

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBAS DE UN DESTILADOR SOLAR**

**SUANN MELISSA COLMENARES ANGARITA**

**JAIRO ALONSO PINZON RANGEL**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIA Y ADMINISTRACION**

**BUCARAMANGA**

**2008**

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBAS DE UN DESTILADOR SOLAR**

**SUANN MELISSA COLMENARES ANGARITA**

**JAIRO ALONSO PINZON RANGEL**

**Trabajo de grado para optar el titulo de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**ALFONSO SANTOS JAIMES**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIA Y ADMINISTRACION  
BUCARAMANGA**

**2008**

**Nota de aceptación:**

El documento presentado fue calificado y aprobado por los jurados por el comité académico, bajo las normas vigentes de la universidad.

---

Firma del Presidente de Jurados

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Bucaramanga, 2008

## **DEDICATORIA**

**Este trabajo lo dedico a mis padres por la confianza y el apoyo que depositaron en mí. A mi hermana y mi hermano por su comprensión y el ánimo que me brindaron todo el tiempo. A mi compañero y gran amigo Jairo Pinzón por su constancia, energía y compañía en la elaboración de este proyecto y en la vida universitaria.**

**Melissa Colmenares.**

## **DEDICATORIA**

**Dedico este trabajo principalmente a mis padres y hermanos por seguir muy de cerca este proceso de mi vida. A mis amigos y la familia Colmenares Angarita por apoyarme en esos momentos difíciles, dándome la confianza para terminar satisfactoriamente mi proyecto de grado.**

**Jairo Pinzón**

## **AGRADECIMIENTOS**

Para llevar a cabo este proyecto exitosamente fue necesaria la colaboración de personas talentosas e íntegras.

Agradecemos profundamente al Ingeniero Alfonso Santos quien con su experiencia, conocimiento y su disposición nos apoyo y nos oriento para superar los obstáculos presentados en el transcurso del tiempo de la elaboración de este proyecto.

Al equipo de mantenimiento de la Universidad Pontificia Bolivariana, por su colaboración, en el desarrollo de las pruebas.

A los profesores y amigos de Ingeniería Mecánica.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ENRGIA SOLAR.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 UTILIZACION DIRECTA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 TRANSFORMACION EN CALOR.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 TRANSFORMACION EN ELECTRICIDAD.....</b>	<b>3</b>
<b>2. RADIACION SOLR.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 DISTRIBUCION DE PLANCK.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 RADIACION INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE.....</b>	<b>9</b>
<b>2.4 TIPOS DE RADIACION SOLAR.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4.1 Directa.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4.2 Difusa.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4.3 Albedo.....</b>	<b>11</b>
<b>2.5 PROPORCIONES DE RADIACION.....</b>	<b>12</b>
<b>2.5.1 Condiciones meteorológicas.....</b>	<b>12</b>
<b>2.5.2 Inclinación de la superficie respecto al plano horizontal.....</b>	<b>12</b>
<b>2.5.3 Presencia de superficie reflectante.....</b>	<b>12</b>

<b>3. APLICACIONES DE LA RADIACION SOLAR.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>13</b>
3.1.1 Sistemas aislados.....	13
3.1.2 Sistemas de conexión a red.....	14
3.1.3 Sistemas híbridos.....	15
<b>3.2 ENERGIA SOLAR TERMICA.....</b>	<b>16</b>
3.2.1 Calentadores solares de agua.....	16
3.2.2 Climatización de piscinas.....	17
3.2.3 Cocinas solares.....	18
3.2.4 Destilador solar.....	19
<b>4. DESTILACION SOLAR.....</b>	<b>21</b>
4.1 CONCEPTO.....	21
4.2 TIPOS DE DESTILADOR SOLAR.....	21
4.2.1 De poceta.....	21
4.2.2 De mecha.....	22
4.2.3 Destilador multiefecto.....	23
4.2.4 De caseta.....	25
4.3 EFICIENCIA DE UN DESTILADOR.....	27

