

# ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR DE AGUAS  
RESIDUALES PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES-DECEM”

PROYECTO DE GRADO PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

REALIZADO POR:

ROBERTO RAFAEL RODRÍGUEZ LEIVA

WILSON DAVID SAAVEDRA ACOSTA

DIRECTOR: ING. ERNESTO SORIA.

CODIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA

SANGOLQUÍ – ECUADOR

Abril 23 de 2008

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

El proyecto “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR DE AGUAS RESIDUALES PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES-DECEM**”, fue realizado en su totalidad por los señores Rodríguez Roberto y David Saavedra, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

Ing. Ernesto Soria  
Director

---

Ing. José Guasumba  
Codirector

**Sangolquí, 21 de Abril de 2008**

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR DE AGUAS RESIDUALES PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES-DECEM”.**

---

Sr. Roberto Rodríguez

---

Sr. David Saavedra

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

COORDINADOR DE LA CARRERA DE  
INGENIERÍA MECÁNICA

Ing. Juan Díaz T.

**Sangolquí, 21 de Abril de 2008**

## DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mi Madre Gloria Leiva que gracias a su apoyo he logrado culminar esta etapa de mi vida. A mi Abuelita Teresa de Leiva por su apoyo durante todos estos años por su infinito amor comprensión y por ayudarme en aquellos momentos cuando más los necesitaba. GRACIAS a mis dos Madres, a mi Abuelito aunque no está presente pero que siempre lo llevo en mi corazón y pensamientos, a mi director y codirector de tesis, gracias por toda la ayuda prestada, sus sugerencias y confianza.

*Roberto Rafael Rodríguez Leiva*

Qué difícil es plasmar en un papel el cúmulo de sentimientos que suscito mi pensamiento en escasos segundos. Escasos segundos de valor temporal pero de gran valor emocional, así dedico estos valiosos segundos a mis padres, porque gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de la vida, fruto del inmenso amor, confianza y apoyo que en mi se deposito y con los cuales he logrado terminar mis estudios profesionales que constituyen el legado más grande que pudiera recibir y por el cual les viviré eternamente agradecido. Con cariño y respeto.

*David Saavedra A  
Ingeniero mecánico.*

## AGRADECIMIENTO

Mis agradecimientos son Primero para Dios por haberme dado salud y vida, a mi familia en particular a mi Madre, Abuelita y padre por su apoyo durante todos estos años por su infinito amor comprensión y por ayudarme en aquellos momentos cuando más los necesitaba. GRACIAS MAMÁ. A mi hermana Andrea Rodríguez de Amaya por su apoyo, a mi Abuelito aunque no está presente en vida que sepa que siempre lo llevo en mi corazón y pensamientos, a mi director y codirector de tesis, gracias por toda la ayuda prestada, sus sugerencias y confianza a mi compañero David por su apoyo y solidaridad, a Johanna Montenegro por su continuo apoyo a lo largo de mi carrera.

*Roberto Rafael Rodríguez Leiva*

Agradezco infinitamente a Dios, y con todo cariño, admiración y respeto a mis padres **DAVID** y **LILIA** por su cariño e incansable, dedicación, apoyo y comprensión; a mis hermanos **FABIÁN** y **GLADYS** por su apoyo moral y estímulos brindados con infinito amor; a **CRISTINA QUIROGA** quien me ha sabido comprender y apoyar en todos los momentos; a mi director y codirector de tesis **ING. ERNESTO SORIA** e **ING. JOSÉ GUASUMBA**, quienes sin escatimar esfuerzo alguno, han dedicado tiempo y energía para llevar a delante este proyecto; a mi compañero de tesis **ROBERTO**, por la comprensión, apoyo y colaboración brindados durante el tiempo compartido en la elaboración de nuestra tesis, y a todas aquellas personas que de una u otra forma me apoyaron directa o indirectamente a lo largo de mi vida estudiantil en la **ESCUELA**; y aquellas personas que durante este tiempo me han sabido comprender y apoyar.

*David Saavedra A.*

# ÍNDICE DE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>	<b>Página</b>
CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE DE GENERAL .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiv
NOMENCLATURA .....	xviii
RESUMEN .....	xix
INTRODUCCIÓN .....	xx
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Definición del problema .....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 General .....	3
1.3.2 Específicos .....	4
1.4 Alcance .....	4
1.5 Justificación e importancia .....	5
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1 El agua .....	7
2.2 Tecnologías para el tratamiento del agua .....	9
2.2.1 Purificación física del agua .....	9
2.3 Ciclo natural del agua .....	15

<b>CONTENIDO</b> <small>(CONTINUACIÓN)</small>	<b>Página</b>
2.4 Energía Solar .....	16
2.4.1 Definiciones .....	18
2.5 Naturaleza de la energía solar .....	20
2.5.1 Constante Solar .....	22
2.5.2 La Radiación Normal Extraterrestre .....	23
2.5.3 Distribución espectral de la radiación solar .....	25
2.6 Consideraciones preliminares .....	27
2.6.1 Relaciones angulares .....	27
2.6.2 Radiación Directa Sobre una Superficie Horizontal .....	30
2.6.3 Energía Solar en el Ecuador .....	34
2.7 Destilador solar .....	35
2.7.1 Elementos del destilador solar .....	36
2.7.2 Operación de los destiladores solares .....	41
2.8 Tipos de destiladores solares .....	43
2.9 Destiladores .....	49
2.9.1 Transferencia de calor y masa .....	51
2.9.2 Recurso solar .....	51
2.9.3 Calor perdido por conducción .....	52
2.9.4 Calor perdido por radiación del vidrio .....	55
2.9.5 Calor perdido por convección del vidrio .....	55
2.9.6 Calor perdido por radiación del agua .....	56
2.9.7 Calor perdido por convección natural .....	58
2.9.8 Calor perdido por evaporación .....	63
2.10 Balance Global y eficiencia .....	65
2.10.1 Balance de calor sobre la cubierta .....	66

<b>CONTENIDO</b> (CONTINUACIÓN)	<b>Página</b>
2.10.2 Balance del calor sobre el agua .....	67
2.10.3 Balance global sobre el colector solar .....	68
2.11 Cantidad de calor necesaria para calentar y evaporar .....	69
2.12 Eficiencia de un destilador solar .....	72

### **CAPÍTULO 3**

<b>ALTERNATIVAS DE SELECCIÓN</b> .....	75
3.1 Variables utilizadas para calificación .....	75
3.2 Matriz de selección .....	76
3.3 Matriz de elaboración y geometría .....	77

### **CAPÍTULO 4**

<b>DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL</b> .....	79
4.1 Consideraciones previas .....	79
4.2 Estimación del recurso solar .....	80
4.3 Diseño térmico .....	85
4.3.1 Valores de las constantes utilizadas .....	86
4.3.2 Cálculo del calor perdido por conducción .....	88
4.3.3 Cálculo del calor perdido por radiación del vidrio .....	89
4.3.4 Cálculo del calor perdido por convección del vidrio .....	90
4.3.5 Cálculo del calor perdido por radiación del agua .....	90
4.3.6 Cálculo del calor perdido por convección natural .....	91
4.3.7 Cálculo del calor perdido por evaporación .....	92
4.3.8 Cálculo del calor almacenado por la cubierta .....	92
4.3.9 Cálculo del calor absorbido por el agua .....	93

<b>CONTENIDO</b> <small>(CONTINUACIÓN)</small>	<b>Página</b>
4.3.10 Cálculo del calor absorbido por el sistema.....	93
4.4 Cálculo del de calor necesario para calentar y evaporar.....	90
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL.....</b>	
5.1 Construcción y montaje del destilador solar.....	97
5.2 Procedimiento de fabricación.....	98
5.3 Materiales.....	99
5.4 Proceso de fabricación.....	100
5.5 Simbología utilizada.....	123
5.6 Criterios de seguridad industrial.....	125
5.6.1 Riesgos físicos.....	125
5.6.2 Riesgos químicos.....	125
5.6.3 Riesgos biológicos.....	126
5.7 Planos de construcción del modelo experimental.....	126
5.8 Construcción del soporte base.....	126
5.8.1 Lista de materiales. ....	127
<b>CAPITULO 6</b>	
<b>HOMOLOGACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL.....</b>	
6.1 Cálculo del aporte solar mediante las curvas f. ....	129
6.2 Pruebas del equipo experimental .....	131
6.2.1 Características técnicas de los equipos de medición utilizados.....	138
6.3 Análisis de las pruebas de funcionamiento.....	139
6.4 Análisis foda.....	143

<b>CONTENIDO</b> (CONTINUACIÓN)	<b>Página</b>
6.5 Mantenimiento del equipo.....	144
6.5.1 Mantenimiento predictivo.....	144
6.5.2 Mantenimiento preventivo.....	144
6.5.3 Mantenimiento correctivo.....	144
6.6 Guía de prácticas de laboratorio.....	144

## **CAPÍTULO 7**

<b>ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.....</b>	<b>147</b>
7.1 Análisis económico.....	147
7.1.1 Determinación de costos.....	148
7.1.2 Costos de producción.....	151
7.1.3 Depreciación.....	152
7.1.4 Mercado potencial.....	154
7.1.5 Ingresos.....	154
7.1.6 Egresos.....	155
7.1.7 Flujo neto de caja.....	156
7.2 Análisis financiero.....	157

## **CAPÍTULO 8**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>159</b>
8.1 Conclusiones.....	159
8.2 Recomendaciones.....	161
<b>Fuentes de información.....</b>	<b>163</b>
Referencias bibliográficas:.....	163

**CONTENIDO** (CONTINUACIÓN)

**Página**

Direcciones electrónicas utilizadas.....	165
Anexo A: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN	
Anexo B: DIAGRAMAS DE PROCESOS	
Anexo C: PRESIÓN DEL VAPOR DE AGUA A VARIAS TEMPERATURAS	
Anexo D: GUÍA DE PRACTICAS DE LABORATORIO	
Anexo E: CURVAS F	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
2. 1	Día n del Año.....	24
2. 2	Espectro solar.....	26
2. 3	Acimut de superficie.....	28
2. 4	Valores de las constantes a y b.....	35
2. 5	Presiones de vapor de agua.....	61
3. 1	Matriz de Selección.....	76
3. 2	Parámetros de diseño establecidos.....	77
3. 3	Parámetros de diseño asumidos.....	78
4. 1	Parámetros de diseño experimental.....	80
4. 2	Heliofanía.....	83
4. 3	Ángulos y Radiación Mensual.....	84
4. 4	Radiación directa y difusa Mensual.....	84
4. 5	Datos de constantes utilizados en el cálculo de la radiación solar.....	85
5.1	Lista de materiales.....	127
6.3	Hoja de pruebas.....	137
6.4	Comparación de resultados.....	142
6.5	Foda.....	143
7.1	Costos de materia prima directa.....	149
7.2	Costos de mano de obra directa.....	150
7.3	Costos de materia prima indirecta.....	150
7.4	Costos de mano de obra indirecta.....	151
7.5	Imprevistos.....	151
7.6	Costos de producción.....	151
7.7	Depreciación por tasa constante.....	153

<b>TABLA</b> (CONTINUACIÓN)	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
7.8	Ingresos.....	155
7.9	Egresos.....	156
7.10	Flujo de caja neto e indicadores económicos.....	156

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
2. 1	Gota de agua.....	8
2. 2	Agua estancada.....	9
2. 3	Filtración lenta por arena.....	10
2. 4	Filtración rápida por arena.....	11
2. 5	Equipo de micro filtración.....	12
2. 6	Esquema de ultrafiltración.....	13
2. 7	Equipo de Nano filtración.....	14
2. 8	Filtración de cartucho.....	14
2. 9	Ciclo natural del agua.....	16
2. 10	El sol.....	17
2. 11	Partes del sol .....	21
2. 12	Irradiancia espectral del sol y de un cuerpo negro.....	26
2. 13	Acimut de superficie.....	29
2. 14	Colector solar.....	37
2. 15	Evaporador.....	38
2. 16	Cámara de aire.....	39
2. 17	Condensador.....	40
2. 18	Recolectores del condensado.....	41
2. 19	Esquema del proceso.....	43
2. 20	Destilador de batea de efecto simple.....	44
2. 21	Destilador de batea de efecto múltiple.....	45
2. 22	Destilador solar de mecha.....	46
2. 23	Destilador solar de dos vertientes.....	47
2. 24	El destilador solar inclinado de filtro.....	48

<b>FIGURA</b> <i>(continuación)</i>	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
2. 25	Destilador solar en escalera.....	49
2. 26	Esquema global que intervienen en el colector.....	50
2. 27	Esquema del calor transferido por las paredes.....	53
2. 28	Analogía eléctrica del sistema.....	54
2.29	Curva típica de ebullición.....	62
2. 30	Balance de Energía sobre el vidrio.....	66
2. 31	Balance de calor sobre el agua.....	67
2. 32	Balance global de energía sobre el dispositivo.....	68
5. 1	Prototipo del destilador.....	98
5. 2	Tapa inferior del colector.....	101
5. 3	Distribución de guías para madera.....	102
5. 4	Forma de doblado.....	103
5. 5	Forma de doblado.....	103
5. 6	Forma de doblado.....	104
5. 7	Forma de corte.....	104
5. 8	Distribución de los maderos.....	105
5. 9	Laterales.....	106
5. 10	Perfil Superior.....	107
5. 11	Forma de corte.....	107
5. 12	Perfil inferior.....	108
5. 13	Forma de doblado.....	109
5. 14	Tubo PVC.....	110
5. 15	Soporte del tubo.....	111
5. 16	Colector solar.....	112
5. 17	Bandeja de agua.....	113

<b>FIGURA</b> <i>(continuación)</i>	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
5. 18	Canales.....	114
5. 19	Tapa delantera.....	115
5. 20	Tapa posterior.....	116
5. 21	Marco triangular de la cubierta.....	117
5. 22	Pletina.....	117
5. 23	Perfil a soldar en la cubierta.....	118
5. 24	Cubierta del destilador.....	118
5. 25	Ventana superior.....	119
5. 26	Ventana lateral.....	119
5. 27	Estructura metálica.....	120
5. 28	Forma de doblado.....	121
5. 29	Estructura metálica.....	121
5. 30	Forma de doblado.....	122
5. 31	Estructura metálica.....	122
5. 32	Estructura metálica conformada.....	123
5. 33	Símbolos para procesos de fabricación.....	124
6. 1	Orientación del equipo.....	132
6. 2	Orientación con la latitud.....	132
6. 3	Verificación de la limpieza del destilador.....	133
6. 4	Carga inicial de agua.....	133
6. 5	Termómetro en el agua.....	134
6. 6	Termocupla en el interior.....	134
6. 7	Termómetro infrarrojo.....	135
6. 8	Anemómetro.....	135
6. 9	Agua destilada.....	136

<b>FIGURA</b> <i>(continuación)</i>	<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
6. 10	Equipo en funcionamiento.....	136
6. 11	Termómetro infrarrojo.....	138
6. 12	Termo - anemómetro.....	138
6. 13	Termómetro Digital.....	139
6. 14	Termómetro de bulbo.....	139
6. 15	Temperaturas experimentales.....	140
6. 16	Influencia de la velocidad del viento.....	141
6. 17	Irradiación sobre el equipo.....	142
7. 1	Depreciación del equipo.....	153



## **RESUMEN**

El presente proyecto desarrollado se basa en ocho capítulos en los cuales se expone un estudio desde los conceptos de energía solar, proceso de destilación y la selección de la alternativa más factible con respecto a su construcción, costo y durabilidad.

Adicionalmente se incluye un análisis económico financiero que respalda la fabricación en serie y su posterior distribución en el mercado nacional

El prototipo se encuentra ubicado en el laboratorio de ENERGÍAS NO CONVENCIONALES del DECEM.

## INTRODUCCIÓN

La energía es factor determinante en el desarrollo social, económico y cultural de una comunidad, con la característica de que su aplicación es indispensable en todos los órdenes de la actividad y por ello es fundamental en el proceso productivo y el bienestar de la colectividad.

A nivel mundial se sabe que uno de los elementos vitales que nos proporciona la madre naturaleza es el agua, la misma que es usada como fuente común, para un sin número de actividades, en la vida diaria de los seres vivos.

Pero pese a ello, este elemento, se ve afectado por dos factores negativos, que influyen directamente sobre las poblaciones que no cuentan con la misma cantidad de este de milagro de la naturaleza. Factores como: su consumo desmedido y su contaminación: este factor genera un sin número de enfermedades en poblaciones que se ven obligadas a consumirla. Todo esto lleva a un único resultado la muerte de las especies dependientes del agua.

Por lo que con el desarrollo experimental de este modelo de destilador solar de aguas residuales, al aplicarlo a gran escala, se logre proporcionar, a estas poblaciones de agua segura, aprovechando de las energías renovables como lo es, la energía solar de baja temperatura, y si el proceso así lo exige se le puedan homologar instalaciones al mismo, con la finalidad de aumentar su rendimiento.

## **CAPÍTULO 1**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 Antecedentes**

La energía es factor determinante en el desarrollo social, económico y cultural de una comunidad, con la característica de que su aplicación es indispensable en todos los órdenes de la actividad y por ello es fundamental en el proceso productivo y el bienestar de la colectividad.

En la actualidad la energía solar ya no puede ser considerada como una energía alternativa, ni como la energía del futuro, es la energía del presente que en el Ecuador todavía no es aprovechada; ni difundida en su totalidad.

Bajo esta realidad, es necesario conocer, estudiar y analizar los principales aspectos, impactos y ventajas de la energía solar dirigida su máximo aprovechamiento y conservación.

Aunque su uso no es tan comercial todavía, no podemos negar que está

presente y que cada día más gente se suma a usar la energía solar como de uso diario, la energía solar es ya usada hoy mismo en la construcción, en nuestros artículos de uso diario, que además de ser una de las energías renovables pura, gratuita y de la cual podemos encontrar en grandes cantidades y en todas las regiones del Ecuador.

Casi el 30% de la energía solar que alcanza el borde exterior de la atmósfera se consume en el ciclo del agua, que produce la lluvia y la energía potencial de las corrientes de montaña y de los ríos. La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende, de forma complicada pero predecible, del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía solar que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor.

El agua que llena las tres cuartas partes del planeta tierra no son aptos para el consumo humano es por eso que vemos la necesidad de encontrar nuevas formas de obtención de agua pura, que mediante la energía solar este proyecto ve la necesidad de destilar el agua de ríos que se ven alterados por presencia de varios microorganismos y de sólidos que contaminan el agua para que uso pueda ser de consumo humano.

## **1.2 Definición del problema**

A nivel mundial se sabe que uno de los elementos vitales que nos proporciona la madre naturaleza es el agua, la misma que es usada como fuente común, para un sin número de actividades, por toda la humanidad.

Pero pese a ello, este elemento, se ve afectado por dos factores negativos, que influyen directamente sobre las poblaciones que no cuentan con la misma

cantidad de este de milagro de la naturaleza. Factores como: su consumo desmedido y su contaminación: este factor genera un sin número de enfermedades en poblaciones que se ven obligadas a consumirla. Todo esto lleva al incremento de enfermedades por consumir esta agua y en el peor de los casos la muerte de las especies dependientes del agua.

Por ello, la instalación de sistemas de desinfección de agua y de alimentos, en áreas donde esta no sea segura para su consumo y que no exista la más remota perspectiva de instalación inmediata, y peor aún no funcione de forma constante este sistema de desinfección de agua, ya sea por falta de inversión económica o simple ignorancia de las autoridades, han pasado a constituir a demás de una alternativa en la implementación de este sistema, una preocupación en nosotros para mejorar la calidad del agua y la conducta sanitaria de la población, contribuyendo además a la disminución de enfermedades de origen hídrico.

Por lo que con el desarrollo experimental de este modelo de destilador solar de aguas residuales, al aplicarlo a gran escala, se logre proporcionar, a estas poblaciones de agua segura, aprovechando las energías renovables como lo es, la energía solar de baja temperatura, y si el proceso así lo exige se le puedan homologar instalaciones al mismo, con la finalidad de aumentar su rendimiento.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 General**

Diseñar y construir un destilador solar con aplicación al análisis y descontaminación de muestras de aguas residuales, para el laboratorio de Energías Renovables – DECEM.

### **1.3.2 Específicos**

Determinación del recurso solar existente dentro del área de la localización geográfica, del que se pueda aprovechar.

Diseñar y construir el modelo experimental para la destilación utilizando las mejores alternativas que permita el máximo aprovechamiento de la energía solar.

Realizar las pruebas de funcionamiento y operación del prototipo para determinar los parámetros de operación.

### **1.3.3 Alcance**

Desarrollar un dispositivo que aproveche la radiación solar directa y difusa para el calentamiento de muestras de agua proveniente de fuentes que han sufrido algún tipo de contaminación por desechos orgánicos las cuales mediante un proceso de evaporación permitan ser desinfectados a través de la evaporación de determinadas muestra.

Este equipo térmico será construido mediante materiales que se encuentren disponibles en el mercado que además por su fabricación este logra tener un bajo costo.

Por otra parte este proyecto se sustenta hasta la realización de las pruebas del mencionado prototipo luego del cual se podría disponer de un equipo que sirva como parte de referencia para aplicaciones en sectores marginados donde no se disponga de infraestructura sanitaria básica.

#### **1.4 Justificación e importancia**

La necesidad de contar con métodos alternativos para la desinfección de aguas contaminadas con ciertos desechos que se pudieren encontrar nos vemos en la necesidad del diseño y construcción del destilador de agua.

Se dispone de las herramientas de cálculo, de los materiales y conocimientos en el campo diseño térmico para innovar de mejor manera los procesos tradicionales que utilizan este método.

El DECEM cuentan con las herramientas y los equipos necesarios para la realización del proyecto.

Para el desarrollo de este prototipo se utiliza el recurso humano conformado por el director, codirector y los responsables del proyecto, así como también los materiales alternativos de bajo costo para que este proyecto sea viable.

La energía desempeña un papel fundamental para la consecución de los objetivos interrelacionados del desarrollo humano sostenible en los campos económico, social y medioambiental. Pero si hemos de conseguir esta importante meta, tendrán que cambiar los tipos de energía que producimos y las formas de utilización. Si no es así, se acelerarán los daños al medioambiente, aumentará la desigualdad y el crecimiento económico mundial estará en peligro.



## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 El agua

El agua<sup>1</sup>, sustancia esencial tanto para la vida como para la propia civilización humana, es el vehículo idóneo donde se desarrollan las complejas reacciones bioquímicas que hacen posible el desarrollo de la actividad vital de cualquier ser vivo. Además, se trata probablemente del único compuesto que se puede encontrar en nuestro planeta en los tres estados físicos de agregación de la materia, líquida, sólida y gaseosa, en una cantidad considerable.

La provisión global de agua en la Tierra es invariante desde hace miles de años, estando sometida al ciclo hidrológico. Este consiste en una serie de cambios de fase, de características físicas, químicas y microbiológicas, e incluso de emplazamiento físico (mareas, nubes, glaciares, ríos, aguas subterráneas) cuyo último efecto es la renovación periódica de la dotación de agua en las grandes

---

<sup>1</sup>[www.fortunecity.es](http://www.fortunecity.es)

acumulaciones o depósitos de ésta existentes en el planeta: océanos, ríos y lagos, atmósfera y litosfera.

El motor del ciclo hidrológico es la radiación solar recibida en nuestro planeta que provoca la evaporación de cantidades ingentes de agua desde la superficie libre de los océanos y mares hasta la atmósfera, desde donde revierte depositándose bajo forma de lluvia. En el ciclo, además intervienen otros factores como son la evaporación de agua desde el propio terreno, la evapotranspiración de plantas y seres vivos, e incluso, el balance entre detracción aporte de agua usada por el hombre.



**Figura 2.1** Gota de agua.

También hay que tener en cuenta que el agua no puede ser usada directamente de la naturaleza, sino que tiene que pasar por un largo proceso de tratamiento para eliminar todas las partículas nocivas para la salud y el bienestar humano. Y que un 97.5% del agua que hay en el mundo es salada, por lo que un gran avance de la tecnología ha consistido en conseguir transformar esa agua salobre en agua potable. Pudiendo así, crear poblaciones y áreas industriales en zonas áridas o de escasos recursos contando con la disponibilidad de recursos desalados a partir de agua de mar o salobre.

## 2.2 Tecnologías para el tratamiento del agua<sup>2</sup>

### 2.2.1 Purificación física del agua

La purificación física del agua se refiere sobre todo a técnicas de filtración. La filtración es un instrumento de purificación para quitar los sólidos de los líquidos. Hay varios tipos de técnicas de filtración. Un filtro típico consiste en un tanque, los medios de filtro y un regulador para permitir la expulsión.



**Figura 2.2** Agua estancada.

#### a) Pantallas

La filtración a través de las pantallas se hace generalmente al principio del proceso de la purificación del agua. La forma de las pantallas depende de las

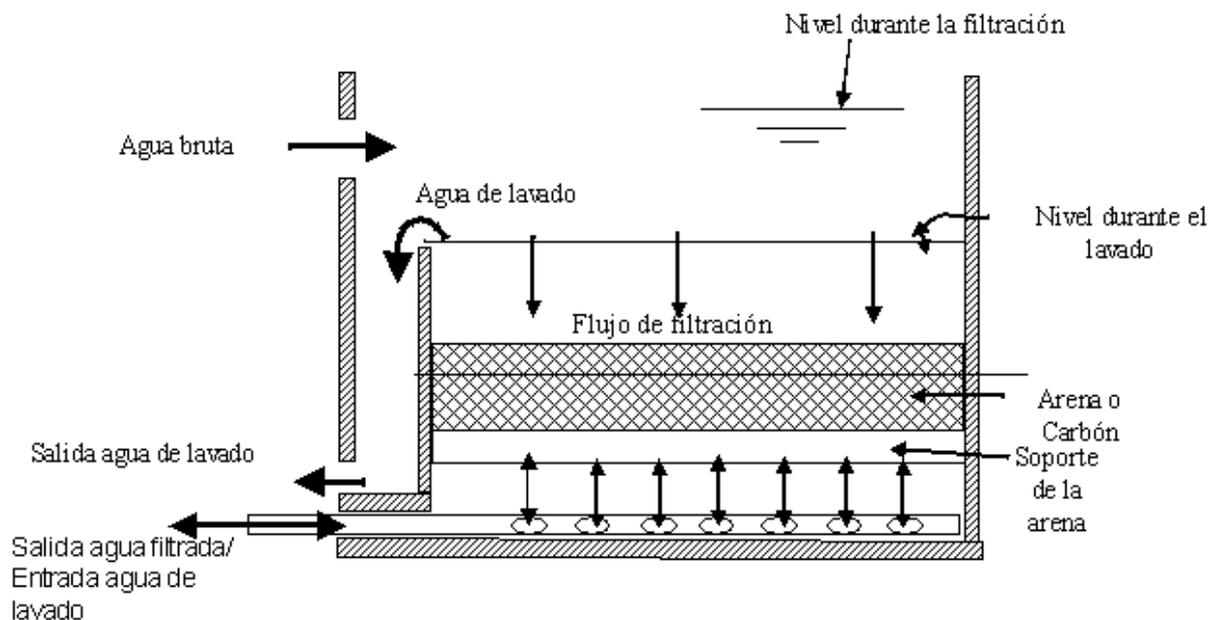
---

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

partículas que tienen que ser eliminadas.

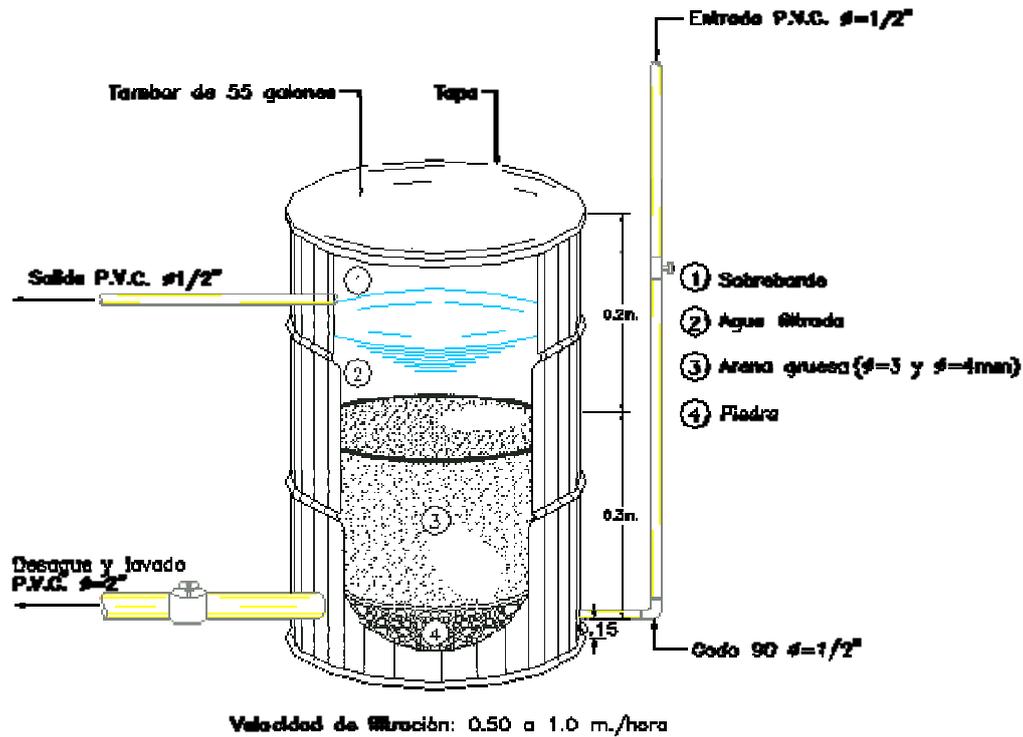
## b) Filtración por arena

De acuerdo a lo que se muestra en las figuras 2.3 y 2.4, la filtración por arena es un método usado con frecuencia, muy robusto para quitar los sólidos suspendidos del agua. El medio de filtro consiste en una capa múltiple de arena con una variedad de tamaño y gravedad específica. Cuando el agua atraviesa el filtro, los sólidos suspendidos en el agua precipitan en la arena donde quedan como residuo y en el agua se reduce los sólidos suspendidos, esta fluye del filtro. Cuando los filtros se cargan con las partículas se invierte la dirección de filtración, para regenerarlo. Los sólidos suspendidos más pequeños tienen la capacidad de pasar a través de un filtro de arena, a menudo se requiere la filtración secundaria.



**Figura 2.3** Filtración lenta por arena<sup>3</sup>

<sup>3</sup> [www.inta.gov.ar](http://www.inta.gov.ar)



**Figura 2.4** Filtración rápida por arena

### c) Micro filtración

La micro filtración es una técnica de separación con membrana en la cual las partículas muy finas u otras materias suspendidas, con acción en partículas de radio de 0,1 a 1,5 micras, se separan de un líquido. Es capaz de quitar los sólidos suspendidos, las bacterias u otras impurezas. Las membranas de la micro filtración tienen un tamaño nominal de poro de 0,2 micras.

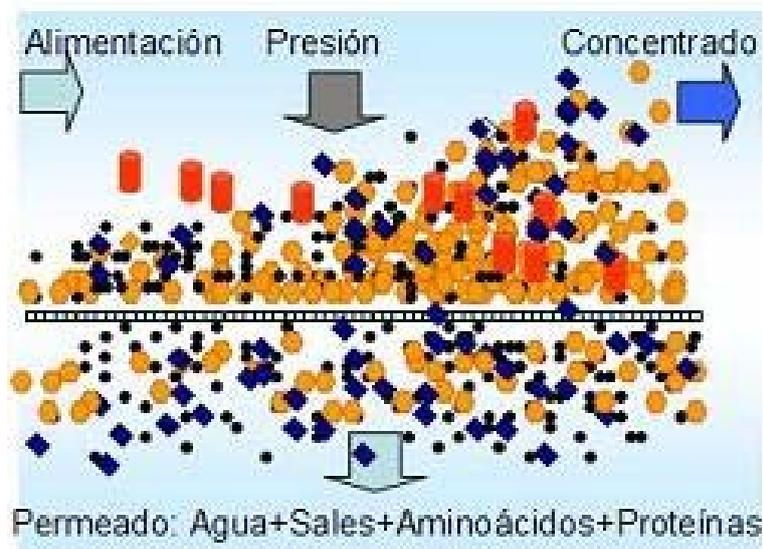
Algunos ejemplos de aplicaciones de la micro filtración son la esterilización por frío de bebidas y productos farmacéuticos, el aclaramiento de zumos de frutas, vinos y cerveza, la separación de bacterias del agua (tratamiento biológico de aguas residuales), el tratamiento de efluentes, la separación de emulsiones de agua y aceite, el Pre-tratamiento del agua para nano filtración y ósmosis inversa, la separación sólido-líquido para farmacias e industrias alimentarias.



**Figura 2.5** Equipo de micro filtración

#### **d) Ultrafiltración**

La ultrafiltración es una técnica de separación con membrana en la cual las partículas muy finas u otras materias suspendidas, con acción en partículas de radio de 0,005 a 0,1 micras, se separan de un líquido. Es capaz de quitar las sales, las proteínas y otras impurezas dentro de su gama. Las membranas de la ultrafiltración tienen un tamaño nominal de poro de 0,0025 a 0,1 micras.



**Figura 2.6** Esquema de ultrafiltración.

#### e) Nano filtración

Nano filtración es un proceso de filtración por membranas operadas bajo presión en la que solutos de bajo peso molecular (1000 daltons), partículas muy finas u otras materias suspendidas, con un tamaño de partícula en la gama de aproximadamente 0,0001 a 0,005 micras, son retenidos, pero las sales pasan, total o parcialmente, a través de la membrana con el filtrado.

Esto provee un rango de selectividad entre las membranas de Ultrafiltración y Osmosis Inversa, permitiendo simultáneamente concentración y desalado de solutos orgánicos. La membrana NF retiene solutos que la UF pasaría, y deja pasar sales que la OI retendría. En algunas aplicaciones, su selectividad entre moléculas de tamaños similares es la clave del éxito del proceso de separación con membrana.



**Figura 2.7** Equipo de Nano filtración.

**f) Filtración de cartucho**

Las unidades<sup>4</sup> de filtración de cartucho consisten en fibras. Funcionan generalmente con más eficacia económica en los usos que tienen niveles de contaminación de menos de 100 PPM. Para usos donde la contaminación es más alta, los cartuchos se utilizan normalmente como filtro en las etapas finales.



**Figura 2.8** Filtración de cartucho

---

<sup>4</sup> [www.mondialpiscine.fr](http://www.mondialpiscine.fr)

### **g) Filtros de carbón activado**

El filtro de carbón<sup>5</sup> funciona por el mismo principio que el filtro de arena, la diferencia radica en los elementos filtrantes y su finalidad. El carbón activado es un material natural que con millones de agujeros microscópicos que atrae, captura y rompe moléculas de contaminantes presentes. Se diseña normalmente para remover cloro, sabores y olores y demás químicos orgánicos. También es uno de los procesos finales del sistema de tratamiento de agua, su función es pulir la descarga final. Son fabricados en acero al carbón de alta resistencia y recubrimiento interno de polietileno para evitar la corrosión. Retro lavado 100% automático, con temporizador o volumen tratado.

### **2.3 Ciclo natural del agua**

Cuando el agua es hervida<sup>6</sup>, sube como vapor y cuando se enfría, se convierte de nuevo en Agua pero agua pura. El proceso de destilación duplica el ciclo hidrológico de la naturaleza. La destilación es el proceso de agua hirviendo en un compartimiento que resulta en la creación de vapor. A medida que se levanta el vapor, este pasa a través de serpentinas refrescantes y se acumula como agua pura.

Todos los contaminantes son abandonados y los gases se vaporizan en las temperaturas más bajas. Al punto que hierve el agua el vapor es liberado y sube para condensarse. Esencialmente, la destilación duplica el ciclo de la madre naturaleza de evaporación y precipitación.

