos

#### 4. ALMACENAMIENTO POR CALOR SENSIBLE O CAPACIDAD CALORIFICA

##### I. Almacenamiento en agua.

El agua es el medio ideal de almacenamiento para sistemas activos y pasivos, debido a que tiene una buena capacidad calorífica y por lo tanto una mayor capacidad de almacenamiento. Esta también puede utilizarse en forma directa o mediante el uso de cambiadores de calor y de manera continua a lo largo del día. En la Figura 2.20 se indica un sistema de almacenamiento de agua en concentradores solares.



**Figura 2.20 Almacenamiento de agua en sistemas de concentradores solares**

##### II. Almacenamiento en piedras o rocas.

Las rocas o piedras son un buen medio de almacenamiento. En sistemas activos, generalmente se usa lechos de piedra bajo tierra o lechos empaquetados. Para este tipo de almacenamiento térmico se utiliza el aire como fluido de trabajo que remueve o adiciona el calor de la unidad de almacenamiento. En este caso, el calor por lo general no puede ser adicionado y removido al mismo tiempo. Aunque las

rocas o piedras no tienen un calor específico alto, son buenos como medio de almacenamiento debido a que tienen una gran densidad, son de costo bajo, tienen conductividad térmica baja y no tienen problemas de corrosión.

## **5.-ALMACENAMIENTO EN ESTANQUES SOLARES.**

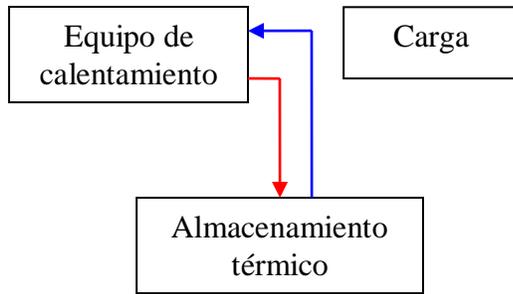
Un estanque común con agua es capaz de captar una gran cantidad de energía solar a través de todos los días del año. Sin embargo, la temperatura del agua permanece baja debido a que también hay grandes pérdidas de energía por radiación, convección y evaporación principalmente. Una manera de evitar esas pérdidas de calor es mediante el uso de estanques con agua salada. Debido al aumento en la densidad del agua por efecto de las sales disueltas, no se da el efecto de la convección dentro del estanque y además esto permite que se desarrolle un gradiente de temperatura estable y positivo hacia abajo. De esta forma, la temperatura del fondo es mayor que la que se tiene en la superficie y por lo tanto se evita la mayor parte de las pérdidas de calor que se dan en la superficie del líquido.

Para el caso de este proyecto, se centrará el estudio del almacenamiento térmico en lechos de rocas, debido a que la fabricación de este tipo de sistemas es fácil y su costo no es elevado.

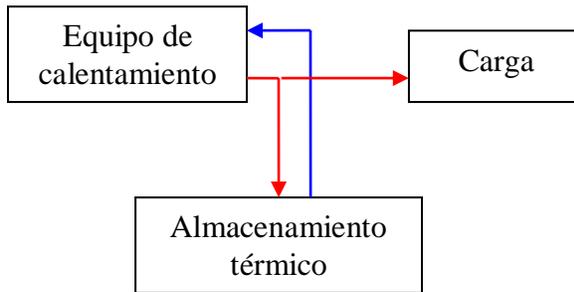
### **2.4.2 ALMACENAMIENTO EN LECHO DE ROCAS**

#### **2.4.2.1 Modos de operación de almacenamientos térmicos.**

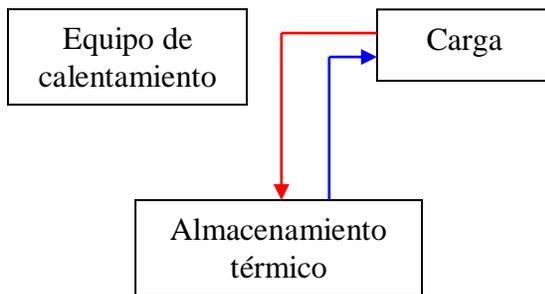
La Figura 2.21 indica cuatro modos operativos básicos de almacenamiento térmico.



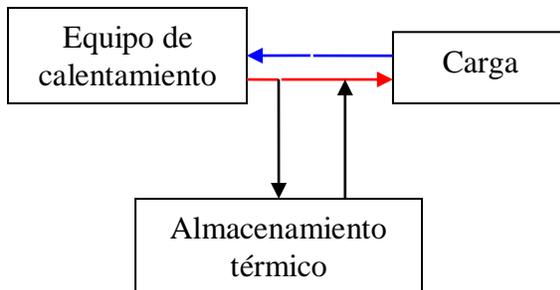
**a) Almacenamiento.**



**b) Almacena y controla la carga.**



**c) Controla la carga desde el almacenamiento.**

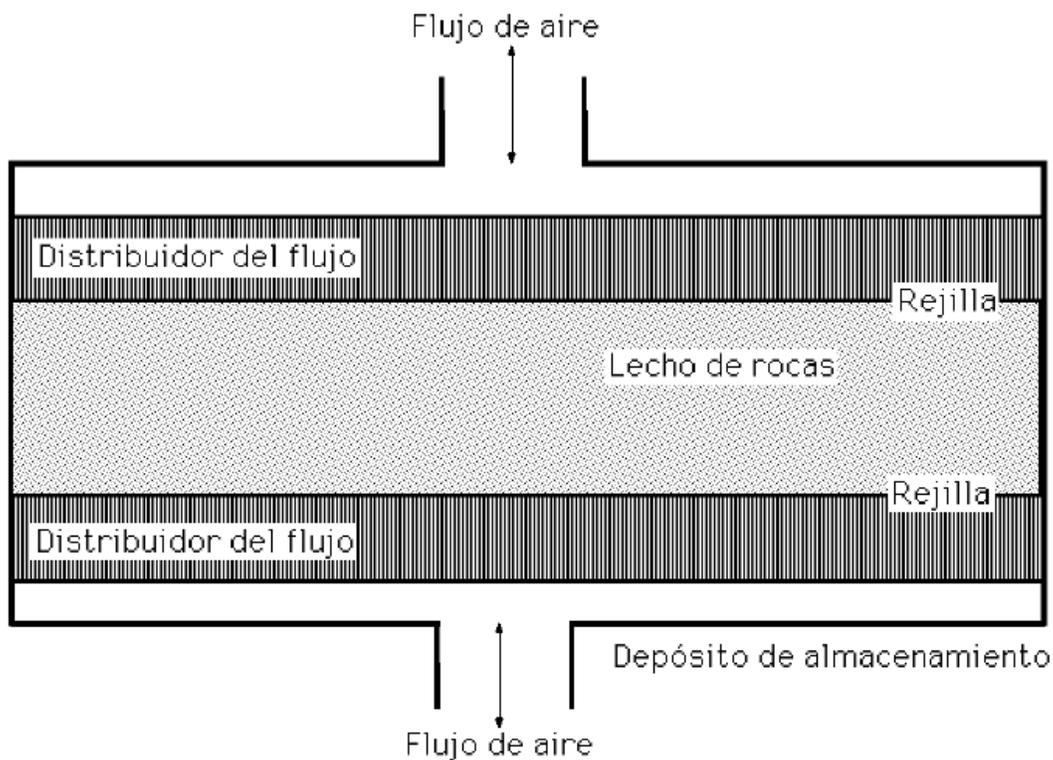


**d) Controla la carga desde el almacenamiento y el equipo de calentamiento.**

**Figura 2.21 Modos de operación**

El proyecto de tesis considera los modos de operación a y c; con un almacenamiento en piedras o rocas.

Una unidad de almacenamiento en lecho de piedras o rocas (guijarros o cantos) Figura 2.22, se basa en la capacidad calorífica de ciertos materiales ligeramente compactos, a través de los cuales se hace circular un fluido, generalmente aire.



**Figura 2.22 Unidad de almacenamiento de lecho compacto**

Para las aplicaciones de energía solar, los lechos de rocas tienen varias características interesantes, como:

- a) El coeficiente de transferencia de calor entre el aire y el material sólido es alto
- b) El costo del material de almacenamiento es bajo
- c) La conductividad térmica del lecho es baja cuando no circula aire a su través.

La cantidad de energía en forma de calor disponible se puede expresar como:

$$q_s = m_p * c_{pp} \frac{dts}{d\theta} = h_o * A * (ts - t) \quad (2.29)$$

Donde:

qs: Flujo de calor sensible.

mp: Masa de las piedras.

c<sub>pp</sub>: Calor específico de las piedras.

θ: Tiempo, h.

h<sub>o</sub>: Coeficiente de convección.

A: Área de las piedras.

ts: Temperatura de las piedras.

t: Temperatura del espacio a controlar la carga.

#### **2.4.2.2 Componentes**

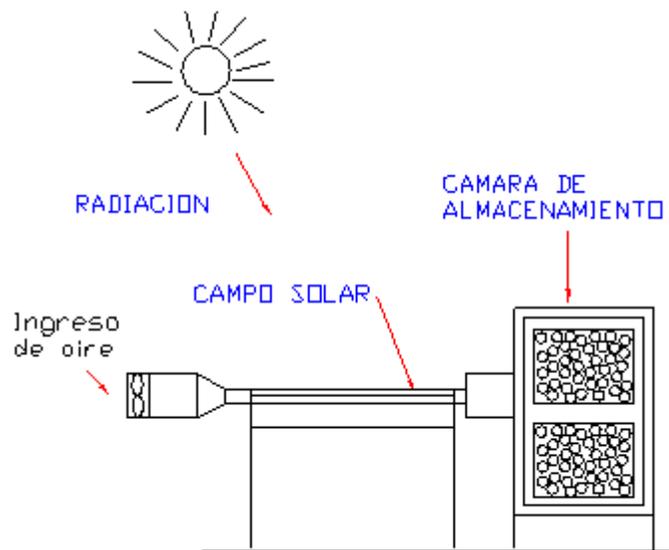
Las partes que componen una unidad de este tipo de lecho compacto son:

- a) Un contenedor
- b) Una estructura porosa para contener y apoyar el lecho
- c) Distribuidores de aire para el flujo en ambas direcciones que reduzcan al mínimo el paso del aire.

### 2.4.2.3 Funcionamiento

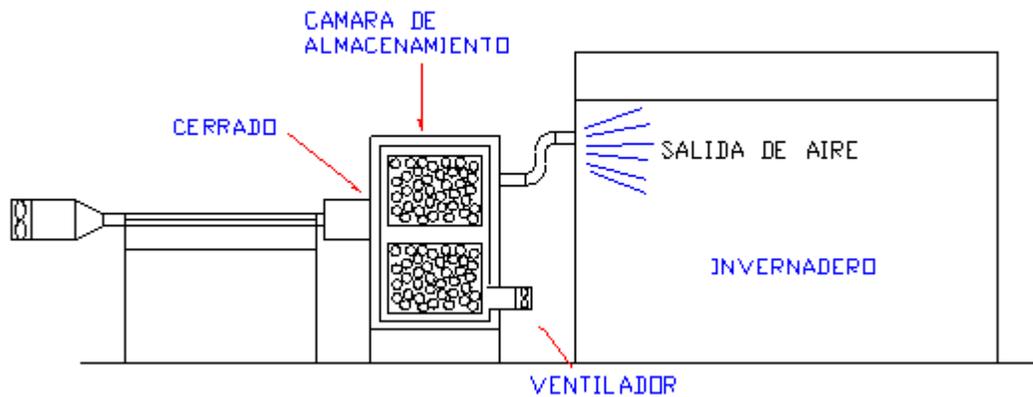
El funcionamiento de este sistema consiste en aprovechar la radiación del sol durante el día para el almacenamiento de calor y así satisfacer las necesidades requeridas en un invernadero en la noche.

En la figura 2.23 se muestra como se almacena el calor en el día.



**Figura 2.23 Almacenamiento de calor durante el día.**

En la figura 2.24 se muestra el aprovechamiento del calor almacenado durante el día, logrando así satisfacer los requerimientos del invernadero para la noche.



**Figura 2.24 Distribución del calor en la noche.**

Durante el funcionamiento, el flujo pasa a través del lecho en una dirección aportando calor (generalmente hacia abajo) y en dirección contraria al extraer calor. No se puede aportar y extraer calor de esta unidad al mismo tiempo; ésta es una diferencia fundamental con los sistemas de almacenamiento de agua donde es posible aportar y extraer calor simultáneamente.

Las necesidades de aislamiento en la superficie exterior del lecho de rocas son mínimas, si el almacenamiento es para períodos de tiempo cortos, puesto que la conductividad térmica del lecho en las direcciones radiales es baja.

#### 2.4.2.4 Dimensionamiento.

Para realizar el dimensionamiento del almacenamiento térmico, en primer lugar se tiene que definir la carga de calor requerido por el invernadero para de esta forma establecer la masa de piedras del almacenamiento<sup>23</sup>:

$$m_p = \frac{Q_e}{c_{pp} * (T_2 - T_1)} \quad (2.30)$$

Donde:

$Q_e$ : es el calor requerido por el invernadero.

$c_{pp}$ : calor específico de la piedra.

$T_2$ : Temperatura a la que puede calentarse una placa negra expuesta al sol.

$T_1$ : Temperatura ambiente.

Para definir el volumen de uno de los lechos de rocas, se tiene que establecer el volumen de la masa de piedras sacando la cuarta parte de la masa total, que esta dado por<sup>24</sup> (Fig. 2.25):

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p} \quad (2.31)$$

y,

$V_p$ : Volumen de lecho de piedras (Cuarta parte)

$m_p$ : masa de piedras.

$\rho_p$ : densidad de la piedra.

---

<sup>23</sup> Referencia 13

<sup>24</sup> Referencia 14

Entonces para determinar el dimensionamiento de la caja del lecho de piedras simplemente se obtiene el lado del volumen, que viene dado por:

$$l = \sqrt[3]{V_p} \quad (2.32)$$

Para obtener el valor de un lado total de la caja del lecho de rocas se suma una cierta separación, y está dado por:

$$l_t := 2 \cdot l + \text{sep} \quad (2.33)$$

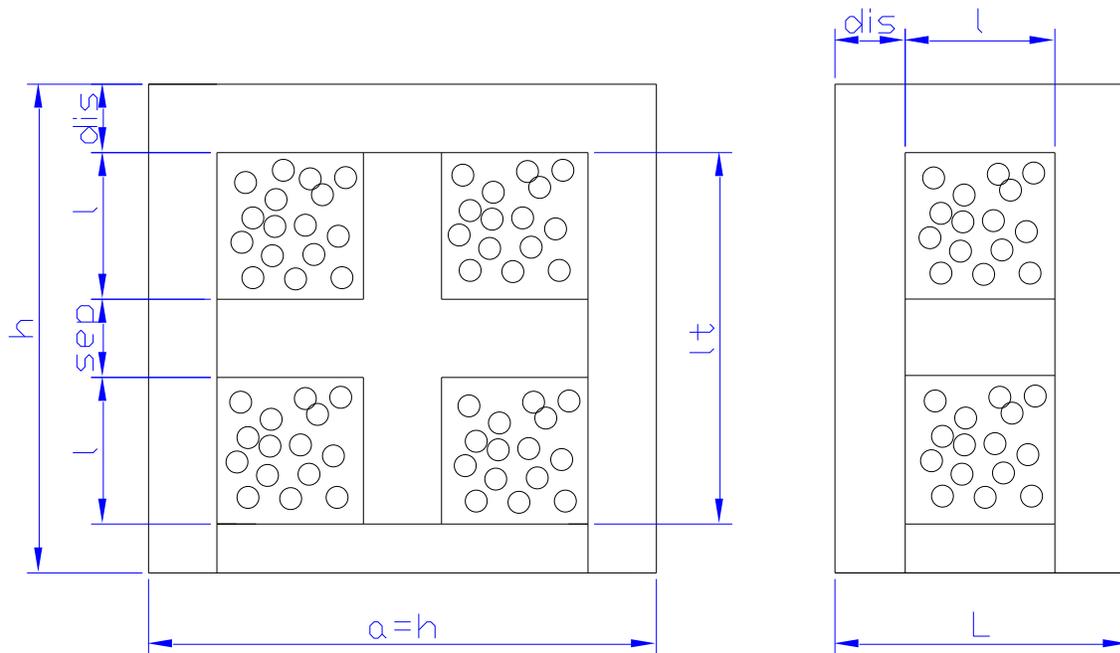
Entonces para determinar la altura y el ancho de la caja del almacenamiento térmico, se suma el lado total del lecho de piedras más una distancia, y viene dado por:

$$h := l_t + 2 \cdot \text{dis} \quad (2.34)$$

Y el largo de la caja, esta dado por:

$$L := l + 2 \cdot \text{dis} \quad (2.35)$$

La separación y la distancia recomendada entre los lechos de piedras es de 0.20m, y permite la libre circulación del aire dentro del almacenamiento térmico, para un calentamiento global de la masa de piedras.