<b>4.4 BALANCE TERMICO EN UN DESTILADOR SOLAR.....</b>	<b>27</b>
<b>4.4.1 Balance en la cubierta.....</b>	<b>28</b>
<b>5. CALIDAD DEL AGUA.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 IMPUREZAS DEL AGUA.....</b>	<b>31</b>
<b>5.2 ANALISIS FISICO DEL AGUA.....</b>	<b>32</b>
<b>5.2.2 Sólidos disueltos.....</b>	<b>32</b>
<b>5.2.3 Sólidos suspendidos.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2.4 Sólidos volátiles y fijos.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2.5 Sólidos sedimentables.....</b>	<b>33</b>
<b>5.3 ANALISIS BACTERIOLOGICO DEL AGUA.....</b>	<b>34</b>
<b>5.3.1 Grupo coliforme.....</b>	<b>34</b>
<b>5.3.2 Caracteres bioquímicos.....</b>	<b>34</b>
<b>5.3.3 Hábitat del grupo coliforme.....</b>	<b>34</b>
<b>5.3.4 Los coliformes como indicadores.....</b>	<b>35</b>
<b>5.3.5 Coliformes totales y coliformes fecales.....</b>	<b>36</b>
<b>5.3.5.1 Coliformes fecales.....</b>	<b>36</b>
<b>5.3.6 Contaminación fecal humana o animal.....</b>	<b>37</b>
<b>5.3.7 Coliformes y aguas frescas.....</b>	<b>37</b>

6. DISEÑO.....	38
6.1 CALCULO DEL AREA DEL DESTILADOR SOLAR.....	38
6.2 CALCULO ESPESOR DEL AISLANTE TERMICO.....	43
7. DESCRIPCION DEL EQUIPO.....	44
7.1 EQUIPOS UTILIZADOS.....	47
7.1.1 Pyranometro.....	47
7.1.2 Indicador de radiación.....	48
7.1.3 Multimetro.....	49
7.1.4 Termocupla.....	49
7.2 COMPORTAMIENTO DEL DESTILADOR.....	50
7.2.1 Evaporador.....	50
7.2.2 Condensador.....	50
8. PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	51
8.1 CALCULO DEL RENDIMIENTO DEL DESTILADOR.....	51
8.1.1 Calculo del flujo másico del agua destilada producida $m_d$ .....	52
8.1.2 Calculo del calor entregado por la fuente $\dot{Q}_{cal}$ .....	54
8.1.3 Calculo del calor latente de evaporización del agua $h_{fg}$ .....	55
8.1.4 Rendimiento del destilador $\eta$ .....	56
8.2 ANALISIS DEL AGUA.....	64

## LISTA DE FIGURAS

1. Figura 1. Naturaleza direccional de la radiación solar fuera de la atmosfera terrestre.....	6
2. Figura 2. Potencia emisiva espectral del cuerpo negro.....	8
3. Figura 3. Energía radiada por el sol y la tierra.....	9
4. Figura 4. Intensidad media de la radiación.....	10
5. Figura 5. Componente directa de la radiación solar.....	11
6. Figura 6. Sistemas fotovoltaicos.....	13
7. Figura 7. Proceso de un calentador solar de agua.....	16
8. Figura 8. Esquema básico del sistema.....	18
9. Figura 9. Esquema, en corte transversal de un destilador solar.....	20
10. Figura 10. Tipo poceta.....	22
11. Figura 11. Tipo mecha.....	23
12. Figura 12. Prototipo de un destilador multiefecto.....	24
13. Figura 13. Destilador de caseta con una pendiente.....	25
14. Figura 14. Flujo de calor en la cubierta del destilador.....	40
15. Figura 15. Temperaturas para un destilador solar de caseta.....	41
16. Figura 16. Interior del destilador solar.....	44
17. Figura 17. Paredes laterales.....	45
18. Figura 18. Sistema para levantar el vidrio.....	46