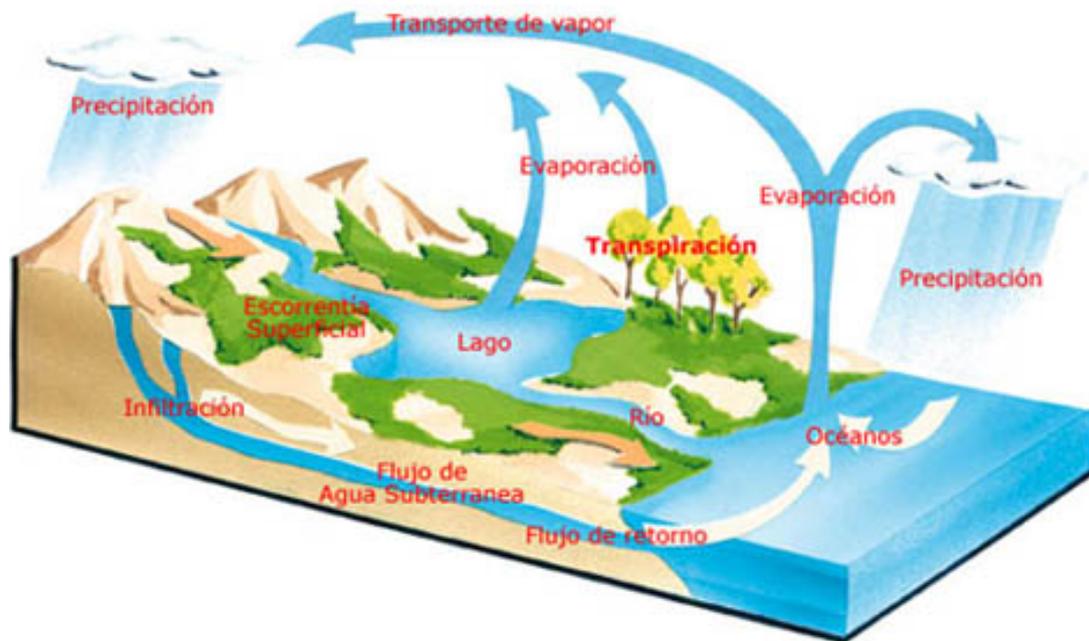
Es altamente eficaz en remover todos los Inorgánicos, Orgánicos y Contaminantes. Éstos incluyen metales pesados, Amoníaco, Nitrato, Cloruro, Fluoruro, Radio 226, Contaminantes orgánicos industriales y Agentes

---

<sup>5</sup> [www.icespedes.com](http://www.icespedes.com)

<sup>6</sup> [www.excelwater.com](http://www.excelwater.com)

contaminadores. La destilación es también altamente eficaz en remover Insecticidas Comúnmente Usados, Herbicidas, y Plomo; así como también, todas las bacterias y virus.



**Figura 2.9** Ciclo natural del agua

## 2.4 Energía Solar

El aprovechamiento de la energía solar está condicionado a la intensidad de radiación solar incidente sobre un área determinada, por lo que es necesario contar con registros de radiación confiables que puedan emplearse en el diseño de equipos que aprovechen la energía solar.

Actualmente se disponen de mapas de radiación solar, en donde normalmente se presentan los valores promedio de radiación solar diaria, mensual o anual. El uso de estos mapas de radiación es importante para determinar las zonas geográficas que tienen un alto potencial para su aprovechamiento y para el pre

diseño de los equipos que utilizan como fuente la energía solar.

Actualmente, las tablas o los mapas de radiación solar se elaboran a partir de mediciones vía satélite o a partir de los datos obtenidos en las ciudades y grandes centros poblados, y raras veces, se tienen en cuenta los niveles de radiación solar a nivel de las zonas rurales.

No obstante, estos datos tienen cierta incertidumbre propia de la tecnología empleada, a lo que se suma, que la mayoría de datos están referidos a grandes extensiones de territorio, por lo que su uso se hace limitado y poco práctico.



**Figura 2.10** El sol.

Esta limitación puede conducir al sobre o sub dimensionamiento de los equipos de aprovechamiento de la radiación solar. Esta falla en los diseños puede tener graves consecuencias en lo que respecta a costos de inversión, operación o mantenimiento, así como la sostenibilidad de los sistemas cuando ellos no cumplen con el fin para el cual fueron instalados.

### 2.4.1 Definiciones

Para el desarrollo del presente proyecto daremos las siguientes definiciones<sup>7</sup> comúnmente utilizados en el estudio de la energía solar y sus aplicaciones.

**a) Albedo:**

Es la relación de la radiación solar (energía radiante luminosa) reflejada por una superficie respecto de aquella que incide sobre ella.

**b) Balance de energía:**

Ecuación que expresa la relación conservadora entre las distintas formas de energía en un determinado emplazamiento o en un sistema atmosférico en estado estacionario.

**c) Balance de radiación:**

Distribución de los diferentes componentes de la radiación atmosférica que son absorbidos, reflejados, transmitidos o emitidos por la atmósfera.

**d) Coeficiente de extinción:**

Medición de la cantidad de energía radiante incidente absorbida por unidad de longitud o por unidad de masa de un medio absorbente.

**e) Heliofanía (n):**

Es el tiempo, en horas, durante el cual el sol tiene un brillo solar efectivo en el que la energía solar directa alcanza o excede un valor umbral variable entre 120 y 210  $W/m^2$ , que depende de su localización geográfica. También se le suele denominar “brillo solar” ó “insolación”.

---

<sup>7</sup> [www.ces.clemson.edu](http://www.ces.clemson.edu)

**f) Irradiancia<sup>8</sup>:**

Es la densidad de flujo de energía de radiación, o bien es la razón (o tasa) a la cual cierta cantidad de energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo y por unidad de superficie, la radiación irradiancia se expresa generalmente en Watts por metro cuadrado  $\left[\frac{w}{m^2}\right]$ .

**g) Radiación solar:**

El término radiación se aplica al cuerpo que radia, mientras que el término irradiación al objeto expuesto a la radiación. Estrictamente, la superficie terrestre es irradiada y los mapas y tablas son de irradiación solar, sin embargo, aún hoy en día suele usarse el término radiación para referirse a la irradiación.

Las cantidades de radiación se expresan generalmente en términos de irradiancia o irradiación (exposición radiante).

**h) Irradiación solar circunglobal:**

Es la irradiación solar directa y difusa más la irradiación reflejada del entorno, interceptada por una superficie esférica.

Es aquella que incide sobre un cuerpo libremente expuesto, es decir, está conformada por la radiación incidente procedente del sol (directo y difusa) y por aquella radiación solar que es reflejada por la superficie terrestre y otros cuerpos aledaños, sin modificar su longitud de onda.

**i) Irradiación solar o irradiación solar global (H)<sup>11</sup>:**

Es la cantidad de energía de irradiación que incide sobre una cierta superficie durante cierto tiempo y por unidad de área, representada por la integral de la

---

<sup>8</sup> [www.procalsol.gob.mx](http://www.procalsol.gob.mx)

irradiancia o densidad de flujo de energía de radiación que recibe la superficie en un intervalo de tiempo dado, intervalo que por lo general puede ser por una hora o un día, la irradiación se expresa generalmente en mega julios por metro cuadrado, para el intervalo de tiempo dado  $\left[\frac{MJ}{m^2}\right]$ .

**j) Irradiación solar directa:**

Es la radiación que llega a la superficie de la tierra en forma de rayos provenientes del sol sin cambios de dirección.

**k) Irradiación solar difusa:**

Radiación que proviene de otras direcciones (distintas a las del disco solar) debido a la reflexión y dispersión que producen en la radiación solar, la atmósfera y las nubes.

**l) Irradiación solar reflejada:**

Fracción de la irradiación solar (directa y difusa) que es reflejada por la superficie terrestre.

**m) Irradiación solar extraterrestre (H<sub>0</sub>):**

Radiación incidente sobre una superficie horizontal en el tope de la atmósfera, que viene a ser el límite superior de la exósfera (ausencia casi total de gases). La irradiación extraterrestre varía con la latitud y la fecha.

## **2.5 Naturaleza de la energía solar<sup>9</sup>**

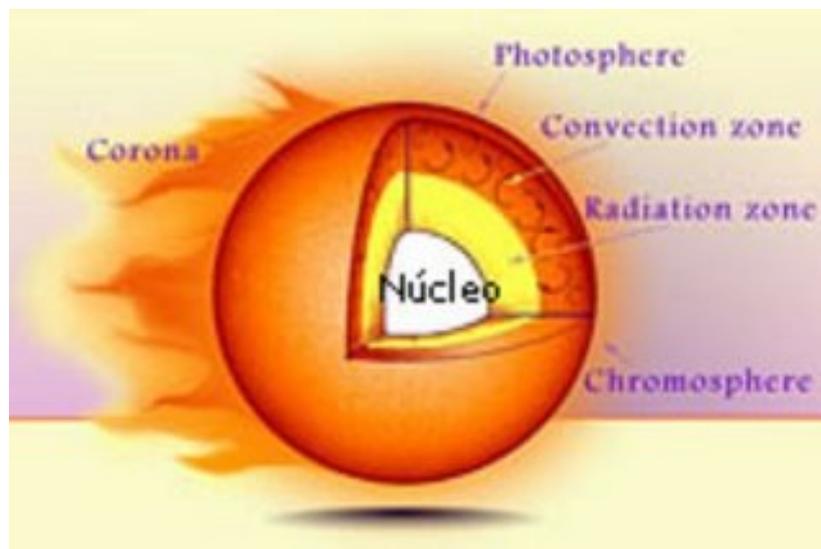
Como todos sabemos la vía láctea es una galaxia grande, espiral y puede tener

---

<sup>9</sup> HERMOSILLO, J.; Notas sobre el curso de energía solar. Jalisco. ITESO. 1995

unos 100.000 millones de estrellas, entre ellas, el Sol. Se estima que este alcanza una temperatura del orden de  $10^7$  °K en la superficie externa llamada fotosfera, sin embargo esta no es una medida cierta si no más bien una medida estimada ya que resultaría imposible colocar cierto aparato de medición en la superficie solar.

Sin embargo mucho más cierto es que el sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión. La generación de energía proviene por tanto de la pérdida de masa del sol que se convierte en energía de acuerdo a la famosa ecuación de Einstein.



**Figura 2.11** Partes del sol

El 90% de la energía proviene del núcleo del sol que únicamente contiene el 40% de la masa total, cuya densidad esta en el orden de  $10^5 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$ , sin embargo ocupa tan solo el 15% del volumen y es el 23% de la región comprendida de su radio, la zona que va hasta el 70% del radio solar se estima una temperatura del orden de  $10^5$  °K y una densidad de  $70 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$ , el resto del radio solar se lo conoce como una zona convectiva en la cual su temperatura cae hasta 6000 °K y a una

densidad de  $10^{-5} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$ .

La capa exterior del sol se lo conoce como fotosfera y es considerada como la superficie del sol, por ser esta una región opaca de donde se emite la mayor cantidad de radiación solar hacia el espacio.

La corona solar observable durante los eclipses totales de sol se considera análogamente a la atmosfera de la tierra.

### **2.5.1 Constante Solar**

Dentro del estudio de la energía solar en las aplicaciones térmicas en la cual nuestra principal fuente de poder viene a ser la estrella luminosa llamada sol están involucrados tres aspectos fundamentales que resultan ser una combinación determinante en la cantidad de flujo de energía que incide sobre la superficie terrestre, así pues tenemos que la distancia de la tierra al sol, el diámetro solar y la temperatura del sol son los factores presumibles que definen al flujo de energía que emite el sol hacia la superficie terrestre como una razón no constante, sin embargo discusiones a lo largo del tiempo nos muestran que dentro del ciclo solar que tiene una duración de 22 años, esto es el tiempo en el cual varia la cantidad de manchas solares, ráfagas y protuberancias solares, con inversión de la polaridad del campo magnético, se ha presentado una variación de energía menor al 1%, razón por la cual se establece que el recurso energético se encuentra ligado a las variaciones de las condiciones ambientales del planeta y mas no a aquellos factores presumibles de variación de energía.

Con lo expuesto anteriormente tenemos que la radiación emitida por el sol, junto con sus condiciones geométricas respecto de la tierra, dan por resultado que, sobre la atmosfera terrestre, incide una cantidad de radiación solar casi constante. Es decir un flujo de energía que incide instantáneamente sobre una

superficie de área unitaria, hipotéticamente perpendicular a la dirección de propagación y situada fuera de la atmosfera a la misma distancia es decir a la media existente entre la tierra al sol, lo que determina que recibirá el mayor flujo de energía. Esto ha dado lugar a la definición de la llamada constante solar. La constante solar,  $G_{sc}$  con sus siglas  $sc$  de “solar constan” en el idioma ingles, es el flujo de energía proveniente del sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la tierra al sol. El valor para la constante solar ha variado en los últimos años según las técnicas de medición empleadas sin que esto quiera decir que la constante haya dejado de ser constante, para nuestro proyecto utilizaremos valores obtenidos de  $G_{sc} = 1353 \frac{W}{m^2}$  que han sido aceptados por la NASA (1971) y por la ASTM, que en otras unidades equivalentes sería:

$$G_{sc} = 4781 \frac{MJ}{m^2hr}$$

$$G_{sc} = 1940 \frac{cal}{cm^2min}$$

$$G_{sc} = 428 \frac{Btu}{ft^2hr}$$

### 2.5.2 La Radiación Normal Extraterrestre

Del punto anterior podemos ver que la radiación extraterrestre que incide sobre la superficie de nuestro planeta está sujeta a factores presumibles de variación de flujo de energía, además debido a que la órbita que describe la tierra no es completamente circular con respecto al sol, la pequeña excentricidad existente en dicha orbita cuasi elíptica hace que en los primeros días de enero se encuentre en la mínima distancia al sol (perihelio), y el primer día de julio este en la máxima distancia al sol (afelio), lo que hace que la radiación solar extraterrestre sea máxima y mínima respectivamente.

Lo que nos lleva a definir la ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre a lo largo del año como:

$$G_{on} = G_{sc} * \left(1 + 0.033 * \cos \frac{360*n}{365}\right) \quad (2.1)$$

Donde:

Gon: Flujo de radiación extraterrestre (subíndice o) medida en un plano normal

a la radiación (subíndice n), y esta expresado en  $\frac{W}{m^2}$

n: Número del día al año que viene de la tabla 2.1.

Día medio del mes: n= 17, 47, 75, 105, 135, 162, 198, 228, 258, 288, 318, 344

**Tabla 2.1** Día n del Año

MES	"n" para el i-ésimo día del mes	MES	"n" para el i-ésimo día del mes
Enero	i	Julio	181+i
Febrero	31+i	Agosto	212+i
Marzo	59+i	Septiembre	243+i
Abril	90+i	Octubre	273+i
Mayo	120+i	Noviembre	304+i
Junio	151+i	Diciembre	334+i

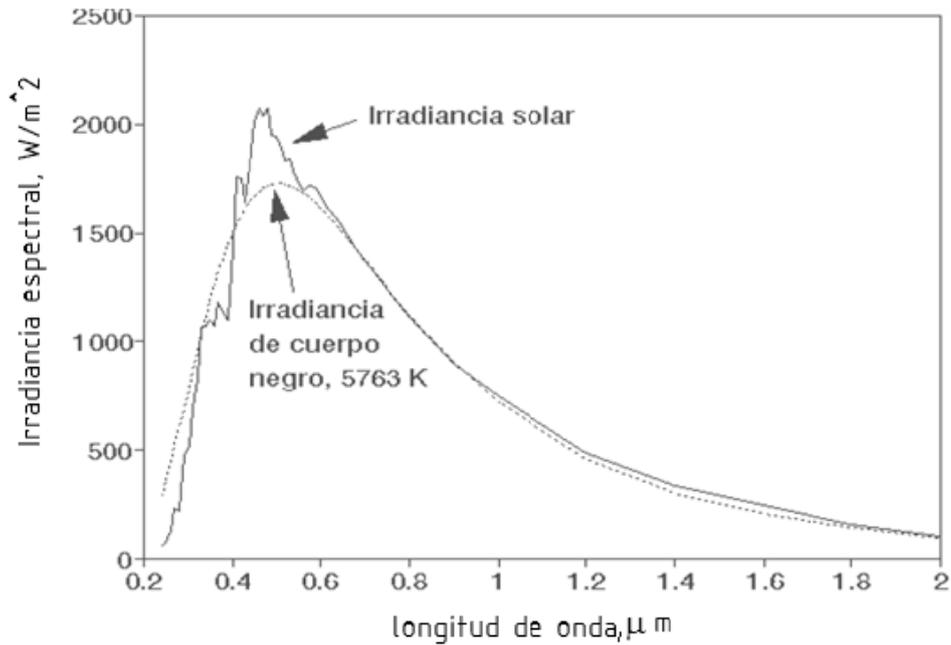
### **2.5.3 Distribución espectral de la radiación solar**

Es importante saber que el sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma, hasta las ondas de radio. Sin embargo, para los fines del aprovechamiento de la energía, solo es importante la llamada radiación térmica que incluye solo la radiación ultravioleta (UV), la radiación visible (VIS) y la radiación infrarroja (IR). Todos los cuerpos emiten cierta cantidad de radiación en virtud de su temperatura. A mayor temperatura ocurren dos cambios en la radiación emitida.

La intensidad de la emisión es mayor, refiriéndose a, un mayor número de watts por metro cuadrado que abandonan el cuerpo.

El color o tipo de radiación cambia hacia una menor longitud de onda esto es, del IR al VIS y al UV, a medida que aumenta la temperatura.

Como ya hemos mencionado la fotosfera se encuentra a unos 6000 °K y emite un cierto flujo de energía correspondiente a esta temperatura. Su distribución espectral es como se muestra en la figura siguiente donde tenemos la grafica de la irradiancia espectral (energía por unidad de tiempo, en la unidad de área, por unidad de longitud de onda) en función de la longitud de onda. La línea continua pero irregular corresponde a la radiación observada, medida desde nuestro planeta, de igual forma la curva punteada representa la irradiancia espectral de un cuerpo negro en condiciones radiador ideal que se lo calentare y mantuviere a la temperatura de 5762 °K, donde trataríamos de simular la temperatura del sol para que tenga la misma emisión de energía.



**Figura 2.12** Irradiancia espectral del sol y de un cuerpo negro

El espectro se suele dividir en las tres regiones siguientes:

**Tabla 2.2** Espectro solar.

ESPECTRO	COLOR	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
Visible ( $0.38 \mu\text{m} < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ ) 47.3%	Violeta	0.42
	Azul	0.48
	Verde	0.52
	Amarillo	0.57
	Anaranjado	0.60
	Rojo	0.70
Infrarrojo ( $\lambda > 0.78 \mu\text{m}$ ) 45.7%	-----	-----
Ultravioleta ( $\lambda < 0.38 \mu\text{m}$ ) 7%	Antes del violeta	-----

## 2.6 Consideraciones preliminares

En los cálculos de energía solar térmica se considera por efectos prácticos solamente la radiación comprendida entre  $0.38 \mu\text{m} < \lambda < 1.9 \mu\text{m}$ . esta interacción hace que finalmente a nivel terrestre se tengan que considerar la componente directa difusa y terrestre de la radiación solar mientras que a nivel extraterrestre solo tenemos la componente directa.

### 2.6.1 Relaciones angulares<sup>10</sup>.

La radiación solar directa sobre nuestro planeta y más específicamente sobre una superficie de orientación arbitraria se la puede describir como sigue:

$\varphi$ : (Phi) Simboliza la latitud geográfica, esto es la posición angular del lugar en donde se encuentre el plano en cuestión, respecto del Ecuador terrestre, positivo en el hemisferio norte.

$$-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$$

$\delta$ : (Delta) declinación solar, nos permite mediante unas coordenadas geocéntricas localizar la posición angular del sol, y es el ángulo formado por la línea Sol Tierra y el plano del ecuador terrestre (norte positivo).

La declinación solar es cero en las fechas de los equinoccios, (21 de marzo y 22 de septiembre) variando cíclicamente de  $+ 23,45^\circ$  que corresponde al solsticio de verano (Junio 22) a  $- 23,45^\circ$  que corresponde al solsticio de invierno (Diciembre 22) y viene dada por la siguiente formula.

$$\delta = 23.45^\circ * \sin \left[ \frac{360^\circ * (284+n)}{365} \right] \quad (2. 2)$$

---

<sup>10</sup> DUFFIE, J. y BECKMAN, W., Solar Energy Thermal Processes, Primera edición New York, 1974.

**n:** número de día del año  $1 < n < 365$

**$\beta$ :** (Beta) Pendiente del plano sobre el cual incide la radiación, esto es, su inclinación respecto de la horizontal. Para valores en los que  $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$  utilizando el lenguaje común y cotidiano se diría que la superficie se encuentra mirando arriba, de igual manera para valores de  $90^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$  se diría en cambio que la superficie se encuentra mirando hacia abajo. Como ejemplos podemos citar la superficie de una piscina que tendrá un pendiente igual a  $0^\circ$ , mientras que la pared de la misma tendrá una pendiente de  $90^\circ$ .

**$\gamma$ :** (Gamma) Acimut de la superficie, este es el ángulo formado por la línea recta que une al Sol y un observador en la Tierra proyectada en el plano horizontal y la línea que va del punto de observación; al Sur (en el hemisferio Norte) o al Norte (en el hemisferio Sur), Este ángulo se mide sobre el plano horizontal local, a partir de la línea Norte Sur con signo negativo hacia el Este y signo positivo al Oeste Nota: El acimut solar es negativo en la mañana,  $0^\circ$  al medio día solar, hora a la que culmina el Sol, y positivo en la tarde.

**Tabla 2.3** Acimut de superficie.

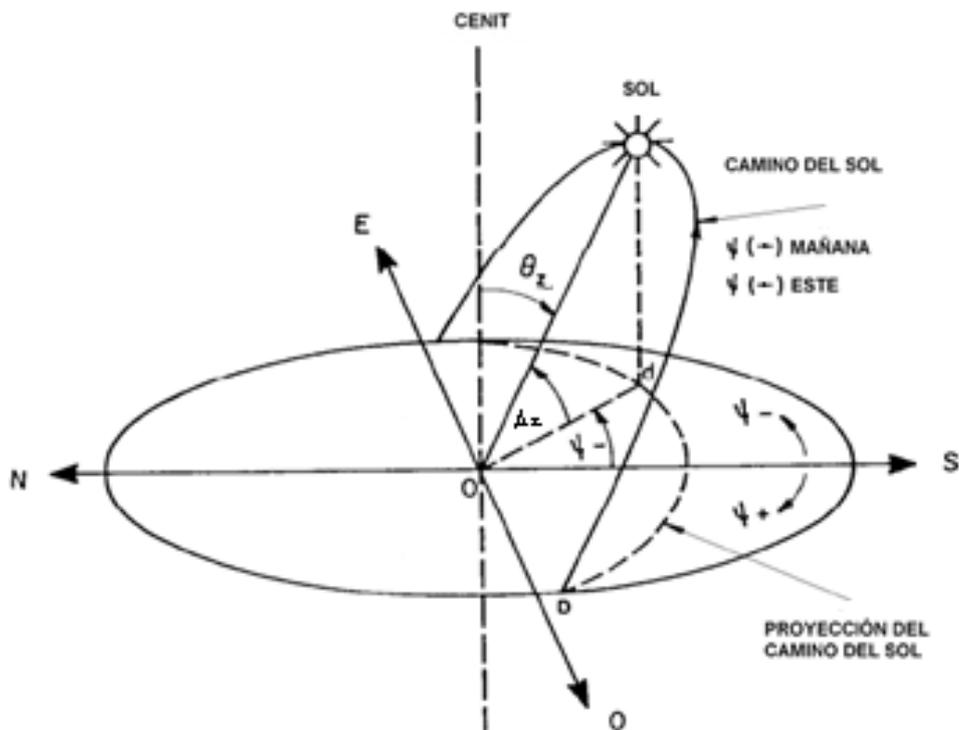
-180 $\leq$ $\gamma$ $\leq$ 180	
ESTE	+
OESTE	-
SUR	0

**$\theta$ :** Ángulo de incidencia, esto es, el ángulo de la radiación directa sobre la superficie y la normal a la superficie.

$$\cos \theta = \sin \delta * \sin \varphi * \cos \beta - \sin \delta * \cos \varphi * \sin \beta * \cos \gamma + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \beta * \cos \omega + \cos \delta * \sin \varphi * \sin \beta * \cos \gamma * \cos \omega + \cos \delta * \sin \beta * \sin \gamma * \sin \omega \quad \text{(2. 3)}$$

**$\theta_z$ :** Ángulo de cenit o sea el ángulo entre la radiación directa sobre la superficie horizontal y la normal de la superficie o cenit. Se lo calcula  $\beta = 0^\circ$  en la ecuación del ángulo de incidencia.

$$\cos \theta_z = \sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega \quad (2.4)$$



**Figura 2.13** Acimut de superficie

**$\omega$ :** Ángulo horario, esto es, el desplazamiento angular del sol hacia el este o el oeste del meridiano local, debido al movimiento de rotación de la tierra alrededor del eje,  $\omega < 0$  en la mañana y  $\omega > 0$  en la tarde, es de notar sin embargo que este ángulo describe un movimiento de  $\omega = -90^\circ$  a la salida del sol y un  $\omega = 90^\circ$  en la puesta del sol únicamente cuando sucede los equinoccios, que estos realmente son un momento particular, un instante de tiempo que ocurre a una hora determinada, también sucede en el ecuador en cualquier

fecha, mas no en otra latitud debido a los movimientos del sol hacia el norte en primavera y hacia el sur en otoño, se lo puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\omega = 15^0 * (12 - H) \quad (2.5)$$

**H:** Hora a cual se requiere calcular  $\omega$

**$\gamma_z$ :** Ángulo acimutal del sol, esto es, la desviación de la proyección de la radiación directa del meridiano local. Las consideraciones son igual que en el caso de  $\gamma$  (Gamma).

$$\sin\gamma_z = \frac{\cos\delta * \sin\omega}{\sin\theta_z} \quad (2.6)$$

**$A_s$ :** Altitud del sol, o sea el ángulo formado entre la dirección del sol y la horizontal.

$$A_s = 90^0 - \theta_z \quad (2.7)$$

El número de horas de luz se puede calcular de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$N = \left(\frac{2}{15}\right) * \cos^{-1}[-\tan\varphi * \tan\delta] \quad (2.8)$$

## 2.6.2 Radiación Directa Sobre una Superficie Horizontal

Como ya hemos visto de la ecuación 2.1 tenemos que la radiación normal extraterrestre está gobernada por la ecuación<sup>11</sup> que describe el flujo de energía

---

<sup>11</sup> HERMOSILLO, J.; Notas sobre el curso de energía solar. Jalisco. ITESO. 1995

solar sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre, a lo largo del año es:

$$G_{on} = G_{sc} * \left(1 + 0.033 * \cos \frac{360*n}{365}\right) \quad (2.9)$$

Donde:

**n:** Número del día del año. Véase también tabla 2.1

De acuerdo a la ecuación 2.10 el flujo de energía sobre una superficie determinada no solo depende de la irradiación que exista sobre esta, sino también de la orientación que tenga su superficie, en otras palabras la intensidad de la radiación sobre esta superficie dependerá del ángulo de incidencia  $\theta$  que se encuentre formando la normal de la superficie respecto de la dirección de propagación de la radiación, es decir si se encuentra mirando hacia la radiación, esta será máxima; de igual manera si se encuentra en sentido opuesto a la radiación, esta será mínima

La ecuación que describe la irradiancia extraterrestre sobre un plano con cualquier inclinación, a lo largo del año es:

$$G_{oT} = G_{on} * \cos \theta \quad (2.10)$$

**G<sub>oT</sub>:** Irradiancia extraterrestre sobre un plano con cualquier inclinación  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

Haciendo una consideración teórica para una superficie horizontal tenemos una pendiente  $\beta = 0$ , y puesto que  $\sin(\beta) = 0$  y el  $\cos(\beta) = 1$ , tenemos que la ecuación que describe la irradiación extraterrestre en superficies horizontales es:

$$G_o = G_{on} * \cos \theta_z \quad (2. 11)$$

Reemplazando la ecuación 2.11 en 2.9 se tiene:

$$G_o = G_{sc} * \left( 1 + 0.033 * \cos \frac{360 * n}{365} \right) * \cos \theta_z \quad (2. 12)$$

Como ya habíamos visto en las definiciones anteriores, la cantidad de energía por unidad de área que incide durante un periodo de tiempo dado recibe el nombre de irradiación y esta expresada en las unidades de  $\left( \frac{J}{m^2} \right)$  y no es otra cosa que la integral de la irradiación durante el periodo en cuestión, generalmente acostumbramos a usar el símbolo “I” para la insolación por hora, mientras que el símbolo “H” es usado generalmente para la insolación durante un día, el concepto se aplica para los diferentes términos como por ejemplo la irradiación difusa en un día será “Hd”, mientras que la irradiación extraterrestre en una hora será “Io”

De acuerdo con la conceptualización hecha en el párrafo anterior la relación de la irradiancia y la irradiación está dada la siguiente integral en donde la irradiación se calcula con los límites t1 y t2, mientras que la irradiancia se considera función del tiempo.

$$I = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt \quad (2. 13)$$

Integrando la expresión anterior desde la salida del sol hasta la puesta del sol con los valores de  $\omega$  correspondientes a nuestra posición y además tomando en consideración que el valor del ángulo de la posición angular del lugar  $\varphi$  es constante para un determinado tiempo así como también el ángulo de la declinación solar es constante en una fecha y lugar determinado únicamente integramos la expresión con respecto a la variable  $\omega$ .

Por lo tanto la ecuación a integrar nos queda:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \left[ G_{sc} * \left( 1 + 0.033 * \cos \frac{360 * n}{365} \right) (\sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega) \right] dt$$

Resolviendo la integral tenemos que:

$$H_o = \frac{24 * 3600 * G_{sc}}{\pi} * A * B \quad (2.14)$$

Donde:

$$A = \left[ 1 + 0.033 * \cos \frac{360 * n}{365} \right]$$

$$B = \left[ \cos \delta * \cos \varphi * \sin \omega_s + \left( \frac{2 * \pi * \omega_s}{360} \right) * \sin \varphi * \sin \delta \right]$$

Ho: la irradiación extraterrestre dada en  $\left( \frac{J}{m^2 \cdot \text{dia}} \right)$ .

La expresión que nos permite calcular la irradiación incidente en un plano horizontal en un determinado tiempo con ángulos horarios  $\omega_1$  y  $\omega_2$  y viene dada en las mismas unidades que Ho es:

$$I_o = \frac{12 * 3600 * G_{sc}}{\pi} * A * C \quad (2.15)$$

Donde

$$C = \left[ \cos \delta * \cos \varphi * (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \left( \frac{2 * \pi * (\omega_2 - \omega_1)}{360} \right) * \sin \varphi * \sin \delta \right]$$

lo: la irradiación extraterrestre dada en  $\left(\frac{J}{m^2-hr}\right)$

Relación entre la irradiación difusa y la irradiación global<sup>12</sup> para valores diarios promedios del mes sobre superficies horizontales terrestres.

$$\frac{H_d}{H} = 1.39 - 4.03 * K_T + 5.53 * K_T^2 - 3.11 * K_T^3 \quad (2. 16)$$

En donde  $K_T$  es el índice de claridad<sup>14</sup>

Relación de la irradiación diaria global promedio del mes sobre superficie horizontal terrestre y sus componentes directa y difusa con los subíndices respectivos,  $d$  (difusa) y  $b$  (directa).

$$H = H_b + H_d \quad (2. 17)$$

### 2.6.3 Energía Solar en el Ecuador

En el Ecuador se dispone de la siguiente información sobre mediciones de heliofanía<sup>13</sup> sobre los niveles de radiación solar cuyo valor fue de  $3000 \frac{W-hr}{m^2 día}$  aceptable para aplicaciones solares y la radiación promedio fue de  $3500 \frac{W-hr}{m^2 día}$ .

El modelo de cálculo de la irradiación solar de mayor aceptación es el de Angstrom<sup>14</sup> modificado.

---

<sup>12</sup> [www1.ceit.es](http://www1.ceit.es)

<sup>13</sup> Roberto David Heredia Fonseca, Enrique Francisco Moya Osorio, Diseño y construcción de un modelo experimental de refrigeración solar intermitente mediante el ciclo de absorción con la solución de agua-amoniaco, pagina 100, Sangolqui. 2007

<sup>14</sup> [www.solartronic.com](http://www.solartronic.com)

$$\frac{H}{H_o} = a + b * \frac{n}{N} \quad (2. 18)$$

Donde:

H: Promedio durante el mes de la irradiación solar sobre una superficie horizontal.

Ho: Promedio mensual del mes de la irradiación solar extraterrestre.

n: Promedio mensual del brillo solar diario.

N: Promedio mensual de la duración astronómica del día.

Las letras a y b representan<sup>15</sup> constantes empíricas de regresión cuyos valores podemos observar en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Valores de las constantes a y b

	a	b
<b>SIERRA</b>	0.25	0.45
<b>COSTA</b>	0.28	0.54

## 2.7 Destilador solar

Un destilador solar (solar still) es un sistema de desalación o destilación basado en la utilización de la energía solar térmica para la obtención de agua a través del efecto de humidificación. El vapor de agua contenido en el aire húmedo es posteriormente condensado, con lo que se obtiene agua dulce, simulando así en

---

<sup>15</sup> BENAVIDES E. Diseño y Construcción de una cocina solar experimental, de tipo cilíndrico parabólico con aplicación al sector rural marginal, paginas 75–76. Sangolqui. 2006

pequeña escala el fenómeno natural de la formación de las nubes y de la lluvia, aprovechando el denominado efecto invernadero.

### **2.7.1 Elementos del destilador solar<sup>16</sup>**

Los elementos del destilador solar cumplen cada uno una función importante e irremplazable dentro del equipo, para así lograr simular el ciclo natural de la naturaleza, un destilador solar está compuesto por los siguientes elementos:

#### **a) Colector solar.**

Consiste en una charola, amplia, extensa y poco profunda, de color negro en su cara superior, que se coloca en forma horizontal. Dentro de esta charola se coloca una pequeña cantidad de agua la cual se calienta directamente por contacto con el fondo de la charola negra.

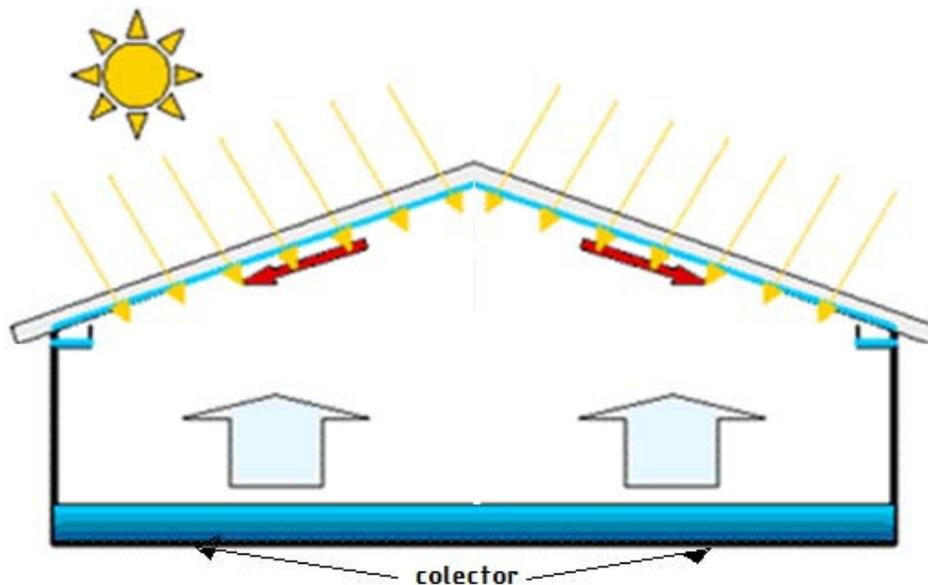
Como todos los colectores y aplicaciones que trabajan a bajas temperaturas, se requiere un aislante térmico en las partes adecuadas, para evitar pérdidas de calor que no se traducen en el efecto deseado.

El material del que se construya la charola colectora no es especialmente importante, desde el punto de vista térmico, pero sí desde otros puntos de vista.

Por ejemplo, la lámina de hierro puede tener problemas de corrosión, aumentado precisamente por la presencia de las sales que se desea remover.

---

<sup>16</sup> [www.ingenieroambiental.com](http://www.ingenieroambiental.com)



**Figura 2.14** Colector solar.

### **b) Evaporador.**

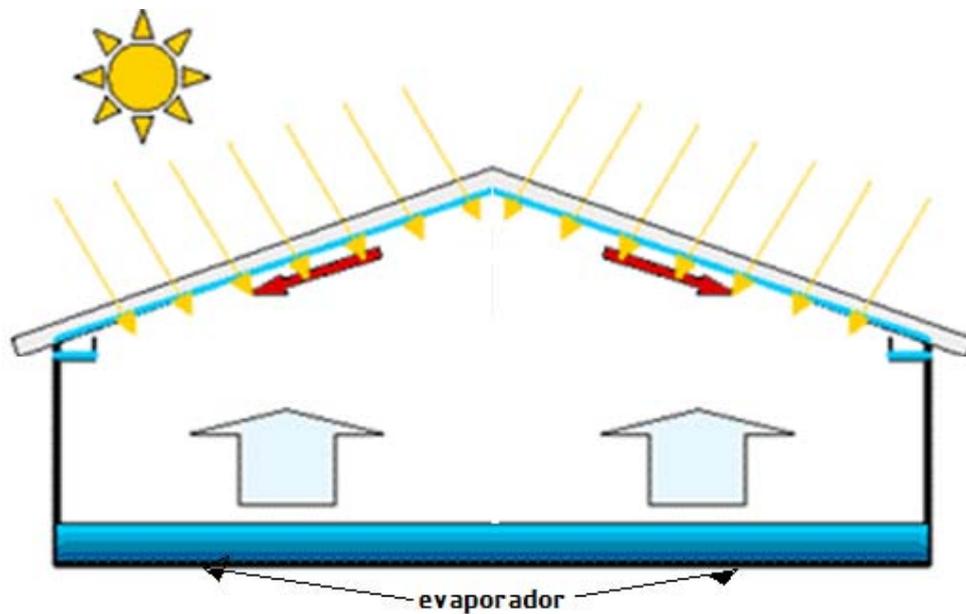
La región en la que se lleva a cabo la evaporación del agua, técnicamente recibe el nombre de evaporador. En la mayoría de casos el evaporador es la misma charola que funge como colector.