**Figura 2.25 Dimensionamiento de la caja del almacenamiento térmico.**

## **CAPITULO 3**

### **SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE INVERNADEROS**

#### **3.1 SISTEMAS DE CALEFACCIÓN CONVENCIONAL**

Para la ambientación de construcciones en general, la energía solar está siendo ampliamente investigada y utilizada como elemento principal de diseño. El uso de este tipo de energía representa una reducción en los costos de acondicionamiento del aire al interior de una construcción.

Existen dos formas de diseñar construcciones aptas para la utilización de la energía solar. Estos dos sistemas son:

- Sistemas activos.
- Sistemas pasivos.

## **3.2 CLIMATIZACIÓN DE INVERNADEROS DURANTE PERÍODOS FRÍOS**

Existen distintos sistemas para calentar y mantener la temperatura en el interior de un invernadero<sup>1</sup> como son:

- Empleo adecuado de los materiales de cubierta.
- Hermetismo<sup>2</sup> del invernadero, evitando pérdidas de calor.
- Empleo de pantallas térmicas, cuyo uso permite mantener entre 2 y 4° C más en el interior del invernadero, con el consiguiente ahorro de energía. Dichas pantallas están justificadas en el caso de utilización de sistemas de calefacción.

---

<sup>1</sup> Referencia 10.

<sup>2</sup> Calidad de impenetrable, cerrado.

- Condensación que evita la pérdida de radiación de longitud de onda larga, aunque tiene el inconveniente del goteo sobre la planta.
- Capas dobles de polietileno de 150 galgas o de polipropileno, que se pueden emplear como pantalla térmica, para evitar condensaciones sobre cubierta, con el inconveniente de pérdida de luminosidad en el interior. Se emplea mucho en invernaderos sin calefacción.
- Invernaderos más voluminosos que permiten mayor captación de la luz y al mismo tiempo mayor pérdida de calor por conducción. La mayor inercia térmica de volúmenes grandes, permite un mejor control del clima.
- Propio follaje de las plantas, ya que almacenan radiación.
- Sistemas de calefacción por agua caliente o por aire caliente.

### **3.2.1. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN**

Para estimar las necesidades de calentamiento en un invernadero se debe considerar el intercambio de energía por conducción y convección, radiación, infiltración y ventilación.

El calor cedido por la calefacción puede ser aportado al invernadero básicamente por convección o por conducción. Por convección al calentar el aire del invernadero y por conducción se localiza la distribución del calor a nivel del cultivo.

Los diferentes sistemas de calefacción aérea o de convección más utilizados se pueden clasificar en:

- Tuberías aéreas de agua caliente.
- Aerotermos.
- Generadores de aire caliente.
- Generadores y distribución del aire en mangas de polietileno.

Los sistemas de distribución de calor por conducción se basan en tuberías de agua caliente, las diferencias entre ellos se encuentran en la temperatura del agua y su localización:

- Suelo a nivel de cultivo.
- Tuberías enterradas.
- Banquetas.

### **3.2.1.1. Calefacción por agua caliente.**

Es el sistema de calefacción aérea más tradicional y se basa en la circulación de agua caliente o vapor procedente de un foco calorífico (caldera, bomba de calor, etc.) por una red de tuberías. En la caldera el agua se calienta a 80-90° C y las tuberías se colocan a unos 10 cm sobre el suelo, que pueden ser fijas o móviles. Los sistemas antiguos tenían las tuberías colgadas del techo lo que incrementaba los costos energéticos.

La distribución del calor dentro del invernadero por el sistema de calefacción central por agua caliente se puede hacer de dos formas diferentes:

- Por termofusión, con tubos de diámetro grande, con una ligera pendiente unidescendiente.
- Por impulsión de bombas o aceleradores con tubería de diámetro menor y una temperatura en el agua de retorno más elevada que en el caso anterior.

Las características del sistema de calefacción del suelo por agua caliente que más destacan, son:

- Al estar el calor aplicado en la base, la temperatura del aire del invernadero es mucho más uniforme en comparación con la calefacción tradicional por tubo caliente colgado del techo.
- Para calentar el suelo se puede utilizar agua entre 30 y 40° C y por tanto es una forma de aplicación de energías alternativas como la geotérmica, calor residual industrial y solar a baja temperatura.
- Los costos de bombeo de agua son mayores. Debido a que la caída de temperatura del agua de calefacción en el invernadero es menor en los sistemas a baja temperatura, se precisa bombear mayor cantidad de agua para ceder la misma cantidad de calor.
- Se pueden usar materiales económicos como el polietileno en lugar de tuberías más caras de acero o aluminio.
- En general, los sistemas de calefacción de suelo representan un ahorro de energía.
- Sus costos de instalación son elevados.

### **3.2.1.2. Calefacción por aire caliente.**

En este caso se emplea aire para elevar la temperatura de los invernaderos. La calefacción por aire caliente consiste en hacer pasar aire a través de focos caloríficos y luego impulsarlo dentro de la atmósfera del invernadero. Existen dos sistemas:

- Generadores de combustión directa. Un ventilador lanza una corriente de aire al interior de la cámara de combustión del generador, con lo que en su salida el aire ya caliente arrastra consigo gases de la combustión, que pueden crear problemas de fitotoxicidad debido a sus componentes azufrados.
- Generadores con intercambiador de calor. La corriente de aire no pasa directamente a través de la cámara de combustión, sino que se calienta atravesando una cámara de intercambio. Por otra parte, la cámara de combustión elimina los gases que se producen en ella a través de una chimenea.

Los generadores de aire caliente pueden instalarse dentro o fuera del invernadero. Si están fuera el aire caliente se lleva hasta intercambiadores que están establecidos dentro del invernadero. Cuando los generadores están colocados dentro del invernadero, los ventiladores aspiran el aire del invernadero por una parte del aparato, donde se calienta y es expulsado directamente a la atmósfera del invernadero. También puede distribuirse por medio de tubos de plástico perforado, que recorren en todas las direcciones el invernadero.

En el caso de que el generador de calor esté en el exterior, el aire del invernadero es retornado al generador con la ayuda de unos conductos termoaislantes, donde se calienta y es impulsado de nuevo por medio de otros conductos.

Normalmente el combustible empleado es gasoil o propano, y los equipos están dotados de un sistema eléctrico de encendido con accionamiento a través de un termostato.

Los sistemas de calefacción por aire caliente tienen la ventaja de su menor inversión económica y mayor versatilidad al poder usarse como sistema de ventilación, con el consiguiente beneficio para el control de enfermedades. Como inconvenientes pueden citarse los siguientes:

- Proporcionan una deficiente distribución del calor, creando a veces turbulencias internas que ocasionan pérdidas caloríficas (menor inercia térmica y uniformidad).
- Su costo de funcionamiento es elevado y si se averían, la temperatura desciende rápidamente.

### **3.3 PARÁMETROS A CONSIDERAR EN EL CONTROL CLIMÁTICO**

El cultivo bajo invernadero siempre ha permitido obtener producciones de primera calidad y mayores rendimientos, en cualquier momento del año, a la vez que permiten alargar el ciclo de cultivo, permitiendo producir en las épocas del año más difíciles y obteniéndose mejores precios. Este incremento del valor de los productos permite que el agricultor pueda invertir tecnológicamente en su explotación mejorando la estructura del invernadero, los sistemas de riego localizado, los sistemas de gestión del clima, etc., que se reflejan posteriormente en una mejora de los rendimientos y de la calidad del producto final.

Entonces los parámetros que intervienen en el control climático son:

#### **3.3.1 PÉRDIDAS DE CALOR.**

El calentamiento del invernadero se produce cuando el infrarrojo largo, procedente de la radiación que pasa a través del material de cubierta, se transforma en calor. Esta radiación es absorbida por las plantas, los materiales de la estructura y el suelo. Como consecuencia de esta absorción, éstos emiten radiación de longitud más larga que tras pasar por el obstáculo que representa la cubierta, se emite radiación hacia el exterior y hacia el interior, calentando el invernadero.

El calor se transmite en el interior del invernadero por radiación, conducción, infiltración, tanto calentando como enfriando. La conducción es producida por el movimiento de calor a través de los materiales de cubierta del invernadero. La infiltración se debe al intercambio de calor del interior del invernadero y el aire frío del exterior a través de las juntas de la estructura. La radiación, por el movimiento del calor a través del espacio transparente.

##### **3.3.1.1. Temperatura.**

Este es el parámetro más importante<sup>3</sup> a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Normalmente la temperatura óptima para las plantas se encuentra entre los 10 y 20° C.

Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. Así mismo se deben aclarar los siguientes conceptos de temperaturas, que indican los valores objetivo a tener en cuenta para el buen funcionamiento del cultivo y sus limitaciones:

- Temperatura mínima letal. Aquella por debajo de la cual se producen daños en la planta.
- Temperaturas máximas y mínimas biológicas. Indican valores, por encima o por debajo respectivamente del cual, no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa, como floración, fructificación, etc.
- Temperaturas nocturnas y diurnas. Indican los valores aconsejados para un correcto desarrollo de la planta.

---

<sup>3</sup>[http://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/control\\_climatico2.asp](http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico2.asp)

### **3.3.1.2 Pérdidas por conducción y convección.**

Las pérdidas de calor por conducción están dadas por<sup>4</sup>:

$$Q_c = \frac{1}{R} \cdot A \cdot (t_{pi} - t_{pe}) \quad (3.1)$$

Donde:

La resistencia térmica de la pared **R** viene dada por<sup>5</sup>:

$$R_{\text{m}} := \frac{1}{h_e} + \frac{X_1}{K_1} + \frac{1}{h_i} \quad (3.2)$$

$h_e$ : coeficiente de convección exterior.

$h_i$ : coeficiente de convección interior.

$X_1$ : espesor de la pared.

$K_1$ : conductividad térmica de la pared.

$A$ : área de paredes y cubierta.

$t_{pi}$ : temperatura interior.

$t_{pe}$ : temperatura exterior.

### 3.3.1.3 Perdidas por radiación.

Las pérdidas de calor por radiación viene dado por<sup>6</sup>:

$$Q_r = h_{pr} \cdot A \cdot (t_{pi} - t_{pe}) \quad (3.3)$$

---

<sup>4</sup> Referencia 13

<sup>5</sup> Referencia 13

<sup>6</sup> Referencia 13

Donde:

El coeficiente de transferencia de calor por radiación  $h_{pr}$  esta dado por<sup>7</sup>:

$$h_{pr} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3 \quad (3.4)$$

$\varepsilon$ : Emisividad.

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzman.

$T_m$ : Temperatura media.

$A$ : Área de paredes y cubierta.

#### 3.3.1.4 Pérdidas por infiltración de aire.

Las pérdidas de calor por infiltración de aire utiliza el método del área, y viene dado por la ecuación:

$$Q_{si} := 1.08 \cdot I_v \cdot (t_{pi} - t_{pe}) \quad (3.5)$$

Donde:

$I_v$ : Infiltración en ventana y está dada por la ecuación:

$$I_v := 1.26 \cdot A_v \quad (3.6)$$

$A_v$ : Área de ventana descubierta.

El coeficiente 1.26 corresponde al volumen de aire infiltrado por pie cuadrado de área de ventana.

---

<sup>7</sup> Referencia 13

Entonces las pérdidas totales de calor, está dada por:

$$Q_{pt} = Q_c + Q_r + Q_s \quad (3.7)$$

#### 3.3.2 CALOR REQUERIDO POR EL INVERNADERO.

La cantidad total de energía en forma de calor requerido por el invernadero, está dado por:

$$Q_{pi} := Q_{pt} \cdot h_{se} \quad (3.8)$$

Donde:

hser: horas de servicio que va a proporcionar el equipo de calentamiento durante la noche.

### **3.3.3 FLUJO MÁSSICO DE AIRE.**

Para determinar la cantidad de aire necesaria por unidad de tiempo para el invernadero, se utiliza la ecuación:

$$m_a := \frac{Q_{pt}}{c_p \cdot (T_s - T_i)} \quad (3.9)$$

Donde:

$c_p$ : calor específico del aire.

$T_s$ : temperatura del aire de suministro al invernadero.

$T_i$ : temperatura interna del invernadero.

### **3.3.4 CAPACIDAD DEL EQUIPO.**

La capacidad del equipo para cubrir las necesidades de calentamiento está dada por:

$$Q_e = m_a \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (3.10)$$

Donde:

$T_e$ : temperatura externa del invernadero.

En el capítulo siguiente se procederá al diseño térmico de un invernadero, ubicado en la sierra ecuatoriana; donde durante las noches puede obtenerse temperaturas mínimas letales.

El calentamiento se cubrirá con la energía almacenada durante el día que normalmente se tienen muchas horas de brillo solar.

## CAPITULO 4

### DISEÑO TERMICO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

#### 4.1 PARAMETROS DE DISEÑO

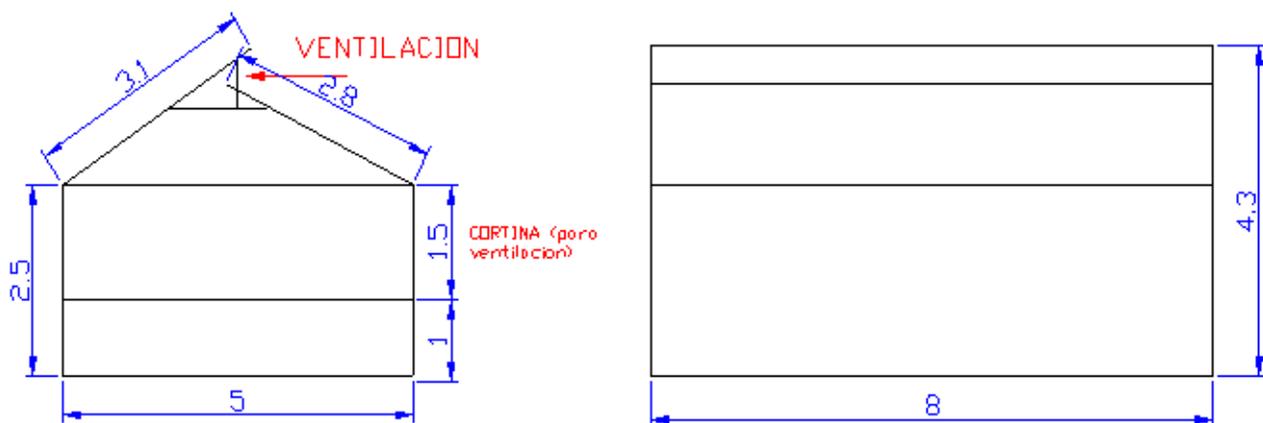
Para el diseño del sistema de calentamiento se debe establecer la cantidad de energía requerida por el invernadero, el valor de la radiación solar directa y el flujo másico de aire.