19. Figura 19. Guía del agua y prensas para ajuste del vidrio.....	46
20. Figura 20. Estructura.....	47
21. Figura 21. Pyranometro.....	48
22. Figura 22. Indicador de radiación.....	48
23. Figura 23. Multímetro.....	49
24. Figura 24. Termocupla.....	49
25. Figura 25. $\Delta T$ vs $V_d$ para cada inclinación.....	59
26. Figura 26. Eficiencia promedio respecto a la inclinación.....	60
27. Figura 27. Cambios de temperaturas respecto a la inclinación.....	61
28. Figura 28. Inclinación $0^\circ$ .....	63
29. Figura 29. Inclinación $4.5^\circ$ .....	63
20. Figura 30. Inclinación $6.5^\circ$ .....	63

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Calculo de flujo másico de agua destilada producida $\dot{m}_d$ .....	53
Tabla 2. Radiación promedia.....	55
Tabla 3. Calor latente de vaporización del agua, $h_{fg}$ .....	56
Tabla 4. Rendimiento del destilador durante las pruebas.....	57
Tabla 5. Datos promedios diarios para ángulo $0^\circ$ .....	58
Tabla 6. Datos promedios diarios para ángulo $4.5^\circ$ .....	58
Tabla 7. Datos promedios diarios para ángulo $6.5^\circ$ .....	58
Tabla 8. Promedios de $\Delta T$ y $V_d$ .....	59
Tabla 9. Promedios $T_i$ , $T_e$ , $T_a$ y $\eta_{prom}$ para cada ángulo.....	60
Tabla 10. Promedios de cada valor por hora, para ángulo $0^\circ$ .....	61
Tabla 11. Promedios de cada valor por hora, para ángulo $4.5^\circ$ .....	62
Tabla 12. Promedios de cada valor por hora, para ángulo $6.5^\circ$ .....	62
Tabla 13. Resultados del amb.....	64

## **LISTA DE ANEXOS**

**Anexo A. Tablas de la radiación solar del destilador en el periodo de pruebas**

**Anexo B. Tablas de temperatura y volumen de agua destilada diaria.**

**Anexo C. Graficas del comportamiento de la radiación solar diaria**

**Anexo D. Radiación solar en el área metropolitana de Bucaramanga**

**Anexo E. Planos del destilador**

**Anexo F. Planos de la estructura**

**Anexo G. Conjunto solid edge**

**Anexo H. Proceso de condensación por goteo en el vidrio (en sol)**

**Anexo I. Proceso de condensación por goteo en el vidrio (en sombra)**

**Anexo J. Vista trasera del destilador**

**Anexo K. Vista frontal del destilador solar**

**Anexo L. Interior del destilador solar**

**Anexo M. Guía de laboratorio del destilador**

**TITULO:** DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBAS DE UN DESTILADOR SOLAR.

**AUTOR(ES):** SUANN MELISSA COLMENARES ANGARITA, JAIRO ALONSO PINZON RANGEL.

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):** ALFONSO SANTOS JAIMES

### **RESUMEN**

La energía solar, como fuente primaria de calor en la tierra, es hoy, una de las más empleadas como energía renovable, y es por esta razón que se han creado diferentes equipos con diversas utilidades, como lo son: las cocinas solares, calentamiento de agua domiciliaria, piscinas y obtención de agua potable. El objetivo principal de este trabajo consiste en diseñar y construir un prototipo de destilador solar, para realizar pruebas en un periodo de tiempo. En el diseño y construcción del prototipo se investigó sobre el tema, se identificaron cada una de las partes del destilador y con base en eso, se diseño un modelo que consta de una carcasa, una bandeja (evaporador), un vidrio (condensador), un canal de recolección de agua potable y una estructura que se acopla a un tornillo, para la variación del inclinación De la caseta con respecto a la radiación solar. Gracias a las pruebas realizadas con el prototipo se llegó a la conclusión que es posible su uso como una forma alternativa de obtener agua potable.