La superficie superior del destilando, es decir, el espejo de agua, es propiamente el evaporador. Con el objeto de que el agua logre temperaturas relativamente altas (del orden de 60 a 70 °C), es necesario que la profundidad de agua sea pequeña, tanto como sea posible.

Las temperaturas altas favorecen el proceso de evaporación al aumentar exponencialmente la presión de vapor del agua, la eliminación de microorganismos requiere también de temperaturas altas.

Sin embargo, en los destiladores solares es posible evaporar alrededor de 0.5 cm de profundidad de agua en un día. Debido a esto, no es recomendable que la profundidad sea menor que esta distancia, para evitar que se seque el

evaporador.

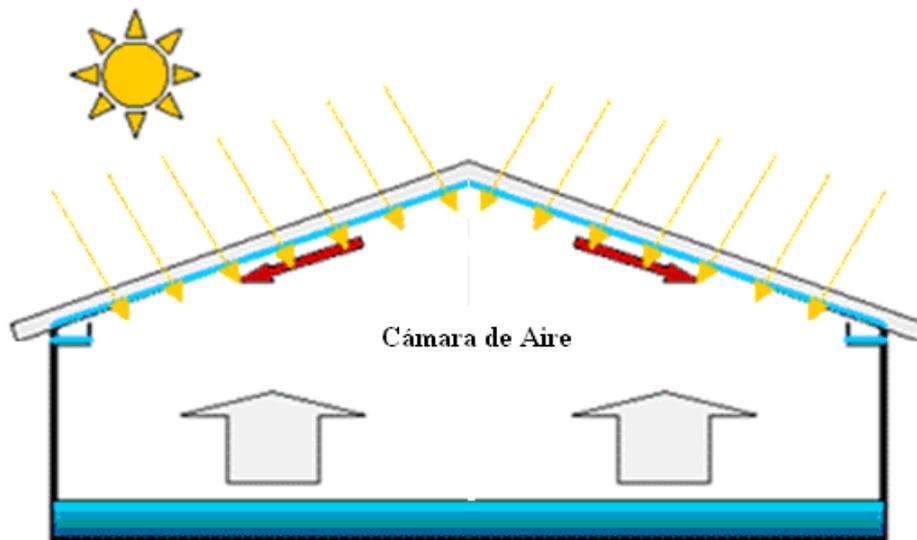


**Figura 215** Evaporador.

**c) Cámara de aire.**

Sobre el evaporador existe una región con aire, que separa a éste del condensador. La función del evaporador es transferir agua al aire para saturarlo. La única función del aire es servir como medio de transporte para las moléculas de agua que viajan del evaporador al condensador.

Los destiladores solares pequeños utilizan como medio para este "viaje" la difusión molecular. Para el proceso de difusión molecular, la distancia es un elemento de resistencia al transporte de las moléculas. Por tanto, la distancia que separa el evaporador del condensador debe ser tan pequeña como sea prácticamente posible.



**Figura 2.16** Cámara de aire.

#### **d) Condensador**

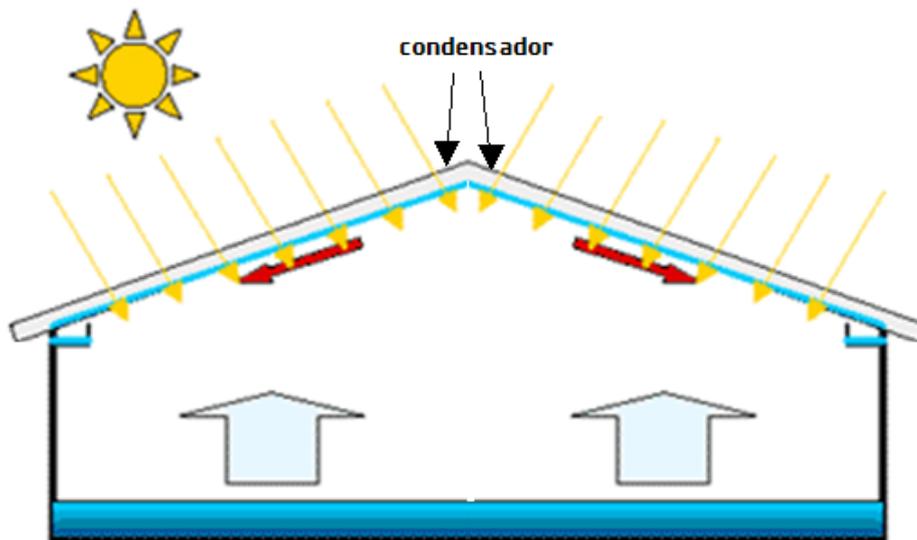
El aire que separa el evaporador del condensador normalmente se encuentra saturado. Esto propicia la extracción del agua, en forma líquida, en alguna región que se encuentre a temperatura menor que el resto del sistema y particularmente que la temperatura del evaporador.

Esta región se llama condensador. En un destilador solar, esto se logra colocando una cubierta de algún material transparente, a una cierta distancia sobre el evaporador. Típicamente se utiliza vidrio, o algunos plásticos. Para que el condensador funcione eficientemente, en un destilador solar, debe tener varias características. Por ejemplo, debe ser un área relativamente grande, por lo menos semejante al área del evaporador. Debe estar ventilado (no aislado) para que se den los flujos de calor hacia el ambiente, tales que lo mantengan a menor temperatura que el resto del destilador.

Debe tener una cierta inclinación, con el objeto de que el agua que se condensa

sobre la cara interna del destilador escurra en la dirección deseada.

Las inclinaciones típicas que se manejan son del orden de  $20^\circ$  a  $30^\circ$  respecto de la horizontal, pero algunos autores han reportado hasta  $6^\circ$ . La inclinación del condensador establece algunos compromisos: por un lado, si está demasiado cercano a la horizontal, el agua condensada puede gotear hacia la salmuera, disminuyendo con ello la eficiencia del destilador; por otro lado, si el condensador está muy inclinado, la separación entre evaporador y condensador puede aumentarse inconvenientemente, porque desfavorece el proceso de difusión descrito anteriormente.



**Figura 2.17** Condensador.

**e) Elementos para la recolección del condensado.**

El destilado que escurra hacia abajo, a lo largo de la cubierta del condensador, debe ser recolectado de forma que no se contamine y no se re evapore. Para ello se utilizan unos pequeños canales casi horizontales, colocados en la parte baja del condensador, pero protegidos adecuadamente contra la posibilidad de que el destilado se mezcle con el destilando. Estos canales colectores se

conectan con tuberías que conducen el destilado al punto deseado, que suele ser un almacén relativamente cercano.

Los materiales involucrados en la construcción de los elementos que conducen el destilado son muy importantes. El agua destilada es, por sí misma, inodora e insípida. Sin embargo, es muy ávida de adquirir sabores y olores extraños. La mayoría de los metales, los plásticos y los materiales cerámicos, transfieren al agua destilada un sabor característico.

Los únicos materiales que hemos encontrado que no alteran el sabor del destilado son: el vidrio, el acero inoxidable y algunos plásticos (silicón, acrílico, PET) cuando están completamente curados.



**Figura 2.18** Recolectores del condensado.

### **2.7.2 Operación de los destiladores solares**

La energía solar penetra en la parte cerrada del destilador a través de la tapa de vidrio. Como la superficie del destilador es de color negro, esta es capaz de

atraer la mayor cantidad de radiación. Las paredes internas deben tener una superficie de color blanco, reflejando la luz solar que reciben, lo que aumenta la concentración de calor dentro del agua acumulada en el fondo del destilador.

Por su parte, la cubierta consta de una superficie transparente colocada sobre el estanque, fabricada principalmente en materiales tales como el plástico o el vidrio.

La cubierta provoca en condiciones adecuadas que se obtengan temperaturas lo suficientemente elevadas (en torno a 60°C) como para producir la evaporación de una parte del agua del estanque. Dichas temperaturas se consiguen gracias al “efecto invernadero” provocado por la cubierta transparente, y que consiste en que la mayor parte de la radiación solar exterior consigue atravesar la superficie de la cubierta, quedando después atrapada.

Una parte de esta radiación es absorbida por el agua que se encuentra en el estanque, y la otra parte es emitida con una longitud de onda mayor que la radiación incidente. A causa de su mayor longitud de onda, esta radiación no puede atravesar hacia el exterior la cubierta transparente, quedando confinada dentro del destilador solar.

Ambas radiaciones provocan un incremento de la temperatura ambiente en el interior que favorece la evaporación de una pequeña parte del agua disponible en el estanque. El vapor así obtenido se condensa al entrar en contacto con la cara interior de la cubierta y forma pequeñas gotas de agua destilada o desalada que terminan uniéndose entre sí y deslizando por la pendiente de la cubierta.

Finalmente son recogidas y canalizadas hasta un colector y terminan en el depósito de agua destilada.

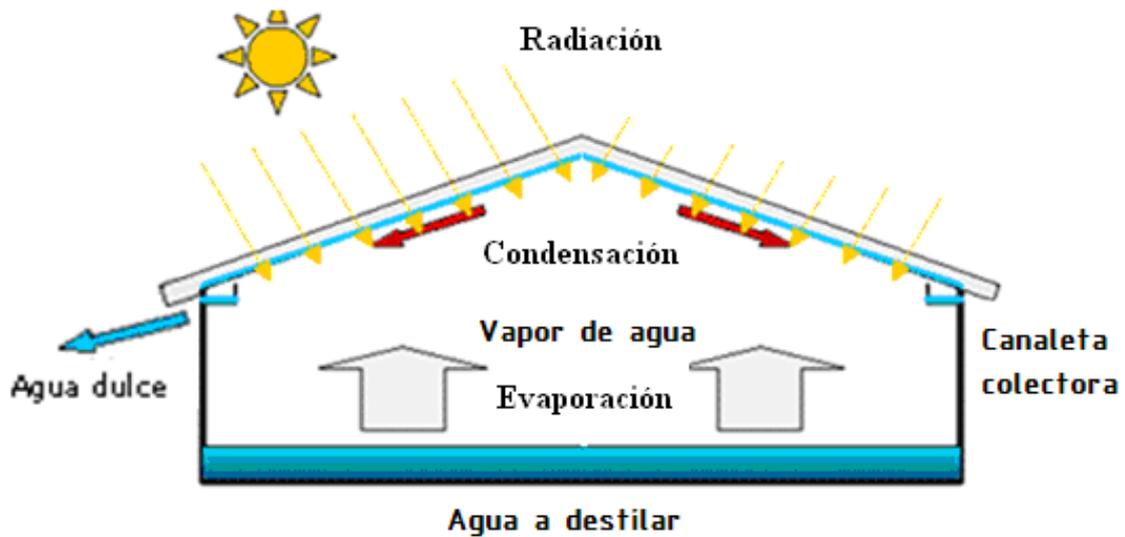


Figura 2.19 Esquema del proceso.

## 2.8 Tipos de destiladores solares<sup>17</sup>

### a) Destilador solar de batea efecto simple (DS1)

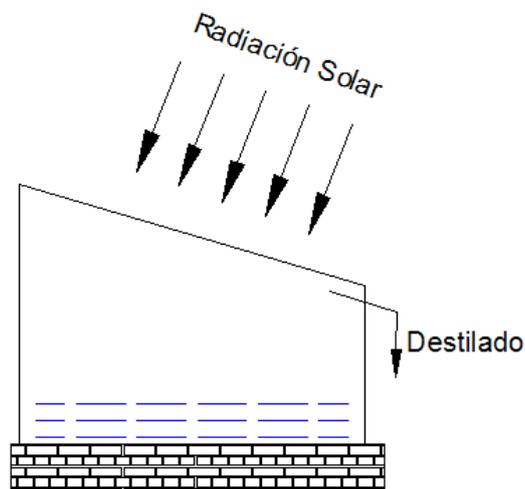
En la piscina o estanque se almacena el agua a destilar o desalar. Para este fin se puede utilizar bien una cavidad natural en el terreno, o bien un recipiente fabricado en materiales que no afecten al agua, y normalmente de color negro para absorber eficientemente la radiación.

Presentan rendimientos típicos del 30%, entendiendo como tal la cantidad de agua destilada producida, frente a la cantidad máxima que podría producirse considerando la radiación solar incidente de la que se dispone y el calor de vaporización del agua. Estos equipos no se emplean para la producción de grandes cantidades de agua desalada, a causa de que presentan una baja

<sup>17</sup> [www.news.soliclima.com](http://www.news.soliclima.com)

producción de destilado por unidad de superficie del estanque.

La producción específica diaria de un destilador solar simple tipo batea se encuentra entre 1 y 4 litros por cada  $m^2$  de superficie. Si se desea producciones superiores que puedan cubrir las demandas de mayores núcleos de población o las de otras aplicaciones (agricultura, industria, saneamiento....) se ha de considerar la desalación solar térmica indirecta por su mayor capacidad.



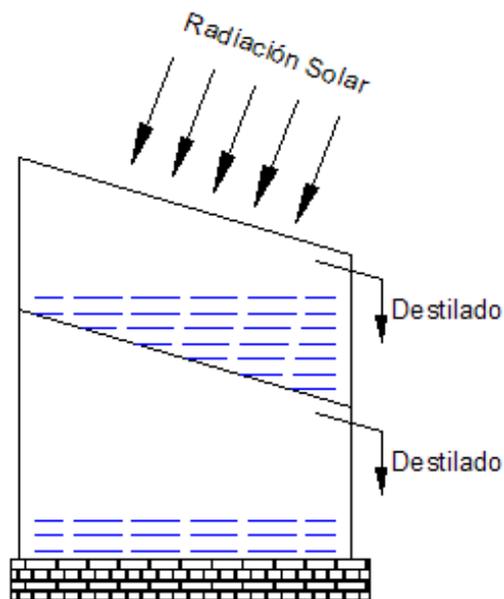
**Figura 2.20** Destilador de batea de efecto simple.

### **b) Destilador solar de batea efecto múltiple (DS2)**

Con esta configuración, la mayor pérdida de energía se produce en forma de calor latente de condensación del agua en la cubierta, con lo que la energía que es necesaria para producir el destilado es aproximadamente igual a su calor de vaporización.

El rendimiento térmico de los destiladores solares puede incrementarse significativamente hasta en un 10% reutilizando dicho calor en dos o más etapas. Así, en un destilador solar tipo batea se puede incorporar una superficie (o incluso más) entre el colector solar y el condensador.

Sobre esta superficie, que sirve de fondo de un recipiente que contiene agua salada, se condensa el vapor del agua que proviene del colector solar. En dicha condensación el vapor cede su calor latente y calienta el agua salada contenida en este recipiente intermedio



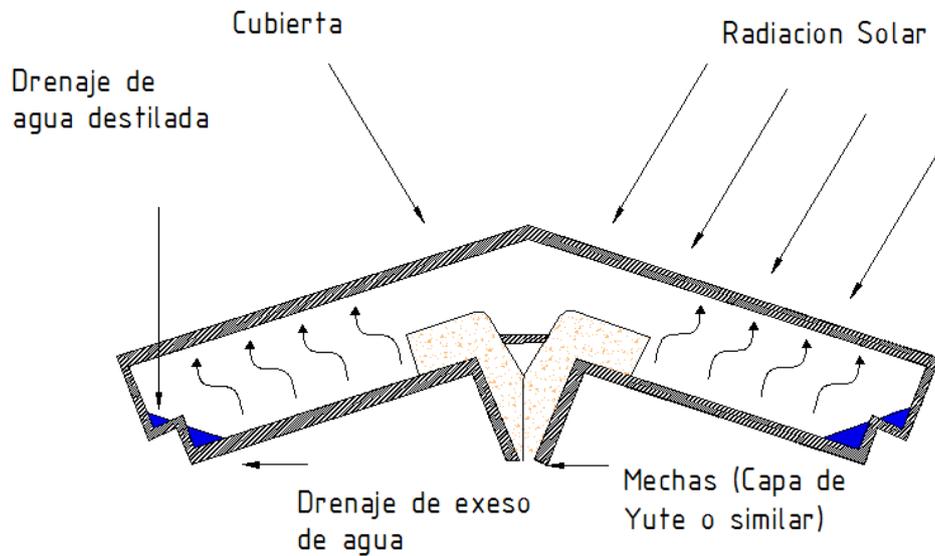
**Figura 2.21** Destilador de bodega de efecto múltiple.

### c) Destiladores solares de mecha (DS3)

En estos equipos, el agua de alimentación fluye lentamente a través de un material poroso -mecha- que absorbe la radiación. Presenta dos ventajas fundamentales sobre los destiladores solares de bodega. La primera es que permite que el material poroso por el que discurre el agua pueda inclinarse, con lo que se consigue un mejor ángulo con el Sol.

Esto se traduce en una menor reflexión, y una mayor superficie efectiva. La segunda ventaja radica en que el material que conforma la mecha permite tener una capa de agua a desalar con un espesor muy fino, que puede ser calentada más rápidamente y hasta una temperatura superior, al presentar una menor

capacidad calorífica. En cuanto a su forma geométrica, pueden construirse en varias configuraciones, aunque se dividen en dos grupos principales: de simple y de doble pendiente.



**Figura 2.22** Destilador solar de mecha.

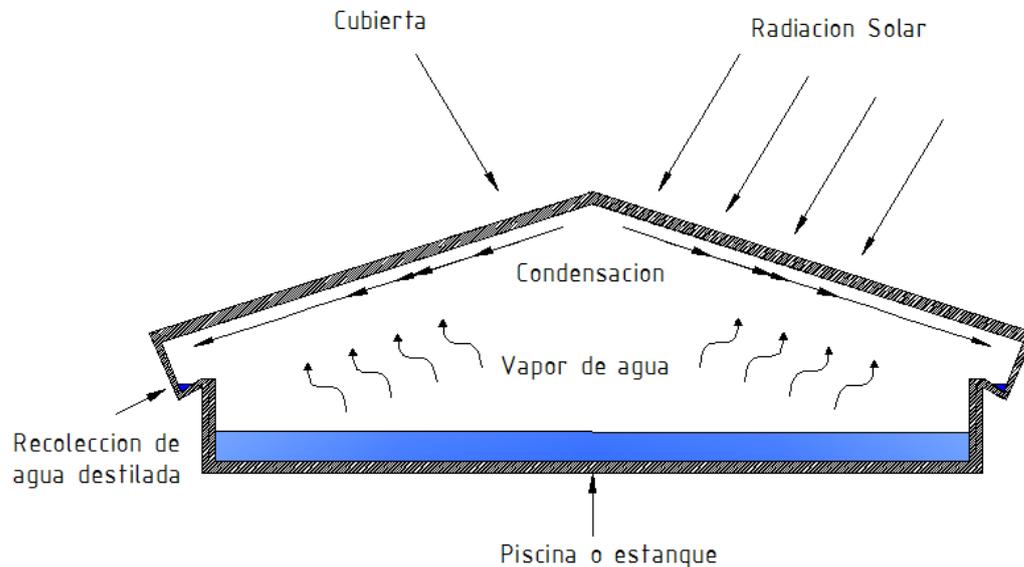
#### **d) Destilador solar de dos vertientes (DS4)**

Un destilador solar de dos vertientes permitirá llegar a obtener hasta medio litro de agua destilada en un día de sol. Aquí se aumenta el área del condensador poniendo dos cubiertas por encima del colector solar lo que nos ayudara con la recolección del agua.

Por lo general este es un destilador solar de gran tamaño con geometría triangular la misma que se utiliza en invernaderos donde se obtienen resultados de la radiación solar incidente sobre cada una de los condensadores con orientación fija en dirección Norte-Sur, se obtiene una eficiencia de hasta 50 %.

Un problema de este tipo de destilador solar es que, se encuentra que la evaporación en la cavidad de destilación es menor, a la que ocurre en canales

abiertos, a pesar de las altas temperaturas que prevalecen en ella.



**Figura 2.23** Destilador solar de dos vertientes.

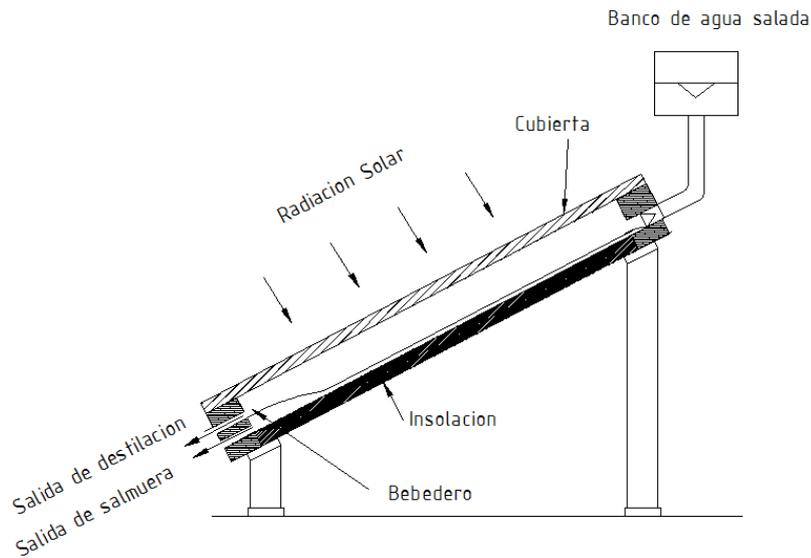
**e) El destilador solar inclinado de filtro (DS5)<sup>18</sup>**

Un destilador solar inclinado de filtro utiliza la acción capilar de las fibras para distribuir el agua de alimentación sobre la superficie entera del filtro en una capa delgada. El agua entonces se expone a la luz del sol, un destilador solar inclinado de filtro permite que una temperatura más alta se forme en la superficie colectora.

Este sistema es tan eficiente como el diseño del destilador solar de batea, pero su uso en el campo sigue siendo cuestionable debido a costes crecientes por el montaje, aislamiento, necesidad de limpieza continua del filtro la que involucra una cubierta desmontable

---

<sup>18</sup>[www.builditsolar.com](http://www.builditsolar.com)



**Figura 2.24** El destilador solar inclinado de filtro.

#### f) Destilador solar en escalera (DS6)<sup>19</sup>

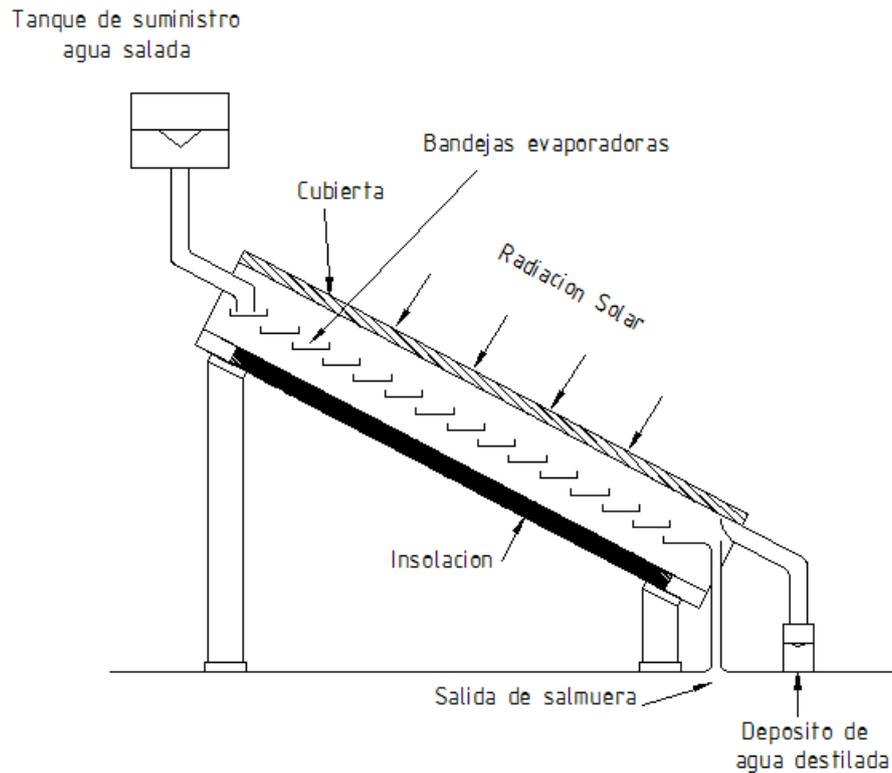
Si en vez de una charola, en la construcción del evaporador se utilizan varias charolas alargadas, dispuestas en forma de escalera, es posible mantener todos los puntos del evaporador a menor distancia del condensador inclinado. Por otro lado, es posible orientarlo adecuadamente hacia la posición promedio del Sol.

Una bandeja múltiple, consiste en una serie de bandejas negras horizontales bajas incluidas en un envase aislado con una cubierta transparente.

Este modelo se puede utilizar en latitudes más alejadas porque la unidad entera puede ser inclinada para permitir que los rayos del sol caigan perpendiculares a la superficie transparente. La característica de la inclinación, sin embargo, es menos importante en y cerca del ecuador donde hay menos cambio en dicha orientación. Aun cuando puede presentar una eficiencia de hasta 50% el sentido práctico de este diseño permanece dudoso debido a la complicada construcción

<sup>19</sup>[www.builditsolar.com](http://www.builditsolar.com)

que implica muchos componentes y al costo de fabricación de las bandejas múltiples y los requisitos del montaje.



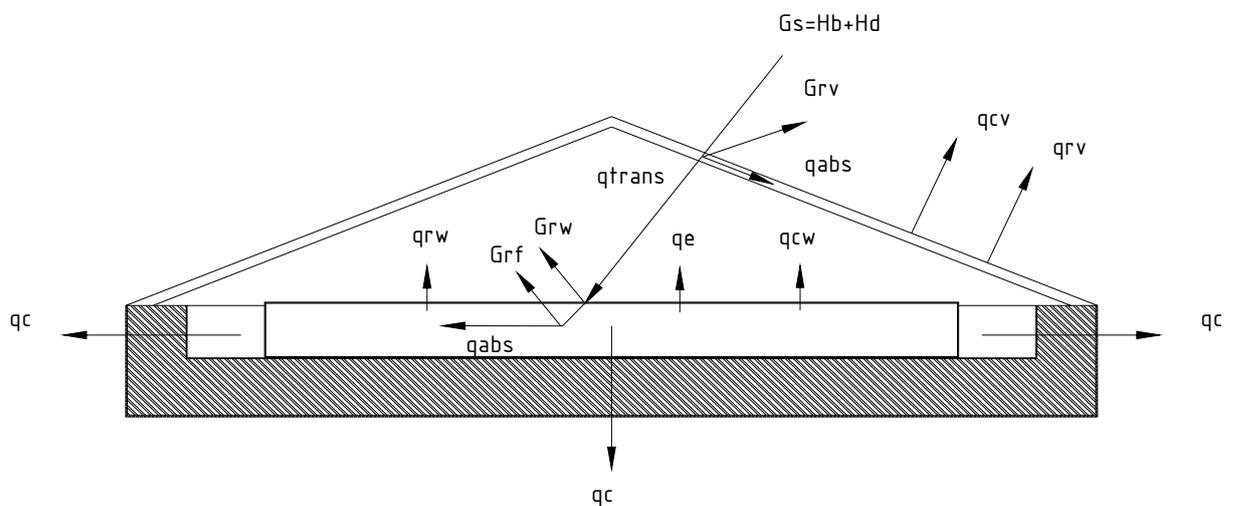
**Figura 2.25** Destilador solar en escalera.

## 2.9 Destiladores<sup>20</sup>

El destilador solar aprovecha el efecto denominado invernadero en las figuras anteriores desde la 2-20 a la 2-25 hemos expuesto una gran variedad de destiladores solares, en la figura siguiente se muestra un balance de energía muy común para un destilador de dos vertientes , que consiste en una superficie

<sup>20</sup> ALMANZA R.; Ingeniería de la Energía Solar, primera edición, pag163-175

cubierta por un material transparente y expuesta a los rayos solares, sufre un calentamiento debido a que la radiación solar que atraviesa la cubierta no es re irradiada, completamente hacia el exterior, ya que los materiales tienen la capacidad de absorber la radiación y a que la cubierta solo permite la salida parcial de la radiación, después de un cierto tiempo de exposición del destilador solar a los rayos del sol se ha de notar que empieza la formación de una película que apaña la cubierta, esto es porque la radiación que llega hacia la bandeja de agua transmite una cierta cantidad de energía para calentar el vapor de agua del medio, de ahí en adelante temperatura del agua se trata de estabilizar ganando energía hasta lograr tener un ritmo de producción de destilado proporcional a la diferencia de temperaturas del agua y de la cubierta, además gracias a la capacidad de almacenamiento de calor por parte del agua y de los materiales utilizados en la construcción de este, provoca que haya producción de agua destilada una o dos horas después de la puesta del sol.



**Figura 2.26** Esquema global que intervienen en el colector

Nota: Las ecuaciones, fórmulas y deducciones de que se realizan a continuación se basan en ALMANZA R.; Ingeniería de la Energía Solar, primera edición, pag 163-175.

A excepción de las formulas y deducciones en donde se cite la fuente.

### 2.9.1 Transferencia de calor y masa.

Este tipo de dispositivos de diseños simples y de ciclos sencillos de funcionamiento poseen los análisis de los procesos de transferencia de calor y masa sumamente complejos, lo que quiere decir que un análisis minucioso detallado y completo de todo el proceso sería sumamente elaborado, por lo que a criterio tomamos en cuenta los términos más relevantes que intervienen en el proceso de transferencia de calor y masa y los detallaremos a continuación.

### 2.9.2 Recurso solar ( $G_s$ )

De las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la energía solar disponible debemos considerar los siguientes puntos fundamentales en el diseño de destiladores solares:

**$G_s$ :** El destilador solar aprovecha la radiación directa y difusa para poder llevar a cabo el proceso térmico de transferencia de calor y masa.

**$G_{rv}$ :** La radiación al llegar al vidrio sufre reflexión, absorción y transmitancia por lo tanto la radiación que entra al destilador es:  $G_s(1 - \alpha_g)$  donde  $\alpha_g$ , es un factor que incluye la reflexión y la absorción de la radiación solar en el vidrio.

**$G_{rw}$ ,  $G_{rf}$ :** Posteriormente la radiación que ingresa al destilador choca contra la superficie del agua, aquí parte es reflejada y parte es absorbida y la mayoría llega al fondo de la charola en la cual parte de la radiación es nuevamente refleja y parte la mayor es absorbida, siendo esta:  $G_s(1 - \alpha_g)(1 - \alpha_a)$  donde  $\alpha_a$  es un factor que incluye la reflexión y absorción por el agua y la reflexión por el fondo del destilador.

Los valores<sup>21</sup> de  $\alpha_g$  y  $\alpha_a$  son 0.1 y 0.3 respectivamente.

Dentro del proceso de transferencia de calor y masa para nuestro modelo experimental tenemos los siguientes términos que están involucrados dentro del proceso térmico y que procederemos a definirlos a continuación:

### 2.9.3 Calor perdido por conducción (qc)

Para el caso en el cual el destilador se encontrare ubicado sobre una superficie o enterrado en la tierra deberíamos considerar la transferencia de calor como un solido semi-infinito, sin embargo nuestras condiciones previas de diseño establecen que nuestro modelo experimental se encuentra sobre una estructura lo que ocasiona que sufra perdidas de calor por conducción a través de la base y de las paredes del destilador.

Ahora considerando el área de transferencia de calor de las paredes con respecto a la de la base podemos suponer que la cantidad de calor que el sistema perdería a través de las paredes es relativamente despreciable con respecto a aquel calor que pierde a través de la base.

Para el cálculo del calor perdido por conducción a través de las paredes del equipo por unidad de área se determina mediante la siguiente formula.

$$qc = Kb * (Tw - Ta) \quad (2. 19)$$

Donde Kb es la resistencia térmica equivalente del aislante

$$Kb = \frac{1}{Req + \frac{1}{hct}} \quad (2. 20)$$

---

<sup>21</sup> COOPER, P. Some factors affecting the absorption of solar radiation in solar stills, 1972.

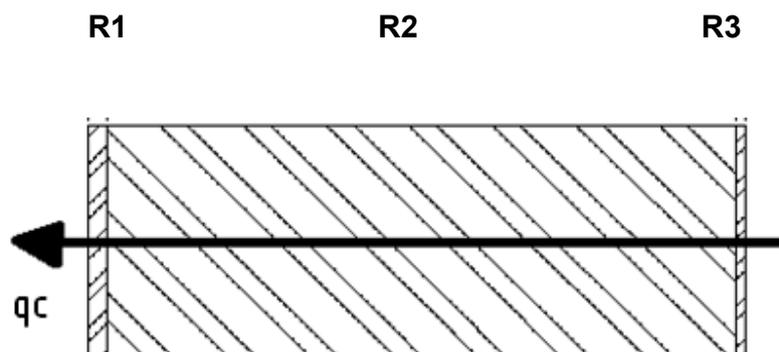
Donde:

hct: Coeficiente de transferencia de calor convectivo del fondo del destilador  
 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$ ;

T<sub>w</sub>: Temperatura media del agua [°C];

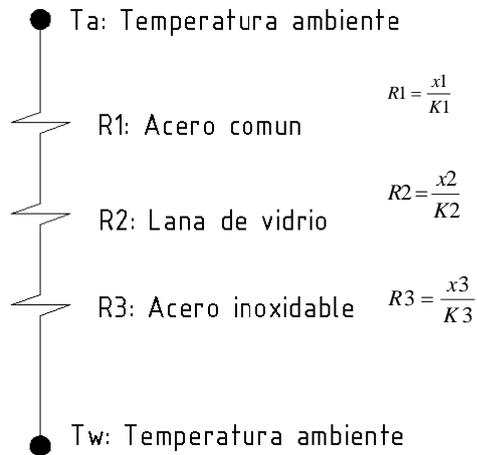
T<sub>a</sub>: Temperatura ambiente [°C].

**Resistencia equivalente de las paredes del colector:**



**Figura 2.27** Esquema del calor transferido por las paredes.

De aquí aplicamos la analogía de las mallas eléctricas usada comúnmente en la transferencia de calor, como podemos apreciar en la figura tenemos las tres resistencias térmicas conectadas en serie que corresponden a los materiales utilizados en la construcción del equipo.



**Figura 2.28** Analogía eléctrica del sistema

Por lo tanto tenemos que la resistencia equivalente es:

$$R_{eq} = \frac{x_1}{K_1} + \frac{x_2}{K_2} + \frac{x_3}{K_3} \quad (2. 21)$$

Donde:

Req: Resistencia térmica equivalente  $\left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}\right]$  :

X: Espesor del material [m]

K: Coeficiente de transferencia de calor por conducción  $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$

**Coeficiente de transferencia de calor convectivo del fondo del destilador:**

Para realizar el siguiente cálculo debemos tomar en cuenta la relación de la velocidad del viento para velocidades no superiores los 2 m/s como nos indica la ecuación según WATMUFF

$$h_{ct} = 2.8 + 3w \quad (2. 22)$$

Donde:

hct: Coeficiente de transferencia de calor convectivo  $\left[\frac{w}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right]$ ;

w: Velocidad promedio que existe en el área de influencia  $\left[\frac{m}{s}\right]$

#### 2.9.4 Calor perdido por radiación del vidrio (qrv)

De la superficie del vidrio se pierde calor por radiación y esta se puede calcular mediante la siguiente formula cuya ecuación está dada por la ley de Stefan Boltzmann.

$$qrv = \varepsilon_v * \sigma * [Tv^4 - Ts^4] \quad (2. 23)$$

Donde:

$\varepsilon_v$ : Emitancia del vidrio

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann  $\left[\frac{w}{m^2 K^4}\right]$

Tv: Temperatura del vidrio [ $^\circ K$ ]

Ts. Temperatura del cielo [ $^\circ K$ ]

#### 2.9.5 Calor perdido por convección del vidrio (qcv)

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado.

Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural.

La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

Debido a la velocidad del viento y a la diferencia de temperatura del vidrio y el aire existe pérdida de calor por el efecto combinado de la conducción y la convección que viene a estar dado por:

$$q_{cv} = h_{cv} * (T_v - T_a) \quad (2. 24)$$

Donde:

$h_{cv}$ : Coeficiente de transferencia de calor convectivo del vidrio  $\left[ \frac{w}{m^2 \text{ } ^\circ C} \right]$ ,

Con lo que podemos determinar qué:

$$h_{cv} = h_{ct} \quad (2. 25)$$

Y poder calcular el calor perdido por convección del vidrio

### **2.9.6 Calor perdido por radiación del agua (q<sub>rw</sub>)**

Es un tipo de energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las

configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.

En lo que respecta a la transferencia de calor es de interés la radiación térmica o forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. La radiación térmica suele corresponder a la banda de frecuencias del infrarrojo.

Todos los cuerpos a una temperatura por encima del cero (0) absoluto emiten radiación térmica. La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o reflejan radiación en diversos grados.

Sin embargo la radiación térmica suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que la radiación emitida por las regiones interiores de un material de este tipo nunca puede llegar a la superficie y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia dentro en dichos sólidos.

A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no necesita un medio de transmisión y puede ocurrir en el vacío. La transferencia de calor por radiación es la más rápida, a la velocidad de la luz. No sufre atenuación en el vacío.

El agua radia calor hacia el vidrio y la expresión para evaluar esta transferencia se obtiene de la ley de Stefan-Boltzmann, considerando que las placas entre las que hay radiación (superficie del agua y placa de vidrio) son planas y paralelas, por lo que el factor geométrico es la unidad, entonces la expresión es:

$$qr_w = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} * (T_w^4 - T_v^4) \quad (2. 26)$$

Donde:

$\varepsilon_w$ : Emitancia del agua

### 2.9.7 Calor perdido por convección natural (q<sub>cw</sub>)

Entre el agua y el vidrio hay un espacio ocupado por aire, y conforme el agua se va calentando y el vidrio también, pero en menor grado debido al efecto refrigerante del aire, empieza a haber corrientes de aire caliente de la superficie del agua hacia el vidrio, que provoca la pérdida de calor por convección natural.

Se puede demostrar que la relación fundamental de Nusselt de este proceso es del tipo:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2. 27)$$

Es decir la convección interior está en función del número de Nusselt, que a su vez es función de los números adimensionales de Grashof y de Prandtl

Por lo tanto tenemos que el número de Nusselt es igual a:

$$Nu = \frac{hc*L}{K} \quad (2. 28)$$

El número de Grashof a su vez está dado por:

$$Gr = \frac{L^3 * \rho^3 * g * \beta * \Delta T}{\mu^2} \quad (2. 29)$$

El número de Prandtl es:

$$Pr = \frac{c_{pa} * \mu}{K} \quad (2. 30)$$

Donde:

hc: Coeficiente de transferencia de calor por convección natural  $\left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right]$ ;;

L: Espacio entre el agua y el vidrio [m];

K<sub>a</sub>: Conductividad térmica del aire  $\left[\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}\right]$ ;

ρ: Densidad del aire  $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$ ;

β: Coeficiente de expansión volumétrica  $\left[\frac{1}{^\circ K}\right]$ ;

ΔT: Diferencia de temperatura entre el agua y el vidrio;

μ: Viscosidad del aire  $\left[\frac{Ns}{m^2}\right]$ ;

C<sub>pa</sub>: Calor específico del aire  $\left[\frac{J}{kg \text{ } ^\circ K}\right]$ .

El coeficiente de transferencia de calor por convección<sup>22</sup> hc, en un destilador solar de batea fue desarrollado por Dunkle usando una relación empírica de Jakob para convección libre en espacios cerrados y el criterio de Sharpley y Boelter para evaporación de agua en aire, relacionando los números de Nusselt, Prandtl y Grashof modificado.

$$Nu = C * (Gr * Pr)^n \quad (2. 31)$$

Y para el régimen turbulento o sea  $8.2 \times 10^5 < Gr < 10^7$  se tiene que C=0.075 y n=1/3; entonces:

$$Nu = 0.075 * (Gr * Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (2. 32)$$

---

<sup>22</sup> FUENTES, R. Teoría de la destilación solar en vacío. Arica. 1997

Podemos apreciar que el espacio existente entre el agua y el vidrio no interviene en esta transferencia de calor ya que se anula.

La transferencia de calor por convección natural dentro de un destilador solar se ve influenciada por la transferencia de masa simultánea (vapor de agua) lo que obliga a usar un Gr modificado, según Sharpley y Boelter:

$$Gr' = \frac{L^3 * \rho^3 * g * \beta' * \Delta T'}{\mu^2} \quad (2. 33)$$

Donde  $\beta' \Delta T'$  es:

$$\beta' \Delta T' = \left[ \frac{T_w - T_v}{T_v} + \frac{P_w - P_{wv}}{\frac{M_{as}}{M_{as} - M_w} * (P_r - P_w)} * \frac{T_w}{T_v} \right] \quad (2. 34)$$

Donde:

$P_w$ : Presión de vapor de agua a  $T_w$  [Pa];

$P_{wv}$ : Presión de vapor de agua a  $T_v$  [Pa];

$M_a$ : Peso molecular del aire [gr-mol];

$M_w$ : Peso molecular del agua [gr-mol].

El subíndice s significa que las propiedades son del aire saturado con vapor. El coeficiente de transferencia se obtiene sustituyendo los términos en la ecuación principal.

$$hc = 0.075 * Ka * \left[ \left( \frac{\rho_s^2 * g}{\mu_s^2} \right) * \left( \frac{C_{pa} * \mu}{Ka} \right) * \left( T_w - T_v + \frac{P_w - P_{wv}}{2.65 * P_T - P_w} * T_w \right) \right]^{1/3} \quad (2. 35)$$

Ahora bien; considerando valores para los parámetros las temperaturas

promedio de 55°C para el agua y 35°C para el vidrio el coeficiente es:

$$hc = 0.884 * \left( T_w - T_v + \frac{P_w - P_{wv}}{268.9 \times 10^3 - P_w} * (T_w + 273) \right)^{1/3} \quad (2.36)$$

Y con las presiones dadas a 55°C y 35°C

**Tabla 2.5** Presiones de vapor de agua<sup>23</sup>

Orden	Factor	Simbología	Unidad	Valor
1	Presión	P <sub>w</sub>	Pa	15758
2		P <sub>wv</sub>		5628

Y con estos valores podemos determinar el coeficiente de calor por convección natural.

Ahora bien considerando la curva típica de ebullición para agua a 1 atm mostrada en la figura siguiente<sup>24</sup>, nos encontramos en un régimen de ebullición de transición, ebullición de película inestable, o ebullición de película parcial es decir formando burbujas tan rápidamente que estas cubren la superficie formando un manto de vapor, puesto que este estado es muy inestable ya que la película desvanece y reaparece intermitentemente, esto hace que de una forma aleatoria la resistencia de la película incremente, reduciendo el flujo y la transferencia de calor.

Sin embargo esto hará un modelo térmico mucho más real de nuestro sistema para lo cual deberemos considerar el coeficiente de radiación efectivo  $h_r$  el mismo se expresa como:

<sup>23</sup> CENGEL, Y., BOLES, M., Termodinámica Tomo I. Cuarta edición. México. McGrawill. 2000. Apéndice 1. p 729

<sup>24</sup> INCROPERA, P., Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta Edición. México 1999. p 539

$$h_r = \frac{\epsilon \sigma (T_{sc}^4 - T_w^4)}{T_{sc} - T_w} \quad (2.37)$$

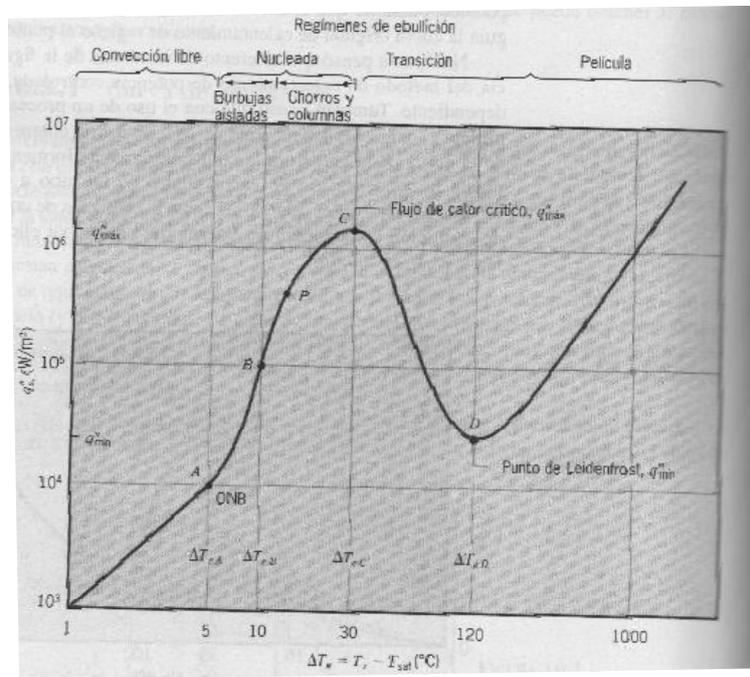
Donde:

$\epsilon$ : Emisividad de la superficie colectora

$T_s$ : Temperatura de la cubierta

$T_w$ : Temperatura de saturación del agua.

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman



**Figura 2.29** Curva típica de ebullición

Ahora bien se sugiere calcular el coeficiente de transferencia de calor total como.

$$h_T^{\frac{4}{3}} = hc^{\frac{4}{3}} + hr^{\frac{4}{3}} \quad (2.38)$$

Si  $hr < hc$ , se puede considerar una forma más simple de cálculo.

$$h_T = hc + \frac{3}{4}hr \quad (2.39)$$

Una vez determinado el coeficiente de transferencia de calor por convección total podemos determinar el calor perdido por convección del agua a partir de:

$$q_{cw} = h_T * (T_w - T_v) \quad (2.40)$$

### 2.9.8 Calor perdido por evaporación

Para el cálculo del calor perdido por evaporación primero debemos saber que el calor sensible del aire dentro del destilador es:

$$q_{cw} = \dot{m}_a * C_{pa} * (T_w - T_v) \quad (2.41)$$

Donde:

$\dot{m}_a$ : Flujo másico de aire  $\left[ \frac{Kg}{hr-m^2} \right]$

Igualando las ecuaciones 2-40 y 2-41 tenemos que:

$$\dot{m}_a = \frac{h_T}{C_{pa}} \quad (2.42)$$

El flujo de vapor de agua que sale de la superficie del agua junto con el aire es

$$\dot{m}_{vw} = \frac{h_T}{C_{pa}} * \frac{M_w}{M_a} * \frac{P_w}{P_T - P_w} \quad (2.43)$$

y la masa de vapor de agua que se condensa sobre el vidrio es

$$\dot{m}_{vc} = \frac{h_T}{C_{pa}} * \frac{M_w}{M_a} * \frac{P_v}{PT - P_v} \quad (2.44)$$

Por lo tanto, el flujo neto de vapor de agua es:

$$\Delta \dot{m}_v = \dot{m}_{vw} - \dot{m}_{vc} \quad (2.45)$$

$$\Delta \dot{m}_v = \frac{h_T}{C_{pa}} * \frac{M_w}{M_a} * \left( \frac{P_w}{PT - P_w} - \frac{P_v}{PT - P_v} \right) \quad (2.46)$$

$$\Delta \dot{m}_v = \frac{h_T}{C_{pa}} * \frac{M_w}{M_a} * \left( (P_w - P_v) * \frac{PT}{(PT - P_w)(PT - P_v)} \right) \quad (2.47)$$

Entonces el calor transferido por evaporación es

$$q_e = \frac{h_T}{C_{pa}} * \frac{M_w}{M_a} * \left( (P_w - P_v) * \frac{PT}{(PT - P_w)(PT - P_v)} \right) * \lambda \quad (2.48)$$

Donde:

$\lambda$ : Calor latente de evaporación  $\left[ \frac{KJ}{kg} \right]$

PT: Presión total [Pa]

Aproximando:

$$\frac{PT}{(PT - P_w)(PT - P_v)} \equiv \frac{1}{PT} \quad (2.49)$$

Entonces tenemos que

$$qe = \frac{h_T}{C_{pa}} * \frac{M_w}{M_a} * (P_w - P_v) * \frac{\lambda}{P_T} \quad (2.50)$$

$$qe = h_e * (P_w - P_v) \quad (2.51)$$

Definiendo como

he: Coeficiente de transferencia de calor evaporativo  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$ ;

$$h_e = \frac{h_T}{C_{pa}} * \frac{M_w}{M_a} * \frac{\lambda}{P_T} \quad (2.52)$$

Con los valores promedio se obtiene

$$h_e = 0.013 h_T \quad (2.53)$$

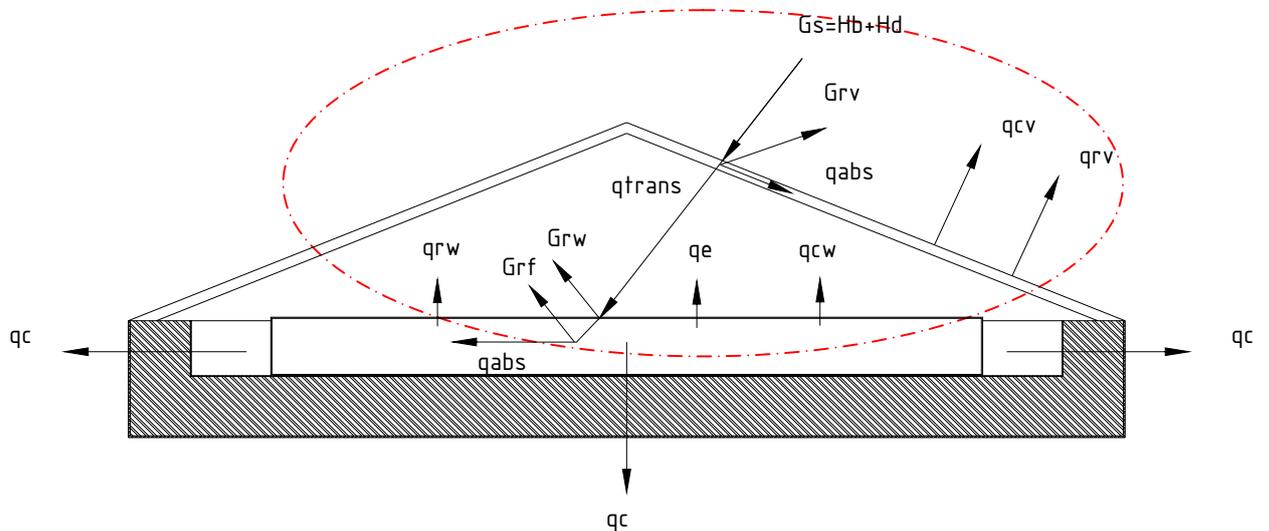
Y entonces el calor valorativo es

$$qe = 13 \times 10^{-3} h_T * (P_w - P_v) \quad (2.54)$$

## 2.10 Balance Global y eficiencia

Para este análisis vamos a considerar a dos sistemas aislados por partes y posteriormente consideraremos el conjunto como un todo, como ya habíamos explicado tomamos en consideración los valores más representativos que inducen pérdida de calor en el sistema.

### 2.10.1 Balance de calor sobre la cubierta



**Figura 2.30** Balance de Energía sobre el vidrio

De acuerdo con el esquema encerrado en el círculo entre punteado mostrado en la figura 2.30 y tomando en consideración el principio de la conservación de la energía tenemos que:

*Energía que entra – Energía que sale = Energía que se almacena*

$$q_{rw} + q_{cw} + q_e + \alpha_g * G_s - (q_{rv} + q_{cv}) = q'c \quad (2. 55)$$

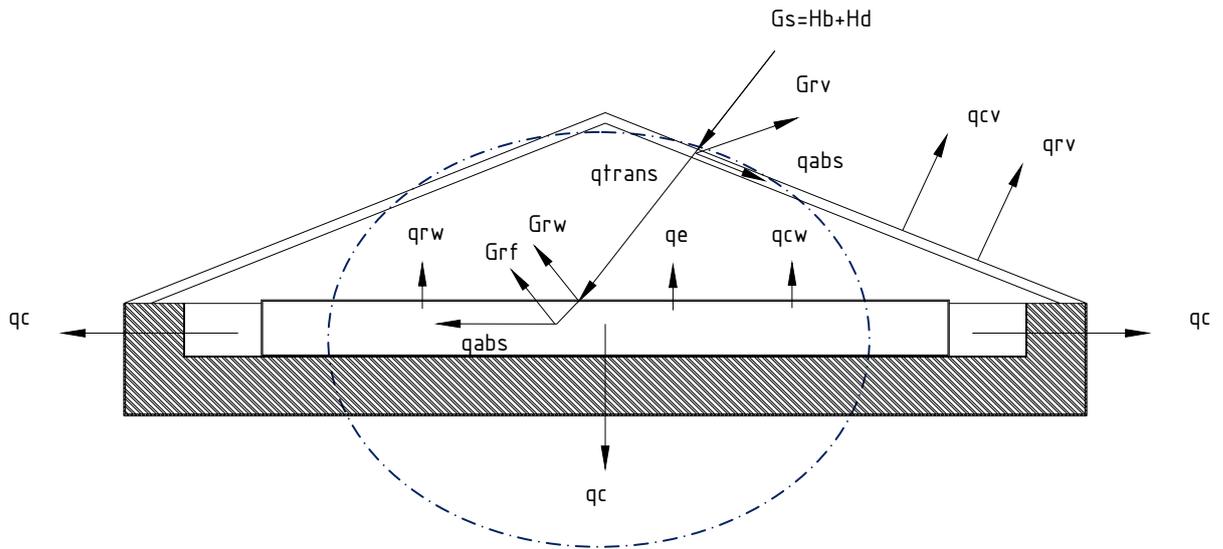
$$q'c = \text{Calor almacenado por la cubierta} \quad (2. 56)$$

Donde:

$\alpha_g$ : Coeficiente que incluye la reflexión y la absorción de la radiación solar en el vidrio y es igual a 0.1 aproximadamente.

$q'c$ : Calor almacenado por la cubierta  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

### 2.10.2 Balance del calor sobre el agua



**Figura 2.31** Balance de calor sobre el agua.

De acuerdo con el esquema encerrado en la circunferencia mostrado en la figura 2.31 y tomando en consideración el principio de la conservación de la energía tenemos que:

*Energía que entra – Energía que sale = Energía que se almacena*

$$G_s * (1 - \alpha_g)(1 - \alpha_a) - (q_{rw} + q_{cw} + q_e + q_c) = q'a \quad (2.57)$$

$$q'a = \text{Calor almacenado en el interior} \quad (2.58)$$

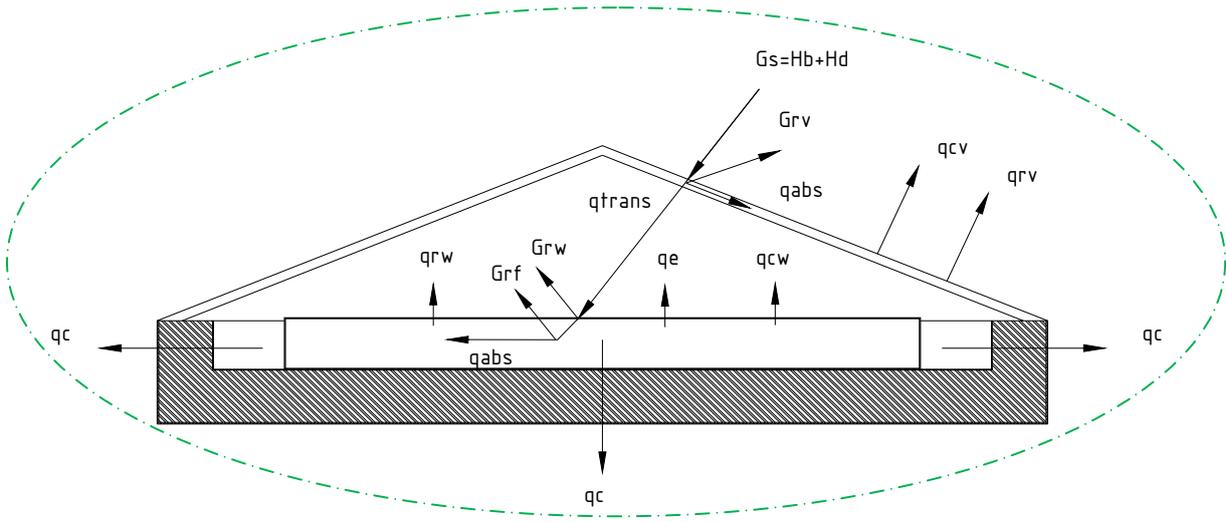
Donde:

$\alpha_a$ : Coeficiente que incluye la reflexión y la absorción de la radiación solar por

el agua y por el fondo del destilador y es igual a 0.3 aproximadamente

$q'a$ : Calor almacenado en el interior  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

### 2.10.3 Balance global sobre el colector solar



**Figura 2.32** Balance global de energía sobre el dispositivo.

De acuerdo con el esquema mostrado en la figura 2.32 y tomando en consideración el principio de la conservación de la energía tenemos que:

*Energía que entra – Energía que sale = Energía que se almacena*

$$G_s * (1 - \alpha_g)(1 - \alpha_a) + \alpha_g * G_s - (q_{rv} + q_{cv} + q_c) = q'_c + q'a \quad (2. 59)$$

Siendo el calor almacenado por unidad de área

$$q_t = q'_c + q'a \quad (2. 60)$$

Expresando esto en función del área del colector solar, tenemos que la

capacidad de calor almacenada por el dispositivo es:

$$QT = qt * A \quad (2. 61)$$

Donde

QT: Calor absorbido por el sistema  $\left[\frac{W-hr}{m^2-day}\right]$ ;

A: Área de captación de la energía solar  $[m^2]$

### 2.11 Cantidad de calor necesaria para calentar y evaporar

Aquí vamos a calcular la cantidad de calor necesaria para poder elevar la temperatura tanto de la cubierta como del agua, y de esta última poder alcanzar su evaporación.

Empezaremos diciendo que el vidrio inicialmente se encuentra a la temperatura ambiente y que posteriormente este elevará su temperatura paulatinamente hasta alcanzar un valor  $T_v$ , dicho esto tenemos que este cuerpo absorberá determinada cantidad de calor del total disponible el mismo que lo determinamos por la siguiente fórmula:

$$Q_v = m_v * C_{pv} * \Delta T \quad (2. 62)$$

Donde la temperatura varía desde una inicial de operación hasta una cierta temperatura  $T_v$  tendríamos lo siguiente:

$$Q_v = m_v * C_{pv} * (T_v - T_a) \quad (2. 63)$$

La masa del vidrio viene dada por:

$$mv = \rho v * Vv \quad (2. 64)$$

La misma que puede ser expresada en función de su área y que para fines prácticos podemos utilizar el área de captación de la energía solar:

$$mv = \rho v * Av * Ev \quad (2. 65)$$

Donde:

$Qv$ : Cantidad de calor necesario para calentar el vidrio  $\left[ \frac{W-hr}{m^2-day} \right]$

$mv$ : Masa del vidrio [ $gr$ ]

$Ev$ : Espesor del vidrio [m]

$C_{pv}$ : Calor específico del vidrio  $\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$

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

$Tv$ : Temperatura de equilibrio del vidrio [ $^{\circ}C$ ]

$\rho v$ : Densidad del vidrio  $\left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$

$Av$ : Área del vidrio [ $m^2$ ]

$Vv$ : Volumen del vidrio [ $cm^3$ ]

Ahora debemos estimar la cantidad de calor necesaria para calentar y evaporar el agua de la bandeja, para esto se requiere el dato del volumen, este viene dado por las dimensiones de la bandeja del colector con lo cual procedemos a determinar el valor de la masa de agua que colocaremos en nuestra bandeja colectora.

$$ms = \rho w * V \quad (2. 66)$$

Donde:

$\rho_w$ : Densidad del agua  $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$

$V$ : Volumen del agua  $[cm^3]$

Con el valor de  $m_s$  podemos determinar el siguiente calor sensible necesario para calentar el agua:

$$Q_{ca} = m_s * C_p * (T_w - T_a) \quad (2. 67)$$

Donde:

$Q_{ca}$ : Cantidad de calor necesaria para calentar el agua  $\left[\frac{W-hr}{m^2-day}\right]$ ;

$m_s$ : Masa de agua en el colector  $[kg]$

$C_p$ : Calor específico del agua  $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}\right]$

$T_a$ : Temperatura ambiente  $[^\circ C]$

$T_w$ : Temperatura de equilibrio del agua  $[^\circ C]$

Para que exista la evaporación del agua, el sistema debe alcanzar el cambio de estado de fase, es decir debe tener una energía extra para que el sistema pueda cumplir su función, dicho lo anterior tenemos que:

$$Q_{ev} = m_{ev} * \lambda. \quad (2. 68)$$

El porcentaje de masa evaporada es igual a:

$$x = \frac{m_{ev}}{m_s} \quad (2. 69)$$

Por lo tanto tenemos que:

$$Q_{ev} = x * m_s * \lambda. \quad (2.70)$$

Donde

$Q_{ev}$ : Cantidad de calor necesaria para evaporar x porcentaje de agua  $\left[\frac{W-hr}{m^2-day}\right]$ ;

x: Porcentaje de masa evaporada [gr]

$\lambda$ : Entalpia de vaporización a la temperatura  $T_w$  en  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Entonces tenemos que la cantidad necesaria para calentar el vidrio, calentar el agua de la bandeja y evaporar cierto porcentaje de la misma viene dada por:

$$QN = Q_{cv} + Q_{ca} + Q_{ev} \quad (2.71)$$

Por lo tanto la demanda energética del sistema será:

$$L = QN = Q_{cv} + Q_{ca} + Q_{ev} \quad (2.72)$$

## 2.12 Eficiencia de un destilador solar<sup>25</sup>

La intensidad de la energía solar que cae sobre el destilador es el parámetro más importante que afecta la producción de agua del destilador solar. La cantidad de agua destilada producida es la cantidad de energía utilizada en la vaporización del agua en el destilador sobre el calor latente de vaporización del agua. La eficiencia del destilador solar es la cantidad de energía utilizada en la

---

<sup>25</sup> [www.solar.nmsu.edu](http://www.solar.nmsu.edu)

vaporización de agua en el destilador sobre la cantidad de incidencia de energía solar en el destilador.

Esto puede ser expresado como:

**Producción del destilador solar teórica:**

$$Me = \frac{QT}{\lambda} \quad (2.73)$$

**Eficiencia del destilador solar teórica:**

$$eficiencia = \frac{QN}{G} \quad (2.74)$$

Donde:

*Me*: Cantidad de agua destilada teórica. [gr]

*QT*: Cantidad de calor almacenada por el dispositivo.

$\lambda$ : Calor latente de vaporización del agua.  $\left[\frac{J}{kg \text{ } ^\circ K}\right]$

*ms*: masa de agua en el colector. [gr].

*G*: energía que llega al colector  $\left[\frac{W-hr}{m^2-day}\right]$ ;



## CAPÍTULO 3

# ALTERNATIVAS DE SELECCIÓN

### 3.1 Variables utilizadas para calificación.

**Eficiencia:** Este parámetro se refiere a la característica fundamental de funcionamiento de todos los equipos, para los destiladores solares es la cantidad de energía utilizada en la vaporización del agua sobre la cantidad de incidencia sobre el destilador solar.

**Mantenimiento:** Se refiere al costo que esto demanda sobre un equipo, lo que repercute tanto en el tiempo de vida como, costo del equipo y eficiencia del mismo, un equipo que requiere mantenimiento mínimo proveerá una mayor comodidad al usuario.

**Costo:** Se refiere al valor correspondiente al costo de materiales y mano de obra que intervendrán en la construcción del equipo.

**Fabricación:** Es el nivel de complejidad que presenta el modelo experimental al momento del montaje además tomamos también en cuenta la precisión que

presenta dicho equipo.

**Vida útil:** Es el tiempo promedio en el cual el diseñador y constructor da como uso o servicio a su equipo de acuerdo a los materiales que utiliza y tomando en cuenta sus parámetros de diseño.

### 3.2 Matriz de selección

La matriz que presentamos a continuación está representada todos los aspectos que debemos considerar al momento de seleccionar el mejor equipo o alternativa que la vayamos a realizar.

**Tabla 3.1** Matriz de Selección.

Aspectos	Calificación	Alternativas de Selección					
		DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6
<b>Técnicas 50</b>							
Facilidad de Trabajo	10	8	8	7	9	7	8
Facilidad de Operación	15	15	15	13	15	14	13
Mantenimiento	5	3	3	2	4	3	2
Disponibilidad de materiales	15	14	14	12	14	13	14
Funcionalidad	5	3	3	3	4	2	2
<b>Económicas 30</b>							
Costo de fabricación	12	11	11	9	10	11	11
Costo de operación	8	9	9	10	11	8	9
Transporte	10	10	10	8	10	9	9
<b>Complementarias 20</b>							
Complejidad	10	10	10	8	9	8	7
Seguridad de uso	10	10	10	9	10	9	9
<b>Puntuación Técnica Total</b>	<b>100</b>	<b>93</b>	<b>93</b>	<b>81</b>	<b>96</b>	<b>84</b>	<b>84</b>

Como podemos apreciar de la tabla 3.1, la opción más viable según los criterios establecidos en el inicio del capítulo es el *DESTILADOR SOLAR DE DOS VERTIENTES* (DS4).

### 3.3 Matriz de elaboración y geometría.

El modelo experimental de destilador solar a construir será el de dos vertientes, teóricamente con un ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar donde se desea instalar el equipo que en nuestro caso es de 11°, pero por limitaciones encontradas en la fabricación tenemos que elevarlo a los 25°.

Para la realización del modelo experimental tomaremos en cuenta consideraciones preliminares ya mediadas o establecidas en proyectos anteriores tales como son temperatura ambiente, velocidad de viento, temperatura de la placa o de superficie colectora, temperatura de saturación del agua, así como también consideramos las medidas exteriores del dispositivo, e espesor del aislante, adicionalmente realizaremos el diseño experimental para el área de 1 metro cuadrado, todas estas consideraciones la mostramos en la tabla siguiente.

La realización del proyecto se basara en el método inductivo además nos basaremos en la matriz de selección.

**Tabla 3.2** Parámetros de diseño establecidos.

Nº	Parámetro	Valor	Unidades	Justificación
1	Temperatura Ambiente (Ta)	18	°C	Medida en Sangolquí
2	Velocidad del Viento	1.2	m/s	Medida en Sangolquí
3	Temperatura de la superficie absorbadora (Tsa)	70	°C	Obtenida experimentalmente por experiencias anteriores
4	Temperatura de Saturación (Tst)	92	°C	Tempera a la cual el agua hierve en la sierra

**Tabla 3.3** Parámetros de diseño asumidos.

1.	Colector Solar (Acero inoxidable)	840*1200*0.75	mm	Estandarizar a 1m <sup>2</sup> de superficie
2.	Espesor de Aislamiento de Lana de Vidrio	50.8	mm	Requerida para minimizar las perdidas
3.	Dimensiones exteriores del destilador	1307*946.1	mm	Obtenida de la alternativa de selección
4.	Bandeja colectora (Acero inoxidable)	600*900*0.75	mm	Obtenida

Por las consideraciones de diseño indicadas anteriormente definimos una estructura base a partir de la cual procederemos al análisis térmico, cálculo de la eficiencia teórica y pruebas de funcionamiento utilizando las consideraciones recomendadas y la viabilidad de las acciones y materiales a implementar, para alcanzar el diseño más adecuado de modelo experimental de destilador solar.

## **CAPÍTULO 4**

### **DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL**

#### **4.1 Consideraciones previas**

El modelo experimental que hemos elegido de acuerdo al análisis que previamente realizamos en el capítulo 3 es un destilador solar de dos vertientes.

Inicialmente realizaremos el cálculo del recurso solar, para posteriormente con este modelo asumido procederemos a realizar el análisis térmico que comprende el cálculo de las pérdidas de calor tanto por conducción, radiación y convección, así como también el cálculo del calor ganado por el dispositivo, para poder encontrar el número de horas requeridas para la evaporación de cierta cantidad de agua, que para nuestro caso y por las consideraciones iniciales de fabricación el volumen de la bandeja colectora es de 5 litros de agua de acuerdo a las dimensiones de la bandeja colectora, en la tabla siguiente establecemos la temperatura del agua en el interior del dispositivo a la que asumimos se encontrara durante su funcionamiento, la temperatura de la superficie del vidrio tomada por experiencias previas, así como también otras consideraciones necesariamente asumidas previo al diseño.

**Tabla 4.1** Parámetros de diseño experimental

Nº	Parámetro	Valor	Unidades
1	Volumen de Agua	5.4	Lt
2	Temperatura Ambiente (Ta)	22	°C
3	Velocidad del Viento	1.2	m/s
4	Temperatura del agua (Tw)	55	°C
5	Temperatura de Saturación (Tst)	92	°C
6	Temperatura del vidrio	35.5	°C
7	Espesor de Aislamiento de Lana de Vidrio	50.8	mm
8	Bandeja colectora (Acero inoxidable)	600*900*10	mm <sup>3</sup>
9	Área del colector solar	1	m <sup>2</sup>

Tomando en cuenta los parámetros de diseño de la tabla 4.1 procedemos a realizar el diseño del modelo experimental

#### **4.2 Estimación del recurso solar.**

Los cálculos realizados a continuación son basados en el libro de: DUFFIE, J. A. Y BECKMAN, W. A., Solar Energy Thermal Processes Primera ed. Nueva York, 1974.

Con excepción de aquellas fórmulas en las cuales citamos la fuente.

Inicialmente debemos establecer las condiciones de lugar donde va a operar el equipo e imponernos por motivos de ejemplo el día a calcular el recurso solar

**Latitud de Sangolquí<sup>26</sup> S 0° 15`.**

**Se calcula la radiación para el día representativo de cada mes:**

Como ejemplo a continuación se calcula para enero y  $n = 17$

---

<sup>26</sup> [www.igm.gov.ec/cms/files/cartabase/enie/ENIEIII\\_B3.htm](http://www.igm.gov.ec/cms/files/cartabase/enie/ENIEIII_B3.htm)

$$\phi = -\frac{15}{60}$$

$$\phi = -0.25$$

$$n = 17 \quad \text{Día representativo del mes}$$

**Declinación:**

$$\delta = 23.45 * \text{sen} \left\{ \left[ \frac{360 * (284 + n)}{365} \right] * \frac{\pi}{180} \right\}$$

$$\delta = -20.9$$

**Ángulo del Ocaso o Semiángulo Horario del día n:**

$$\omega_s = \text{acos} \left[ -\tan \left( \delta * \frac{\pi}{180} \right) * \tan \left( \phi * \frac{\pi}{180} \right) \right]$$

$$\omega_s = 1.57 \text{ rad}$$

$$\omega_s = 90.10 (^\circ)$$

**Número de horas de sol teóricas:**

$$N = \frac{2}{15} * \omega_s$$

$$N = 12.0 \text{ Horas}$$

**Constante Solar:**

$$G_{sc} = 1353 \frac{W}{m^2}$$

**Irradiación diaria solar promedio extraterrestre sobre superficie horizontal (Ho):**

$$H_o = \frac{24 \cdot G_{sc}}{\pi} \left[ \left( 1 + 0.033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) [A + B] \right]$$

$$A = \cos \left( \phi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \cos \left( \delta \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \text{sen} \left( \omega_s \cdot \frac{\pi}{180} \right)$$

$$B = \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_s}{360} \cdot \text{sen} \left( \phi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \text{sen} \left( \delta \cdot \frac{\pi}{180} \right)$$

$$H_o = 9523.80 \frac{W \cdot hr}{m^2 \text{ dia}}$$

**Irradiación diaria solar promedio terrestre sobre superficie horizontal (H):**

$n_r = 4.6665$  Ver Tabla 5,2; número de horas de luz solar real

$a = 0.23$ ;  $b = 0.56$  Ver tabla 2.4; valores de constantes a y b.

$$H = H_o * \left[ a + b * \left( \frac{n_r}{N} \right) \right]$$

$$H_o = 4262.27 \frac{W \cdot hr}{m^2 \text{ dia}}$$

**Irradiación diaria solar difusa promedio (Hd):**

$$KT = \frac{H}{H_o}$$

Índice de claridad

$$KT = 0.448$$

$$H_d = H * [1.39 - 4.03 * KT + 5.53 * KT^2 - 3.11 * KT^3]$$

$$H_d = 1769.924 \left( \frac{w*hr}{m^2-dia} \right)$$

**Irradiación diaria solar directa promedio (Hb):**

$$H_d = H - H_b$$

$$H_d = 2492.35 \frac{W * hr}{m^2 dia}$$

**Datos de heliofanía para diferentes años:**

**Tabla 4.2 Heliofanía**

Mes	1996	1997	1998	1999	2000	Suma	Promedio Anual	Promedio Diario
Enero	119,70	165,10	159,20	128,10	151,20	723,30	144,66	4,67
Febrero	104,40	149,90	124,30	87,90	127,10	593,60	118,72	4,24
Marzo	120,50	111,00	132,30	37,00	119,30	520,10	104,02	3,36
Abril	131,70	147,70	126,60	141,00	111,20	658,20	131,64	4,39
Mayo	168,40	157,10	133,30	134,50	89,70	683,00	136,6	4,41
Junio	139,70	148,20	182,20	124,90	162,60	757,60	151,52	5,05
Julio	220,50	246,10	179,50	198,10	183,40	1027,60	205,52	6,63
Agosto	223,30	231,30	190,70	198,20	160,70	1004,20	200,84	6,48
Septiembre	199,40	161,70	184,60	130,30	137,00	813,00	162,6	5,42
Octubre	168,80	170,80	170,00	156,00	201,50	867,10	173,42	5,59
Noviembre	240,00	105,90	175,50	169,20	178,10	868,70	173,74	5,79
Diciembre	191,50	179,70	216,80	128,80	166,00	882,80	176,56	5,70
Fuente: Quito INAMHI-INNAQUITO							Suma	61,716
							Promedio	5,143

El valor de 5.14 horas promedio es el dato que utilizamos como nuestro tiempo

de funcionamiento del equipo.