##### 4.1.1 CALCULO DEL CALOR REQUERIDO POR EL INVERNADERO

La energía requerida por el invernadero es fundamental para el diseño del sistema de calentamiento, debido a parámetros importantes como: temperatura interna, temperatura externa, las pérdidas de calor por el piso, por infiltración de aire, por paredes y cubierta.

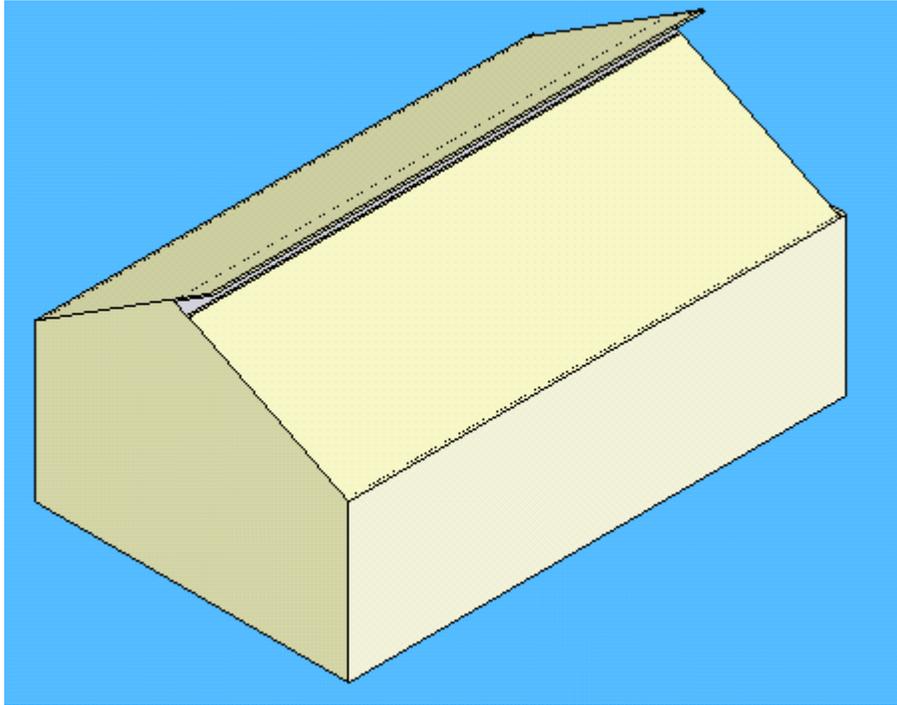
Para determinar estos parámetros se tiene que seleccionar un tipo de invernadero, en la Figura 4.1 se muestran las dimensiones del invernadero en estudio y en la Figura 4.2 se indica el invernadero en tres dimensiones.

Estas dimensiones fueron tomadas de los invernaderos que existen en la empresa DENMAR ubicada en el sector de Tabacundo, provincia de Pichincha; la cual se dedica al



cultivo de rosas.

**Figura 4.1 Dimensiones del invernadero.**



**Figura 4.2 Invernadero.**

### **TEMPERATURA INTERIOR**

Cuando la temperatura dentro del invernadero durante las noches alcanza valores menores a 7 °C, se requiere el calentamiento; el dato es registrado y fue proporcionado por la empresa DENMAR.

$$t_{pi} = 7 \text{ °C ( 44,6 °F)}$$

### **TEMPERATURA EXTERIOR**

En Ecuador, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología –INAMHI-, realiza mediciones diarias de temperatura en sus estaciones ubicadas en distintas localidades del país, una de estas se encuentra en Tomalon – Tabacundo

Se debe considerar que el equipo va a trabajar bajo las condiciones más críticas, la temperatura exterior será la mínima temperatura promedio ambiente registrada en la zona que es de 5.5 °C.

$$t_{pe} = 5,5 \text{ °C ( 41,9 °F)}$$

### **PERDIDAS DE CALOR POR EL PISO**

Para efecto del cálculo se lo considera al piso adiabático, esto quiere decir que no existe transferencia de calor hacia el piso; ya que éste funciona como un aislante natural.

### **PÉRDIDAS DE CALOR POR PAREDES Y CUBIERTA**

Para obtener las pérdidas de calor por las paredes y cubierta, primero se debe obtener el área total de las mismas, para lo cual de la Figura 4.1 se tienen los siguientes datos:

a := 5 m	Ancho del invernadero.
b := 8 m	Longitud del invernadero
c1 := 3.1 m	Ancho de la cubierta del invernadero.
c2 := 2.81 m	Ancho de la cubierta del invernadero.
h := 2.5 m	Altura del invernadero

$$A := [ 2 \cdot (a \cdot h + b \cdot h) + [b \cdot (c1 + c2)] ] \cdot 10.764$$

$$A = 1.209 \times 10^3 \text{ ft}^2 \quad \text{Área total de las paredes y cubierta.}$$

La cantidad de calor perdido tanto por las paredes como la cubierta viene dado por la ecuación 3.1:

$$Q_{\text{paredes}} := \frac{1}{R} \cdot A \cdot (t_{\text{pi}} - t_{\text{pe}})$$

Por lo tanto, primero se debe obtener la resistencia térmica de la pared del invernadero

### Resistencia térmica de la pared del Invernadero

Para efectos de cálculo de Ingeniería debido a la velocidad del viento se recomienda utilizar coeficientes de transferencia de calor por convección de 6.0 para el exterior y de 1.65 Btu/h·ft<sup>2</sup>·°F para el interior<sup>1</sup>, entonces se tiene la ecuación 3.2:

$$h_e := 6.0 \quad \left( \frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \right) \quad \text{Coeficiente de convección exterior}$$

$$X_1 := 0.019 \quad (\text{plg}) \quad \text{Espesor de la pared (0.5 mm)}$$

$$K_1 := 2.28 \quad \left( \frac{\text{Btu} \cdot \text{plg}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \right) \quad \text{Conductividad de pared (polietileno baja densidad)}^2$$

$$1 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} = 6.937 \frac{(\text{BTU} \cdot \text{in})}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}}$$

$$h_i := 1.65 \quad \left( \frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \right) \quad \text{Coeficiente de convección interior}$$

$$R := \frac{1}{h_e} + \frac{X_1}{K_1} + \frac{1}{h_i}$$

$$R = 0.781 \quad \left( \frac{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{Btu}} \right) \quad \text{Resistencia al paso de calor de la pared}$$

---

<sup>1</sup> Referencia 13

<sup>2</sup> Referencia 12

Por lo tanto la cantidad de calor que se pierde por las paredes y cubierta es:

$$Q_{\text{paredes}} := \frac{1}{R} \cdot A \cdot (t_{pi} - t_{pe})$$

$$Q_{\text{paredes}} = 4.178 \times 10^3 \quad \left( \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \right)$$

$$Q_{\text{paredes}} := \frac{Q_{\text{paredes}}}{3600} \cdot 1054.35$$

$$Q_{\text{paredes}} = 1.224 \times 10^3 \quad \text{W}$$

## **PERDIDAS DE CALOR POR RADIACION**

Las pérdidas de calor por radiación están dadas por la ecuación 3.3:

$$Q_r = h_{pr} \cdot A \cdot (t_{pi} - t_{pe})$$

Donde el coeficiente de transferencia de calor por radiación  $h_{pr}$  esta dado por la ecuación 3.4:

$$h_{pr} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3$$

$$T_m := \frac{t_{pi} + t_{pe}}{2}$$

$$T_m = 43.25 \quad ^\circ\text{F}$$

$$T_m := 279.4 \quad ^\circ\text{K} \quad \text{Temperatura media.}$$

$$\varepsilon := 0.88 \quad \text{Emisividad del polietileno de baja densidad.}^3$$

---

<sup>3</sup> Referencia 12

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad \text{Constante de Stefan Boltzman.}$$

$$h_{pr} := 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3$$

$$h_{pr} = 4.353$$

La cantidad de calor perdido por radiación será:

$$A := 112.31 \quad \text{m}^2 \quad \text{Área total de las paredes y cubierta.}$$

$$Q_r := h_{pr} \cdot A \cdot (t_{pi} - t_{pe})$$

$$Q_r = 1.32 \times 10^3 \quad \text{W}$$

## **PÉRDIDAS DE CALOR POR INFILTRACIÓN DE AIRE**

Para obtener las pérdidas de calor por infiltración de aire se utiliza el método del área, donde se considera que el invernadero se halla rodeado de ventanas sin protección a un 100% de ventilación a lo que corresponde un coeficiente de 1.26 de volumen de aire infiltrado (pie<sup>3</sup>/min) por pie cuadrado de superficie de ventana<sup>4</sup>.

$$A_v := 1.3 \cdot 4.5 \cdot 10.764 \quad \text{Área de ventana descubierta}$$

$$A_v = 62.969 \quad (\text{ft}^2)$$

$$I_v := 1.26 \cdot A_v$$

$$I_v = 79.341 \quad \left( \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \right) \quad \text{Infiltración en ventana}$$

---

<sup>4</sup> Referencia 13

La cantidad de calor que se pierde por infiltraciones de aires es:

$$Q_{si} := 1.08 \cdot I_v \cdot (t_{pi} - t_{pe})$$

$$Q_{si} = 2 \times 10^3 \quad \left( \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \right) \quad \text{Calor sensible por infiltración de aire}$$

$$Q_{si} := \frac{Q_{si}}{3600} \cdot 1054.35$$

$$Q_{si} = 585.866 \quad \text{W}$$

## PERDIDAS TOTALES DE CALOR

Representa la sumatoria de todos los calores perdidos y es el calor equivalente al que se debe administrar al invernadero para mantener constante la temperatura y está dado por la ecuación 3.7.

$$Q_{pt} = Q_{si} + Q_{paredes} + Q_{piso} + Q_r$$

$$Q_{pt} = 2.611 \times 10^3 \quad (\text{W}) \quad \text{Carga de calefacción para mantener la temperatura al interior en un valor de } 7^\circ\text{C}$$

Para mantener la temperatura estable y que no disminuya de 7°C, se requieren cuatro horas de servicio en las noches por parte del equipo de calentamiento.

$$h_{ser} := 4 \quad \mathbf{h}$$

La energía necesaria requerida por el invernadero, está dado por la ecuación 3.8.

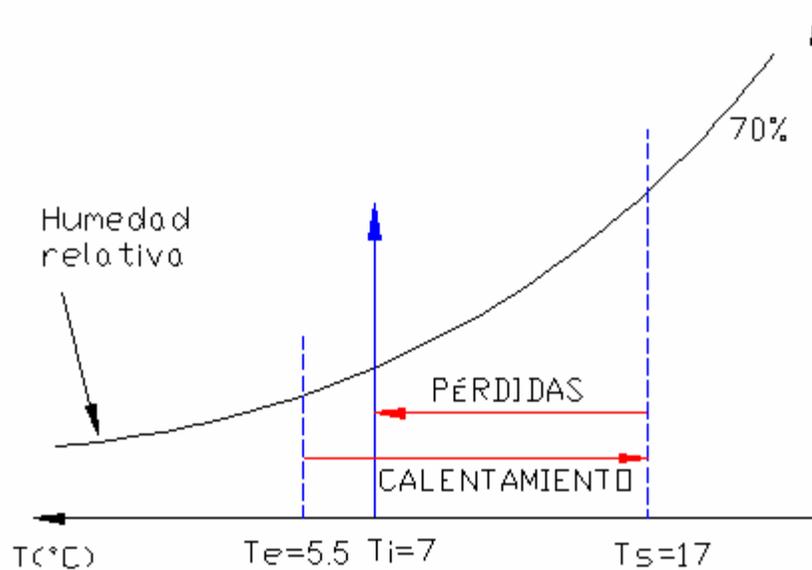
$$Q_{pi} := Q_{pt} \cdot h_{ser}$$

$$Q_{pi} = 1.045 \times 10^4 \quad \mathbf{W \cdot h}$$

$$Q_{pi} = 10.45 \quad \mathbf{Kw \cdot h}$$

#### 4.1.2 FLUJO MÁSICO DE AIRE.

La masa de aire que será suministrada al invernadero es calentada desde la temperatura externa (5.5°C) hasta la temperatura de suministro de 17 °C, pero las pérdidas de energía se producen al intentar que la temperatura interna del invernadero no baje de 7°C.



### Figura 4.3 Proceso de calentamiento de la masa de aire.

Para determinar el flujo másico se considera la energía necesaria requerida por el invernadero y viene dado por la ecuación:

$$Q_{pt} = m_a \cdot c_p \cdot (T_s - T_i)$$

Donde

$$c_p := 1.005 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{C}} \quad \text{Calor específico del aire.}$$

$$T_s := 17 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de suministro al invernadero.}$$

$$T_i := 7 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura interna del invernadero.}$$

El flujo másico de aire, está dado por la ecuación 3.9.

$$m_a := \frac{Q_{pt}}{c_p \cdot (T_s - T_i)}$$

$$m_a = 0.26 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

El flujo de calor requerido por el equipo de calentamiento es:

$$Q_e = m_a \cdot c_p \cdot (T_s - T_e)$$

Donde :

$$T_e = 5.5 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura externa}$$

$$Q_e := m_a \cdot c_p \cdot (T_s - T_e)$$

$$Q_e = 3.133 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}$$

y la energía total durante las cuatro horas es:

$$Q_e = Q_e * 4 \text{ h}$$

$$Q_e = 3,133 \text{ Kw} * 4\text{h}$$

$$Q_e = 12,532 \text{ Kw} * \text{h}$$

Para el suministro de aire del equipo se selecciona un ventilador, lo cual se muestra en el Anexo A.

### **4.1.3 RADIACIÓN SOLAR DIRECTA**

El cálculo de la radiación solar directa es importante, debido a que, las celdas parabólicas solo pueden concentrar este tipo de radiación.

Se debe empezar haciendo una estimación de toda la radiación solar que se posee, para luego descomponer en sus componentes como son radiación difusa y la que interesa la radiación directa.

### **ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR**

Para la estimación de la radiación solar se hará un promedio para el día mas representativo de cada mes del año y como ejemplo de cálculo se escogerá el 17 de Agosto por ser el día más representativo del año y para lo cual se utilizará el marco teórico establecido en el capítulo N.-2.

$$H_{av} = H_o \cdot \left( a + b \cdot \frac{hel}{T_D} \right)$$

De donde  $H_o$  sale de la ecuación 2.12.

$$H_o = \frac{24}{\pi} \cdot 3600 \cdot I_{sc} \cdot \left[ \left( 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right) \cdot \left( \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) \frac{2}{360} \cdot \pi \cdot \omega_s \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \right) \right]$$

y:

$$I_{sc} := 1353 \quad \frac{W}{m^2}$$

$n := 229$  Día representativo (17 agosto).