**PALABRAS CLAVES:** RADIACION SOLAR, ENERGIA SOLAR, DESTILADOR SOLAR, EVAPORADOR, CONDENSADOR, INCLINACION CASETA.

**TITULO:** DESIGN, BUILDING AND PROOF OF A SOLAR STILL.

**AUTOR(ES):** SUANN MELISSA COLMENARES ANGARITA, JAIRO ALONSO PINZON RANGEL.

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):** ALFONSO SANTOS JAIMES

### **ABSTRACT**

Solar energy, as primary source of heat, is one of the most common energies used today, because of that we can find different equipment, such as: solar cooker, solar collector, solar still, e.t.c. The main goal of this work is to design and make a prototype of solar still, to put it in practice in a period of time. A research on this subject was made to design and build this prototype; all of its parts have been identified and studied in order to improve it. Thanks to that a new more competitive model is proposed, this model has a carcass, a tray (evaporator), a glass (condenser), a channel to collect water, a structure that is attached to a screw to change the angle of incidence of radiation. It has been found as a conclusion that is possible to use it a real source to drinking water

**PALABRAS CLAVES:** SOLAR RADIATION, SOLAR ENERGY, SOLAR STILL, EVAPORATOR, CONDENSER, INCIDENT'S ANGLE.

## **OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y construir un prototipo de destilador solar, con estándares de calidad y realizar pruebas con base en investigaciones de la energía renovable, para mostrar a través de prácticas en el laboratorio de transferencia de calor.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Medir periódicamente la radiación solar con los instrumentos pertinentes.
- Diseñar un prototipo que permita mostrar el proceso que le ocurre al agua contaminada, ser agua potable.
- Construir una estructura que nos permita variar el ángulo del destilador solarl.
- Determinar la eficiencia del destilador solar con base en pruebas que se realizaran.
- Diseñar guía de laboratorio.

## INTRODUCCION

A medida que pasa el tiempo y crece la problemática con el calentamiento global y los cambios de clima, se han presentado una serie de eventualidades en la naturaleza que afectan al mundo, y es ahí donde las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar.

Del estudio de la energía solar se han desarrollado diferentes tipos de equipos, como lo son: las cocinas solares, colectores solares, destiladores solares, e.t.c.

La destilación de agua para consumo humano, mediante la radiación solar, es una forma de aprovechamiento de la energía solar, y a su vez se encuentra entre las más importantes, esta técnica de purificación es muy sencilla, y se acopla a las necesidades económicas de las poblaciones que son afectadas por la contaminación del agua, ya que para su elaboración se pueden utilizar materiales de fácil acceso y de bajo costo.

La destilación solar elimina los microorganismos que se encuentran en ríos, lagos, etc., permitiendo la desinfección del agua, lo que disminuye el riesgo de contraer enfermedades debido al consumo de agua en zonas donde no existen redes de acueducto.

Este proyecto muestra un prototipo de destilador solar con ángulo de incidencia de radiación variable y eficiencia para cada uno de los días de prueba, por lo cual, puede servir como punto de partida a futuros diseños de equipos de destilación que permitan un mejor aprovechamiento de la energía solar presente en las zonas de aplicación y desarrollo de este método de purificación de agua.

## **1. ENERGIA SOLAR**

La energía solar directa, es la energía del sol sin transformar, que calienta e ilumina, se necesitan sistemas de captación y de almacenamiento para aprovechar la radiación del sol de varias maneras diferentes, entre las cuales se tienen la utilización directa y transformación en calor o electricidad.

### **1.1 UTILIZACION DIRECTA.**

Se aprovecha la incorporación de acristalamiento y otros elementos arquitectónicos con elevada masa y capacidad de absorción de energía térmica, es la llamada energía solar térmica pasiva.