**Tabla 4.3** Ángulos y Radiación Mensual

Mes	n	$\delta$	$\omega_s$	N	Ho
		(°)	(°)	Hr	(W-hr/m <sup>2</sup> día)
Enero	17,00	-20,92	90,10	12,01	9523,98
Febrero	47,00	-12,96	90,06	12,01	9849,48
Marzo	75,00	-2,42	90,01	12,00	10379,39
Abril	105,00	9,41	89,96	11,99	9851,55
Mayo	135,00	18,79	89,92	11,99	9878,30
Junio	162,00	23,09	89,90	11,99	9197,88
Julio	197,00	21,36	89,90	11,99	9882,26
Agosto	228,00	13,46	89,94	11,99	10118,82
Septiembre	258,00	2,22	89,99	12,00	9985,04
Octubre	288,00	-9,59	90,04	12,01	10289,90
Noviembre	318,00	-18,91	90,09	12,01	10082,96
Diciembre	344,00	-23,05	90,11	12,01	9853,78

**Tabla 4.4** Radiación directa y difusa Mensual

Mes	nr	H	KT	Hd	Hb
		(W-hr/m <sup>2</sup> día)		(W-hr/m <sup>2</sup> día)	(W-hr/m <sup>2</sup> día)
Enero	4,67	4262,28	0,45	1769,96	2492,32
Febrero	4,24	4212,97	0,43	1830,96	2382,01
Marzo	3,36	4012,33	0,39	1921,31	2091,02
Abril	4,39	4284,07	0,43	1831,47	2452,60
Mayo	4,41	4305,20	0,44	1836,43	2468,77
Junio	5,05	4285,95	0,47	1706,68	2579,27
Julio	6,63	5333,59	0,54	1796,66	3536,93
Agosto	6,48	5388,61	0,53	1845,46	3543,15
Septiembre	5,42	4822,32	0,48	1847,95	2974,37
Octubre	5,59	5051,66	0,49	1901,30	3150,36
Noviembre	5,79	5041,47	0,50	1859,05	3182,42
Diciembre	5,70	4882,24	0,50	1818,83	3063,41
				Sumatoria	33916,64
				Promedio	2826,39
				Menor	2091,02

Como podemos apreciar en la tabla anterior consideramos al mes de Marzo como el de más baja irradiación, dato con el cual procederemos a la estimación del tiempo requerido para que nuestro equipo pueda cumplir su objetivo.

**Tabla 4.5** Datos de constantes utilizados en el cálculo de la radiación solar

Phi	-0.25	(°)	Latitud
Gsc	1353	(W/m <sup>2</sup> )	Constante Solar
a	0.23	Constantes del modelo de Armstrong Modificado	
b	0.56		

Siendo  $G_s = H$  la radiación solar original directa más difusa que llega al sistema ya que este equipo puede calentar su interior únicamente con la radiación difusa.

### 4.3 Diseño térmico

El diseño térmico de nuestro modelo experimental lo llevaremos a cabo utilizando las ecuaciones descritas en el marco teórico de nuestro escrito expuesto dentro del capítulo 2, considerando el modelo a desarrollarse seleccionado las alternativas de selección correspondiente al capítulo 3.

Previamente estableceremos los valores de las constantes utilizadas para los cálculos posteriores, la determinación del recurso solar para nuestro equipo se lo hará con el valor más bajo de irradiación solar directa e irradiación solar difusa, los balances globales de energía se los realizara por separado tanto para la cubierta como para el cuerpo del destilador.

A continuación detallaremos los valores de nuestras constantes.

#### 4.3.1 Valores de las constantes utilizadas.

$T_w$	= 55 [°C],	Temperatura media del agua <sup>27</sup> ;
$T_a$	= 16 [°C],	Temperatura ambiente <sup>26</sup> ;
$X_1$	= 0.003 [m],	Espesor del acero común A-36 <sup>28</sup> ;
$K_1$	= 60.5 $\left[\frac{w}{m \cdot ^\circ C}\right]$ ,	Conductividad térmica para el acero A-36 <sup>29</sup> ;
$X_2$	= 0.051 [m]	Espesor de lana de vidrio <sup>27</sup> ;
$K_2$	= 60.5 $\left[\frac{w}{m \cdot ^\circ C}\right]$ ,	Conductividad térmica de lana de vidrio <sup>28</sup> ;
$X_3$	= 0.002 [m],	Espesor del acero inoxidable <sup>27</sup> ;
$K_3$	= 14.9 $\left[\frac{w}{m \cdot ^\circ C}\right]$ ,	Conductividad térmica del acero inoxidable <sup>28</sup> ;
$w$	= 1.2 $\left[\frac{m}{s}\right]$ ,	Velocidad viento promedio <sup>26</sup> ;
$\epsilon_v$	= 0.8,	Emitancia del vidrio <sup>30</sup> ;
$\sigma$	= 5.6697 $\times 10^{-8} \left[\frac{w}{m^2 K^4}\right]$ ,	Constante de Stefan Boltzmann <sup>31</sup> ;
$T_v$	= 35.5 [°C],	Temperatura del vidrio <sup>27</sup> ;
$T_{sc}$	= 90 [°C],	Temperatura de la superficie colectora <sup>27</sup> ;
$T_s$	= 0.0522 $\times (T_a)^{1.5}$ [°K],	Temperatura del cielo <sup>32</sup> ;
$\epsilon_w$	= 0.96	Emitancia del agua <sup>33</sup> ;

---

<sup>27</sup> Estimada en experiencias anteriores.

<sup>28</sup> Consideraciones preliminares de diseño.

<sup>29</sup> INCROPERA, P., Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta Edición. México 1999. Apéndice A. p 827

<sup>30</sup> MILLS, F., Transferencia de calor, Primera edición. Los Ángeles. 1995. Tabla 1.3. p 15.

<sup>31</sup> MILLS, F., Transferencia de calor, Primera edición. Los Ángeles. 1995. Tabla 1.3. p 512.

<sup>32</sup> BENAVIDES E. Diseño y Construcción de una cocina solar experimental, de tipo cilíndrico parabólico con aplicación al sector rural marginal. Sangolquí. 2006. p 126.

<sup>33</sup> INCROPERA, P., Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta Edición. México 1999. Apéndice A. p 853

$\epsilon_a$	= 0.19	Emitancia del acero inoxidable <sup>34</sup> ;
$K_a$	= $26300 \left[ \frac{w}{m \text{ } ^\circ\text{C}} \right]$	Conductividad térmica del agua <sup>35</sup>
$\rho$	= $1.1614 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$	Densidad del aire <sup>33</sup> ;
$\beta$	= $1/300 \left[ \frac{1}{^\circ K} \right]$	Coefficiente de expansión volumétrica <sup>33</sup> ;
$\mu$	= $184.6 \times 10^{-7} \left[ \frac{N \cdot s}{m^2} \right]$	Viscosidad del aire <sup>33</sup> ;
$C_{pa}$	= $1.007 \left[ \frac{J}{kg \text{ } ^\circ K} \right]$	Calor específico del aire <sup>33</sup> .
$\lambda$	= $2333000 \left[ \frac{KJ}{kg} \right]$ ,	Calor latente de evaporación <sup>36</sup>
$P_T$	= 101.325 [KPa]	Presión total <sup>37</sup>
$A$	= 1 [m <sup>2</sup> ]	Área de captación de la energía solar <sup>27</sup>
$E_v$	= 0.004 [m]	Espesor del vidrio <sup>27</sup>
$m_s$	= 2.97 [kg]	Masa de agua en el colector <sup>27</sup> ;
$T_w$	= 55 [°C]	Temperatura de equilibrio del agua <sup>26</sup>
$x$	= 0.25	Porcentaje de masa evaporada <sup>26</sup>
$\rho_v$	= $2500 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right]$	Densidad del vidrio <sup>36</sup>
$V$	= 3000 [cm <sup>3</sup> ]	Volumen del agua <sup>27</sup>

---

<sup>34</sup> INCROPERA, P., Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta Edición. México 1999. Apéndice A. p 853

<sup>35</sup> INCROPERA, P., Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta Edición. México 1999. Apéndice A. p 839

<sup>36</sup> CENGEL, Y., BOLES, M., Termodinámica Tomo I. Cuarta edición. Mexico. McGrawill. 2000. Apéndice 1. p 729

<sup>37</sup> CENGEL, Y., BOLES, M., Termodinámica Tomo I. Cuarta edición. Mexico. McGrawill. 2000. p 830

$$C_{p\text{CV}} = 750 \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] \quad \text{Calor específico del vidrio}^{38};$$

$$C_p = 4186 \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] \quad \text{Calor específico del agua}^{39}$$

$$\rho_w = 0.99 \left[ \frac{gr}{cm^3} \right] \quad \text{Densidad del agua}^{40}$$

### 4.3.2 Cálculo del calor perdido por conducción

Para el cálculo del calor perdido por conducción debemos calcular la resistencia térmica equivalente del aislante con lo cual tenemos que:

De la ecuación (2.21) tenemos que:

$$Req = \frac{x1}{K1} + \frac{x2}{K2} + \frac{x3}{K3}$$

Obtenemos que la resistencia equivalente es:

$$Req = 1.016 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

De la ecuación (2.22) tenemos que:

$$hct = 2.8 + 3w$$

$$hct = 6.4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

---

<sup>38</sup> INCROPERA, P., Fundamentos de Transferencia de calor. Cuarta Edición. México 1999. Apéndice A. p 837

<sup>39</sup> MILLS, F., Transferencia de calor, Primera edición. Los Ángeles. 1995. Tabla A.9. p 875.

<sup>40</sup> MILLS, F., Transferencia de calor, Primera edición. Los Ángeles. 1995. Tabla A.10b. p 877.

Con el coeficiente de transferencia de calor convectivo del fondo del destilador con lo cual determinamos la resistencia térmica equivalente del aislante

De la ecuación (2.20) tenemos que:

$$Kb = \frac{1}{Req + \frac{1}{hct}}$$

$$hct = 0.853 \frac{W}{m^2 * K}$$

Con los datos calculados anteriormente determinamos el calor perdido por conducción.

De la ecuación (2.19) tenemos que:

$$qc = Kb * (Tw - Ta)$$

$$qc = 33.264 \frac{W-hr}{m^2-dia}$$

### 4.3.3 Cálculo del calor perdido por radiación del vidrio

Para la temperatura del cielo (Tsky) se la calcula mediante la siguiente ecuación definida dentro de los parámetros de cálculo a utilizar

$$Ts = 0.0522 * Ta^{1.5}$$

$$Ts = 26.48 K$$

Como hemos visto la cubierta radia calor hacia el ambiente, este flujo de energía llega esta descrito por la ecuación (2.23) de donde tenemos que:

$$qrv = \varepsilon_v * \sigma * [Tv^4 - Ts^4]$$

$$qrv = 215.363 \frac{\text{W-hr}}{\text{m}^2\text{-day}}$$

#### 4.3.4 Cálculo del calor perdido por convección del vidrio

De la ecuación (2.24) tenemos que:

$$qcv = h_{cv} * (Tv - Ta)$$

$$qcv = 124.8 \frac{\text{W-hr}}{\text{m}^2\text{-dia}}$$

#### 4.3.5 Cálculo del calor perdido por radiación del agua

De la ecuación (2.26) tenemos que:

$$qrw = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} * (Tw^4 - Tv^4)$$

$$qrw = 110.619 \frac{\text{W-hr}}{\text{m}^2\text{-dia}}$$

#### 4.3.6 Cálculo del calor perdido por convección natural

Para el cálculo del calor perdido por convección natural debemos tomar en cuenta la tabla de presiones y temperaturas para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección natural.

De la ecuación (2.36) tenemos que:

$$hc = 0.884 * \left( Tw - Tv + \frac{Pw - Pwv}{268.9 \times 10^3 - Pw} * (Tw + 273) \right)^{1/3}$$

$$hc = 2.852 \frac{W}{m^2K}$$

Mediante la ecuación (2.37) tenemos que:

$$hr = \frac{\epsilon * \sigma * (Tsc^4 - Tw^4)}{Tsc - Tw}$$

$$hr = 1.783 \frac{W}{m^2K}$$

Como vemos  $hr < hc$ , por lo que de la ecuación (2.39) tenemos que :

$$h_T = hc + \frac{3}{4} hr$$

$$h_T = 4.189 \frac{W}{m^2K}$$

Entonces tenemos que la cantidad de calor perdida por convección del agua según la ecuación (2.40)

$$qcw = h_T * (T_w - T_v)$$

$$qcw = 81.687 \frac{W-hr}{m^2-dia}$$

#### 4.3.7 Cálculo del calor perdido por evaporación

De la ecuación (2.51) tenemos que:

$$qe = 13 \times 10^{-3} h_T * (P_w - P_v)$$

$$qe = 551.663 \frac{W-hr}{m^2-dia}$$

#### 4.3.8 Cálculo del calor almacenado por la cubierta

De la Tabla 4.4 tomamos el valor de la radiación correspondiente al mes más bajo, para nuestro caso es marzo.

$$G_s = 4012.28 \frac{W-hr}{m^2-dia}$$

A esta radiación al llegar al vidrio sufre reflexión, absorción y transmitancia con el factor  $\alpha_g$

$$\alpha_g * G_s = (0.1) * 4012.28 \frac{W-hr}{m^2-dia}$$

Y considerando el número de horas de funcionamiento del equipo o la heliofanía de la tabla 4.2 tenemos que:

$$\alpha_g * G_s = (0.1) * 4012.28 \frac{W-hr * 1-dia}{m^2-dia * 5-hr}$$

Por lo tanto la radiación que llega al vidrio es de:

$$\alpha g * G_s = (0.1) * 802.456 \frac{W}{m^2}$$

De la ecuación **(2.55)** del balance de calor sobre la cubierta tenemos que

$$qr_w + qc_w + q_e + \alpha g * G_s - (qr_v + qc_v) = q'c$$

$$q'c = 161.007 \frac{W}{m^2}$$

#### **4.3.9 Cálculo del calor absorbido por el agua**

De la ecuación **(2.57)** del balance de calor sobre el agua tenemos que

$$G_s * (1 - \alpha g)(1 - \alpha a) - (qr_w + qc_w + q_e + qc) = q'a$$

$$q'a = 350.101 \frac{W}{m^2}$$

#### **4.3.10 Cálculo del calor absorbido por el sistema**

Para el cálculo del calor absorbido por el sistema tenemos que según **(2.60)**:

$$qt = q'c + q'a$$

$$qt = 511.107 \frac{W}{m^2}$$

De la ecuación **(2.61)** tenemos que:

$$QT = 511.507 W$$

#### 4.4 Cálculo del calor necesario para calentar y evaporar

Debemos estimar la cantidad de calor necesaria para calentar el vidrio, por lo tanto de la ecuación (2.65) tenemos que:

$$mv = \rho v * Av * Ev$$

Por lo tanto:

$$mv = 10 Kg$$

Con este dato y de la ecuación (2.63) tenemos que:

$$Qv = mv * Cpv * (Tv - Ta)$$

De ahí tenemos que el calor necesario para calentar el vidrio es de:

$$Qv = 40.620 \frac{W - hr}{dia}$$

Tomando en consideración el número de horas de heliofanía tenemos que:

$$Qv = 8.125 W$$

Para el cálculo del calor necesario para calentar el agua tenemos de la ecuación (2.67)

$$Qca = ms * Cp * (Tw - Ta)$$

Por lo tanto el calor sensible para calentar el agua es:

$$Q_{ca} = 134.685 \frac{W - \text{hr}}{\text{dia}}$$

Tomando en consideración el número de horas de heliofanía tenemos que:

$$Q_{ca} = 26.937 W$$

Para el cálculo del calor necesario para evaporar un porcentaje del total de la masa de agua tenemos de la ecuación **(2.70)**

$$Q_{ev} = x * m_s * \lambda.$$

Por lo tanto el calor latente para evaporar el agua es:

$$Q_{ev} = 507.581 \frac{W - \text{hr}}{\text{dia}}$$

Tomando en consideración el número de horas de heliofanía tenemos que:

$$Q_{ev} = 101.516 W$$

Entonces tenemos que la cantidad necesaria para calentar el vidrio, calentar el agua de la bandeja y evaporar cierto porcentaje de la misma viene dada por la ecuación **(2.71)** tenemos que:

$$QN = Q_{cv} + Q_{ca} + Q_{ev}$$

Por lo tanto tenemos que:

$$QN = 136.578 W$$

Siendo el dispositivo de acuerdo a la ecuación **(2.74)**

$$Eficiencia = 0.23 * 100 \approx 23.3\%$$

De acuerdo a la ecuación **(2.73)** tenemos que la producción del destilador solar es de:

$$Me = 0.7 \frac{kg}{hr}$$

Sin embargo debemos considerar que este valor de producción del destilador solar se vería seriamente afectado, puesto que intervienen una serie de factores que no los podemos regular como por ejemplo el movimiento de las nubes o la caída de lluvia, lo que provocaría un caída notable en la producción de destilado teórica.

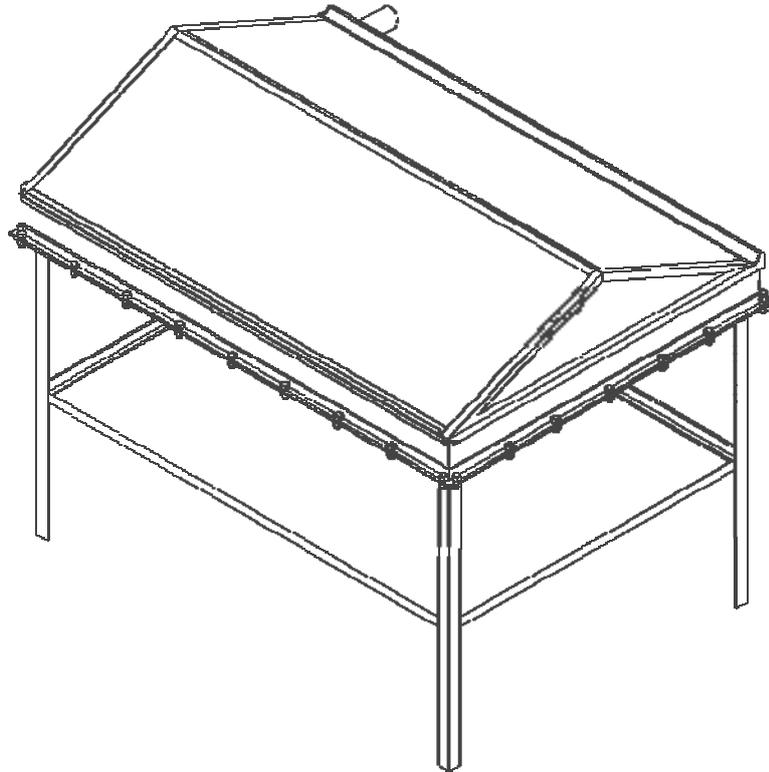
## **CAPÍTULO 5**

# **CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL**

### **5.1 Construcción y montaje del destilador solar**

Para el presente prototipo su construcción y montaje lo realizamos de acuerdo a las indicaciones o referencias mostradas en los planos de construcción, así como también en sus diagramas de procesos, en el presente capítulo se describirá detalladamente los procesos de fabricación en cuanto a su construcción, se toman en cuenta incluir un detalle del cómo se debe manipular cada una de las piezas, así como también los riesgos y peligros que cada una de ellas conlleva.

Es de notar que todo procedimiento de fabricación nos llevo varios pasos, desde la adquisición del material, la llegada del mismo, los cortes las soldaduras, el limado cepillado, esmerilado, taladrado, son algunos de los procesos llevados a cabo para nuestro proyecto, recomendamos no descuidar el aspecto de la seguridad, ya que como es lógico todo proceso conlleva riesgos.



**Figura 5.1** Prototipo del destilador

## **5.2 Procedimiento de fabricación**

En la fabricación de los componentes del Destilador Solar, y su posterior ensamblaje, para obtener mejores resultados y evitar dificultades se recomienda seguir técnicas adecuadas, en tiempo, velocidad de proceso, calidad y seguridad. Por estas razones es importante considerar los siguientes aspectos:

- Seleccionar una adecuada secuencia de fabricación.
- Selección de los materiales existentes en el mercado.
- Ocupar un lugar adecuado y seguro para su fabricación.
- Verificar la infraestructura existente en el lugar de trabajo.

- Revisar si el lugar tiene los requerimientos en cuanto a materiales y equipos.
- Procesos de manufactura.
- Tipos de aislantes existentes en el mercado.
- Uso de implementos de seguridad más si se refiere a la manipulación de lana de vidrio.
- Ropa adecuada de trabajo.
- Normativa de seguridad industrial.

La seguridad en el proceso productivo es necesario que se lo tome muy seriamente, debido a que en el transcurso de la fabricación del prototipo existe la presencia de riesgos de carácter físico, químico o biológico que inciden directa o indirectamente en el desempeño de los trabajadores.

### **5.3 Materiales.**

Existen en el mercado, una gama de materiales que pueden ser utilizados para la fabricación, así como varios lugares en los cuales podemos conseguir los componentes del destilador solar. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que por características propias del destilador hay que seleccionar aquellos materiales que sean compatibles con la realidad socioeconómica de los potenciales usuarios del proyecto, así como también, tomar en cuenta los costos de adquisición y transporte, y las propiedades termo físicas de los mismos. A continuación se realiza la descripción de la materia prima utilizada en la fabricación de los diversos componentes de la Destilador Solar.

#### 5.4 Proceso de fabricación

Para la fabricación y montaje de nuestro modelo experimental tenemos que tomar en cuenta los planos que se encuentran en el **ANEXO A** y los diagramas de procesos que constan en el **ANEXO B**.

En todo proceso de fabricación de componentes de máquinas o equipos, se necesita de documentación técnica, para una mejor interpretación y aplicación de las actividades de manufactura, ya sea que se utilicen herramientas manuales o de potencia, por lo que se recomienda lo siguiente:

- Planos de componentes trazados en 2 y 3 dimensiones.
- Planos de ensamblaje.
- Listado de materiales.
- Organigramas de procesos de fabricación.
- Normativas de seguridad industrial.

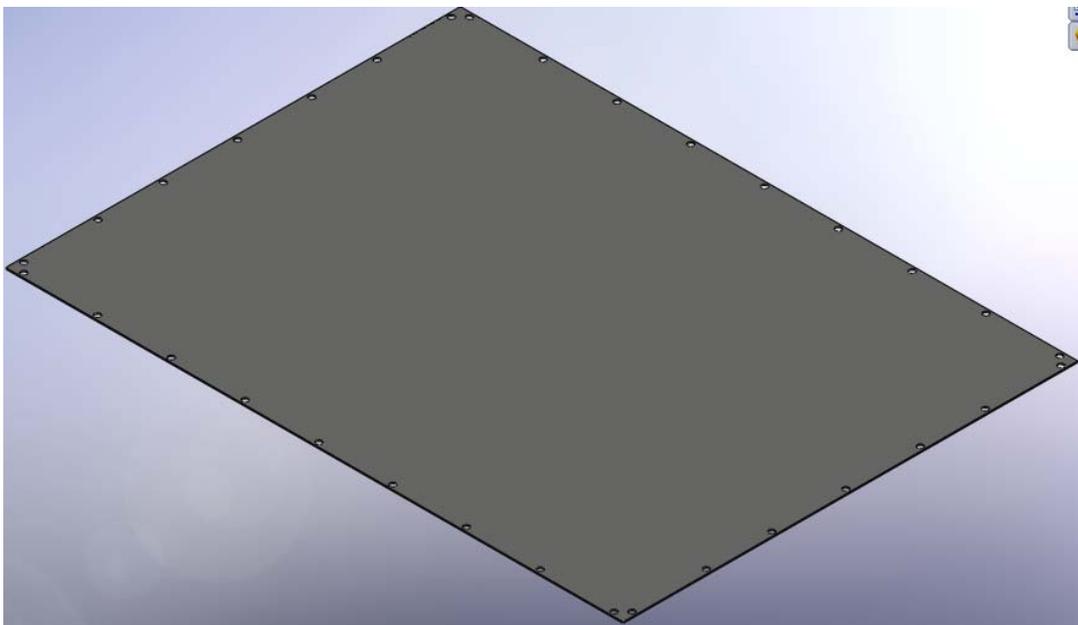
Se requiere utilizar esta información, con el propósito de que el producto final cumpla con los requerimientos proyectados en la ingeniería básica. Para el caso del presente desarrollo, conviene identificar y definir los diferentes criterios tecnológicos para la elaboración de cada uno de los componentes del prototipo.

- |                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| - Tapa del colector | - Perfil inferior  |
| - Guías para madera | - Tubo             |
| - Maderos           | - Soporta tubo     |
| - Laterales         | - Colector solar   |
| - Perfil superior   | - Bandeja del agua |

- Canales
- Tapa delantera
- Tapa posterior
- Cubierta
- Agarraderas de cubierta
- Ventana superior
- Ventana lateral
- Estructura metálica

### **Tapa inferior del colector.**

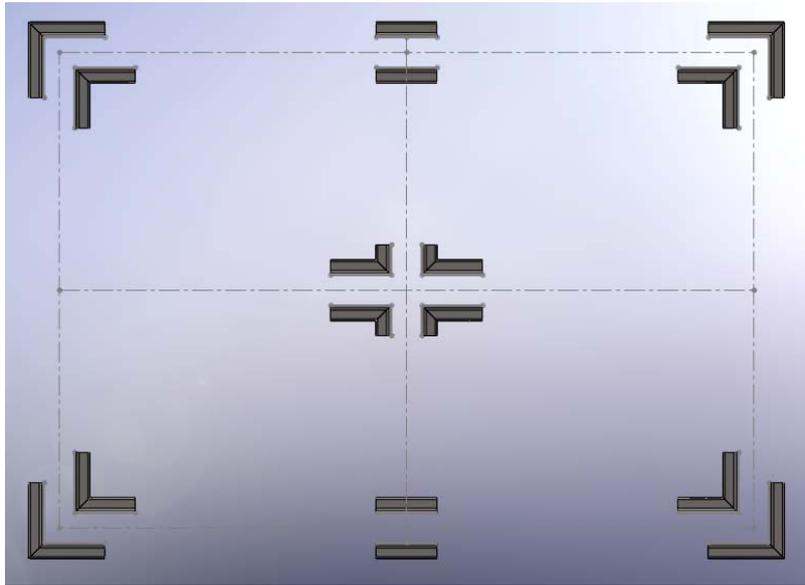
Para la fabricación de la tapa del colector, se compro una plancha de tool negro acero A-36 de 1220\*2400 y 3mm de espesor debido a la hermeticidad que debe existir en la zona media del Destilador, con el cual partimos tomando las medidas y posteriormente rayarlas en la plancha, acto seguido procedemos a cortar mediante plasma ya que el espesor no nos permitió utilizar otra máquina disponible en el laboratorio, con la tapa ya cortada procedemos a marcar los centros de los agujeros por donde van ir los pernos así que: primeramente taladramos con broca 4mm, luego taladramos con broca de 8 para finalmente taladrar con broca de 13mm la limpiamos para posteriormente almacenarla.



**Figura 5.2** Tapa inferior del colector

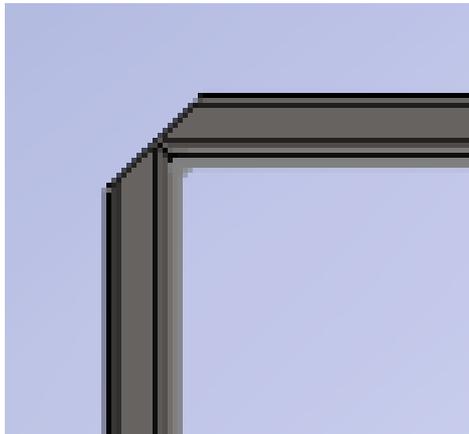
### Guías para los madera.

Las guías que realizamos son de cuatro tipos para ello necesitamos perfilaría ángulo 20x2mm, el cual se encuentra en venta en longitudes de 6m, por otra parte marcamos las longitudes necesarias en el perfil para cortar mediante sierra esto lo realizamos en los cuatro tipos de perfiles, al momento de doblar los perfiles hay diferencias que se debe tomar en cuenta.



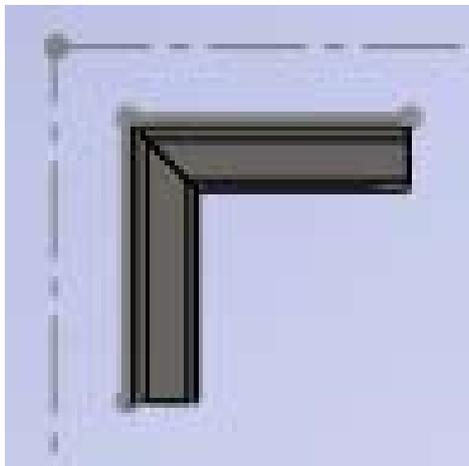
**Figura 5.3** Distribución de guías para madera

Para el primer tipo de doblado se debe marcar en la mitad, luego a escuadra se raya a 45° para cortar con sierra posteriormente le colocamos al perfil en la entenalla por la parte media de esta para luego doblarle mediante golpes con el martillo como se muestra en la figura 5.4.



**Figura 5.4** Forma de doblado

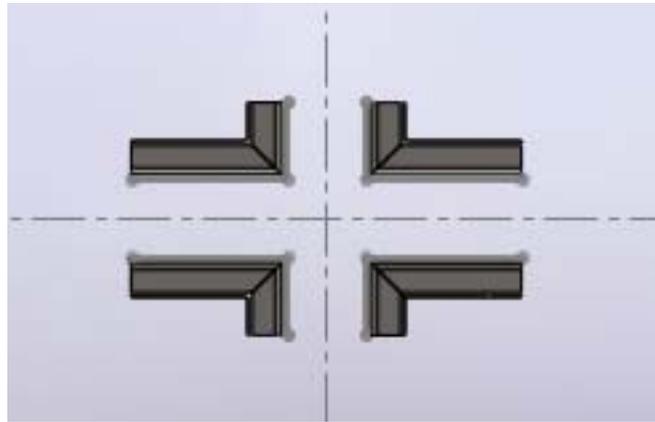
Para el segundo tipo de doblado se debe trabajar de la misma manera, marcar en la mitad luego a escuadra se raya a 45° para cortar con sierra, posteriormente colocamos el perfil en la entenalla por la parte media de esta para luego doblarle mediante golpes con el martillo como se muestra en la figura 5.5.



**Figura 5.5** Forma de doblado

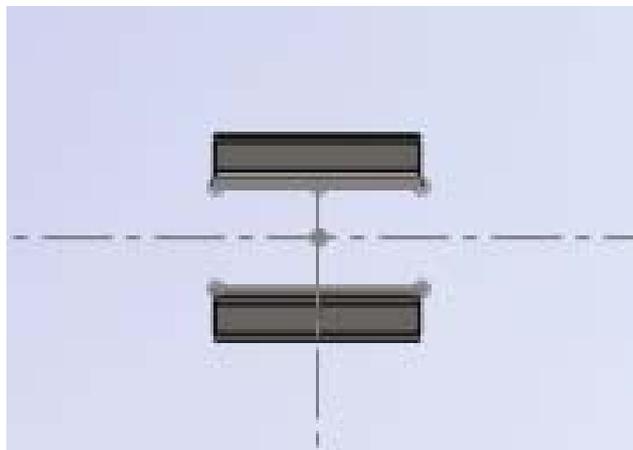
Para el tercer tipo de doblado se debe marcar a 50mm, luego a escuadra se raya a 45° para cortar con sierra, posteriormente colocamos el perfil en la entenalla por

la parte media de esta para luego doblarle mediante golpes con el martillo como se muestra en la figura 5.6.



**Figura 5.6** Forma de doblado

Para el último tipo de perfil solo se requiere lo mencionado en la primera parte de la construcción de las guías para los maderos como se muestra en la figura 5.7.

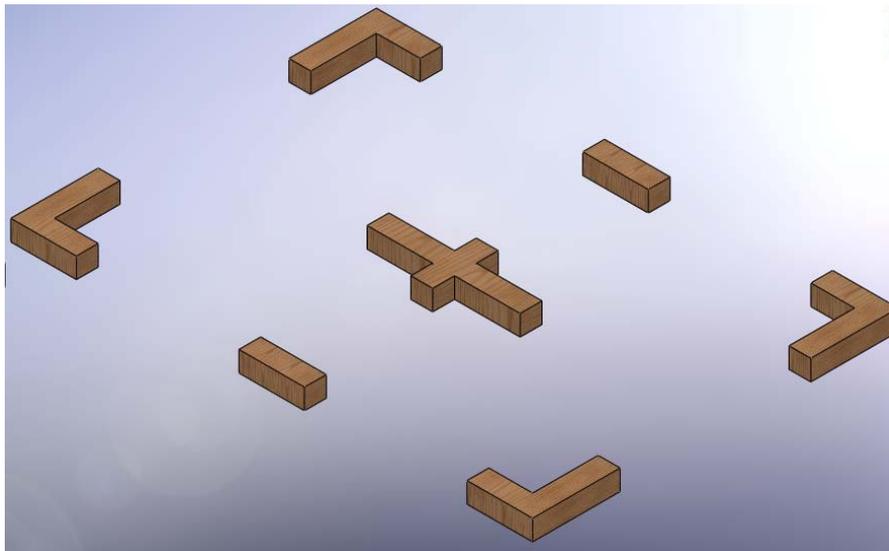


**Figura 5.7** Forma de corte

### **Maderos.**

Para los maderos no se requiere un tipo de madera en especial o que contenga

características termo físicas indispensables es por ello que en este punto se da a escoger en cuanto a costo, hay que tomar en cuenta que la compra del madero es igual al de los perfiles es decir por longitud, para esto necesitamos 13 maderos de 50\*50mm de 150mm de longitud, para lo cual medimos en el madero y cortamos mediante un serrucho la medida deseada. A continuación se muestra la distribución de los maderos.