$\phi := -0.28$  ° Latitud de Sangolquí

Con la ecuación 2.3, se puede sacar la declinación para un día representativo, de la siguiente forma:

$$\delta := 23.45 \cdot \sin\left[ 360 \cdot \left( \frac{284 + n}{365} \right) \cdot \frac{\pi}{180} \right]$$

$\delta = 13.122$  ° Declinación en el día representativo.

De la ecuación 2.8, se saca el ángulo de ocaso, así:

$$\cos(\omega_s) = -\tan\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \tan\left(\delta \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$\omega_s := \arccos\left(-\tan\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \tan\left(\delta \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$\omega_s = 89.935$  ° Angulo de ocaso.

De la ecuación 2.9, se puede sacar la duración teórica del día

$$T_d := \frac{2}{15} \cdot \omega_s$$

$$T_d = 11.991 \quad \mathbf{h} \quad \text{Duración teórica del día.}$$

Una vez que se ha obtenido todos estos datos se puede obtener la radiación solar extraterrestre en una superficie horizontal ( $H_o$ ).

$$H_o := \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot \left[ \left( 1 + 0.033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right) \cdot \left( \cos \left( \phi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \cos \left( \delta \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \sin \left( \omega_s \cdot \frac{\pi}{180} \right) + \frac{2}{360} \cdot \pi \cdot \omega_s \cdot \sin \left( \phi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \sin \left( \delta \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right]$$

$$H_o = 9.817 \times 10^3 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$$

Entonces la radiación solar diaria sobre una superficie horizontal será:

$$h_{el} := 5 \quad \mathbf{h} \quad \text{Horas de brillo solar para el Ecuador}$$

$$a := 0.25$$

$$b := 0.48 \quad \text{Constantes de Page para el Ecuador}$$

$$H_{av} := H_o \cdot \left( a + b \cdot \frac{h_{el}}{T_d} \right)$$

$$H_{av} = 4.419 \times 10^3 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$$

En la tabla 4.1 se indican los valores de la radiación solar extraterrestre diaria y la radiación solar diaria para una superficie horizontal en cada uno de los días representativos de cada mes con su respectivo promedio.

**Tabla 4.1 Radiación solar extraterrestre y diaria promedio para todo el año.**

MES	FECHA	DIA REPRES.	Ho (W/m <sup>2</sup> *día)	Hav (W/m <sup>2</sup> *día)
Enero	17	17	9989	4493
Febrero	15	46	10310	4638
Marzo	17	77	10420	4687
Abril	15	106	10090	4541
Mayo	15	136	9251	4287
Junio	11	163	9177	4,132
Julio	18	200	9329	4200
Agosto	17	229	9817	4419
Septiembre	15	259	10240	4609
Octubre	15	289	10280	4625
Noviembre	14	319	10020	4506
Diciembre	12	347	9828	4420
<b>PROMEDIO</b>			<b>9895,92</b>	<b>4119,09</b>

Una vez que se ha obtenido la radiación solar extraterrestre y la radiación solar diaria promedio para todo el año, se puede obtener las componentes diarias de radiación directa y difusa con la ayuda de la figura 2.10.

Para lo cual se hacen las siguientes relaciones:

$$H_o := 9895.92 \frac{W}{m^2 \cdot dia} \quad \text{Radiación solar extraterrestre promedio del año.}$$

$$H_{av} := 4119.09 \frac{W}{m^2 \cdot dia} \quad \text{Radiación solar diaria promedio del año.}$$

Con este dato en la grafica de la figura 2.10 y se observa que la relación entre la radiación difusa diaria y la total diaria es 0.58, de donde se puede obtener el valor de la radiación difusa diaria:

**Eje y**

$$\frac{H_{difd}}{H_{av}} = 0.58$$

De donde:

$$H_{difd} := H_{av} \cdot 0.58$$

$$H_{difd} = 2.389 \times 10^3 \frac{W}{m^2 \cdot dia}$$

Ahora para obtener la radiación solar directa, simplemente se resta la radiación solar difusa diaria de la total diaria.

$$H_{dird} := H_{av} - H_{difd}$$

$$H_{dird} = 1.73 \times 10^3 \frac{W}{m^2 \cdot dia}$$

Esta es la radiación directa diaria promedio, pero también se puede obtener esta radiación para cada hora del día.

## ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR POR HORA

### Radiación solar difusa por hora

Para obtener la radiación solar difusa por hora se debe utilizar las ecuaciones 2.14 y 2.15.

$$rd = \frac{\pi}{1440} \cdot \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) - \omega_s \cdot \cos(\omega_s)}$$

$$H_{dif} = H_{dif} \cdot rd$$

Donde:

$\omega$  es el ángulo horario y varia con el tiempo, siendo 15 para cada hora; positivo para la mañana y para la tarde negativo y se puede obtener de la ecuación 2.4.

$$\omega = 15 \cdot \left( 12 - \frac{\text{Tiempo}}{60} \right)$$

en donde el tiempo esta en minutos.

Por ejemplo se quiere sacar el ángulo horario para la 6 horas.

$$\text{Tiempo} := 360 \text{ min}$$
$$\omega := 15 \cdot \left( 12 - \frac{\text{Tiempo}}{60} \right)$$

$$\omega = 90^\circ$$

En la tabla 4.2 se muestran los ángulos horarios desde las 6 horas hasta 18 horas., que permitirán obtener la radiación solar y su dirección.

**Tabla 4.2 Ángulos horarios desde las 6 hasta las 18 horas.**

HORA	ANGULO HORARIO
6 – 7	90°
7 – 8	75°
8 – 9	60°
9 – 10	45°
10 – 11	30°
11 – 12	15°
12 – 13	0°
13 – 14	-15°
14 – 15	-30°
15 – 16	-45°
16 – 17	-60°
17 -18	-75°

Con estos ángulos horarios se puede obtener las radiación solar difusa en cada hora y su promedio para todo el día.

Para ejemplo de cálculos, todos estos se harán para las 12 horas.

$$\omega := 0$$

$$rd := \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos\left(\omega \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \cos\left(\omega s \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\sin\left(\omega s \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \omega s \cdot \cos\left(\omega s \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$$

$$rd = 0.146$$

$$H_{dif} := H_{dif} \cdot rd$$

$$H_{dif} = 348.031 \quad \frac{W}{m^2 \cdot \text{día}}$$

### **Radiación solar directa por hora**

Para obtener la radiación solar directa por hora, se debe primero calcular la radiación global por hora, dada por la ecuación 2.18.

$$H_g = H_{av} \cdot r_g$$

Donde el coeficiente  $r_g$  está dado por la ecuación 2.16.

$$r_g = rd \cdot (ag + bg \cdot \cos(\omega))$$

Donde :

Los coeficientes  $ag$  y  $bg$  están dados por la ecuación 2.17.

$$ag := 0.409 + 0.5016 \cdot \sin \left[ \left( \omega_s - \frac{\pi}{3} \right) \cdot \frac{\pi}{180} \right]$$

$$ag = 0.911$$

$$bg := 0.6609 - 0.4767 \cdot \sin \left[ \left( \omega_s - \frac{\pi}{3} \right) \cdot \frac{\pi}{180} \right]$$

$$bg = 0.184$$

La radiación global por hora es:

$$r_g := rd \cdot \left( ag + bg \cdot \cos \left( \omega \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right)$$

$$r_g = 0.159$$

$$H_g := H_{av} \cdot r_g$$

$$H_g = 656.936$$

$$\frac{W}{m^2}$$

Por lo tanto para obtener la radiación solar directa por hora, simplemente se resta la radiación solar global por hora de la radiación solar difusa por hora, dado por la ecuación 2.19.

$$H_{dir} := H_g - H_{dif}$$

$$H_{dir} = 308.905 \quad \frac{W}{m^2}$$

En la tabla 4.3 se indican los valores de la radiación solar difusa, global y directa por hora con su respectivo promedio para el día.

**Tabla 4.3 Radiación solar global, difusa y directa por hora para el día.**

<b>HORA</b>	<b>ANGULO HORARIO</b>	<b>H<sub>g</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>H<sub>dif</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>H<sub>dir</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>
-------------	-----------------------	--	--	--

6 – 7	90°	0	0	0
7 – 8	75°	148,328	89,783	58,545
8 – 9	60°	300,479	173,817	126,662
9 – 10	45°	441,413	245,979	195,434
10 – 11	30°	555,995	301,351	254,644
11 – 12	15°	630,886	336,159	294,727
12 – 13	0°	656,936	348,031	308,905
13 – 14	-15°	630,886	336,159	294,727
14 – 15	-30°	555,995	301,351	254,644
15 – 16	-45°	441,413	245,979	195,434
16 – 17	-60°	300,479	173,817	126,662
17 -18	-75°	148,328	89,783	58,545
	<b>TOTAL</b>	<b>4810,515</b>	<b>2641,812</b>	<b>2168,703</b>

Debido a que las celdas parabólicas trabajan o pueden concentrar la radiación solar directa, entonces el dato que sirve para el diseño de las celdas es 2168.703 W/m<sup>2</sup>.

## 4.2 DISEÑO DEL ALMACENAMIENTO TERMICO

#### 4.2.1 MASA DE PIEDRAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE CALOR

Para obtener la masa de piedras necesaria para el almacenamiento de calor que se requiere en el invernadero, se considera la ecuación 2.29.

$$m_p = \frac{Q_e}{c_{pp} * (T_2 - T_1)}$$

Donde:

$Q_e$  calor requerido por el equipo y se obtuvo anteriormente.

$$Q_e := 12.538 \cdot 10^3 \quad \mathbf{W \cdot h}$$

$$Q_e = 12.538 \quad \mathbf{Kw \cdot h}$$

$$c_{pp} = 0.812 \quad \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C} \quad \text{Calor específico de la piedra}$$

$$T_1 := 16 \quad (^\circ C) \quad \text{Temperatura promedio ambiente.}$$

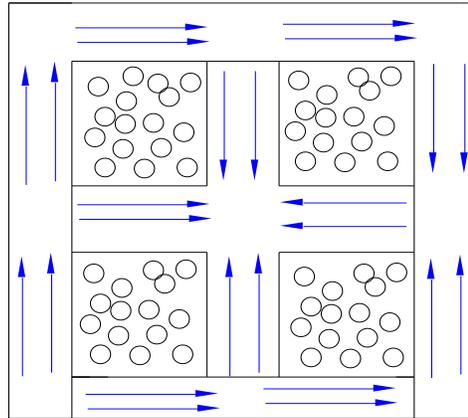
$$T_2 := 70 \quad (^\circ C) \quad \text{Una placa negra expuesta al sol con radiación directa puede llegar a calentarse hasta } 70 \text{ } ^\circ C$$

Entonces la cantidad de piedras necesarias son:

$$m_p = \frac{Q_e}{c_{pp} * \frac{1000}{3600} (T_2 - T_1)}$$

$$m_{pat} = 1.024 \times 10^3 \quad (\mathbf{Kg})$$

La masa que se obtuvo será dividida en 4 partes, debido a que se necesita que el aire circule por toda esta, como se muestra en la figura.



**Figura 4.4 Distribución de la masa de piedras dentro del almacenamiento térmico**

#### 4.2.2 DIMENSIONAMIENTO DEL ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Una vez que se obtuvo la masa de piedras, se puede considerar la ecuación 2.30 para obtener el volumen del almacenamiento térmico.

$$\rho_p = 2640 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \text{ Densidad de la piedra.}$$

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p}$$

El volumen obtenido es para la cuarta parte de la masa de piedras.

$$V_p = 0.097 \text{ m}^3$$

Para obtener el dimensionamiento de la caja para el lecho de piedras, simplemente se saca el lado del volumen obtenido, dado por la ecuación 2.31..

$$V_p = l^3$$

De donde:

$$l = \sqrt[3]{V_p}$$

$$l = 0.459 \text{ m}$$

Este valor puede ser aproximado a:

$$l := 0.5 \text{ m}$$

Entonces el lado total para la caja del lecho de piedras será:

$$\text{sep} := 0.20 \text{ m} \quad \text{Separación entre los lechos de piedra}$$

$$l_t := 2 \cdot l + \text{sep}$$

$$l_t = 1.2 \text{ m}$$

Para obtener el lado de caja del almacenamiento térmico se debe tomar en cuenta una cierta distancia entre la caja del lecho de piedras y la del almacenamiento.

$$\text{dis} := 0.20 \text{ m} \quad \text{Separación entre la caja del lecho de piedras y la caja del almacenamiento térmico.}$$

$$h := l_t + 2 \cdot \text{dis}$$

$$h = 1.6 \text{ m}$$

Se puede concluir que la altura y el ancho de la caja del almacenamiento térmico será de:

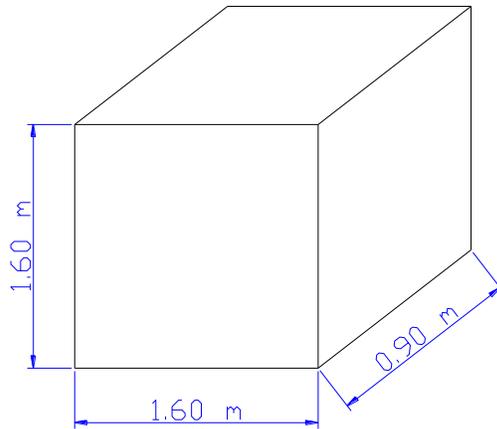
$$h := 1.60 \quad \text{m}$$

y el largo de la misma será de:

$$L_c = 1 + 2d_{is}$$

$$L_c = 0.9 \quad \text{m}$$

En la Figura 4.5 se muestra las dimensiones de la caja del almacenamiento térmico.