### **1.2 TRANSFORMACION EN CALOR.**

Es la llamada energía solar térmica, que consiste en el aprovechamiento de la radiación que proviene del sol para calentar fluidos que circulan por el interior de captadores solares térmicos. Este fluido se puede destinar para el agua caliente sanitaria (ACS), dar apoyo a la calefacción para atemperar piscinas, etc.

### **1.3 TRANSFORMACION EN ELECTRICIDAD.**

Es la llamada energía solar fotovoltaica que permite transformar en electricidad la radiación solar por medio de células fotovoltaicas integrantes de módulos solares.

Esta electricidad se puede utilizar de manera directa, se puede almacenar en acumuladores para un uso posterior, e incluso se puede introducir en la red de distribución eléctrica.

La energía renovable con mayor posibilidad de desarrollo, es la energía solar, sus ventajas y desventajas son:

Ventajas:

- Escaso impacto ambiental.
- No produce residuos perjudiciales para el medio ambiente.
- No tiene más costos que el mantenimiento del equipo el cual es sencillo, después de instalado.

Desventajas:

- Se precisan sistemas de acumulación (baterías) que contienen agentes químicos peligrosos.
- Puede afectar a los ecosistemas por la extensión ocupada de los sistemas de aprovechamiento, solo en casos de grandes instalaciones.
- Impacto visual negativo, si no se cuida la integración de los módulos solares en el entorno.

## 2. RADIACION SOLAR

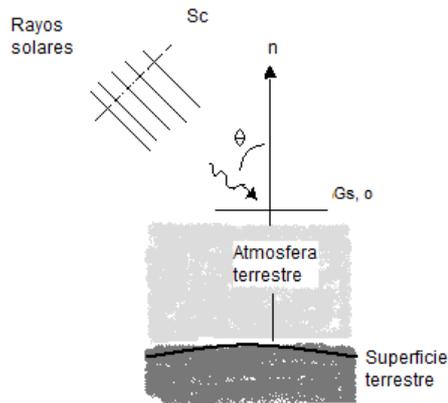
La radiación solar es, por supuesto, esencial para la vida en la tierra. A través del proceso de fotosíntesis, se satisface nuestra necesidad de comida, fibra y combustible. Además, a través de procesos térmicos y fotovoltaicos, se tiene el potencial para satisfacer muchas de nuestras demandas de calentamiento espacial. [2]

El sol es una fuente de radiación casi esférica que tiene  $1.39 * 10^9$  m de diámetro y se localiza a  $1.50 * 10^{11}$  m de la tierra. Con respecto a la magnitud y a la dependencia espectral y direccional de la radiación solar incidente, es necesario distinguir entre las condiciones en la superficie de la tierra y en el extremo exterior de la atmosfera terrestre. Para una superficie horizontal fuera de la atmosfera terrestre, la radiación solar parece un haz de rayos casi paralelos que forman un ángulo  $\theta$ , el *ángulo cenital*, relativo a la superficie normal (figura 1). La irradiación extraterrestre  $G_{s,o}$  depende de la latitud geográfica, así como del tiempo del día y del año, se puede determinar a partir de la ecuación 2.1.

$$G_{s,o} = S_C * f * \cos \theta \quad (2.1)$$

Donde  $S_C$ , la constante solar, es el flujo de energía solar incidente sobre una superficie normal a los rayos solares, cuando la tierra está a su distancia media del sol. Se sabe que tiene un valor de  $S_C = 1353 \text{ W/m}^2$ . La cantidad  $f$  es un factor de corrección para tener en cuenta la excentricidad de la órbita de la tierra alrededor del sol ( $0.97 \lesssim f \lesssim 1.03$ ). [1]

Figura 1. Naturaleza direccional de la radiación solar fuera de la atmosfera terrestre.



Tomada de: Incropera DeWitt, Fundamentos de Transferencia de Calor, Capitulo 12, PRENTICE HALL, México, 1999.pag 681.