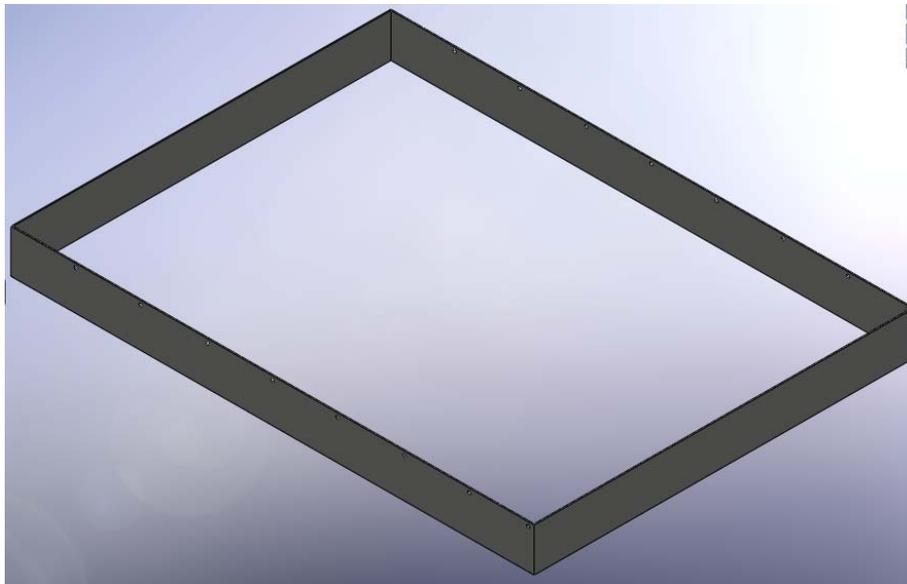


**Figura 5.8** Distribución de los maderos

### **Laterales.**

Para la fabricación de los laterales se utiliza lo que sobro de la plancha de tool negro acero A-36 de 3mm de espesor debido a la hermeticidad que debe existir en la zona media del Destilador además se debe tomar en cuenta que como van a formar parte de las paredes del destilador estas no se deben pandear, por otro lado tomando las medidas y posteriormente rayarlas en la plancha, acto seguido procedemos a cortar mediante plasma ya que el espesor no nos permitió utilizar otra máquina disponible en el laboratorio, con los laterales ya cortados y limpiados de la escoria que sale del proceso de cortado procedemos a soldar con el electrodo utilizado para las uniones mediante soldadura SMAW, es el AGA E7018

Ø 3mm a escuadra formando 90° entre cada lateral, limpiamos la escoria que sale del proceso del soldado, luego amolamos los cordones de soldadura para quitar las sobre montas y salpicaduras que existiera en dicho proceso, al mismo tiempo se debe marcar los centros de los agujeros por donde van ir los pernos que sujetaran los canales así que taladramos con broca 4mm, en el lateral izquierdo se realiza un agujero de 2" mediante electrodo E7018 para la posterior colocación del tubo (conducto de desfogue del agua), limpiamos para posteriormente almacenarla.

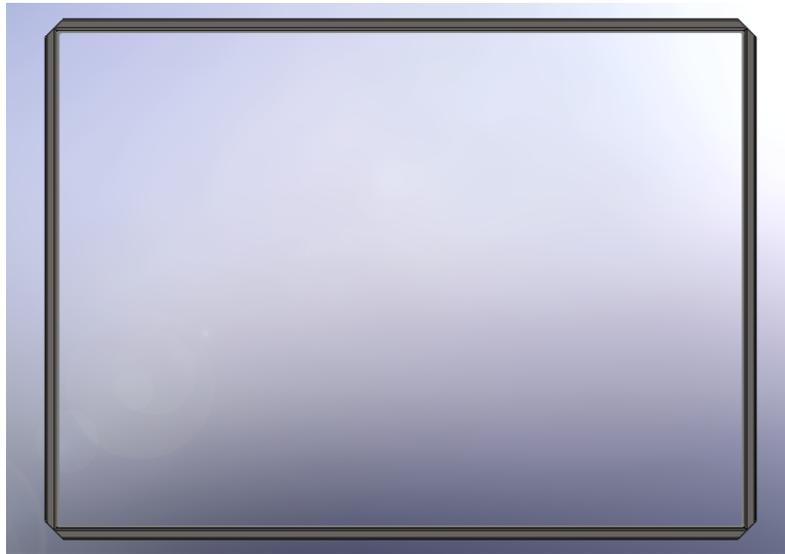


**Figura 5.9 Laterales**

### **Perfil superior.**

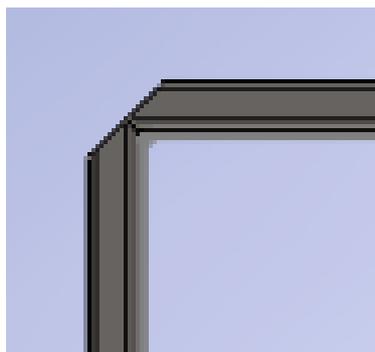
Para el perfil superior necesitamos un ángulo de 1"×3/16", este a su vez viene de igual forma en longitud de 6m en el cual realizamos lo siguiente. Marcamos las longitudes necesarias en el perfil para cortar mediante sierra, para el doblado se debe marcar a la longitud deseada luego a escuadra se raya a 45° para cortar con sierra, posteriormente colocamos al perfil en la entenalla en la parte donde se realizo el corte a escuadra, luego doblarle mediante golpes con el martillo esto lo

debemos hacer hasta formar una especie de marco como se muestra en la figura 5.10.



**Figura 5.10** Perfil Superior

Para unir el perfil el electrodo utilizado para las unión mediante soldadura SMAW, es el AGA E7018  $\varnothing 3\text{mm}$ .



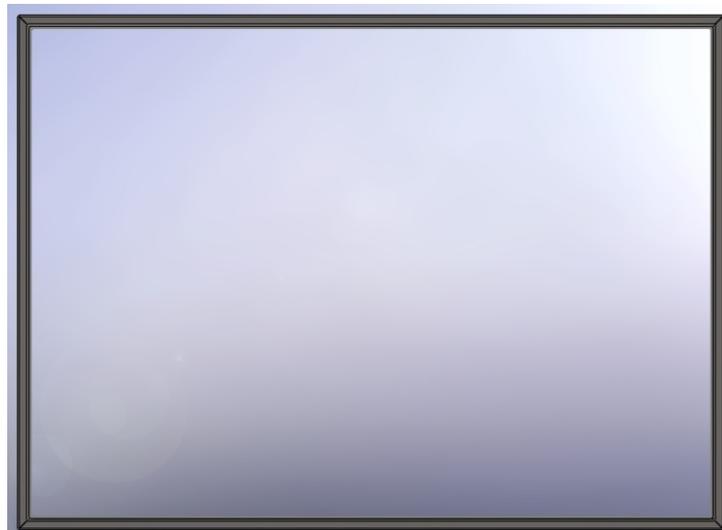
**Figura 5.11** Forma de corte

Ya obteniendo el perfil armado procedemos a colocarlo al contorno de los laterales, tomando en cuenta que este se debe ubicar en forma coincidente con los agujeros de los laterales, colocado en su lugar el perfil se procede a realizar

puntos de soldadura mediante el electrodo AGA E6011  $\varnothing$  3mm con soldadura SMAW, verificamos la ubicación y procedemos a soldar los cordones con el mismo electrodo, consecutivamente taladramos por los agujeros ya existentes en los laterales al perfil superior con broca de 4mm., y finalmente retiramos la rebaba.

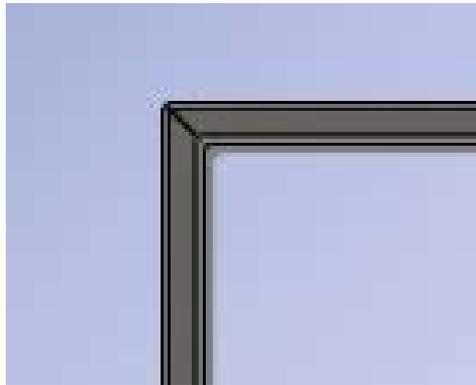
### **Perfil Inferior.**

Para el perfil inferior necesitamos un ángulo de  $1\frac{1}{4} \times 3/16$ " este a su vez viene de igual forma en longitud de 6m en el cual realizamos lo siguiente. Marcamos las longitudes necesarias en el perfil para cortar mediante cierra, para el doblado se debe marcar a la longitud deseada luego a escuadra se raya a  $45^\circ$  para cortar con cierra, posteriormente le colocamos al perfil en la entenalla en la parte donde se realizo el corte a escuadra para luego doblarle mediante golpes con el martillo esto lo debemos hacer hasta formar una especie de marco como se muestra en la figura 5.12.



**Figura 5.12** Perfil inferior

Para unir el perfil el electrodo utilizado para las unión mediante soldadura SMAW, es el AGA E7018  $\varnothing$  3mm.

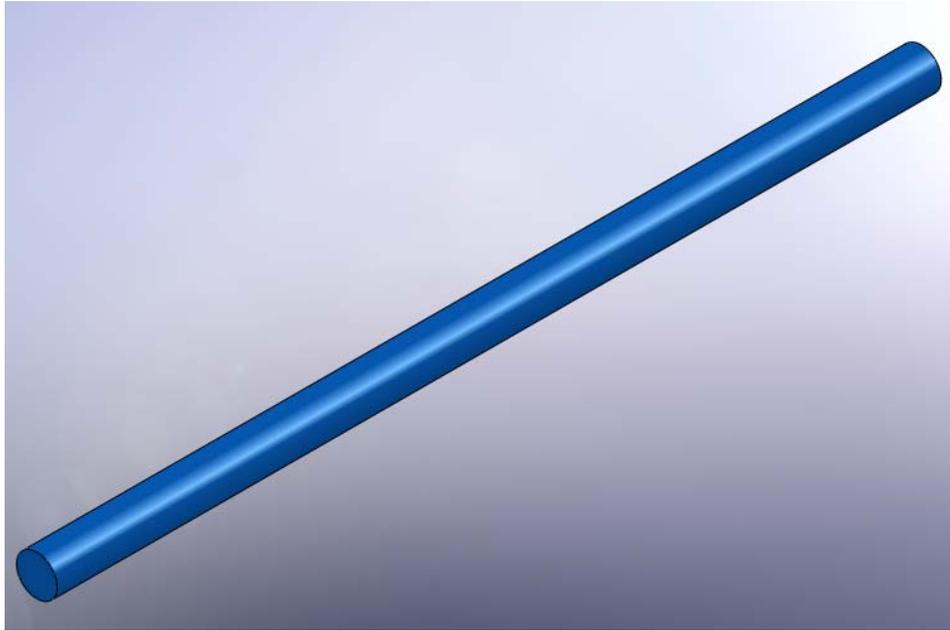


**Figura 5.13** Forma de doblado

Ya obteniendo el perfil armado procedemos a colocarlo en la tapa colectora, tomando en cuenta que este se debe ubicar en forma coincidente con los agujeros que previamente realizamos en el proceso anterior, colocado en su lugar el perfil se procede a realizar puntos de soldadura mediante el electrodo AGA E7018  $\varnothing$  3mm con soldadura SMAW, consecutivamente taladramos primeramente con broca 4mm, luego taladramos con broca de 8, para finalmente taladrar con broca de 13mm la limpiamos para posteriormente colocar el perfil armado al contorno de los laterales en el cual se procede a realizar puntos de soldadura mediante el electrodo AGA E6011  $\varnothing$  3mm con soldadura SMAW, verificamos la ubicación, procedemos a soldar los cordones con el mismo electrodo, limpiamos la escoria y las salpicaduras para su posterior almacenamiento.

### **Tubo recolector.**

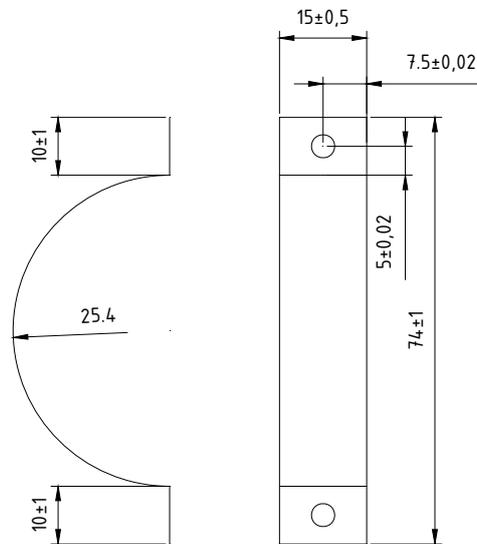
Para realizar el tubo recolector necesitamos un tubo PVC de 2" de diámetro y de longitud 1.20m en el cual realizaremos lo siguiente: marcamos las medidas por donde van a ir los canales para realizar los agujeros mediante sierra o un cuchillo incandescente, al mismo tiempo realizamos una tapa para colocarla en el extremo y la sellamos con silicona.



**Figura 5.14** Tubo PVC

### **Soporta tubo.**

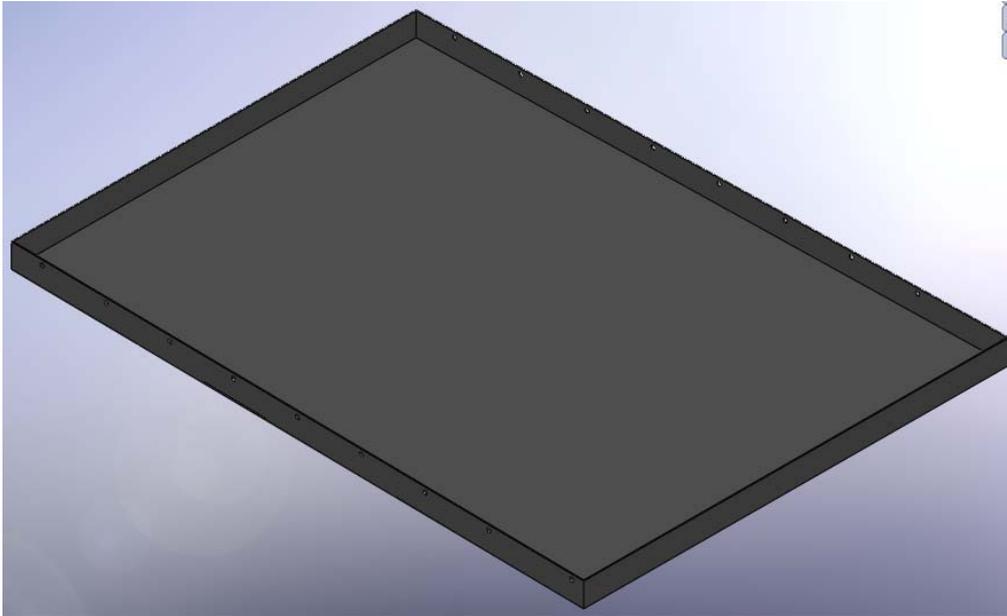
En la fabricación del soporte del tubo elegimos utilizar como material de construcción el acero galvanizado en el cual realizamos lo siguiente: marcamos las medidas dadas por la figura 5.15 para después cortar con tijeras para acero, la forma de semicírculo la damos con el tubo es decir le enrollamos el tubo, luego procedemos a doblar a las medidas dadas, por último taladramos con broca de 4mm limpiamos y lo almacenamos.



**Figura 5.15** Soporta tubo

### **Colector Solar.**

Para la fabricación del colector solar utilizamos una plancha de acero Inoxidable AISI-304 de 1220\*2400 y 2mm de espesor debido a las propiedades termo físicas que debe existir en la zona interna del Destilador, con el cual partimos tomando las medidas y posteriormente rayarlas en la plancha acto seguido procedemos a cortar mediante la cizalla manual del laboratorio, con la forma dada del colector solar procedemos a doblar en la dobladora manual para darle la forma de bandeja como se muestra en la figura 5.16, el electrodo utilizado para las uniones mediante soldadura SMAW, es el AGA E-308-16,  $\varnothing$  3mm a escuadra formando 90° entre las paredes de la bandeja, limpiamos la escoria que sale del proceso del soldado, luego amolamos los cordones de soldadura para quitar las sobre montas y salpicaduras que existiera en dicho proceso, al mismo tiempo se debe marcar los centros de los agujeros por donde van ir los pernos que sujetaran los canales así que taladramos con broca 4mm limpiamos y almacenamos para su posterior montaje.

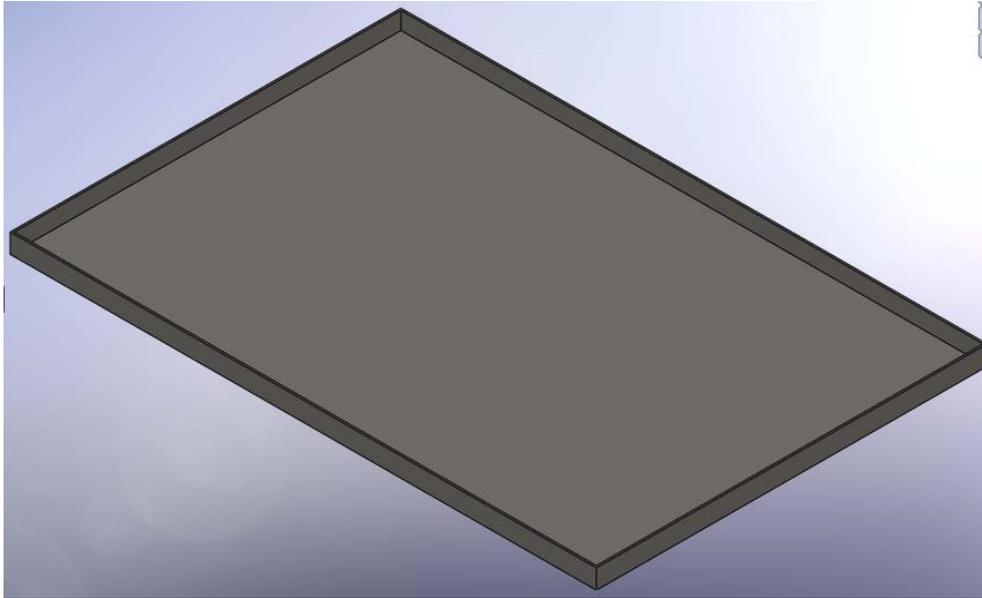


**Figura 5.16** Colector solar

### **Bandeja de Agua.**

Para la fabricación del colector solar utilizamos una plancha de acero Inoxidable AISI-304 de 1220\*2400 y 2mm de espesor debido a las propiedades termo físicas en este pieza se pondrá el agua el agua que destilara en la realización del prototipo, con el cual partimos marcando las medidas y posteriormente confinarlas en la plancha acto seguido procedemos a cortar mediante la cizalla manual del laboratorio, con la forma dada del colector solar procedemos perdón la redundancia a doblar en la dobladora manual para darle la forma de bandeja como se muestra en la figura, en esta bandeja realizamos otro doblez que el se ubica en el filo del perímetro de la bandeja para que haya mayor facilidad de manipularla, el electrodo utilizado para las uniones mediante soldadura SMAW, es el AGA E-308-16,  $\varnothing$  3mm a escuadra formando  $90^\circ$  entre las paredes de la bandeja, limpiamos la escoria que sale del proceso del soldado luego amolamos los cordones de soldadura para quitar las sobre montas y salpicaduras que existiera en dicho

proceso, limpiamos y almacenamos para su posterior montaje.

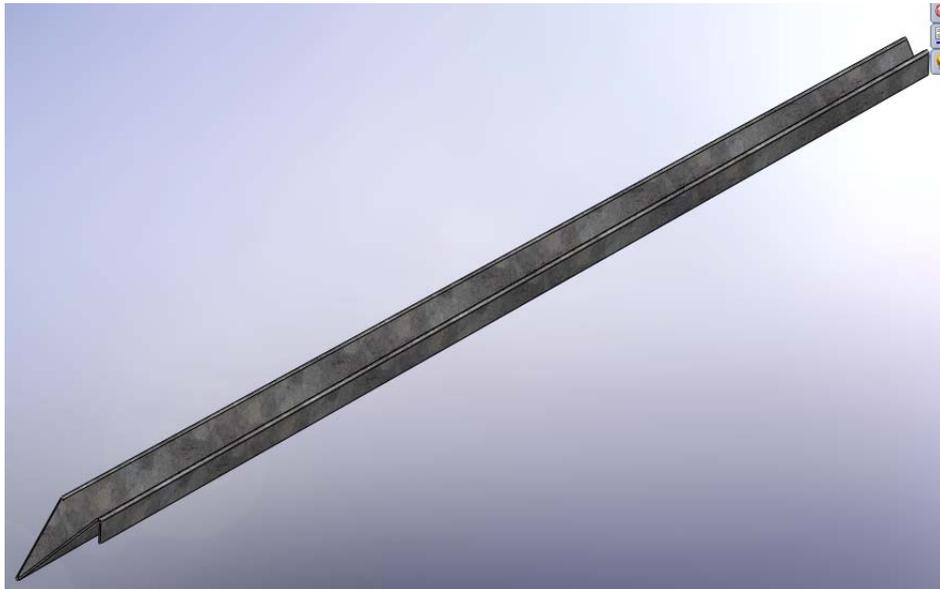


**Figura 5.17** Bandeja de agua

### **Canales.**

En la fabricación de los canales elegimos utilizar como material de construcción el acero galvanizado en el cual realizamos lo siguiente: marcamos las medidas dadas para luego proceder a cortar mediante la cizalla manual del laboratorio, al mismo tiempo se debe marcar los centros de los agujeros por donde van ir los pernos que sujetaran los canales así que taladramos con broca 4mm limpiamos, después en la dobladora manual realizaremos tres dobleces en cada canal para lo cual seguiremos la siguiente secuencia:

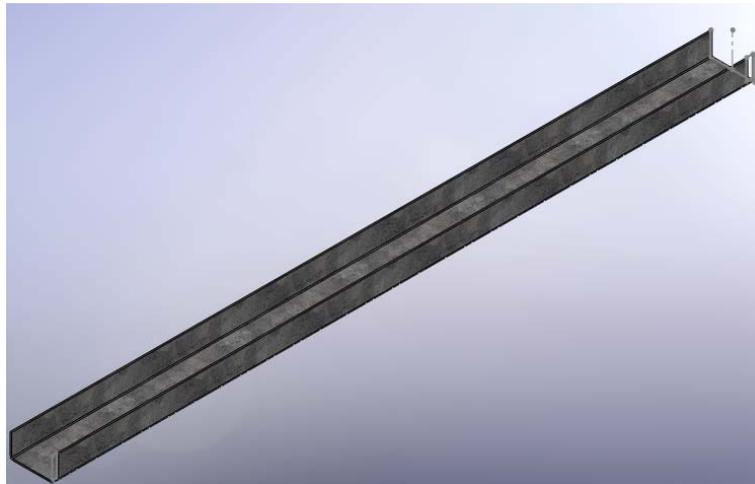
- 1** Primero doblamos la falda la cual contiene los agujeros hasta el tope de la máquina.
- 2** Realizamos el dobléz del canal propiamente dicho.
- 3** Por último, realizamos el dobléz de la otra falda



**Figura 5.18** Canales

### **Tapa Delantera.**

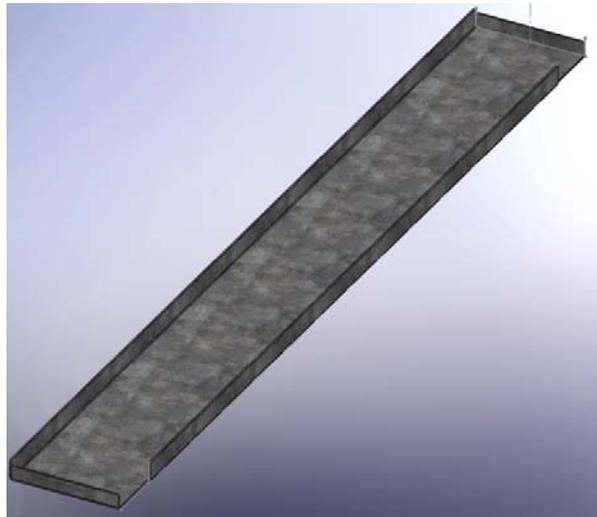
En la fabricación de la tapa delantera elegimos utilizar como material de construcción el acero galvanizado en el cual realizamos lo siguiente: marcamos las medidas dadas para luego proceder a cortar mediante la cizalla manual del laboratorio, luego procedemos a verificar las medidas para doblar mediante la dobladora limpiamos y almacenamos para el posterior ensamblaje.



**Figura 5.19** Tapa delantera.

### **Tapa Posterior.**

En la fabricación de la tapa posterior utilizamos como material de construcción el acero galvanizado en el cual realizamos lo siguiente: marcamos las medidas dadas para luego proceder a cortar mediante la cizalla manual del laboratorio, luego procedemos a verificar las medidas para doblar mediante la dobladora, acto seguido realizamos una nueva verificación para cortar mediante tijeras de acero parte de la tapa para no topar al canal, limpiamos y almacenamos para el posterior ensamblaje.

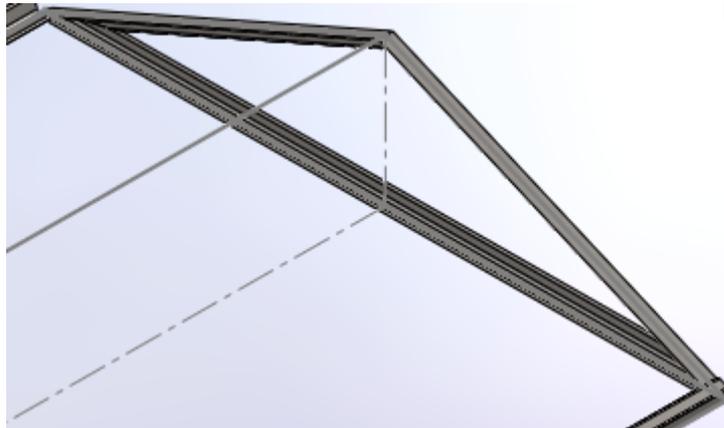


**Figura 5.20** Tapa posterior

### **Cubierta.**

Para la construcción de la cubierta se requiere ángulo de 1"3/16", ángulo de 20\*2mm y pletina de 3/4"\*1/8", con los cuales realizamos los siguientes trabajos:

Primeramente con el ángulo de 20\*2mm., marcamos las longitudes necesarias en el perfil para cortar mediante sierra, para el doblado se debe marcar a la longitud deseada, luego con la escuadra se raya a 25° para posteriormente cortar con sierra, previamente cortado el ángulo se coloca en la entenalla donde se realizó el corte, para luego doblarle mediante golpes con el martillo, esto lo debemos hacer hasta formar una especie de marco como se muestra en la figura 5.21, el electrodo utilizado para las uniones mediante soldadura SMAW, es el AGA E7018  $\varnothing$  3mm a escuadra formando el ángulo necesario, limpiamos la escoria que sale del proceso de soldado, luego amolamos los cordones de soldadura para quitar las sobre montas y salpicaduras que existiera en dicho proceso, esto lo realizamos dos veces.



**Figura 5.21** Marco triangular de la cubierta

Luego con la pletina de 3/4" \* 1/8" de la misma forma: marcamos las longitudes necesarias en la platina para cortar mediante sierra, el electrodo utilizado para las uniones mediante soldadura SMAW, es el AGA E7018  $\varnothing$  3mm estas pletinas previamente verificadas se las suelda a los perfiles armados como se muestra en la figura 5.21, limpiamos la escoria que sale del proceso del soldado, luego amolamos los cordones de soldadura para quitar las sobre montas y salpicaduras que existiera en dicho proceso.

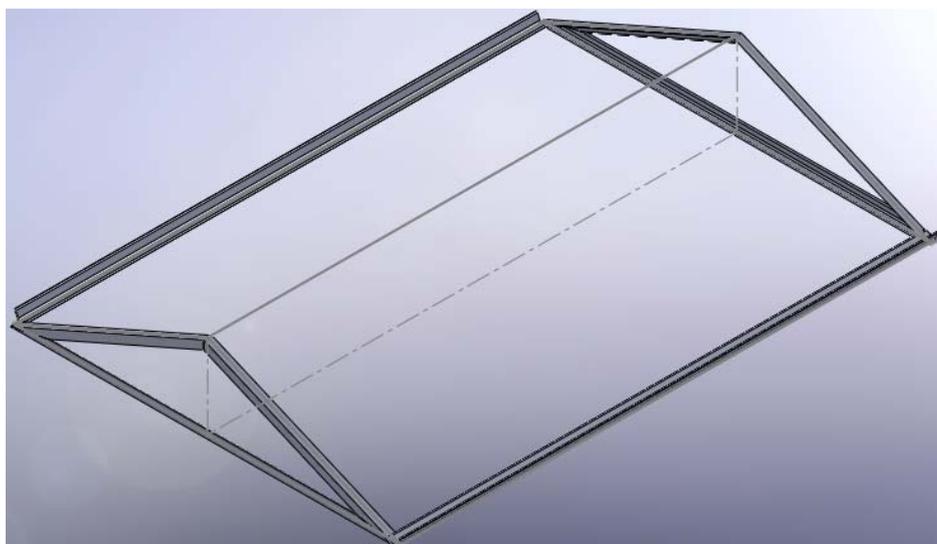


**Figura 5.22** Pletina

Por último con el ángulo de 1"3/16", marcamos las longitudes necesarias en el perfil para cortar mediante sierra, el electrodo utilizado para las uniones mediante soldadura SMAW, es el AGA E7018  $\varnothing$  3mm junto con lo realizado anteriormente, limpiamos la escoria que sale del proceso del soldado luego amolamos los cordones de soldadura para quitar las sobre montas y salpicaduras que existiera en dicho proceso, esto lo realizamos dos veces.



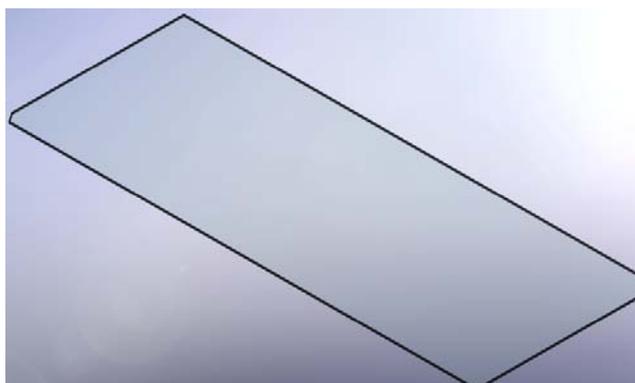
**Figura 5.23** Perfil a soldar en la cubierta



**Figura 5.24** Cubierta del destilador

### **Ventana superior.**

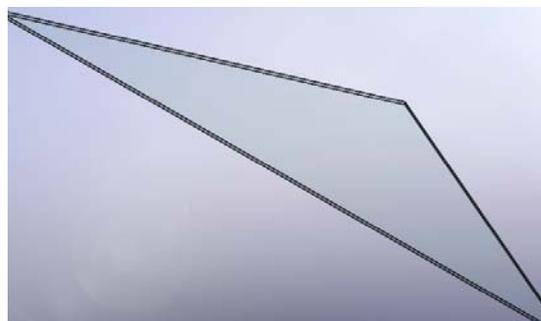
Para el montaje del vidrio se tuvo que recurrir a personas capacitadas en lo que se refiere a la manipulación de este material, para conseguir la forma deseada y poder colocarla la cubierta se realizo varias tomas de medidas, este paso fue realizado dos veces para cubrir ambos lados.



**Figura 5.25** Ventana superior

### **Ventana lateral.**

Para el montaje del vidrio se tuvo que recurrir a personas capacitadas en lo que se refiere a la manipulación del mismo, para conseguir la forma deseada y poder colocarla en la cubierta se realizo varias tomas de medidas, en este paso fue realizado dos veces para cubrir ambos lados.

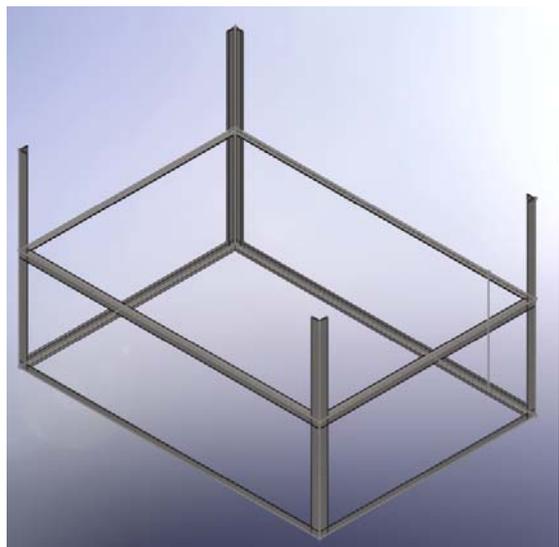


**Figura 5.26** Ventana lateral

### Estructura metálica.

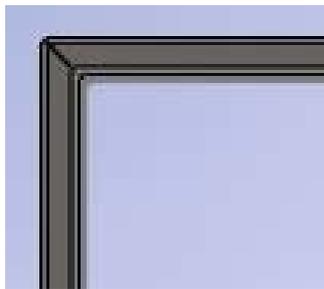
Para la construcción de la cubierta se requiere ángulo de 1"3/16", ángulo de 20\*2mm y ángulo de 40\*5mm, con los cuales realizamos los siguientes trabajos:

Para el perfil inferior necesitamos un ángulo de  $1\frac{1}{4}"3/16"$  este a su vez tiene una longitud de 6m en el cual realizamos lo siguiente: marcamos las longitudes necesarias en el perfil para cortar mediante sierra, para el doblado se debe marcar a la longitud deseada, luego a escuadra se raya a 45° para cortar con sierra, posteriormente colocamos el perfil en la entenalla en la parte donde se realizó el corte a escuadra para luego doblar mediante golpes con el martillo, esto lo debemos hacer hasta formar una especie de marco como se muestra en la figura 5.27.



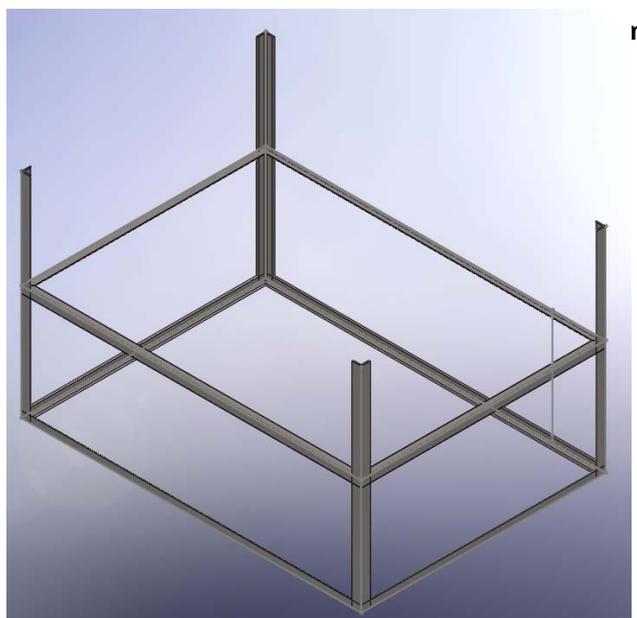
**Figura 5.27** Estructura metálica

Para unir el perfil el electrodo utilizado para las unión mediante soldadura SMAW, es el AGA E7018  $\varnothing$  3mm limpiamos la escoria que sale del proceso del soldado, luego amolamos los cordones de soldadura para quitar las sobre montas y salpicaduras que existiera en dicho proceso.



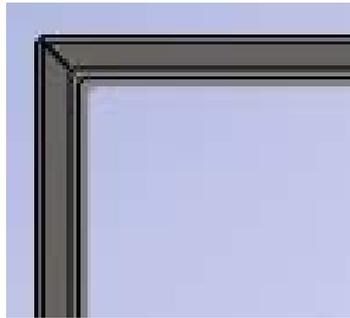
**Figura 5.28** Forma de doblado

Para el perfil superior necesitamos un ángulo de 20\*2mm este a su vez tiene una longitud de 6m en el cual realizamos lo siguiente: marcamos las longitudes necesarias en el perfil para cortar mediante sierra, para el doblado se debe marcar a la longitud deseada luego a escuadra se raya a 45° para cortar con sierra, posteriormente colocamos el perfil en la entenalla en la parte donde se realizo el corte a escuadra para luego doblarle mediante golpes con el martillo esto lo debemos hacer hasta formar una especie de marco como se muestra en la figura 5.29.



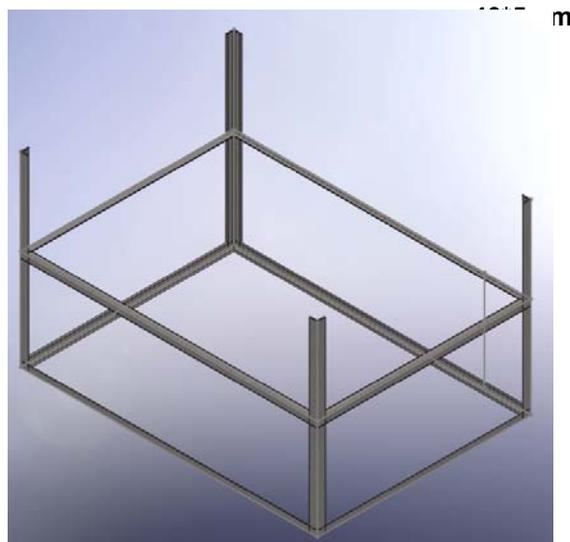
**Figura 5.29** Estructura metálica

Para unir el perfil el electrodo utilizado para las unión mediante soldadura SMAW, es el AGA E7018  $\varnothing$  3mm limpiamos la escoria que sale del proceso del soldado luego amolamos los cordones de soldadura para quitar las sobre montas y salpicaduras que existiera en dicho proceso.