**Figura 4.5 Dimensionamiento de la caja del almacenamiento térmico.**

### **4.2.3 CALOR REQUERIDO PARA EL ALMACENAMIENTO TÉRMICO**

El calor necesario para el almacenamiento térmico es el mismo que se requiere concentrar en las celdas parabólicas y es igual a la suma del calor requerido por el equipo mas las perdidas de calor por las paredes del almacenamiento térmico.

$$Q_{nat} = Q_{pat} + Q_e$$

## Pérdidas de calor en las paredes

Para determinar las pérdidas de calor por las paredes del almacenamiento térmico, se considera la ecuación 3.1.

$$Q_{pat} = \frac{1}{R_p} \cdot A_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Donde:

El área total de las paredes ( $A_{pat}$ ) es:

$$A_{pat} := 2 \cdot h^2 + 4 \cdot h \cdot L$$
$$R_{pat} = \frac{1}{heat} + \frac{1}{k \cdot h} + \frac{1}{hiat}$$
$$A_{pat} = 10.88 \frac{m^2}{m}$$

Donde:

La resistencia al paso del calor por la pared del almacenamiento térmico, se obtiene de

la ecuación 3.2. Los coeficientes de convección externa e interna de la pared, vienen dado por:

$$heat = 5.8 + 3.7 \cdot (V_{ve})$$

$$hiat = 5.8 + 3.7 \cdot (V_{vi})$$

$$V_{ve} := 1.7 \frac{m}{s} \quad \text{Velocidad del aire exterior.}$$

$$V_{vi} := 2 \frac{m}{s} \quad \text{Velocidad del aire interior.}$$

$$heat := 5.8 + 3.7 \cdot (V_{ve})$$

$$heat = 12.09 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$hiat := 5.8 + 3.7 \cdot (V_{vi})$$

$$h_{iat} = 13.2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$k_{ln} := 0.022 \frac{W}{m \cdot K} \quad \text{Coeficiente de conductividad térmica de la lana de vidrio, no se considera las láminas de metal por ser de un mínimo espesor.}$$

$$x_{at} := 0.05 \quad m \quad \text{Espesor del aislamiento del almacenamiento térmico.}$$

Una vez que se obtienen los coeficientes de convección tanto interna como externa se puede calcular la resistencia al paso de calor por la pared, de la siguiente forma:

$$R_{pat} := \left( \frac{1}{h_{eat}} + \frac{x_{at}}{k_{ln}} + \frac{1}{h_{iat}} \right)$$

$$R_{pat} = 2.431 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Entonces la cantidad de calor perdido por las paredes del almacenamiento térmico será:

$$Q_{pat} := \frac{1}{R_{pat}} \cdot A_{pat} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$Q_{pat} = 241.659 \quad W$$

$$Q_{pat} = 241.659 * 12h$$

$$Q_{pat} = 2899.9 \quad W \cdot h$$

Entonces el calor necesario que se requiere concentrar en las celdas parabólicas para el almacenamiento térmico será:

$$Q_{nat} := Q_{pat} + Q_e$$

$$Q_{nat} = 15438 \quad W \cdot h$$

$$Q_{nat} = 15.438 \quad Kw \cdot h$$

### 4.3 DISEÑO DE LAS CELDAS PARABÓLICAS

#### 4.3.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA CELDA PARABÓLICA

Para el diseño de la celda parabólica se debe obtener la parábola del concentrador que está dado por la ecuación 2.20.

$$x^2 = 4 \cdot F \cdot y$$

donde:

F es el foco de la parábola y para obtener una mejor eficiencia, lo óptimo es hacerlo coincidir en la apertura de la boca; y esta dado por la ecuación 2.21.

$$F = \frac{B}{4}$$

Debido a la disponibilidad de construcción de la celda parabólica en planchas de acero inoxidable en el mercado nacional y por diseño se puede imponer que la apertura de la boca sea de 1.20 m.

$$B := 1.20 \quad m$$

El foco será de:

$$F := \frac{B}{4}$$

$$F = 0.3 \quad m$$

Reemplazando en la ecuación de la parábola, se tiene que:

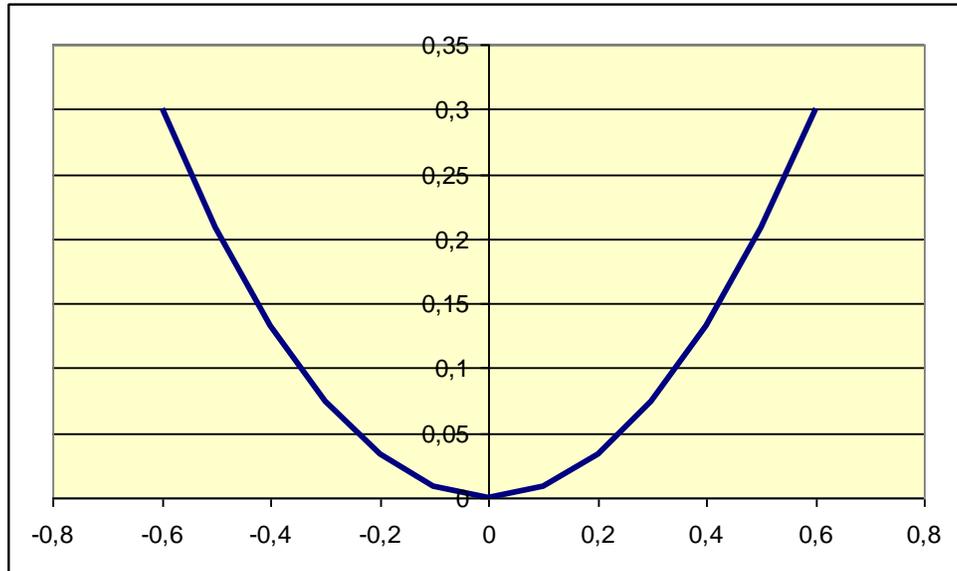
$$x^2 = 1.20 \cdot y$$

Para la construcción de la celda parabólica en acero inoxidable se tiene que hacer un molde de la parábola, para lo cual de la ecuación obtenida se sacan los puntos (x,y) de la misma; esto se muestra en la Tabla 4.4 y Figura 4.6

**Tabla 4.4 Puntos de la parábola.**

<b>x (m)</b>	<b>y (m)</b>
-0,6	0,3
-0,5	0,20833333
-0,4	0,13333333
-0,3	0,075
-0,2	0,03333333
-0,1	0,00833333
0	0
0,1	0,00833333
0,2	0,03333333
0,3	0,075
0,4	0,13333333
0,5	0,20833333
0,6	0,3

En la figura 4.6 se muestra la parábola del concentrador cilíndrico parabólico.



**Figura 4.6 Parábola del CCP.**

#### **4.3.2 CALOR ÚTIL CONCENTRADO POR UNA CELDA PARABÓLICA**

El calor útil de cada concentrador esta dado por el balance de energía de la ecuación 2.22.

$$Q_u = Q_{ef} - Q_{pr}$$

Donde:

$Q_{ef}$  es el calor radiante efectivo que llega al fluido de trabajo y esta dado por la ecuación 2.23.

$$Q_{ef} = \eta_o \cdot A_a \cdot H_{dir}$$

Donde  $\eta_o$  es la eficiencia óptica y esta dado por la ecuación 2.24.

$$\eta_o = \rho_r \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot F \cdot f_t$$

donde :

$\rho_r := 0.75$                       Reflejancia del espejo

$\tau := 0.9$                         Transmitancia de la envolvente del absorbedor (cubierta)

$\alpha := 0.9$                         Absortancia del absorbedor

$\gamma := 0.9$  Factor de forma que depende de los errores en la pendiente del espejo y de la dispersión que sufre la radiación solar directa incidente.

$F := 0.9$  Error en el seguimiento

$f_t := 0.9$  Fracción de la apertura no sombreada por soportes y Absorbedor.

Todos estos parámetros son adimensionales y sus valores típicos son del orden de 0.9 a 0.95, con excepción de  $\rho_r$  que es del orden de 0.75 a 0.85.

La eficiencia óptica será:

$$\eta_o := \rho_r \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot F \cdot f_t$$

$$\eta_o = 0.443$$

Debido a la disponibilidad de construcción de la celda parabólica en acero inoxidable en el mercado nacional y por diseño se puede imponer la longitud de la celda siendo esta de 2.0 m., para obtener el área de apertura  $A_a$ , que está dado por la ecuación 2.25.

$$A_a := B \cdot L$$

Donde:

$$L := 2.0 \quad (\text{m}) \quad \text{Longitud de la celda parabólica.}$$

El área de apertura será:

$B := 1.20$  (m) Apertura de la boca.

$$A_a = 2.4 \quad (\text{m}^2)$$

Finalmente para obtener el calor radiante efectivo que llega al fluido se requiere de la radiación solar directa que se obtuvo anteriormente.

$$H_{dir} := 2168.703 \quad \frac{W}{m^2}$$

$$Q_{ef} := \eta_o \cdot A_a \cdot H_{dir}$$

$$Q_{ef} = 2.305 \times 10^3 \quad W \cdot h$$

Para completar el balance de energía se debe determinar el calor perdido por radiación  $Q_{pr}$ , que esta dado por la ecuación 2.26.

$$Q_{pr} = A_t \cdot \sigma \cdot F_{1-2} \cdot (T_t^4 - T_c^4)$$

Donde:

El área por metro lineal del tubo del absorbedor esta dada por la ecuación 2.27.

$$A_t = \pi \cdot D_t \cdot L$$

Por la disponibilidad en el mercado nacional y por diseño, se considera que el diámetro del tubo absorbedor será de 1" (0.05m).

$$D_t := 0.05 \quad \text{m}$$

Por lo que el área transversal del tubo absorbedor es:

$$A_t := \pi \cdot D_t \cdot L$$

$$A_t = 0.314 \quad \text{m}^2$$

El factor de orientación para dos cilindros concéntricos  $F_{1-2}$  esta dado por la ecuación 2.28.

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_t} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \cdot \left( \frac{D_t}{D_c} \right)}$$

Donde:

$$\epsilon_t := 0.91 \quad \text{Emitancia del tubo absorbedor}$$

$$\epsilon_c := 0.94 \quad \text{Emitancia de la cubierta.}$$

Para evitar la conducción entre el tubo absorbedor y la cubierta, la distancia mínima entre los mismos debe ser de 0.015m, por lo que el diámetro de la cubierta debe ser de 0.075m.

$$D_c := 0.075 \quad \text{m}$$

$$F_{12} := \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_t} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \cdot \left( \frac{D_t}{D_c} \right)}$$

$$F_{12} = 0.876$$

El coeficiente de Stefan Boltzman  $\sigma$  es:

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

La temperatura del tubo es 120 °C y de la cubierta es 70 °C.

$$T_t := 120 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_c := 70 \quad ^\circ\text{C}$$

$$Q_{pr} := A_t \cdot \sigma \cdot F_{12} \cdot (T_t^4 - T_c^4)$$

$$Q_{pr} = 2.861 \quad \text{W}$$

$$Q_{pr} = 2.861 * 12h$$

$$Q_{pr} = 34.32 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

El calor útil que concentra cada celda parabólica es:

$$Q_u := Q_{ef} - Q_{pr}$$

$$Q_u = 2270.68 \quad W \cdot h$$

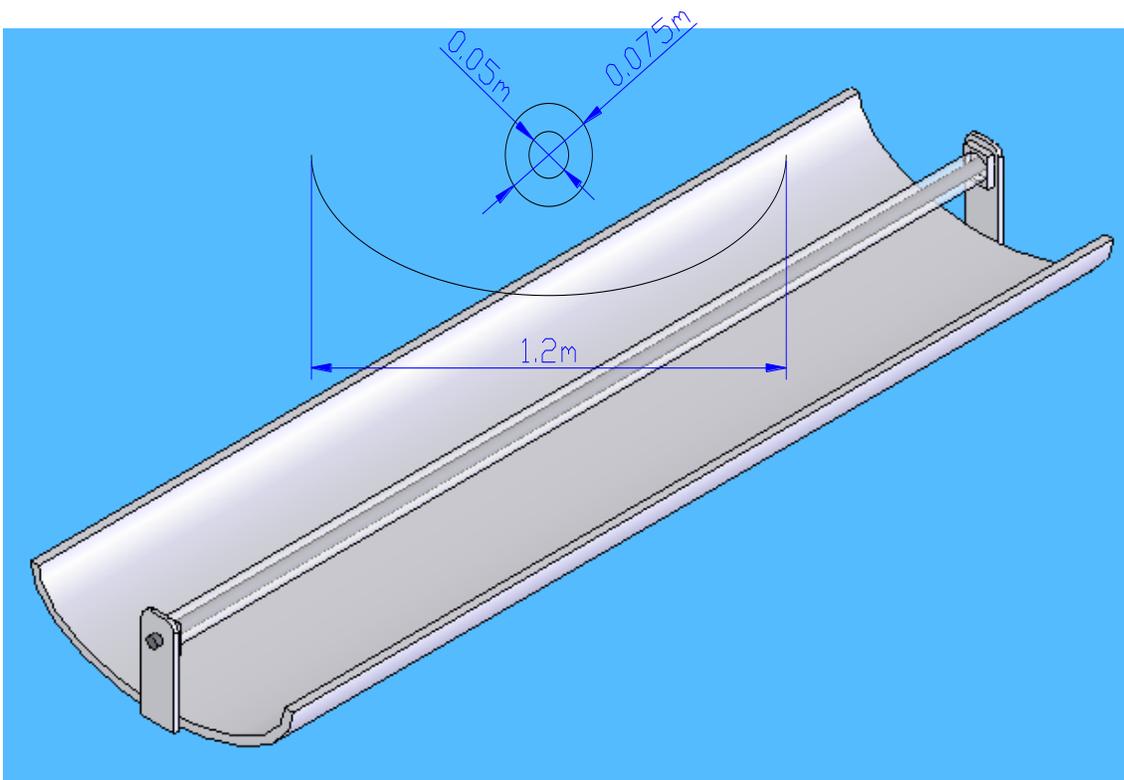
Para obtener el número de concentradores que requiere el diseño simplemente se divide el calor requerido para el almacenamiento térmico para el calor útil que concentra cada celda parabólica.

$$Q_{nat} = 15438 \quad W \cdot h$$

$$NC := \frac{Q_{nat}}{Q_u}$$

$$NC = 6.2$$

Entonces se puede concluir que se necesitan 6 celdas parabólicas de 2m de longitud y con una apertura de boca de 1.20m, que serán instaladas en paralelo de tres en tres logrando optimizar el espacio de longitud, en la figura 4.7 se muestra las dimensiones del concentrador cilíndrico parabólico.



### Figura 4.7 Dimensiones del CCP.

#### 4.3.3 SEGUIMIENTO DE LA TRAYECTORIA DEL SOL.

Dado que la trayectoria del sol no es la misma y varía para las diferentes horas del día, se debe calcular el ángulo de incidencia de la radiación solar directa, que se expresa mediante la ecuación 2.10.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{Sen}(\delta) * \text{Sen}(\phi) * \text{Cos}(\beta) - \text{Sen}(\delta) * \text{Cos}(\phi) * \text{Sen}(\beta) * \text{Cos}(\gamma) + \text{Cos}(\delta) * \text{Cos}(\phi) * \text{Cos}(\beta) \\ & * \text{Cos}(\omega) + \text{Cos}(\delta) * \text{Sen}(\phi) * \text{Sen}(\beta) * \text{Cos}(\gamma) * \text{Cos}(\omega) + \text{Cos}(\delta) * \text{Sen}(\beta) * \text{Sen}(\gamma) * \text{Sen}(\omega) \end{aligned}$$

Donde:

$\beta := 0$       Ángulo de inclinación de la superficie.

$\gamma := -75^\circ$       Ángulo de azimut en el que se encuentra el Ecuador

Si se varia el ángulo horario para cada hora como se muestra en la Tabla 4.1, se obtendrá el ángulo de incidencia de la radiación directa para cada hora.

Por ejemplo, para las 13 horas será:

$$\omega := -15^\circ$$

Debido a que el ángulo de inclinación de la superficie es cero, entonces:

$$\text{sen}(\beta) = 0$$

Por lo tanto la ecuación 2.10 se reduce a la siguiente expresión:

$$t := \sin\left(\delta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \sin\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \cos\left(\beta \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \cos\left(\delta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \cos\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \cos\left(\beta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$t = 0.94$$

Siendo  $\text{Cos}(\theta) = t$

De donde:

$$\theta := \text{acos}(t) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 20.018^\circ$$

Al ángulo que se obtiene a las 6 horas, se lo considera como posición inicial del concentrador cilíndrico parabólico.

En la Tabla 4.5 se muestran los ángulos de incidencia de la radiación solar directa desde las 6 horas hasta las 18 horas y el ángulo de variación para el seguimiento en cada una de las horas.

**Tabla 4.5 Ángulos de incidencia de la radiación solar directa y de variación para el seguimiento.**

<b>HORA</b>	<b>ANGULO DE INCIDENCIA (<math>\theta^\circ</math>)</b>	<b>ANGULO DE VARIACIÓN (<math>\alpha^\circ</math>)</b>
6 – 7	90.064	0
7 – 8	75.466	14.598
8 – 9	60.933	29.131
9 – 10	46.566	43.498
10 – 11	32.617	57.94
11 – 12	20.018	70.56
12 – 13	13.402	76.662
13 – 14	20.018	110.082
14 – 15	32.617	122.681
15 – 16	46.566	136.63
16 – 17	60.933	150.997
17 – 18	75.466	165.530

## **CAPITULO 5**

### **CONSTRUCCION DEL MODELO**

Para realizar la construcción del modelo, su diseño debe tener relación con el diseño real. Al realizar los cálculos del diseño real, resultó que se necesitan seis celdas parabólicas, las cuales iban a ser colocadas de forma paralela; pero para el caso de la construcción del modelo se toman tres concentradores ya que serán instalados en serie.