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. La energía procedente del sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrogeno en el núcleo del sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar.

El sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

La radiación es emitida sobre un espectro de longitud de ondas, con una cantidad específica de energía para cada longitud de onda, la cual puede ser calculada usando Ley de Planck: [13]

## 2.1 DISTRIBUCION DE PLANCK

La distribución espectral de emisión de cuerpo negro es llamada de Planck, y se rige por la ecuación 2.2.

$$E_{\lambda, b}(\lambda, T) = C_1/(\lambda^5[\exp(C_2/\lambda T)-1]) \quad (2.2)$$

Donde la primera y segunda constante de irradiación son  $C_1 = 2\pi^5hc_0^2/15 = 3.742 \cdot 10^8 \text{ w} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$  y  $C_2 = (hc_0/k) = 1.439 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{k}$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda y T es la temperatura emitida por un cuerpo negro.

Para las temperaturas presentes en la figura 2, se debe constatar varias características importantes.

1. La radiación emitida varía de forma continua con la longitud de onda.
2. En cualquier longitud de onda la magnitud de la radiación emitida aumenta al ascender la temperatura
3. La región espectral en la que la radiación se concentra depende de la temperatura, dándose comparativamente más radiación que aparece para longitudes más pequeñas a medida que aumenta la temperatura.

4. Una fracción significativa de la radiación emitida por el sol, que se puede aproximar como un cuerpo negro a 5800 K, está en la región visible del espectro (figura 3), por el contrario, para  $T \approx 800$  K, la emisión está de manera predominante en la región infrarroja del espectro y no es visible.[1]

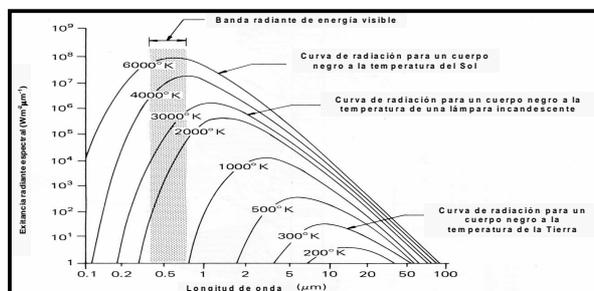
## 2.2 LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN

En la figura 2 la distribución espectral de un cuerpo negro tiene un máximo y que la longitud de onda correspondiente a  $\lambda_{\max}$  depende de la temperatura, la naturaleza de esta dependencia se obtiene de la ecuación 2.3.

$$\lambda_{\max} = C_3/T \quad (2.3)$$

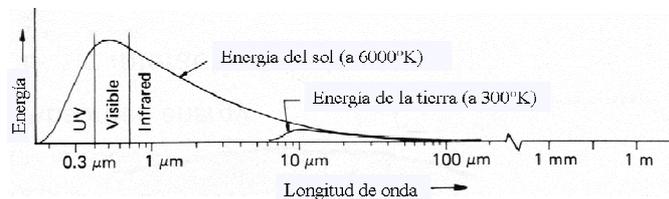
Donde la tercera constante de radiación  $C_3 = 2897 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ . Para una temperatura de 5.800K (temperatura de la superficie solar) la longitud máxima de energía es aproximadamente  $0,5 \mu\text{m}$  (micrómetro, equivalente a  $1 \times 10^{-6}$  m). Esta longitud de onda corresponde a radiación en la parte del espectro visible.

Figura 2. Potencia emisiva espectral del cuerpo negro



Tomada de: IDEAM, leyes de radiación: [www.ideam.gov.co/radiacion.htm](http://www.ideam.gov.co/radiacion.htm).

Figura 3. Energía radiada por el sol y la tierra.



Tomada de: IDEAM, leyes de radiación: [www.ideam.gov.co/radiacion.htm](http://www.ideam.gov.co/radiacion.htm).