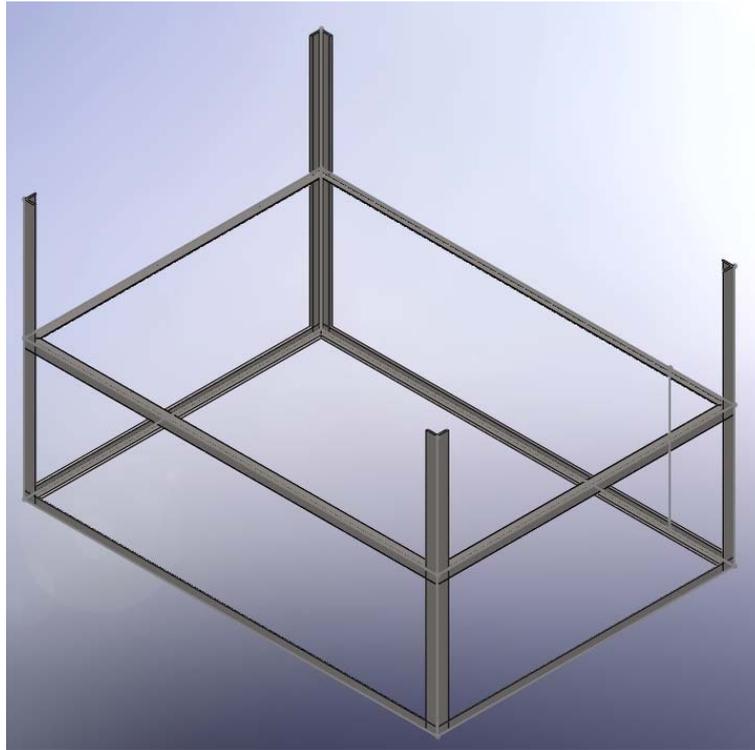
**Figura 5.30** Forma de doblado

Para la estructura portante necesitamos un ángulo de 40\*5mm este a su vez tiene una longitud de 6m en el cual realizamos lo siguiente: marcamos las longitudes necesarias en el perfil para cortar mediante sierra.



**Figura 5.31** Estructura metálica

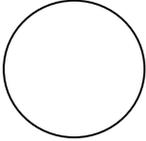
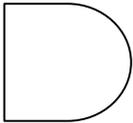
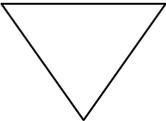
Para unir el perfil el electrodo utilizado para las unión mediante soldadura SMAW, es el AGA E7018  $\varnothing$  3mm limpiamos la escoria que sale del proceso del soldado luego amolamos los cordones de soldadura para quitar las sobre montas y salpicaduras que existiera en dicho proceso.



**Figura 5.32** Estructura metálica conformada

### **5.5 Simbología utilizada.**

La secuencia de trabajo y las actividades de conformado mecánico se pueden interpretar con facilidad, al utilizar los diagramas de operaciones tecnológicas, más conocidos como diagramas de proceso. Los símbolos para cada actividad se muestran en el siguiente diagrama:

Símbolo	Ejemplos y explicación		
	Envoltura de la pieza	Taladrar agujero	
<p><b>Operación</b></p> 	<p>Una operación representa las etapas principales del proceso. Se crea, se cambia o se añade algo. Las operaciones implican actividades tales como conformación, embutición, montaje y desmontaje de algo.</p>		
	<b>Examen de calidad y cantidad</b>	<b>Revisión de la precisión</b>	<b>Comprobación para obtener datos</b>
<p><b>Inspección</b></p> 	<p>La inspección se produce cuando los artículos son comprobados, verificados, revisados o examinados en relación con la calidad y cantidad, sin que sufran ningún cambio.</p>		
	<b>Material de entrada</b>	<b>Persona que espera turno</b>	<b>En espera de firma</b>
<p><b>Demora</b></p> 	<p>La demora se produce cuando las condiciones no permiten o no requieren una ejecución inmediata de la próxima acción planificada. La demora puede ser evitable o inevitable.</p>		
	<b>Material en almacenamiento</b>		
<p><b>Almacenamiento</b></p> 	<p>El almacenamiento se produce cuando algo permanece en un sitio sin ser trabajado o en proceso de elaboración, esperando una acción en fecha posterior. El almacenamiento puede ser temporal o permanente</p>		

**Figura 5.33** Símbolos para procesos de fabricación

## **5.6 Criterios de seguridad industrial.**

En el ambiente productivo se pueden presentar riesgos de tipo físico, químico y biológico, los cuales pueden afectar la calidad del producto, la salud de los operarios, e impacto a terceros, dentro de la planta, por esta razón ha sido necesario identificar los siguientes riesgos.

### **5.6.1 Riesgos físicos.**

En esta categoría se tienen los siguientes riesgos:

- Generación de alta corriente en el proceso de soldadura.
- Quemaduras por corte con plasma o lesiones con la cortadora manual
- La iluminación deficiente que puede afectar al operario
- Generación de calor por fricción en las herramientas, piezas cortadas o soldadas en el prototipo.
- Ruido y vibración

### **5.6.2 Riesgos químicos**

Aparecen cuando se trata de mejorar la hermeticidad del colector solar con la lana de vidrio, este material es altamente tóxico y cancerígeno para lo cual se debe utilizar ropa adecuada, mascarilla, guantes y gafas, además debemos tomar en cuenta los vapores, gases o nieblas que pueden causar intoxicación o severos daños al personal que se dedica a cumplir estas labores nos referimos a proceso de soldadura y pintura, por lo que es necesario que, la zona de trabajo tenga

ventilación adecuada, y que se utilicen los implementos de seguridad recomendados por la OSHA.

### **5.6.3 Riesgos biológicos.**

En los materiales que se encuentran almacenados durante un determinado período en bodega, se pueden incrustar hongos, bacterias o virus patógenos, los cuales pueden causar infecciones en las personas dedicadas a la fabricación o montaje de estos sistemas térmicos. Para reducir este riesgo, se debe estar previamente vacunado, y evitar cortes causados por elementos mecánicos que tengan aristas cortantes. Por lo que es recomendable el uso del equipo de protección personal adecuado. Por otra parte, la presencia de biocorrosión en los diversos tipos de aceros, que no se encuentran protegidos contra la oxidación, puede ocasionar lesiones y transmitir tétanos afectando seriamente la salud de las personas.

Se ha considerado pertinente indicar los diversos tipos de riesgos a los que puede estar sometido el personal dentro del ambiente productivo, no con el ámbito de alarmar, sino con la responsabilidad de proteger en forma coherente la salud de los trabajadores.

Durante el desarrollo de este proyecto, no se tuvo ningún tipo de afectación ni el apareamiento de enfermedades profesionales dado que se siguieron y se cumplieron con todas las normativas de seguridad industrial vigente en el Ecuador y reglamentada por el Instituto de Seguridad Social.

### **5.7 Planos de construcción del modelo experimental.**

Todos los planos requeridos para la fabricación del modelo experimental, se muestran en el Anexo A.

## 5.8 Construcción del soporte base

Todos los diagramas de procesos requeridos para la fabricación del modelo experimental, se muestran en el Anexo B

### 5.8.1 Lista de materiales

**Tabla 5.1** Lista de materiales

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad
1.	Pernos cabeza hexagonal 1/2in x 1 in	Unidad	32
2.	Tornillos milimétricos en inox, M10 x 10	Unidad	18
3.	Tuercas de acero inoxidable milimétricas m4	Unidad	18
4.	Pernos de acero UNC 4 x 15	Unidad	18
5.	Tuercas de acero negro UNC 4	Unidad	18
6.	Rodajas de acero inoxidable plana 3/16	Unidad	32
7.	Angulo de 1 1/4x3/16	Unidad	2
8.	Vidrio transparente 4 mm	m <sup>2</sup>	2
9.	Angulo 1 x 3/16	Unidad	2
10.	Angulo 20 x 2 mm	Unidad	2
11.	Pletina 3/4 x 1/8	Unidad	1
12.	Masilla champion	Galón	1/4
13.	Ángulos de 1 1/2 x 5 mm	Unidad	1
14.	Pintura anticorrosiva gris mate	Galón	1/2
15.	TINNER	LITRO	4
16.	Cadena galvanizada # 32	m	2
17.	Cerradura MA	Unidad	1
18.	Rueda IND 3 in	Unidad	2
19.	Pintura negra mate	Galón	1/4
20.	Pintura verde esmeralda	Galón	1
21.	Codo pvc 50 mm	Unidad	1
22.	Silicón # 10	Unidad	2
23.	Estilete cuchilla 9 mm	Unidad	1
24.	Sika espuma boom	Unidad	1
25.	Tiras para sellar	Unidad	2
26.	Plancha de acero negro	Unidad	1
27.	Lana de vidrio aislante	m	5



## CAPÍTULO 6

# HOMOLOGACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

### 6.1 Cálculo del aporte solar mediante las curvas $f$ .

El método de las curvas  $f$ <sup>41</sup> es uno de los más utilizados para hacer cálculos de las prestaciones de los sistemas solares de baja temperatura. Se desarrolló en la universidad de Wisconsin (Beckman, Klein y Duffie, 1977).

En las instalaciones solares, los parámetros que influyen en el rendimiento del captador son muy variables, y suponer unas condiciones medias de funcionamiento supone asumir un riesgo elevado. El método aporta la fracción solar a partir de dos parámetros a dimensionales que se calculan a partir de las características técnicas de los componentes utilizados, la demanda de energía y las condiciones meteorológicas de operación.

Siendo  $f$  la fracción solar (porcentaje de la demanda que cubre al sol), se utiliza una función del tipo  $f=f(X, Y)$ .

Donde los parámetros a dimensionales utilizados son:

---

<sup>41</sup> [www.eis.uva.es](http://www.eis.uva.es)

$$X = \frac{\text{Perdidas del captador}}{\text{Demanda}} = \frac{Pc}{L}$$

$$Y = \frac{\text{Energia absorbida}}{\text{Demanda}} = \frac{Qg}{L}$$

Donde:

PC: Perdidas del captador [W].

Qg: Calor ganado por el equipo [W]

L: Demanda energética [W].

Para el análisis del aporte solar nos imponemos una condición real de trabajo del equipo lo que quiere decir que en un día de operación normal rara vez o casi nunca este recibirá las cinco horas de sol completas y continuas, la velocidad del viento la temperatura ambiente nunca serán unas constantes por lo que la demanda tampoco lo sería.

Dicho esto procedemos a evaluar el método f, considerando que el equipo estará expuesto al ambiente desde las 7:00 am hasta las 5:00 pm es decir diez horas de exposición al ambiente, con lo cual procederemos a calcular el análisis f.

$$Pc = qrv + qcv + qc$$

Por lo tanto en 5 horas de funcionamiento del equipo tenemos un total de pérdidas de

$$Pc = 1867 W$$

Y una ganancia de calor en 5 horas de:

$$Qg = 511.107 W$$

Por lo tanto:

$$X = 2.853 \quad Y = 0.781$$

Entonces la expresión que da la cobertura solar en función de los parámetros definidos es:

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3$$

Entonces evaluando La ecuación tenemos que:

$$f = 0.494$$

Este valor resulta ser pequeño puesto que estos modelos y sistemas son de aplicación de baja temperatura y de baja eficiencia.

Por lo tanto el aporte de energía es

$$f * QN = 64.613 W$$

## 6.2 Pruebas del equipo experimental

Para realizar las pruebas del equipo deberemos primero cumplir una serie de pasos los cuales están orientados a calibrar el equipo para poder aprovechar de una mejor manera la radiación solar.

### Procedimiento:

- Primero debemos orientar el equipo en forma transversal al desplazamiento del sol durante el día.



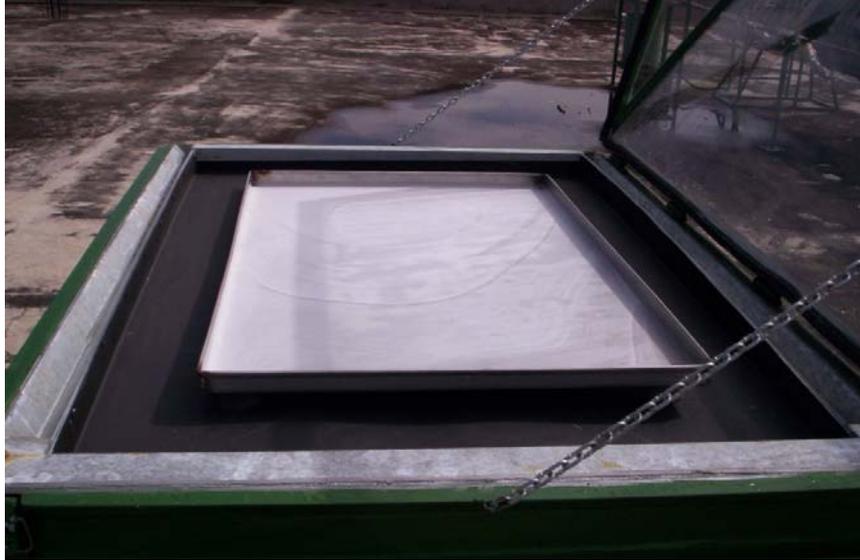
**Figura 6.1** Orientación del equipo

- Girar un ángulo igual a la latitud donde se ubicara el equipo, que para nuestra posición es de  $0^{\circ}15'$ . Por lo tanto quedaría orientado así.



**Figura 6.2** Orientación con la latitud

- Posteriormente debemos asegurarnos la limpieza del interior del destilador



**Figura 6.3** Verificación de la limpieza del destilador

- Posteriormente cargarlo con un volumen inicial de 3 litros



**Figura 6.4** Carga inicial de agua

- Luego colocar el agua en el depósito de agua y colocar el termómetro dentro del agua para poder medir la temperatura del líquido.



**Figura 6.5** Termómetro en el agua

- A continuación colocamos la termocupla que nos permitirá medir la temperatura ambiente del interior.



**Figura 6.6** Termocupla en el interior

- Para medir la temperatura de la superficie de la cubierta utilizamos el termómetro infrarrojo, el mismo que previamente es calibrado para medir la temperatura de la superficie del vidrio, con un valor de 0.85.



**Figura 6.7** Termómetro infrarrojo

- Para medir la velocidad del viento utilizamos el anemómetro.



**Figura 6.8** Anemómetro

- Recolección del condensado.



**Figura 6.9** Agua destilada

- Finalmente tenemos el equipo en funcionamiento mostrado en la siguiente fotografía.



**Figura 6.10** Equipo en funcionamiento

Procederemos a llenar la siguiente tabla tomando los datos experimentales cada quince minutos según la nomenclatura indicada.

Donde:

Ta: Temperatura ambiente.                      T<sub>H2O</sub>: Temperatura del agua.  
 HR: Humedad relativa.                      W: Velocidad del viento.  
 Tc: Temperatura de cubierta.              H: Irradiación solar.  
 Ti: Temperatura interior.

**Tabla 6.3** Hoja de pruebas

Orden	Hora		Tiempo	Ta	HR	Tc	Ti	TH2O	W
	de	hasta	min	°C	%	°C	°C	°C	m/s
1	09:15	09:30	00:15	21.2	58	24	29.5	17	0
2	09:30	09:45	00:30	22.5	58	25	30	18	0
3	09:45	10:00	00:45	23.1	54	27.0	34.4	20	0.0
4	10:00	10:15	01:00	24.0	39	28.0	46.2	29	0.0
5	10:15	10:30	01:15	24.0	41	28.0	48.4	34	0.0
6	10:30	10:45	01:30	24.4	39	34.0	54.1	40	0.0
7	10:45	11:00	01:45	25.3	37	34.8	52.2	42	0.0
8	11:00	11:15	02:00	25.6	37	34.0	55.9	45	0.0
9	11:15	11:30	02:15	27.8	30	37.0	53.2	47	0.0
10	11:30	11:45	02:30	27.1	31	34.7	52.1	47	0.0
11	11:45	12:00	02:45	29.5	29	39.8	58.4	49	0.0
12	12:00	12:15	03:00	30.7	26	44.9	61.9	53	0.0
13	12:15	12:30	03:15	28.0	26	39.0	58.5	53	0.8
14	12:30	12:45	03:30	27.8	27	41.0	64.4	56	1.2
15	12:45	13:00	03:45	26.0	29	36.5	60.7	55	1.6
16	13:00	13:15	04:00	24.3	32	36.4	55.9	53	0.3
17	13:15	13:30	04:15	23.9	33	37.3	54.7	51	0.8
18	13:30	13:45	04:30	25.8	31	38.8	55.1	50	0.3
19	13:45	14:00	04:45	26.7	29	38.5	54.6	50	0.5
20	14:00	14:15	05:00	26.5	29	37.5	54.5	50	0.3

### 6.2.1 Características técnicas de los equipos de medición utilizados

- Termómetro infrarrojo, lo utilizamos para medir la temperatura del vidrio.



**Figura 6.11** Termómetro infrarrojo

Datos Técnicos:

Marca: Raytek.

Margen de Temperaturas: -30-900 °C.

Resolución: 0.1°C.

Tiempo de respuesta: 250 ms.

- Termocupla, la utilizamos para medir la temperatura interna del dispositivo.



**Figura 6.12** Termo - anemómetro

Datos Técnicos:

Marca: EXTECH.

Apreciación: 0.1°C.

- Termómetro ambiente, lo utilizamos para medir la temperatura ambiente y la humedad relativa



**Figura 6.13** Termómetro digital

Marca: EXTECH.

Datos Técnicos:

Precisión: 0.1°C.

- Termómetro de bulbo, lo utilizamos para medir la temperatura del agua.



**Figura 6.14** Termómetro de bulbo

Marca: EXTECH.

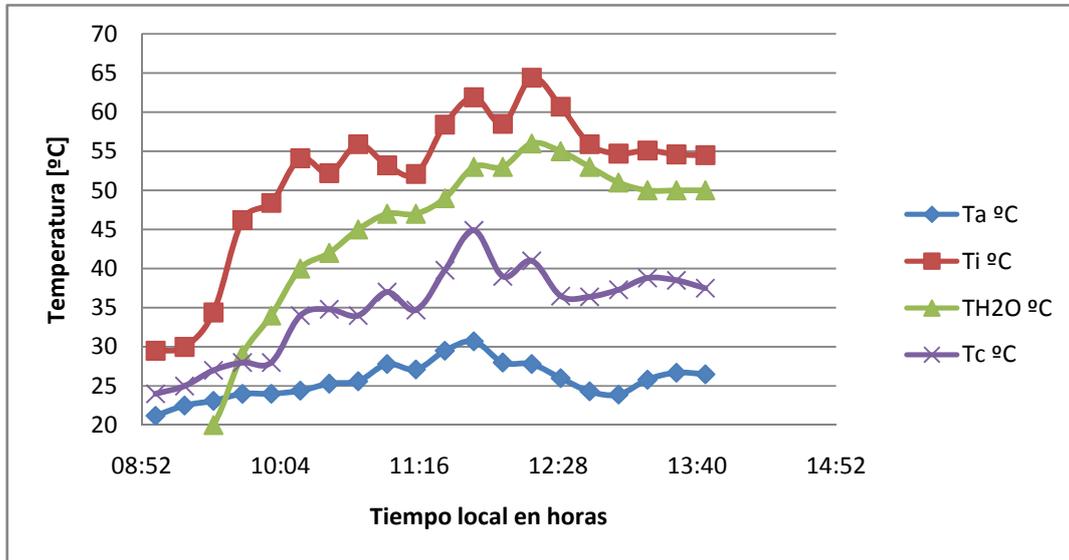
Datos Técnicos:

Precisión: 0.1°C.

### **6.3 Análisis de las pruebas de funcionamiento.**

De las pruebas de funcionamiento realizadas al modelo experimental de destilador solar el día 16 de abril de 2008, a partir de las 9:15 hasta las 14:15 es decir con un total de 5 horas de funcionamiento del equipo tenemos que:

Las temperaturas experimentales registradas a lo largo del tiempo de prueba para nuestro modelo experimental con la orientación indicada anteriormente son mostradas en la figura siguiente:

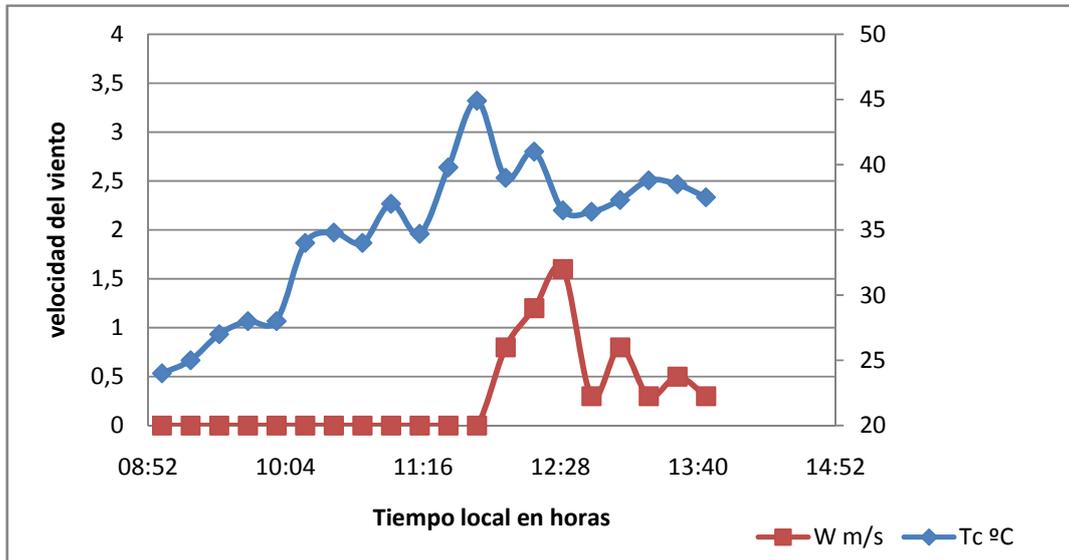


**Figura 6.15** Temperaturas experimentales

Como podemos ver en la figura 6.13 existen claras diferencias en las temperaturas medidas, sin embargo podemos apreciar que poseen una tendencia similar con un pico notorio en todas las temperaturas medidas alrededor del medio día, también es importante notar que la temperatura del agua y la temperatura interior se incrementan progresivamente hasta llegando aparentemente a una estabilización térmica, es decir incrementaron paulatinamente su temperatura hasta llegar mantenerla constante pasado el medio día de operación.

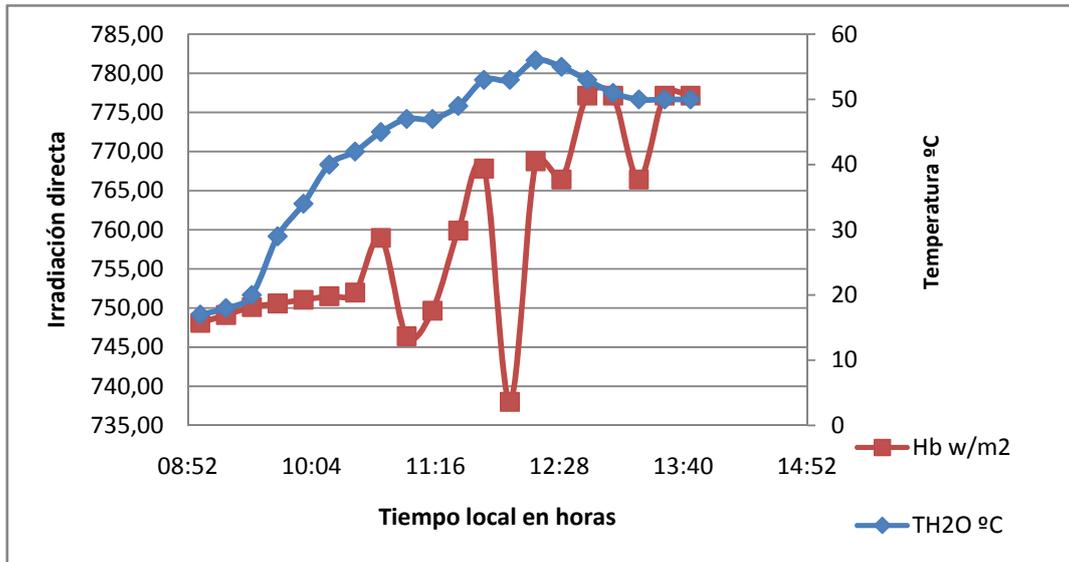
La temperatura de la cubierta sufre un incremento progresivo en las primeras horas de funcionamiento del equipo en las cuales no se registra velocidad de viento alguna, sin embargo como se puede ver a partir del medio día empieza haber presencia de viento en el lugar del funcionamiento del equipo, lo que determina claramente un descenso de la temperatura de cubierta lo que favorece

al enfriamiento y condensado del vapor y por ende mejora la producción de destilado.



**Figura 6.16** Influencia de la velocidad del viento.

Según la figura siguiente la temperatura del agua se va incrementando a lo largo del tiempo de operación del equipo, simultáneamente vemos una tendencia al incremento a lo largo del periodo de prueba en la irradiación que llega al equipo teniendo por su puesto unas caídas que corresponden a los instantes en que las nubes cubrían parcial o totalmente el sol, dicho esto podemos verificar que el modelo experimental trabaja con los dos tipos de energía disponibles como son la irradiación directa y la irradiación difusa.



**Figura 6.17** Irradiación sobre el equipo

Finalmente obtuvimos los siguientes resultados y comparándolos con los cálculos teóricos tenemos:

**Tabla 6.4** Comparación de resultados

Parámetro	Unidades	Teórico	Real
Irradiación (promedio)	W/m <sup>2</sup>	802.46	789.86
Volumen inicial	mml	3000.00	3000.00
Volumen destilado	mml	743.00	700.00
X % destilado	%	0.25	0.23
eficiencia	%	0.23	0.22

Como podemos apreciar en la tabla 6.4 hemos verificado que las ecuaciones aplicadas al cálculo del modelo termodinámico de destilador solar son validas.

#### 6.4 Análisis foda.

Este tipo de análisis representa un esfuerzo para examinar la interacción entre las características particulares de su negocio y el entorno en el cual éste compete. Para nuestro caso aplicaremos este análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas a nuestro modelo experimental de destilador solar.

**Tabla 6.5 Foda**

<b>Fortalezas</b>	<p>Se logra la obtención de agua dulce o pura a partir de aguas residuales o agua sal.</p> <p>Se utiliza energías no convencionales como es la solar lo que permite conservar el sistema medioambiental.</p> <p>Los estudios realizados en la elaboración de este proyecto son los más adecuados y concretos.</p>
<b>Oportunidades</b>	<p>Se busca beneficiar a comunidades las cuales carecen de sistemas de distribución de agua potable.</p> <p>Se estudia nuevas formas de obtención de agua dulce.</p> <p>En busca nuevas y mejores implementaciones en el campo ecológico.</p>
<b>Debilidades</b>	<p>Requiere de grandes cantidades de energía para su funcionamiento.</p> <p>El tiempo de funcionamiento del equipo debe ser de 5 horas.</p> <p>La eficiencia del prototipo es muy baja.</p> <p>La obtención del agua dulce o pura es en pocas cantidades.</p>
<b>Amenazas</b>	<p>La principal amenaza es el efecto medio ambiental el cual afectara la vida útil del prototipo desarrollado.</p> <p>La mala utilización del equipo dará como resultado un prematuro desgaste.</p> <p>Puede ser susceptible a daños por terceros si no se le da la debida seguridad.</p>

## **6.5 Mantenimiento del equipo.**

EL equipo fue seleccionado por su baja mantenibilidad, por lo que este punto se limita únicamente al siguiente procedimiento o guía para mantenimiento.

### **6.5.1 Mantenimiento predictivo.**

En cada recarga verificar:

Estado de los cubierta.

Estado de los canales de recolección.

Estado de la estructura soporte

Estado del exterior del equipo

### **6.5.2 Mantenimiento preventivo.**

Semanalmente realizar limpieza general para evitar acumulación de suciedades tanto en la cubierta como en la bandeja, para la primera utilizar un limpiador de vidrios común, y para la bandeja alcohol y polvo de tiza.

Cada 3 meses revisar estado de la pintura exterior verificar zonas afectadas por corrosión (recomendado limpiar y pintar), realizar limpieza general.-

### **6.5.3 Mantenimiento correctivo.**

Anualmente limpiar zonas afectadas por corrosión y pintar, esto alargara la vida útil del equipo.

## **6.6 Guía de prácticas de laboratorio.**

Puesto que partiendo desde el tema de nuestro proyecto es “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR DE AGUAS RESIDUALES

PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES-DECEM”, procedemos a elaborar una guía práctica de laboratorio.

Para ver la “Guía de laboratorio” ir al anexo D



## **CAPÍTULO 7**

# **ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO**

### **7.1 Análisis económico.**

Por la naturaleza del proyecto que hemos desarrollado en la presente tesis, este está destinado a servir en poblaciones en las cuales no poseen un sistema de distribución de agua potable o este sea precario, así como también en lugares en los cuales sean temporalmente afectados por la furia de la naturaleza, lo que provocaría que no se posea que los sistemas públicos de distribución de agua colapsen y la población no pueda satisfacer sus necesidades básicas de alimentación, aseo y otras afines, procurando evitar las enfermedades causadas por ingerir agua contaminada.

Dicho esto presentamos en nuestro proyecto una solución ecológica para que en poblaciones que no cuentan con un sistema público de distribución de agua que funcione ininterrumpidamente o si es el caso, que no haya perspectivas de construcción inmediata. Para ello determinaremos los costos de fabricación del equipo, así mismo se desarrolla un análisis de viabilidad sustituyendo materiales que pueden abaratar los costos de fabricación del equipo.

Sin embargo esto puede repercutir en la vida útil del mismo.

### **7.1.1 Determinación de costos**

Para la determinación de los costos vamos a tomar en consideración los más relevantes que intervienen en un análisis financiero.

#### **Costos materia prima directa:**

Son todos aquellos ítems que intervienen directamente y formaran parte del equipo, están detallados a continuación.

#### **Costos de mano de obra directa:**

Son todos aquellos costos que intervienen directamente en la fabricación del equipo y están detallados a continuación.

#### **Costos materia prima indirecta:**

Son todos aquellos ítems que intervienen indirectamente directamente y no formaran parte del equipo, están detallados a continuación.

#### **Costos de mano de obra indirecta:**

Son todos aquellos costos que intervienen indirectamente en la fabricación del equipo y están detallados a continuación.

#### **Imprevistos:**

Es un valor adicional a considerar si en el transcurso del proyecto incurriéramos en algún gasto no contemplado en los desgloses anteriores, con la finalidad de simplificarlo realizaremos una recarga del 10% al mayor valor establecido anteriormente. En nuestro caso el de la mano de obra indirecta.

**Tabla 7.1** Costos de materia prima directa.

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	V U.	V T.
1.	Pernos cabeza hexagonal 1/2in x 1 in	Unidad	32	0.1416	4.53
2.	Tornillos milimétricos en inox, M10 x 10	Unidad	18	0.0748	1.41
3.	Tuercas de acero inoxidable milimétricas m4	Unidad	18	0.0470	0.85
4.	Pernos de acero UNC 4 x 15	Unidad	18	0.0672	1.21
5.	Tuercas de acero negro UNC 4	Unidad	18	0.0157	0.28
6.	Rodelas de acero inoxidable plana 3/16	Unidad	32	0.018	0.65
7.	Angulo de 11/4x3/16	Unidad	2	9.50	9.50
8.	Vidrio transparente 4 mm	m <sup>2</sup>	2	20	40
9.	Angulo 1 x 3/16	Unidad	2	8.60	7.20
10.	Angulo 20 x 2 mm	Unidad	2	4.82	9.64
11.	Pletina 3/4 x 1/8	Unidad	1	3.12	3.12
12.	Masilla champion	Galón	1/4	4.15	4.15
13.	Ángulos de 11/2 x 5 mm	Unidad	1	12.00	12.00
14.	Pintura anticorrosiva gris mate	Galón	1/2	3.26	6.19
15.	TINNER	LITRO	4	1.02	4.04
16.	Cadena galvanizada # 32	m	2	4.01	8.02
17.	Cerradura MA	Unidad	1	3.56	3.56
18.	Rueda IND 3 in	Unidad	2	2.13	4.26
19.	Pintura negra mate	Galón	1/4	4.65	4.65
20.	Pintura verde esmeralda	Galón	1	10.00	10.00
21.	Codo pvc 50 mm	Unidad	1	0.63	0.63
22.	Silicón # 10	Unidad	2	5.79	11.48
23.	Estilete cuchilla 9 mm	Unidad	1	0.53	0.53
24.	Sika espuma boom	Unidad	1	4.45	4.45
25.	Tiras para sellar	Unidad	2	6.96	13.92
26.	Plancha de acero negro	Unidad	1	83.6	83.6
27.	Lana de vidrio aislante	m	5	5	25
				Subtotal	274.87
				IVA 12%	32.98
				Total	307.85

**Tabla 7.2** Costos de mano de obra directa.

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	V U.	V T.
1.	Cortes de plancha acero inoxidable	Corte	8	1	8.00
2.	Cortes de plancha acero negro	Corte	20	1	20.00
3.	Corte de ángulos	Corte	20	0.45	9.00
4.	Taladrado de banco	Hora	4	5	20.00
5.	Soldadura	Horas	4	10	40.00
6.	Esmerilado de aristas	Horas	1	7	7.00
7.	Cortado de maderos	Cortes	28	0.10	2.80
8.	Limpieza de escoria (grata)	Horas	1	7	7.00
9.	Pintura	Horas	5	5	25.00
10.	Limpieza final	Horas	1	5	5.00
11.	Cortes de vidrio	Corte	14	0.35	4.90
12.	Honorario estudiante 1	Horas	16	3	48
13.	Honorario estudiante 2	Horas	16	3	48
				Subtotal	244.7
				IVA 12%	29.36
				Total	274.06

**Tabla 7.3** Costos de materia prima indirecta.

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	V U.	V T.
1.	Llave mixta Stanley # 7	Unidad	1	1.92	1.92
2.	Broca HSS dormer 4 mm	Unidad	1	0.73	0.73
3.	Lija de hierro #4	Unidad	1	0.53	0.53
4.	Lija de hierro #2	Unidad	1	0.45	0.45
5.	Rodillo de felpa 9 in	Unidad	1	1.18	1.18
6.	Broca HSS dormer 13 mm	Unidad	1	10.80	10.80
7.	Pistola para silicón	Unidad	1	3.00	3.00
8.	Lana de acero # 6	Unidad	2	0.45	.90
9.	Cinta maskin 1 in	Unidad	1	0.50	0.50
				Subtotal	20.01
				IVA 12%	2.40
				Total	22.41

**Tabla 7.4 Costos de mano de obra indirecta**

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	V U.	V T.
	Director	Hora	20	16.00	320.00
	Codirector	Hora	20	16.00	320.00
	Papel	Resma	1	4.00	4.00
	Servicios de internet	Hora	60	.50	30.00
	Transporte	Hora	16	20	320.00
				Subtotal	994
				IVA 12%	119.28
				Total	1113.28

**Tabla 7.5 Imprevistos**

Ítem	Detalle	Unidad	Costos de	V T.
	Imprevistos	10%	MOI	111.30

### 7.1.2 Costos de producción

Son todos aquellos rubros que intervienen en el proceso de fabricación del bien o servicio, que en nuestro caso son los siguientes:

**Tabla 7.6 Costos de producción**

Detalle	Año 0
Costo de materia prima directa	307.85
Costo de mano de obra directa	274.06
Costo de materia prima indirecta	22.41
Costo de mano de obra indirecta	1113.28
Imprevistos	111.30
Costo Total	1828.9

### 7.1.3 Depreciación

Para el cálculo de la depreciación de nuestro equipo consideraremos lo siguiente:

Depreciación por tasa constante

Número de años de vida útil del equipo 20 años

Número de años máximo a depreciarse  $n = 10$  años.