Los concentradores que se utilizan en la construcción del modelo, tienen las siguientes dimensiones:

$$B = 0.6 \text{ m}$$

$$L = 1 \text{ m}$$

El área de apertura es:

$$Aa = B * L$$

$$Aa = 0,6 * 1$$

$$Aa = 0,6 \text{ m}^2$$

Para obtener el calor útil de los concentradores, se debe considerar el calor efectivo y las pérdidas por radiación.

$$Qu = Qef - Qpr$$

$$Qu = (Aa * \eta_o * Hdir) - (At * \sigma * F_{1-2} * Tt^4)$$

$$Qu = (0.6 * 1 * 0.443 * 2168,703) - (\pi * 0.0508 * 1 * 5.67E^{-8} * 1 * (120^4 - 70^4))$$

$$Qu = 576,38W * h$$

Si se desprecia el calor perdido por las paredes del almacenamiento térmico ( $Q_{pat}$ ), el calor del equipo será igual al calor útil de los concentradores.

La masa de piedras será igual a:

$$mp = \frac{Qe}{cpp * (T2 - T1)}$$

$$mp = \frac{576,38w * h}{0,812 \frac{KJ}{kg * C} * \frac{1000}{3600} * (70 - 16)C}$$

$$mp = 47,02kg$$

El dimensionamiento de la caja para el almacenamiento térmico considera una masa de piedras de **50Kg**; para lo que se requiere del volumen de las piedras y luego el lado del volumen.

$$Vp = \frac{mp}{\rho_p}$$

$$Vp = \frac{50Kg}{2640 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$Vp = 0,005m^3$$

El lado del cubo es igual a:

$$l = \sqrt[3]{Vp}$$

$$l = \sqrt[3]{0,005}$$

$$l = 0,17m$$

Este valor puede ser aproximado a:

$$l = 0,25 \text{ m}$$

El lado total de la caja del lecho de piedras será igual a:

$$l_t = 2 \cdot l + \text{sep}$$

$$l_t = 2 \cdot 0,25 + 0,10$$

$$l_t = 0,60 \text{ m}$$

El lado de la caja del almacenamiento térmico es:

$$h = l_t + 2 \cdot \text{dis}$$

$$h = 0,60 + 2 \cdot 0,10$$

$$h = 0,80 \text{ m}$$

Se puede decir que la altura y el ancho de la caja del almacenamiento térmico es de 0,80 m y el largo de la misma de 0,45 m.

En la tabla 5.1 se indican las partes del modelo que se construirán

**Tabla 5.1 Partes del modelo.**

<b>N.-</b>	<b>CANT.</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>APLICACIÓN</b>
1	3	Celda parabólica.	Concentración de energía solar.
2	1	Caja del almacenamiento térmico	Almacenamiento de energía.
3	1	Caja del lecho de piedras.	Sostension de piedras.
4	1	Ducto de entrada.	Circulación de aire.
5	1	Ducto de entrada al almacenamiento térmico.	Circulación de aire.

6	1	Ducto de salida al almacenamiento térmico.	Circulación de aire.
7	1	Ventilador de ingreso de aire.	Ingreso de aire
8	1	Ventilador de salida de aire.	Salida de aire
9	1	Tubo absorbedor.	Absorber la energía solar.
10	1	Soporte de celda y ventilador.	Soporte.
11	1	Soporte de celda.	Soporte.
12	1	Soporte de la caja de almacenamiento térmico.	Soporte.
13	2	Chumaceras.	Sujeción del tubo absorbedor.
14	2	Seguros.	Seguimiento de la trayectoria del sol.
15	12	Prisioneros	Sujeción de celdas parabólicas.
16	4	Pernos	Sujeción de chumaceras.
17	4	Tornillos	Sujeción de ventilador de ingreso de aire

La fabricación del modelo, se basa en los planos de construcción que se indican en el ANEXO C. En la tabla 5.2 se indican los códigos de los formatos para cada uno de los planos de construcción.

**Tabla 5.2 Códigos de las partes del modelo que se construyen.**

<b>N.-</b>	<b>PARTE</b>	<b>CODIGO DE FORMATO</b>	<b>CODIGO DE PROCESO</b>
1	Celda parabólica.	ESPEINTER01F-01	Inter-1
2	Caja de almacenamiento térmico.	ESPEINTER01F-02	Inter-2
3	Caja de lecho de piedras.	ESPEINTER01F-03	Inter-3
4	Ducto de entrada.	ESPEINTER01F-04	Inter-4
5	Ducto de entrada al almacenamiento	ESPEINTER01F-05	Inter-5

	térmico.		
6	Ducto de salida del almacenamiento térmico.	ESPEINTER01F-06	Inter-6
7	Tubo absorbedor.	ESPEINTER01F-07	Inter-7
8	Soporte de celda y ventilador.	ESPEINTER01F-08	Inter-8
9	Soporte de celda.	ESPEINTER01F-09	Inter-9
10	Soporte de caja de almacenamiento térmico.	ESPEINTER01F-10	Inter-10
11	Seguro.	ESPEINTER01F-11	Inter-11

## 5.1 HOJAS Y DIAGRAMAS DE PROCESOS

El proceso de construcción se realizó con base a los planos y de acorde con las hojas de procesos incluidas en el anexo C, y utilizando las materias primas indicadas en la tabla de materiales Tabla 5.3, mediante los procesos específicos para cada una de las partes que se indican en la Tabla 5.1

**Tabla 5.3 Materia prima para la construcción del modelo.**

<b>CANT.</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>APLICACIÓN</b>
100	Unidades	Remaches 1/8 * 1/2	Caja del almacenamiento térmico.
100	Unidades	Remaches 3/16 * 1/2	Celdas parabólicas.
1	Metros	Plancha de acero inoxidable brillante 1mm.	Celdas parabólicas.
2	Metros	Plancha de acero galvanizado 1mm.	Caja del almacenamiento térmico.
3	Metros	Tubo cuadrado 3/4 * 1.5mm	Caja del lecho de piedras.

3	Metros	Tubo cuadrado 1 * 1.5mm	Estructura de la caja del almacenamiento térmico.
2	Metros	Tubo cuadrado 1 1/4 * 1.5mm.	Soportes de las celdas parabólicas.
1	Metros	Tubo redondo 2 * 2mm.	Tubo absorbedor.
5.49	Kg.	Tubo perforado 75 * 50mm.	Sujeción de las celdas parabólicas.
2	Metros	Angulo 25 * 3mm.	Soporte de la caja del almacenamiento térmico.
2	Metros	Angulo 20 * 3mm.	Estructura de las celdas parabólicas.
1	Metros	Tee 3/4 * 3mm.	Estructura de las celdas parabólicas.
3	Kg.	Electrodos 6011 de 1/8.	Soldadura.
2	Unidades	Chumacera de piso 2".	Soporte del tubo absorbedor.
2	Metros	Malla soldada galvanizada 2" * 1".	Caja del lecho de piedras.
1	Unidad.	Venterol eléctrico de 2".	Ventilador para circulación de aire.
1	Unidad.	Extractor Cata B10 plus.	Extracción de aire
4	Unidades	Pernos 5/8 * 2".	Sujeción de chumaceras.
4	Unidades	Tuercas 5/8.	Sujeción de chumaceras.
8	Unidades	Arandelas planas 5/8.	Sujeción de chumaceras.
4	Unidades	Tornillos 4mm * 15mm.	Sujeción del venterol.
12	Unidades	Prisioneros 5/16 * 1/2.	Sujeción de las celdas parabólicas.
3/4	Galón	Pintura anticorrosiva industrial (negro).	Pintura de la estructura.
1/4	Galón	Pintura anticorrosiva industrial (gris).	Pintura del la caja de almacenamiento térmico.

### 5.1.1 ELABORACIÓN DE DIAGRAMAS DE PROCESOS.

Los diagramas de proceso están dados en concordancia con la simbología estándar para el planeamiento y control de una línea de producción y se indican en el anexo B, es decir utilizando:

-  Operación
-  Inspección
-  Demora

El código de proceso para cada parte del modelo se encuentran especificados en la Tabla 5.2

### **5.1.2 ELABORACIÓN DE HOJAS DE PROCESOS.**

Las hojas de proceso o también denominadas hojas o planos de construcción fueron elaborados de acuerdo al código de dibujo técnico - mecánico INEN con disposición ISO E, y se presentan en el anexo C.

Las partes que se construirán con su código de formato se indican en la Tabla 5.2,.

## **5.2 GUIA DE ENSAMBLE**

Para la guía de ensamble consideran las partes que se indican en la Tabla 5.2, el proceso de ensamble se da tal como se ilustra en el diagrama de la figura 5.1, de acuerdo con las especificaciones propias de cada proceso.

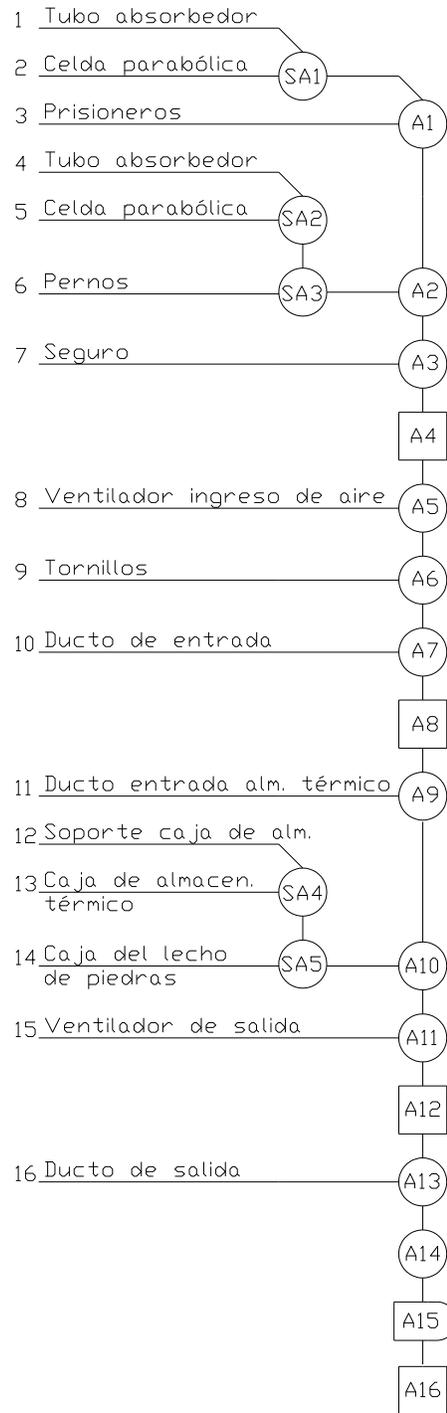
### **5.2.1 ENSAMBLE**

Conforme con el esquema de ensamble que se indica en el anexo D y siguiendo el diagrama de la figura 5.1, el proceso se detalla de la siguiente manera:

- SA1.- Montar las celdas parabólicas al tubo absorbedor;
- A1.- Sujetar las celdas parabólicas al tubo absorbedor, mediante prisioneros;
- SA2.- Montar las chumaceras a los soportes de celda y ventilador;
- SA3.- Sujetar las chumaceras a los soportes de celda y ventilador, mediante pernos;
- A2.- Montar el conjunto resultado de A1 con SA3;
- A3.- Montar los seguros al soporte y tubo absorbedor;
- A4.- Verificar la rotación del conjunto A2;
- A5.- Montar el ventilador al soporte;
- A6.- Sujetar el ventilador al soporte, mediante los tornillos;

- A7.- Conectar el ventilador al ducto de entrada;
- A8.- Verificar el funcionamiento del ventilador;
- A9.- Conectar el ducto de entrada al almacenamiento térmico con el resultado de A2;
- SA4.- Montar la caja del almacenamiento térmico al soporte;
- SA5.- Montar la caja del lecho de piedras dentro de la caja del almacenamiento térmico;
- A10.- Conectar el resultado de SA5 con A9;
- A11.- Instalar el ventilador de salida a la caja del almacenamiento térmico;
- A12.- Verificar el funcionamiento del ventilador de salida;
- A13.- Conectar el ducto de salida al ventilador;
- A14.- Pintar el equipo;
- A15.- Esperar el secado de la pintura;
- A16.- Inspección final

# DIAGRAMA DE ENSAMBLE



**Figura 5.1: Diagrama de ensamblaje del modelo**

## 5.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO

### 5.3.1 PROCEDIMIENTO

Las pruebas de funcionamiento del modelo se realizaron desde el día Lunes 25 de septiembre hasta el día Viernes 29 de septiembre del 2006; los datos se tomaron a partir de las 8:00 horas en adelante y se lo realizo en cada hora, donde se consideran los siguientes parámetros:

H: Hora.

Hdir: Radiación solar directa.

Tic: Temperatura de ingreso a los concentradores o temperatura ambiente.

Tsc: Temperatura de salida de los concentradores.

Tiat: Temperatura de ingreso al almacenamiento térmico.

Tmiat: Temperatura máxima de ingreso al almacenamiento térmico.

Tsat: Temperatura de salida del almacenamiento térmico.

Tp: Temperatura de las piedras.

Tt: Temperatura del tubo absorbedor.

mp: Masa de piedras = 50Kg

Qairei: Caudal de aire de ingreso = 29,18 m<sup>3</sup>/h.

Qaires: Caudal de aire de salida = 84,82 m<sup>3</sup>/h.

Para la medición de estos parámetros se utilizó el siguiente equipo:

- Termómetro digital.
- Termómetro de mercurio.
- Termocuplas de superficie y aire.
- Medidor de velocidad de aire.