Valor inicial del equipo:  $V_0 = 2000$  usd

Valor final del equipo:  $V_f = 310$  usd

Dicho esto calculamos la tasa de depreciación

$$\phi = 1 - \sqrt[n]{\frac{V_f}{V_0}}$$

$$\phi = 0.17$$

Por lo tanto tenemos que la depreciación del periodo  $ai$  es:

$$ai = \phi * Vi$$

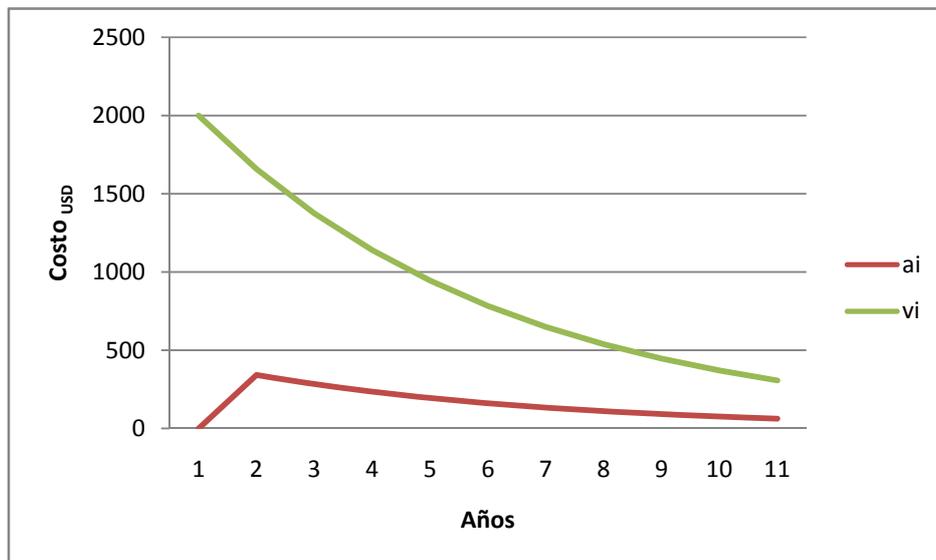
Donde  $vi$  es el valor final del periodo.

Elaboramos una tabla para el número de años de vida útil en el cual vamos a depreciar nuestro equipo y tenemos:

**Tabla 7.7** Depreciación por tasa constante

Años	ai	vi
0	-	2000.00
1	341.79	1658.21
2	283.38	1374.84
3	234.95	1139.89
4	194.80	945.09
5	161.51	783.58
6	133.91	649.67
7	111.02	538.65
8	92.05	446.60
9	76.32	370.28
10	63.28	307.00

Graficando lo expresado en lo anterior tenemos lo siguiente



**Figura 7.1** Depreciación del equipo

Es muy importante realizar este análisis puesto que un proyecto que va a ser destinado a servir en áreas donde la infraestructura de agua potable no llegue quizá en el tiempo de vida útil del equipo y para ese entonces se pueda contar con

el presupuesto para poder desarrollar nuevamente el equipo o mejorarlo.

#### **7.1.4 Mercado potencial**

El equipo está destinada a las áreas rurales.

El equipo podrá ser fabricado en serie para proveer a organismos del estado equipos que puedan ser utilizados en caso de desastres naturales.

Áreas donde no se cuente con la infraestructura del sistema de público de distribución de agua.

Hoteles y proyectos turísticos ubicados en zonas donde el agua para beber sea un limitante.

Senderos y caminos ecológicos para dar un mejor servicio a los turistas.

#### **7.1.5 Ingresos**

Con la finalidad de realizar un estudio económico viable dentro de los próximos 10 años planteamos un precio inicial a nuestro equipo de 500 usd., que representa una alternativa inmediata y de bajo costo; el equipo año a año se incrementara en un valor de 50 usd, es decir el equipo en el decimo año terminara costando 950 usd, sin embargo cabe notar que en el cuarto y quinto año se realizara una importante inversión en tecnología, lo que mejorara nuestros diseños originales., incluimos un préstamo inicial de 10000 usd., valor con el cual iniciaremos el montaje de nuestra fabrica, también destacan los ingresos por prestación de servicio, que pueden ser ya sea mantenimiento del equipo o charlas acerca del mismo, seminarios, conferencias, capacitación, etc.

Dentro de los próximos 10 años estimamos seguir el siguiente orden, puesto que en el mercado nacional las empresas nuevas sucumben ante la copia de ideas, es por este motivo que predecimos un modelo de ventas a seguir.

**Tabla 7.8 Ingresos**

Periodo	Unidades vendidas	Ingresos			
		Inversión	Préstamo	Servicio	Ventas
0	0	2000.00		-	-
1	25	-	10000.00	1000.00	12500.00
2	30	-	-	1010.00	15000.00
3	35	-	-	1020.10	17500.00
4	40	-	-	1030.30	20000.00
5	40	-	-	1040.60	20000.00
6	35	-	-	1051.01	17500.00
7	40	-	-	1061.52	20000.00
8	45	-	-	1072.14	22500.00
9	40	-	-	1082.86	20000.00
10	35	-	-	1093.69	17500.00

### 7.1.6 Egresos

Para el análisis de los egresos estimamos un aumento del 5% anual en los valores de materia prima y mano de obra tanto directa como indirecta, en cuanto a los imprevistos estimamos un aumento anual del 1% de su valor inicial, incluimos una empresa aseguradora para proteger nuestros activos y nuestro patrimonio, también se incluye una depreciación anual estimada en un valor inicial de 1000 usd., los gastos por administración y ventas se estima una tasa de crecimiento del 1% , los de publicidad un 5%, el préstamo está fijado en la tasa activa actual del 8% y la consideraremos constante en los 10 años del presente análisis.

**Tabla 7.9 Egresos**

Egresos												
Montaje fabrica	Inversión tecnología	Directos		Indirectos		Imp.	Seguros	depreciación	Gastos			
		M-P	M-O	M-P	M-O				Admr.	Ventas	Préstamo	Publicidad
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10000.00		307.85	274.06	22.41	1113.28	111.30	1000.00	1000.00	5000.00	600.00	1000.00	2000.00
		323.24	287.76	23.53	1168.94	112.41	1000.00	1000.00	5050.00	606.00	1800.00	2100.00
		339.40	302.15	24.71	1227.39	113.54	1000.00	1000.00	5100.50	612.06	1890.00	2205.00
	5000.00	356.37	317.26	25.94	1288.76	114.67	1000.00	1000.00	5151.51	618.18	1984.50	2315.25
	5000.00	374.19	333.12	27.24	1353.20	115.82	1000.00	1000.00	5203.02	624.36	2083.73	2431.01
		392.90	349.78	28.60	1420.86	116.98	1000.00	1000.00	5255.05	630.61	2187.91	2552.56
		412.55	367.27	30.03	1491.90	118.15	1000.00	1000.00	5307.60	636.91	2297.31	2680.19
		433.18	385.63	31.53	1566.50	119.33	1000.00	1000.00	5360.68	643.28	2412.17	2814.20
		454.83	404.91	33.11	1644.82	120.52	1000.00	1000.00	5414.28	649.71	2532.78	2954.91
		477.58	425.16	34.77	1727.06	121.73	1000.00	1000.00	5468.43	656.21	2659.42	3102.66

**7.1.7 Flujo neto de caja**

De aquí determinamos tanto la sumatoria de los ingresos como la sumatoria de los egresos, realizamos la respectiva diferencia y encontramos el flujo neto de caja, para el cálculo de los indicadores ayudados del programa MICROSOFT EXEL, podemos determinar tanto la TIR y el VAN, los cuales determinaran si el proyecto es viable o no.

**Tabla 7.10 Flujo de caja neto e indicadores económicos**

Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
∑ Ingresos	2000.0	23500.0	16010.0	18520.1	21030.3	21040.6	18551.0	21061.5	23572.1	21082.9	18593.7
∑ Egresos	0.0	22428.9	13471.9	13814.8	19172.4	19545.7	14935.2	15341.9	15766.5	16209.9	16673.0
FCN	2000.0	1071.1	2538.1	4705.3	1857.9	1494.9	3615.8	5719.6	7805.6	4873.0	1920.7
INDICADORES											
TIR	102.50%										
VAN	\$18,282.76										
VA	3.604										

## 7.2 Análisis financiero

Como podemos ver en el punto anterior si invertimos en nuestro proyecto obtendremos una tasa interna de retorno muy efectiva pero a su vez esta no nos indica un proyecto rentable, pero si nos dice mucho acerca de la variación de los ingresos tanto por ventas como la variación de nuestros gastos. Con esto podemos darnos cuenta que nuestra TIR, nos dice que deberemos cuidar mucho la inversión de nueva tecnología y la protección de los diseños ya que una variación negativa en el nicho de mercado nos dejaría un mal sabor.

El valor actual neto o VAN, representa una actualización del monto de dinero a través del tiempo pero traído a la actualidad es decir si decidiéramos realizar esa inversión con todos los puntos planteados y planeados en el análisis económico, podríamos traer hoy en día 18.300 usd.

Así mismo el valor actual VA como podemos apreciar es de 3.604 usd. Esto quiere decir que si nosotros invertimos un dólar para nuestro proyecto actualmente podríamos recuperar 3 usd.

Adicionalmente del análisis económico hecho prevemos que nuestra inversión estará recuperada en menos de dos años.



## **CAPÍTULO 8**

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **8.1 Conclusiones**

Se desarrollo el “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR DE AGUAS RESIDUALES PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES-DECEM”, proyecto que servirá para la realizar pruebas de laboratorio de energías renovables y la homologación de equipos o diseños posteriores.

Del estudio realizado en el capítulo 3 y su mejor alternativa concluimos que el destilador de dos vertientes es el que posee una mayor eficiencia, bajo costos de fabricación, en fin cumple con la mayoría de los requerimientos que podemos esperar al momento de construir y montar el prototipo o en su efecto adquirirlo.

En el caso de los materiales que empleamos en la construcción fueron los más convenientes ya que el acero inoxidable por sus propiedades fisicoquímicas nos permite tener una vida útil prolongada respecto del costo del mismo, así tenemos también en la parte del asilamiento la lana de vidrio fue la más económica y que

nos dio muy buenos resultados al preservar el calor en la parte interna del destilador.

El prototipo fue probado en condiciones no tan optimas de funcionamiento y aun así logro obtener el ambiente deseado es decir el de efecto invernadero ya que la radiación difusa que llega de la atmosfera se concentro en el interior del destilador, permitiendo así que el agua que se encuentra en el interior se destile de manera efectiva.

La realización de las pruebas de funcionamiento demostraron y comprobaron la valides del modelo matemático utilizado en el diseño de este proyecto

En las prácticas realizadas al prototipo se comprobó que los materiales están debidamente utilizados en la parte media del destilador existe la suficiente rigidez para que el destilador no sufra ningún pandeo, no se deforma ante el calor que se genera interna y externamente en el prototipo.

La eficiencia térmica del destilador solar es del 22%, con un volumen inicial de 3 litros, valor que puede ser incrementado ya que en un día total de operación el destilador solar producirá condensado en las noches por la capacidad térmica de almacenamiento de calor por parte de los materiales utilizados.

Para reducir los costos de fabricación nos debemos basar en los diagramas de procesos y planos de construcción los cuales nos permiten seguir de manera eficiente y ágil la planificación necesaria al momento de realizar el proceso de fabricación de cada una de las partes que conforman el prototipo así como su posterior montaje.

## 8.2 Recomendaciones

Para la presente realización del prototipo se recomienda la utilización de ropa de trabajo adecuada para la fabricación y montaje del mismo ya que algunos de los materiales que se van a emplear son tóxicos y pueden generar cáncer, además los procesos de fabricación que requiere el prototipo generan gases que suelen ser perjudiciales para la salud humana.

Hay que tener cuidado en la manipulación de cada elemento, tener presente que podemos ser afectados al momento de emplear maquinaria o herramientas de trabajo.

Para obtener una mejor eficiencia del prototipo se puede invertir en material de aislamiento de mejores propiedades termo físicas que permitan una mayor concentración de calor en la parte interna del destilador.

Se debe tomar en cuenta que el área del condensador debe ser similar a la del colector solar y que el ángulo de inclinación de la cubierta si bien es cierto debe ser igual al de la latitud donde operara el destilador, debemos considerar que un ángulo por inferior de los 20° ocasionara que las gotas no resbalen hacia los canales recolectores y un ángulo superior a los 30° generar un espacio demasiado grande lo que aumentara las pérdidas de calor por convección.

Se debe considerar la correcta nivelación y orientación del prototipo para obtener un mejor funcionamiento del mismo.

Se debe realizar un buen mantenimiento para la conservación del prototipo ya que como se encuentra a la intemperie el ambiente mismo que lo rodea causa degradación del mismo.



## Fuentes de información

### Referencias bibliográficas:

ALMANZA R.; Ingeniería de la Energía Solar, primera edición, Primera Ed. México, DF. 1194. pp. 163-175.

BENAVIDES, S.; Diseño y construcción de una cocina solar experimental, de tipo cilíndrico parabólico con aplicación al sector rural marginal. Tesis Ing. Mecánico. Sangolqui. Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. 2006

CENGEL, Y.; BOLES, M., Termodinámica. Tomo I. Cuarta Ed. México. McGraw-Hill. 2002

DUFFIE, J.; BECKMAN, W., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons. 1980.

HEREDIA, D.; MOYA F.; Diseño y construcción de un modelo experimental de refrigeración solar intermitente mediante el ciclo de absorción con la solución de agua-amoniaco. Tesis Ing. Mecánico. Quito. Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. 2007

HOLLMAN J, O. Thermodynamics. Cuarta Ed. McGraw-Hill.

INCROPERA, F y DE WITT, D. Fundamentos de Transferencia de Calor. Cuarta Ed. México .Prentince-Hall. 1999.

OÑATE A. Diseño y Construcción de un Destilador Solar de Frutas. Tesis de Grado. Ing. Mecánico. Sangolqui. Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ingeniería Mecánica. 1997,.



### **Direcciones electrónicas utilizadas.**

Analogía termoeléctrica

[www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia\\_de\\_calor\\_031\\_analogia\\_termoelectrica.htm](http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia_de_calor_031_analogia_termoelectrica.htm)

Como obtener agua

[www.asde.scouts.es/net/gs477/Documentacion/Talleres/obtener%20agua.htm](http://www.asde.scouts.es/net/gs477/Documentacion/Talleres/obtener%20agua.htm)

Desinfección de Emergencia del Agua Potable

[www.epa.gov/safewater/faq/pdfs/fs\\_emergency-disinfection-drinkingwater-2006\\_spanish.pdf](http://www.epa.gov/safewater/faq/pdfs/fs_emergency-disinfection-drinkingwater-2006_spanish.pdf)

Destilación mediante energía solar térmica directa

[www.news.soliclima.com/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=146](http://www.news.soliclima.com/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=146)

Efecto del aire en movimiento sobre la temperatura (tomada de Kane y Sternheim)

[www2.udec.cl/~dfiguero/curso/concon/concon.html](http://www2.udec.cl/~dfiguero/curso/concon/concon.html)

Evaluación experimental de un destilador colector solar acumulador

[www.ingenieroambiental.com/4014/destilador.pdf](http://www.ingenieroambiental.com/4014/destilador.pdf)

Irradiaciones, global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal para la república mexicana.

[www.solartronic.com/download/radiacion.pdf](http://www.solartronic.com/download/radiacion.pdf)

Calculo del aporte energético

[www.eis.uva.es/energias-renovables/trabajos\\_06/PlatonArias.pdf](http://www.eis.uva.es/energias-renovables/trabajos_06/PlatonArias.pdf)

Potabilización del agua

[www.ingenieroambiental.com/?pagina=833](http://www.ingenieroambiental.com/?pagina=833)

Potencia máxima emitida. Cuerpo negro. Emisividad. Absortividad.

[www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia\\_de\\_calor\\_06\\_radiacion.htm](http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia_de_calor_06_radiacion.htm)

Transmisión de calor por convección, correlaciones para la convección natural.

[www.personales.ya.com/universal/TermoWeb/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/14.pdf](http://www.personales.ya.com/universal/TermoWeb/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/14.pdf)

Teoría de la destilación solar en vacío

[www.redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/114/11400407.pdf](http://www.redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/114/11400407.pdf)

## **Anexo A**

### **PLANOS DE CONSTRUCCIÓN**

- Anexo AI:** Isometría del conjunto
- Anexo AII:** Vista armada del conjunto
- Anexo AIII:** Estructura portante
- Anexo AIV:** Vista explotada cuerpo del destilador
- Anexo AV:** Estructura portante
- Anexo A1:** Cubierta destilador
- Anexo A2:** Vidrio de cubierta
- Anexo A3:** Vidrio de cubierta
- Anexo A4:** Tapa posterior
- Anexo A5:** Tapa delantera
- Anexo A6:** Deposito de agua
- Anexo A7:** Canales recolectores
- Anexo A8:** Colector solar
- Anexo A9:** Tubo recolector
- Anexo A10:** Soporta tubo
- Anexo A11:** Perfil sujetador superior

**Anexo A12:** Laterales del colector

**Anexo A13:** Perfil sujetador inferior

**Anexo A14:** Guías para madera

**Anexo A15:** Guías para madera

**Anexo A16:** Guías para madera

**Anexo A17:** Maderos espaciadores

**Anexo A18:** Tapa inferior del colector

**Anexo A19:** Estructura portante

## **Anexo B**

### **DIAGRAMAS DE PROCESOS**

- Anexo B1:** Bandeja de agua
- Anexo B2:** Colector solar
- Anexo B3:** Tapa del colector
- Anexo B4:** Guías para maderas
- Anexo B5:** Maderos
- Anexo B6:** Conjunto armado del fondo
- Anexo B7:** Canales
- Anexo B8:** Laterales
- Anexo B9:** Perfil sujetador superior
- Anexo B10:** Perfil sujetador inferior
- Anexo B11:** Tubo
- Anexo B12:** Cuerpo del cuerpo del destilador
- Anexo B13:** Perfiles de la cubierta
- Anexo B14:** Pletina
- Anexo B15:** Perfiles de la cubierta
- Anexo B16:** Manija

**Anexo B17:** Ventana superior

**Anexo B18:** Ventana lateral

**Anexo B19:** Conjunto armado de la cubierta

**Anexo B20:** Tapa delantera

**Anexo B21:** Tapa posterior

**Anexo B22:** Perfil superior mesa

**Anexo B23:** Perfil inferior mesa

**Anexo B24:** Perfil soporta mesa

**Anexo B25:** Estructura portante Destilador solar

**Anexo B26:** Destilador solar

## **Anexo C**

### **PRESIÓN DEL VAPOR DE AGUA A VARIAS TEMPERATURAS**



## **Anexo D**

### **GUÍA DE PRACTICAS DE LABORATORIO**



## LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES

### **Consideraciones preliminares**

*El siguiente equipo ha sido diseñado y probado para un periodo de funcionamiento de cinco horas, es decir la tabulación de datos de la presente práctica deberá llevarse a cabo a partir de las nueve de la mañana y deberá finalizar a las dos de la tarde, intervalo de tiempo considerado como un día de sol.*

**Tema:** Destilador solar de dos vertientes.

### **1. Objetivos:**

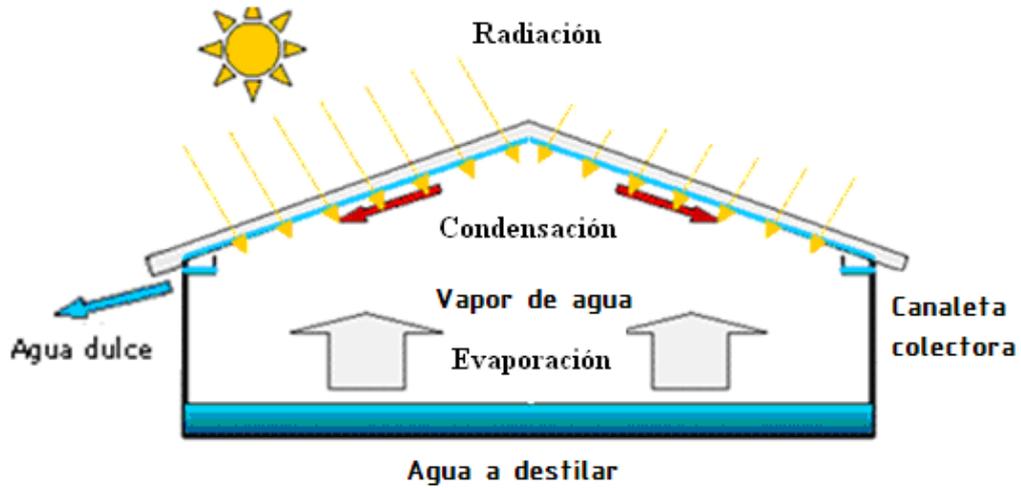
- Analizar el fenómeno que gobierna el proceso.
- Determinar el porcentaje de masa evaporada en un día de sol y la eficiencia del presente modelo experimental.
- Determinar la irradiación solar existente en el área.

### **2. Marco teórico.**

#### **Destilador**

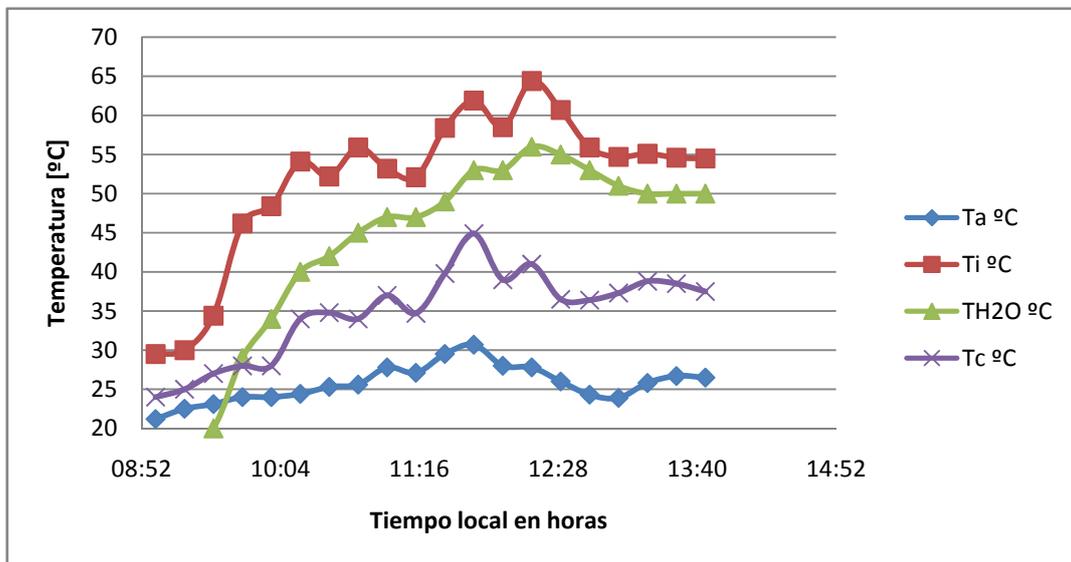
Es un sistema de desalación o destilación basado en la utilización de la energía solar térmica para la obtención de agua a través del efecto de humidificación. El vapor de agua contenido en el aire húmedo es posteriormente condensado, con lo que se obtiene agua dulce, simulando así en pequeña escala el fenómeno natural de la formación de las nubes y de la lluvia, aprovechando el denominado efecto invernadero.

A continuación se muestra un esquema del fenómeno de la naturaleza simulado a escala que rige el proceso.



**Figura 1** Operación del destilador solar

Las temperaturas experimentales registradas a lo largo de un día de sol, son mostradas a continuación, hay que considerar las condiciones climatológicas, ambientales y de operación del equipo en las cuales se llevo a cabo el ensayo que nos proporcione estos datos mostrados en la figura siguiente:



**Figura 2** Temperaturas de prueba

Por la naturaleza impredecible de las condiciones mencionadas anteriormente las

graficas a obtenerse en cada practica de laboratorio, si bien no resulten ser iguales a la mostrada anteriormente, la tendencia debería mantenerse.

### **Eficiencia del destilador**

La intensidad de la energía solar que cae sobre el destilador es el parámetro más importante que afecta la producción de agua del destilador solar. La cantidad de agua destilada producida es la cantidad de energía utilizada en la vaporización del agua en el destilador sobre el calor latente de vaporización del agua. La eficiencia del destilador solar es la cantidad de energía utilizada en la vaporización de agua en el destilador sobre la cantidad de incidencia de energía solar en el destilador.

Esto puede ser expresado como:

### **Eficiencia del destilador solar teórica:**

$$eficiencia = \frac{QN}{G}$$

Donde:

**QN:** Cantidad de calor requerida para el proceso.

**G:** Energía que llega al colector  $\left[ \frac{W-hr}{m^2-day} \right]$ ;

### **Recurso solar.**

El parámetro a medir y tabular para tener un registro de la cantidad de energía que llega al área de prueba del equipo es proporcionado por el panel fotovoltaico, la misma que es expresada por la siguiente fórmula:

$$H = \frac{Im}{3.68} * 1000$$

Donde:

***I<sub>m</sub>***: Es la cantidad de corriente continua proporcionada por las celdas de sílice del panel fotovoltaico en ese instante *t* específico [amp].

***H***: Es la cantidad de irradiación que llega al área de prueba por metro cuadrado  $\left[\frac{W-hr}{m^2-day}\right]$ ;

### **3. Procedimiento experimental:**

#### **Materiales y equipos**

##### **Proceso de destilación**

Destilador solar de dos vertientes.

Termómetro ambiental.

Termómetro de bulbo de mercurio.

Termómetro infrarrojo.

Termo – anemómetro digital.

Vaso de precipitación graduado.

Cronometro.

Brujula.

Cartulina negra de 10x10 [cm].

##### **Medición del recurso solar**

Panel fotovoltaico

Multímetro digital de corriente continua

#### **4. Procedimiento:**

1. Orientar el panel fotovoltaico y el destilador solar en forma transversal al desplazamiento del sol durante el día es decir en dirección al norte en nuestro país.
2. Girar los equipos un ángulo igual a la latitud,  $0^{\circ}15'$  noroeste para Sangolquí.
3. Medir la temperatura del agua a colocar en la bandeja colectora, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y tabular estos datos.
4. Cargar la bandeja colectora con agua, en un volumen inicial de 3 litros.
5. Colocar el termómetro de bulbo de mercurio en la bandeja colectora, el bulbo deberá estar en contacto con el agua más no con la bandeja y mirando hacia la cubierta.
6. Colocar la termocupla en el interior del destilador evitando que está entre en contacto con algún elemento, así mediremos la temperatura interna del mismo.
7. Cerrar la cubierta del destilador y colocar los seguros.
8. Medir la temperatura del interior del destilador y tabular este dato.
9. Medir la corriente continua proporcionada por el panel fotovoltaico, para esto el rayo de sol incidente debe llegar en forma perpendicular al mismo; tabular el dato.
10. Colocar en una esquina de la cubierta la cartulina negra, esperar 30 segundos y tabular la temperatura mediante el termómetro infrarrojo, una vez realizada la medición retirar la cartulina.
11. Tabular los datos pedidos en la tabla correspondiente.

## 5. Tabulación de datos

### Hoja de datos:

Orden	Hora		Tiempo	Ta	Tc	Ti	T <sub>H2O</sub>	W	Im
	De	Hasta	min	°C	°C	°C	°C	m/s	Amp
1	09:00	09:15	00:15						
2	09:15	09:30	00:30						
3	09:30	09:45	00:45						
4	09:45	10:00	01:00						
5	10:00	10:15	01:15						
6	10:15	10:30	01:30						
7	10:30	10:45	01:45						
8	10:45	11:00	02:00						
9	11:00	11:15	02:15						
10	11:15	11:30	02:30						
11	11:30	11:45	02:45						
12	11:45	12:00	03:00						
13	12:00	12:15	03:15						
14	12:15	12:30	03:30						
15	12:30	12:45	03:45						
16	12:45	13:00	04:00						
17	13:00	13:15	04:15						
18	13:15	13:30	04:30						
19	10:00	13:45	04:45						
20	13:45	14:00	05:00						

Donde:

Ta: Temperatura ambiente.

T<sub>H2O</sub>: Temperatura del agua.

Tc: Temperatura de cubierta.

W: Velocidad del viento.

Ti: Temperatura interior.

Im: Corriente continúa.

## 6. Resultados

Parámetro	Unidades	Teórico	Real
Irradiación (promedio) H	W/m <sup>2</sup>	802.46	
Volumen inicial	ml	3000.00	
Volumen destilado	ml	743.00	
X % destilado	%	0.25	
Eficiencia	%	0.23	

## 7. Graficas

Graficar  $T_a$  vs horas de sol.

Graficar  $T_i$  vs horas de sol.

Graficar  $T_{H_2O}$  vs horas de sol.

Graficar  $T_c$  vs horas de sol.

Graficar  $T_c$  y  $W$  vs horas de sol.

Graficar  $H$  y  $T_{H_2O}$  vs horas de sol.

## 8. Cuestionario.

Describir el fenómeno que gobierna el proceso.

Realizar el balance de energía del equipo.

Determinar el error experimental del equipo.

A que se debe que el destilador solar de dos vertientes posee un bajo rendimiento.

Que parámetros se puede cambiar para obtener una mayor eficiencia.

## 9. Conclusiones y recomendaciones

Valores referenciales tomados el día de prueba del equipo.

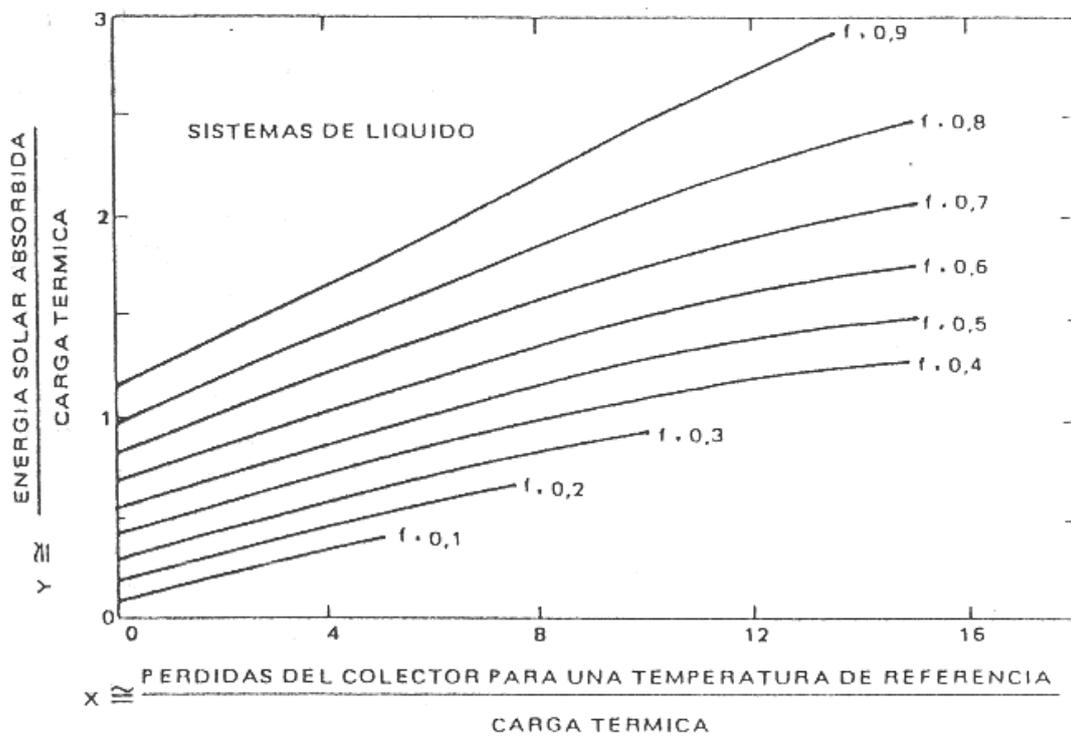
Orden	Hora		Tiempo	Ta	HR	Tc	Ti	TH2O	W	H
	De	hasta	Min	°C	%	°C	°C	°C	m/s	w/m <sup>2</sup>
1	09:45	10:00	00:15	23.1	54	27.0	34.4	20	0.0	750.13
2	10:00	10:15	00:30	24.0	39	28.0	46.2	29	0.0	750.59
3	10:15	10:30	00:45	24.0	41	28.0	48.4	34	0.0	751.06
4	10:30	10:45	01:00	24.4	39	34.0	54.1	40	0.0	751.53
5	10:45	11:00	01:15	25.3	37	34.8	52.2	42	0.0	751.99
6	11:00	11:15	01:30	25.6	37	34.0	55.9	45	0.0	758.98
7	11:15	11:30	01:45	27.8	30	37.0	53.2	47	0.0	746.40
8	11:30	11:45	02:00	27.1	31	34.7	52.1	47	0.0	749.66
9	11:45	12:00	02:15	29.5	29	39.8	58.4	49	0.0	759.91
10	12:00	12:15	02:30	30.7	26	44.9	61.9	53	0.0	767.83
11	12:15	12:30	02:45	28.0	26	39.0	58.5	53	0.8	738.01
12	12:30	12:45	03:00	27.8	27	41.0	64.4	56	1.2	768.76
13	12:45	13:00	03:15	26.0	29	36.5	60.7	55	1.6	766.44
14	13:00	13:15	03:30	24.3	32	36.4	55.9	53	0.3	777.15
15	13:15	13:30	03:45	23.9	33	37.3	54.7	51	0.8	777.15
16	13:30	13:45	04:00	25.8	31	38.8	55.1	50	0.3	766.44
17	13:45	14:00	04:15	26.7	29	38.5	54.6	50	0.5	777.15
18	14:00	14:15	04:30	26.5	29	37.5	54.5	50	0.3	777.15

Parámetro	Unidades	Teórico	Real
Irradiación (promedio)	W/m <sup>2</sup>	802.46	789.86
Volumen inicial	mml	3000.00	3000.00
Volumen destilado	mml	743.00	700.00
X % destilado	%	0.25	0.23
eficiencia	%	0.23	0.22

## **Anexo E**

**CURVAS *f***





**Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones**

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m <sup>3</sup> /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropía kJ/kg, K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^3$	$v_g$	$u_f$	$u_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_g$
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405
4,00	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600
7,00	165,0	1,1080	0,2729	696,44	2572,5	697,22	2066,3	2763,5	1,9922	6,7080
8,00	170,4	1,1148	0,2404	720,22	2576,8	721,11	2048,0	2769,1	2,0462	6,6628
9,00	175,4	1,1212	0,2150	741,83	2580,5	742,83	2031,1	2773,9	2,0946	6,6226
10,0	179,9	1,1273	0,1944	761,68	2583,6	762,81	2015,3	2778,1	2,1387	6,5863
15,0	198,3	1,1539	0,1318	843,16	2594,5	844,84	1947,3	2792,2	2,3150	6,4448
20,0	212,4	1,1767	0,09963	906,44	2600,3	908,79	1890,7	2799,5	2,4474	6,3409
25,0	224,0	1,1973	0,07998	959,11	2603,1	962,11	1841,0	2803,1	2,5547	6,2575
30,0	233,9	1,2165	0,06668	1004,8	2604,1	1008,4	1795,7	2804,2	2,6457	6,1869
35,0	242,6	1,2347	0,05707	1045,4	2603,7	1049,8	1753,7	2803,4	2,7253	6,1253
40,0	250,4	1,2522	0,04978	1082,3	2602,3	1087,3	1714,1	2801,4	2,7964	6,0701
45,0	257,5	1,2692	0,04406	1116,2	2600,1	1121,9	1676,4	2798,3	2,8610	6,0199
50,0	264,0	1,2859	0,03944	1147,8	2597,1	1154,2	1640,1	2794,3	2,9202	5,9734
60,0	275,6	1,3187	0,03244	1205,4	2589,7	1213,4	1571,0	2784,3	3,0267	5,8892
70,0	285,9	1,3513	0,02737	1257,6	2580,5	1267,0	1505,1	2772,1	3,1211	5,8133
80,0	295,1	1,3842	0,02352	1305,6	2569,8	1316,6	1441,3	2758,0	3,2068	5,7432
90,0	303,4	1,4178	0,02048	1350,5	2557,8	1363,3	1378,9	2742,1	3,2858	5,6772
100	311,1	1,4524	0,01803	1393,0	2544,4	1407,6	1317,1	2724,7	3,3596	5,6141
110	318,2	1,4886	0,01599	1433,7	2529,8	1450,1	1255,5	2705,6	3,4295	5,5527
120	324,8	1,5267	0,01426	1473,0	2513,7	1491,3	1193,6	2684,9	3,4962	5,4924
130	330,9	1,5671	0,01278	1511,1	2496,1	1531,5	1130,7	2662,2	3,5606	5,4323
140	336,8	1,6107	0,01149	1548,6	2476,8	1571,1	1066,5	2637,6	3,6232	5,3717
150	342,2	1,6581	0,01034	1585,6	2455,5	1610,5	1000,0	2610,5	3,6848	5,3098
160	347,4	1,7107	0,009306	1622,7	2431,7	1650,1	930,6	2580,6	3,7461	5,2455
170	352,4	1,7702	0,008364	1660,2	2405,0	1690,3	856,9	2547,2	3,8079	5,1777
180	357,1	1,8397	0,007489	1698,9	2374,3	1732,0	777,1	2509,1	3,8715	5,1044
190	361,5	1,9243	0,006657	1739,9	2338,1	1776,5	688,0	2464,5	3,9388	5,0228
200	365,8	2,036	0,005834	1785,6	2293,0	1826,3	583,4	2409,7	4,0139	4,9269
220,9	374,1	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3	0	2099,3	4,4298	4,4298