La instalación del equipo se hizo colocando un termómetro de mercurio para la medición de la temperatura de ingreso a los concentradores o temperatura ambiente, las termocuplas de aire se colocaron en la salida de los concentradores y del almacenamiento térmico, una termocupla de superficie en el lecho de piedras y otra en el tubo absorbedor. Estas termocuplas se conectan a un termómetro digital; del cual se obtuvieron los siguientes datos, que se indican en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4 Datos de las pruebas de funcionamiento del modelo.**

**LUNES, 25 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Hdir (W/m<sup>2</sup>*h)</b>	<b>Tic (°C)</b>	<b>Tt (°C)</b>	<b>Tsc=Tiat (°C)</b>	<b>Tsat (°C)</b>	<b>Tip (°C)</b>
8:00 - 9:00	161,97	12	75,4	29,8	23,1	12,3
9:00 - 10:00	245,14	16	79,6	42,6	28,4	19,4
10:00 - 11:00	315,36	20	85,3	52,3	30,9	24,8
11:00 - 12:00	362,34	22	83,1	56,2	32,1	28,6
12:00 - 13:00	378,87	24	88,5	59,1	33,9	31,2
13:00 - 14:00	362,64	24	80,2	47,4	34,8	33,6
14:00	315,36	24	76,8	37,8	34,5	34

**MARTES, 26 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Hdir (W/m<sup>2</sup>*h)</b>	<b>Tic (°C)</b>	<b>Tt (°C)</b>	<b>Tsc=Tiat (°C)</b>	<b>Tsat (°C)</b>	<b>Tip (°C)</b>
8:00 - 9:00	164,52	11	74,7	29,3	22	12,1
9:00 - 10:00	248,7	15	78,3	41,4	29	18,3
10:00 - 11:00	319,67	19	85,1	51,6	31,7	24,1
11:00 - 12:00	367,12	21	84,4	54,9	33,6	29,2
12:00 - 13:00	383,81	23	89,8	57,1	36,4	31,4
13:00 - 14:00	367,12	24	82,3	44,3	35,7	33,2
14:00	319,67	25	76,5	38,7	34,9	33,5

**Tabla 5.4 Datos de las pruebas de funcionamiento del modelo (Continuación)**

**MIERCOLES, 27 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Hdir (W/m<sup>2</sup>*h)</b>	<b>Tic (°C)</b>	<b>Tt (°C)</b>	<b>Tsc=Tiat (°C)</b>	<b>Tsat (°C)</b>	<b>Tip (°C)</b>
8:00 - 9:00	158,14	12	78,1	29,1	24,6	12,8
9:00 - 10:00	239,63	16	81,2	41,6	28,5	18,7
10:00 - 11:00	308,52	20	87,5	51,7	32,9	23,9
11:00 - 12:00	354,66	22	83,4	53,8	34	27,8
12:00 - 13:00	370,9	24	91,1	56,9	36,2	30,6
13:00 - 14:00	354,66	24	83,5	49,6	34,5	33,4
14:00	308,52	23	74,2	40,7	34,7	34,1

**JUEVES, 28 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Hdir (W/m<sup>2</sup>*h)</b>	<b>Tic (°C)</b>	<b>Tt (°C)</b>	<b>Tsc=Tiat (°C)</b>	<b>Tsat (°C)</b>	<b>Tip (°C)</b>
8:00 - 9:00	163,63	12	76,2	30,1	21,2	11,8
9:00 - 10:00	247,35	14	83,1	40,7	26,4	18,2
10:00 - 11:00	317,93	19	86,9	53,2	33	23,9
11:00 - 12:00	365,12	22	84,2	57,1	35,6	30,8
12:00 - 13:00	381,72	24	89,9	58,6	37,5	33,5
13:00 - 14:00	365,12	25	83,1	46,8	35,7	35,3
14:00	317,93	25	73,6	36,8	34,2	35,8

**Tabla 5.4 Datos de las pruebas de funcionamiento del modelo (Continuación)**

**VIERNES, 29 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Hdir (W/m<sup>2</sup>*h)</b>	<b>Tic (°C)</b>	<b>Tt (°C)</b>	<b>Tsc=Tiat (°C)</b>	<b>Tsat (°C)</b>	<b>Tip (°C)</b>
8:00 - 9:00	160,23	13	77,4	31,1	22,7	11,9
9:00 - 10:00	242,49	16	80,9	42,1	26,6	18,2
10:00 - 11:00	311,94	20	87,3	53	33,6	24,6
11:00 - 12:00	358,4	24	85,3	58,5	36,6	31,6
12:00 - 13:00	374,75	24	93,4	54,1	40,3	35,1
13:00 - 14:00	358,4	25	86,1	44,7	35	37,1
14:00	311,94	25	78,9	39,5	35,3	37,6

En la tabla 5.5 se indica los datos del tiempo de descarga de la energía almacenada y las temperaturas registradas en el lecho de piedras.

**Tabla 5.5 Tiempo de descarga de la energía.**

**Jueves, 28 de Septiembre del 2006.**

<b>HORA</b>	<b>Tip (°C)</b>
15:00 - 15:30	32,6
15:30 - 16:00	26,2
16:00 - 16:30	19,4
16:30 - 17:00	10,8

**Viernes, 29 de Septiembre del 2006.**

<b>HORA</b>	<b>Tip (°C)</b>
15:00 - 15:30	34,1
15:30 - 16:00	27,3
16:00 - 16:30	20,5
16:30 - 17:00	11,6

## 5.3.2 EFICACIA Y EFICIENCIA DEL MODELO

### 5.3.2.1 Eficacia

Se calculan dos eficacias en el modelo: del concentrador solar y del almacenamiento térmico.

- La eficacia de concentrador, considera la energía solar que concentra las celdas parabólicas y la energía que gana el aire.
- La eficacia del almacenamiento térmico es la relación entre la energía almacenada por el lecho de piedras y la energía que obtiene el aire de los concentradores.

### 5.3.2.2 Eficiencia

La eficiencia del modelo es la relación entre la energía almacenada por el lecho de piedras y la energía que concentra las celdas parabólicas.

### 5.3.2.3 Ejemplo de cálculos.

El cálculo de las eficacias y de la eficiencia se realiza para cada uno de los días que se hicieron las pruebas de funcionamiento, por la tanto se toma de ejemplo el día Lunes 25 de septiembre del 2006 de 12:00 horas a 13:00 horas.

La eficacia del concentrador está dada por la ecuación:

$$\varepsilon_c = \frac{Q_{aire}}{Q_c} * 100\%$$

Donde:

$Q_c$ : calor que concentran las celdas parabólicas.

$Q_{aire}$ : calor que gana el aire.

Estos parámetros se encuentran definidos en el diseño del proyecto (Capítulo 4).

Entonces el calor que concentran las celdas parabólicas es la diferencia entre el calor efectivo  $Q_{ef}$  y el calor perdido por radiación  $Q_{pr}$  y esta dado por:

$$Q_c = Q_{ef} - Q_{pr}$$

$$Q_c = (A_a * \eta_o * H_{dir}) - (A_t * \sigma * F_{1-2} * T_t^4)$$

$$Q_c = (0.6 * 3 * 0.443 * 378,87) - (\pi * 0.0508 * 3 * 5.67E^{-8} * 1 * 88,5^4)$$

$$Q_c = 300,30W * h$$

La energía que obtiene el aire es:

$$Q_{aire} = m_a * c_{pa} * (T_{sc} - T_{ic})$$

Donde:

$m_a$ : masa de aire.

$c_{pa}$ : calor específico del aire = 1.005 KJ/Kg\*C.

Para obtener la masa del aire, se considera el caudal de aire de ingreso, entonces:

$$m_a = \delta a * V_a = \delta a * Q_{airei} * h$$

La densidad del aire se obtiene de<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> [http://soko.com.ar/Fisica/Gases\\_ideales.htm](http://soko.com.ar/Fisica/Gases_ideales.htm)

$$\delta a = \frac{P * Mr}{R * T}$$

Donde:

P: Presión atmosférica local (Sangolqui) = 546mmHg = 0,71 at.

Mr: Peso molecular del aire = 28,9 gr/mol.

R: constante ideal de los gases = 0,082 at\*l/mol\*K.

T: Temperatura ambiente promedio.

$$\delta a = \frac{0,71 * 28,9}{0,082 * (20 + 273)}$$

$$\delta a = 0,85 \frac{gr}{l} = 0,85 \frac{Kg}{m^3}$$

La masa de aire es:

$$ma = 0,85 \frac{Kg}{m^3} * 29,18 \frac{m^3}{h}$$

$$ma = 24,8 \frac{Kg}{h}$$

Entonces la energía que obtiene el aire es:

$$Q_{aire} = ma * c_{pa} * (T_{sc} - T_{ic})$$

$$Q_{aire} = 24,8 \frac{Kg}{h} * 1,005 \frac{KJ}{Kg * C} * \frac{1000}{3600} * (59,1 - 24)C$$

$$Q_{aire} = 242,89W * h$$

La eficacia del concentrador es:

$$\varepsilon_c = \frac{Q_{aire}}{Q_c} * 100\%$$

$$\varepsilon_c = \frac{242,89}{300,30} * 100\%$$

$$\varepsilon_c = 80,88\%$$

La eficacia del almacenamiento térmico esta dada por la ecuación:

$$\varepsilon_a = \frac{Q_a}{Q_{aire}} * 100\%$$

Donde:

Qa: calor que almacena el lecho de piedras.

La energía que almacena el lecho de piedras es:

$$Q_a = m_p * c_{pp} * (T_{pf} - T_{pi})$$

$$Q_a = 50kg * 0.812 \frac{KJ}{Kg * C} * \frac{1000}{3600} (33,6 - 31,2)C$$

$$Q_a = 27,2W * h$$

$$\varepsilon_a = \frac{Q_a}{Q_{aire}} * 100\%$$

$$\varepsilon_a = \frac{27,2}{242,89} * 100\%$$

$$\varepsilon_a = 11,2\%$$

La eficiencia del modelo está dada por la ecuación:

$$\eta = \frac{Q_a}{Q_c} * 100\%$$

Obteniendo la energía concentrada en cada una de las horas para los días en que se realizaron las pruebas, se puede obtener la eficiencia diaria del modelo; por ejemplo para el día **Lunes** la energía total concentrada es **1448,10 w\*h**, y la energía almacenada en el lecho de piedras **245,9 w\*h**.

$$\eta = \frac{245,9}{1448,10} * 100\%$$

$$\eta = 16,98\%$$

En la tabla 5.6 se indican las energías calculadas para todos los días en que se realizaron las pruebas de funcionamiento del modelo, estas energías son:

Qef: Calor efectivo.

Qpr: Calor perdido por radiación.

Qc: Calor que concentran las celdas parabólicas.

Qaire: Calor que gana el aire.

Qa: Calor almacenado en el lecho de piedras.

**Tabla 5.6 Energías calculadas en el modelo.**

**Lunes, 25 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Qef (w*h)</b>	<b>Qpr (w*h)</b>	<b>Qc (w*h)</b>	<b>Qaire (w*h)</b>	<b>Qa (w*h)</b>
8:00 - 9:00	129,09	0,88	128,21	123,18	80,45
9:00 - 10:00	195,38	1,09	194,29	184,07	61,19
10:00 - 11:00	251,34	1,43	249,91	223,52	43,06
11:00 - 12:00	288,78	1,29	287,49	236,66	29,46
12:00 - 13:00	301,96	1,66	300,30	242,89	27,20
13:00 - 14:00	289,02	1,12	287,90	161,93	4,53
	<b>1455,58</b>	<b>7,47</b>	<b>1448,10</b>	<b>1172,25</b>	<b>245,9</b>

**Martes, 26 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Qef (w*h)</b>	<b>Qpr (w*h)</b>	<b>Qc (w*h)</b>	<b>Qaire (w*h)</b>	<b>Qa (w*h)</b>
8:00 - 9:00	131,12	0,84	130,28	126,64	70,26
9:00 - 10:00	198,21	1,02	197,20	182,69	65,72
10:00 - 11:00	254,78	1,42	253,36	225,59	57,79
11:00 - 12:00	292,59	1,38	291,22	234,59	24,93
12:00 - 13:00	305,90	1,76	304,13	235,97	20,40
13:00 - 14:00	292,59	1,24	291,35	140,48	3,40
	<b>1475,20</b>	<b>7,66</b>	<b>1467,53</b>	<b>1145,95</b>	<b>242,5</b>

**Miércoles, 27 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Qef (w*h)</b>	<b>Qpr (w*h)</b>	<b>Qc (w*h)</b>	<b>Qaire (w*h)</b>	<b>Qa (w*h)</b>
8:00 - 9:00	126,04	1,01	125,03	118,33	66,86
9:00 - 10:00	190,99	1,18	189,81	177,15	58,92
10:00 - 11:00	245,89	1,59	244,30	219,36	44,19
11:00 - 12:00	282,66	1,31	281,35	220,06	31,73
12:00 - 13:00	295,61	1,87	293,74	227,67	31,73
13:00 - 14:00	282,66	1,32	281,35	177,15	7,93
	<b>1423,85</b>	<b>8,27</b>	<b>1415,58</b>	<b>1139,72</b>	<b>241,4</b>

**Tabla 5.6 Energías calculadas en el modelo (Continuación).**

**Jueves, 28 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Qef (w*h)</b>	<b>Qpr (w*h)</b>	<b>Qc (w*h)</b>	<b>Qaire (w*h)</b>	<b>Qa (w*h)</b>
8:00 - 9:00	130,41	0,91	129,50	125,25	72,52
9:00 - 10:00	197,14	1,29	195,85	184,76	64,59
10:00 - 11:00	253,39	1,55	251,84	236,66	78,19
11:00 - 12:00	291,00	1,36	289,64	242,89	30,60
12:00 - 13:00	304,23	1,77	302,46	239,43	20,40
13:00 - 14:00	291,00	1,29	289,71	150,86	5,67
	<b>1467,17</b>	<b>8,18</b>	<b>1459,00</b>	<b>1179,86</b>	<b>272,0</b>

**Viernes, 29 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>Qef (w*h)</b>	<b>Qpr (w*h)</b>	<b>Qc (w*h)</b>	<b>Qaire (w*h)</b>	<b>Qa (w*h)</b>
8:00 - 9:00	127,70	0,97	126,73	125,25	71,39
9:00 - 10:00	193,26	1,16	192,10	180,61	72,52
10:00 - 11:00	248,62	1,57	247,04	228,36	79,32
11:00 - 12:00	285,64	1,43	284,21	238,74	39,66
12:00 - 13:00	298,68	2,06	296,61	208,29	22,66
13:00 - 14:00	285,64	1,49	284,16	136,32	5,67
	<b>1439,55</b>	<b>8,69</b>	<b>1430,86</b>	<b>1117,58</b>	<b>291,2</b>

En la tabla 5,7 se indican las eficacias del modelo para cada hora, de todos los días en que se realizaron las pruebas de funcionamiento.

**Tabla 5.7 Eficacias del modelo.**

**Lunes, 25 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>εc</b> (%)	<b>εa</b> (%)
8:00 - 9:00	96,07	65,32
9:00 - 10:00	94,74	33,24
10:00 - 11:00	89,44	19,27
11:00 - 12:00	82,32	12,45
12:00 - 13:00	80,88	11,20
13:00 - 14:00	56,24	2,80

**Martes, 26 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>εc</b> (%)	<b>εa</b> (%)
8:00 - 9:00	97,20	55,48
9:00 - 10:00	92,64	35,98
10:00 - 11:00	89,04	25,62
11:00 - 12:00	80,55	10,63
12:00 - 13:00	77,59	8,64
13:00 - 14:00	48,22	2,42

**Miércoles, 27 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b>εc</b> (%)	<b>εa</b> (%)
8:00 - 9:00	94,64	56,50
9:00 - 10:00	93,33	33,26
10:00 - 11:00	89,79	20,15
11:00 - 12:00	78,21	14,42
12:00 - 13:00	77,51	13,94
13:00 - 14:00	62,97	4,48

**Tabla 5.7 Eficacias del modelo (Continuación).**

**Jueves, 28 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b><math>\epsilon_c</math></b> (%)	<b><math>\epsilon_a</math></b> (%)
8:00 - 9:00	96,72	57,90
9:00 - 10:00	94,34	34,96
10:00 - 11:00	93,97	33,04
11:00 - 12:00	83,86	12,60
12:00 - 13:00	79,16	8,52
13:00 - 14:00	52,07	3,76

**Viernes, 29 de Septiembre del 2006.**

<b>H</b>	<b><math>\epsilon_c</math></b> (%)	<b><math>\epsilon_a</math></b> (%)
8:00 - 9:00	98,83	57,00
9:00 - 10:00	94,02	40,15
10:00 - 11:00	92,44	34,74
11:00 - 12:00	84,00	16,61
12:00 - 13:00	70,22	10,88
13:00 - 14:00	47,98	4,16

En la tabla 5.8 se indican las eficiencias para cada uno de los días en que se realizaron las pruebas de funcionamiento del modelo

**Tabla 5.8 Eficiencia del modelo.**

<b>DIA</b>	<b>Qc</b>	<b>Qa</b>	<b>Eficiencia</b>
	<b>(w*h)</b>	<b>(w*h)</b>	<b>(%)</b>
<b>LUNES</b>	1448,1	245,9	16,98
<b>MARTES</b>	1467,53	242,5	16,52
<b>MIERCOLES</b>	1415,58	241,4	17,05
<b>JUEVES</b>	1459	272	18,64
<b>VIERNES</b>	1430,86	291,2	20,35
		<b>PROMEDIO</b>	<b>17,91</b>

Se puede concluir que la eficiencia del modelo es del 18%, entonces con esta eficiencia se puede satisfacer en un 25% la energía que se requiere en un invernadero con este tipo de proyectos de energías alternativas y el otro 75% puede ser mediante los métodos tradicionales (quemadores de gas).

### 5.3.3 DESCARGA DE LA ENERGIA ALMACENADA

Para obtener la energía en la descarga se considera la temperatura almacenada en las piedras hasta que llegue a ser igual a la del ambiente, estas temperaturas fueron tomadas cada treinta minutos debido a que el tiempo de descarga es menor al tiempo de carga y se indican en la tabla 5.5.

Por ejemplo, la energía durante la descarga para el día Jueves 28 de septiembre de 16:00 a 16:30 es:

$$Qd = mp * cpp * (Tpf - Tpi)$$

$$Qd = 50kg * 0.812 \frac{KJ}{Kg * C} * \frac{1000}{3600} (26,2 - 19,4)C$$

$$Qd = 76,69W * h$$

En la tabla 5.9 se indica la energía que se descarga.

**Tabla 5.9 Energía de descarga.**

**Jueves, 28 de septiembre del 2006.**

<b>HORA</b>	<b>Qd (w*h)</b>
15:00 - 15:30	36,09
15:30 - 16:00	72,18
16:00 - 16:30	76,69
16:30 - 17:00	96,99
	<b>281,94</b>

**Viernes, 29 de septiembre del 2006.**

<b>HORA</b>	<b>Qd (w*h)</b>
15:00 - 15:30	39,47
15:30 - 16:00	76,69
16:00 - 16:30	76,69
16:30 - 17:00	100,37
	<b>293,22</b>

## **CAPITULO 6**

### **ASPECTO ECONÓMICO - FINANCIERO**

#### **6.1 COSTOS DIRECTOS**

Los costos directos de fabricación son los de mayor importancia dentro del proyecto, debido a que intervienen directamente en la construcción del mismo y son: la materia prima directa y la mano de obra directa.

### 6.1.1 MATERIA PRIMA DIRECTA

La materia prima directa son todos aquellos elementos físicos que es imprescindible consumir durante el [proceso](#) de elaboración de la máquina, esto quiere decir que son todos los materiales que son transformados en el producto terminado.

La materia prima es el único elemento del costo de fabricación nítidamente variable. En la tabla 6.1 se indica la materia prima y sus precios utilizados para la construcción del modelo

**Tabla 6.1 Materia prima y precios.**

CANT.	UNIDAD	DESCRIPCION	VALOR UNIT.	TOTAL
100	Unidades	Remaches 1/8 * 1/2	0.01	1
100	Unidades	Remaches 3/16 * 1/2	0.01	1
1	Metros	Plancha de acero inoxidable brillante 1mm.	53.91	53,91
2	Metros	Plancha de acero galvanizado 1mm.	30.45	60,9
3	Metros	Tubo cuadrado 3/4 * 1.5mm	5.94	17,82
3	Metros	Tubo cuadrado 1 * 1.5mm	7.00	21.00
2	Metros	Tubo cuadrado 1 1/4 * 1.5mm.	8.95	17,9
1	Metros	Tubo redondo 2 * 2mm.	15.53	15,53
5.49	Kg.	Tubo perforado 75 * 50mm.	3.40	18,67
2	Metros	Angulo 25 * 3mm.	4.28	8,56
2	Metros	Angulo 20 * 3mm.	3.73	7,46
1	Metros	Tee 3/4 * 3mm.	4.09	4,09
3	Kg.	Electrodos 6011 de 1/8.	2.10	6,3
2	Unidades	Chumacera de piso 2".	15.88	31,76

**Tabla 6.1 Materia prima y precios (Continuación)**

2	Metros	Malla soldada galvanizada 2" * 1".	3.55	7,1
1	Unidad.	Venterol eléctrico de 2".	25.45	25,45
1	Unidad.	Extractor Cata B10 plus.	22.47	22,47
4	Unidades	Pernos 5/8 * 2".	0.55	2,2
4	Unidades	Tuercas 5/8.	0.21	0,84
8	Unidades	Arandelas planas 5/8.	0.06	0,48
4	Unidades	Tornillos 4mm * 15mm.	0.02	0,08
12	Unidades	Prisioneros 5/16 * 1/2.	0.35	4,2
3/4	Galón	Pintura anticorrosiva industrial	3.54	10,62

		(negro).		
1/4	Galón	Pintura anticorrosiva industrial (gris).	3.54	3,54
			<b>TOTAL</b>	<b>321,88</b>
			+ 12 %	38,63
			<b>TOTAL</b>	<b>360,51</b>

### 6.1.2 MANO DE OBRA DIRECTA

La mano de obra directa de producción se utiliza para convertir las materias primas en productos terminados. La mano de obra es un servicio que no puede almacenarse y no se convierte, en forma demostrable, en parte del producto terminado.

Con los años y el avance de la tecnología la mano de obra ha ido perdiendo peso dentro del costo de producción.

La mano de obra de producción que está comprometida directamente con la fabricación de los productos, se conoce como mano de obra directa.. La mano de obra directa se carga directamente a trabajos en proceso.

Para la construcción del modelo se emplearon 5 horas diarias durante un mes. En la tabla 6.2 se indica los precios de remuneración de la mano de obra directa.

**Tabla 6.2 Remuneración de la mano de obra directa.**

Nombre	Cargo	Horas-H	Valor H-H (USD)	Costo total (USD)
Sr. Patricio Taipe	Responsable del Proyecto	100	3	300
Sr. Cristian Acosta	Responsable del Proyecto	100	3	300
			<b>TOTAL</b>	<b>600</b>

## 6.2 COSTOS INDIRECTOS

Los costos indirectos o cargas fabriles son todos los costos de producción, excepto los de materia prima y mano de obra directa.

La materia prima y la mano de obra directa dan origen a desembolsos, los cuales forman parte de las cargas fabriles. La primera supone costos de manipuleo, inspección, conservación, seguros. La segunda obliga a habilitar servicios sociales, oficinas de personal, oficinas de estudios de tiempos, etc.

Los costos indirectos de fabricación puede subdividirse según el objeto de gasto en tres categorías:

- Insumos o materiales indirectos
- mano de obra indirecta
- costos indirectos generales de fabricación.

Los insumos o materiales indirectos son los usados en la producción, pero que no forman parte del producto terminado, incluidos dentro de esta categoría tenemos la energía eléctrica, agua, comunicaciones, transporte de materia prima, combustible.

Para la construcción de este modelo, no fue necesaria la participación de mano de obra indirecta.

En la tabla 6.3 se indica los costos indirectos para la construcción del modelo.

**Tabla 6.3 Costos indirectos.**

<b>MATERIALES INDIRECTOS</b>	<b>VALOR (USD)</b>
Energía eléctrica	60
Agua potable	20
Comunicaciones	30
Transporte de materia prima	25

Combustible	30
<b>TOTAL</b>	<b>165</b>

### 6.3 GASTOS ADMINISTRATIVOS

Los gastos administrativos incluyen todos los desembolsos originados por la dirección y coordinación del proyecto, así como también los gastos originados por la capacitación de los estudiantes, la alimentación, copias, impresiones, empastado del libro de tesis, etc.

Los gastos de capacitación consisten en aquellos tendientes a la instrucción, adiestramiento y preparación del personal para el desarrollo de las habilidades y conocimientos que deben adquirir con anticipación a la puesta en marcha del proyecto.

En la tabla 6.4 se indica la remuneración del personal administrativo por la dirección y coordinación del proyecto y en la tabla 6.5 se indica los gastos administrativos para la construcción e implementación del modelo.

**Tabla 6.4 Remuneración del personal administrativo.**

<b>NOMBRE</b>	<b>CARGO</b>	<b>VALOR (USD)</b>
Ing. Adrián Peña	Director	160
Ing. Roberto Gutiérrez	Codirector	160
	<b>TOTAL</b>	<b>320</b>

**Tabla 6.5 Gastos Administrativos.**

<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR (USD)</b>
Capacitación	100
Alimentación	40
Copias	15
Impresiones	40
Empastado del libro de tesis	10

<b>TOTAL</b>	<b>205</b>
--------------	------------

En la tabla 6.6 se indica el resumen y el costo total de la construcción e implementación del modelo.

**Tabla 6.6 Costo total de la construcción del modelo.**

<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR (USD)</b>
Materia prima directa	360,51
Mano de obra directa	600
Costos indirectos	165
Gastos administrativos	525
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>1650,51</b>

## **CAPITULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **7.1 CONCLUSIONES**

1. El modelo del intercambiador de calor de celdas parabólicas con almacenamiento térmico, para el Laboratorio de Energías no Convencionales de la Facultad de Ingeniería Mecánica, satisface los requerimientos de diseño y construcción establecidos.
2. Los recursos utilizados tanto para el diseño como para la construcción del modelo del intercambiador de calor, fueron aprovechados de forma eficiente con la finalidad de evitar complejidad dentro de los procesos y consecuentemente reducir los costos de la construcción.

3. La selección del tipo de concentrador mas adecuado para el intercambiador de calor, es el concentrador cilíndrico parabólico o también llamado celda parabólica, debido a que, es uno de los modelos mas utilizados, porque es de fácil construcción y manejo; además su costo de fabricación no es muy elevado y la materia prima está disponible en el mercado nacional, en estos concentradores la radiación solar es concentrada en una línea que es exactamente igual de largo que el concentrador.
4. Debido a la eficiencia del modelo se puede satisfacer en un 25% la energía que se requiere en un invernadero con este tipo de proyectos de energías alternativas y el otro 75% puede ser mediante los métodos tradicionales como quemadores de gas.
5. El cálculo de la radiación solar directa es importante, debido a que las celdas parabólicas solo pueden concentrar este tipo de radiación y esta depende de la ubicación y localidad en la que va a trabajar el modelo.
6. El número de celdas parabólicas necesarias en la construcción del intercambiador de calor dependen directamente de la energía o calor requerido en el almacenamiento térmico, esto quiere decir que mientras más grande sea el área del invernadero mayor serán las dimensiones y el número de celdas, dependiendo del numero de concentradores, estos pueden ser colocados en paralelo o en serie; para este proyecto se toma tres celdas parabólicas instaladas en serie.
7. Para el almacenamiento de la energía, se utilizó lecho de piedras de río, debido a que estas almacenan gran cantidad de energía, su disponibilidad es alta en nuestro medio, por lo tanto su costo no es elevado.
8. Realizando las pruebas de funcionamiento se pudo concluir que las temperaturas dentro del almacenamiento térmico se estabilizan a partir de las 14:00 horas, esto produce que ya no exista ganancia de energía solar dentro del almacenamiento térmico.

9. Con este tipo de proyectos se pretende proteger el medio ambiente, mediante la aplicación de nuevas energías, como es la energía solar, ya que anteriormente se utilizaba y sigue utilizando quemadores de gas y azufre para el calentamiento de invernaderos, lo que provoca una gran contaminación en el medio ambiente.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

1. Es recomendable la utilización del modelo de intercambiador de calor de celdas parabólicas con almacenamiento térmico, en prácticas de laboratorio para la familiarización de nuevos proyectos con energías alternativas (Energía solar).
2. El desarrollo de proyectos de investigación en este nuevo campo de energías alternativas, deben ser eficientes en su diseño, es decir que, la utilización de recursos sean aprovechados de la mejor manera cumpliendo siempre con los objetivos planteados.
3. Para la selección de un tipo de concentrador es recomendable tomar en cuenta la aplicación que este va a realizar y las condiciones del lugar de instalación.
4. Montar la estructura del modelo en una superficie plana con la orientación indicada en el diseño (Norte - Sur), y siguiendo la trayectoria del sol, esto ayudara aumentar la eficiencia del modelo.

5. Este tipo de proyectos que utilizan radiación solar directa deben ser aprovechados en estaciones donde no exista mucha nubosidad (verano), obteniendo distintas aplicaciones, como por ejemplo el calentamiento de un invernadero en la noche.
6. Es recomendable que el área de apertura de las celdas parabólicas, sea de acuerdo a las dimensiones de la materia prima disponible en el mercado nacional, para evitar que haya desperdicios en la construcción del proyecto.
7. Se recomienda que la investigación de nuevos proyectos se centren en el estudio de nuevas energías alternativas que no afecten y ayuden a preservar el medio ambiente, debido a que en la actualidad ya existe demasiada contaminación.
8. Es recomendable para aumentar el aprovechamiento de la energía solar, instalar otra caja de almacenamiento térmico con lecho de piedras a partir de las 14:00 horas.

## **CAPITULO 8**

### **BIBLIOGRAFIA Y ANEXOS**

#### **8.1 REFERENCIAS**

- 1.- BECKER M., MACIAS M., AJONA J.I.: ‘Solar Thermal Power Stations’, En:”The future for renewable energy. Prospects and directions”, Ed. EUREC-Agency, James&James Science, London, ISBN 1-873936-70-2,1996..
- 2.- WINTER C.J., SIZMANN R.L., "Solar Power Plants", Springer-Verlag, Berlin, ISBN 3-540-18897-5, Vant-Hull L.L. (Eds) (1991).
- 3.-ENERMODAL ENGINEERING Ltd. “Cost Reduction Study for Solar Thermal Power Plants. Final Report”. Prepared by Enermodal Engineering Ltd. in association with Marbek

Resource Consultants Ltd., by contract of World Bank/GEF, Washington D.C., May 5, 1999.

4.- DEMEO E.A., GALDO J.F., "Renewable Energy Technology Characterizations", TR-109496 Topical Report, December 1997, U.S. DOE-Washington and EPRI, Palo Alto, California.

5.- LOTKER, M. " Barriers to Commercialization of Large Scale Solar Electricity. The LUZ experience". Informe técnico publicado por Sandia National Laboratories, Ref.: SAND91-7014, (1991).

6.- COSIDINEE D.M. , "Enciclopedia de Energia, Tecnología", vol 5, México, 1989.

7.- BECKMAN, "Solar heating design by the f-chart method", 169

8.- MCVEIGH, J.C., "Sun Power, An Introduction to the Applications of Solar Energy", Pergamon Press, 1977.

9.- ASHRAE, "Applications handbook", 30.20

10.- ALPI, A.; TOGNONI, F. "Cultivo en invernadero", Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 347 pp, 1999.

11.- NAVARRO, J.A. "Pantallas térmicas para el control ambiental en invernadero", Plantflor. Cultivo y Comercio. Año 12. N° 3. 20-24, 1999.

12.- ALMANZA, R., "Ingeniería de la Energía Solar", Editorial El Colegio Nacional, México, 1994.

13.- HERNANDEZ, G. Eduardo, "Fundamentos de aire acondicionado y Refrigeración", Editorial Limusa, México, 1986.

14.- GOODMAN, A.W., "Geometría Analítica y Cálculo", Editorial Hispanoamérica, Primera Edición, México, 1980.

15.-MOTT, Robert; " Mecánica de Fluidos"; Cuarta edición, México, 1996.

16.- RODRIGUEZ, NUÑEZ, "Infraestructura básica para colectores solares", Segunda edición, 1998.