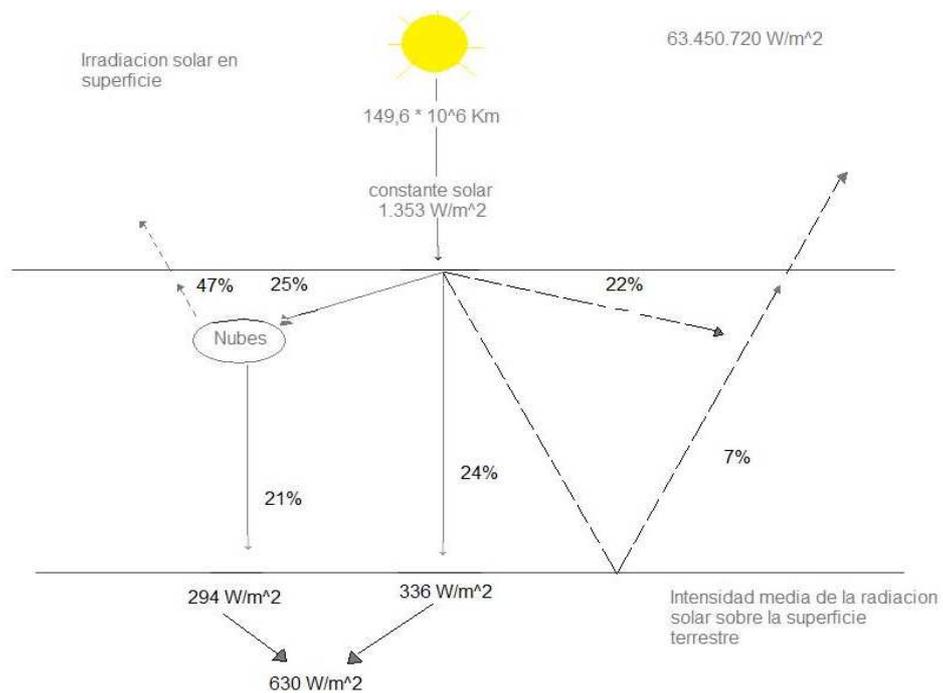
### 2.3 RADIACION INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

Es muy grande la cantidad de energía solar que fluye hacia y desde la Tierra y la atmósfera. Una comparación que permite apreciar la cantidad de energía solar que cada año incide sobre la Tierra es que equivale a cerca de 160 veces la energía de las reservas mundiales de energía fósil o que es similar a más de 15.000 veces la energía anual usada de los combustibles fósiles, nucleares y de las plantas hidráulicas.

Una aproximación de la cantidad de energía incidente en la Tierra y de cómo se transforma en la atmósfera y la superficie terrestre se puede establecer de la siguiente manera: de la radiación total incidente, 173.000 Teravatios, el 30% es reflejado al espacio exterior. La mayor parte del 70% restante calienta la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos (47%) o se absorbe en la evaporación de agua (23%). Relativamente, muy poca energía es usada y dirigida al viento y las olas o para ser absorbida por las plantas en la fotosíntesis. En realidad prácticamente toda la energía es radiada al espacio exterior en forma de radiación infrarroja.

El efecto de atenuación de la radiación solar al atravesar la atmósfera se muestra en la figura 4. La radiación que finalmente llega a la superficie de la tierra se clasifica en radiación directa, difusa y global. [13]

Figura 4. Intensidad media de la radiación.



Tomado de: Méndez Javier, Cuervo Rafael, Energía Solar Fotovoltaica, capítulo 1, fundación confemetal.

## 2.4 TIPOS DE RADIACION SOLAR

En función de cómo inciden los rayos en la tierra se distinguen tres componentes de la radiación solar:

**2.4.1 DIRECTA ( $H_b$ ).** Es la recibida desde el sol sin que se desvíe en su paso por la atmósfera (figura 5); se puede calcular mediante la ecuación 2.4.

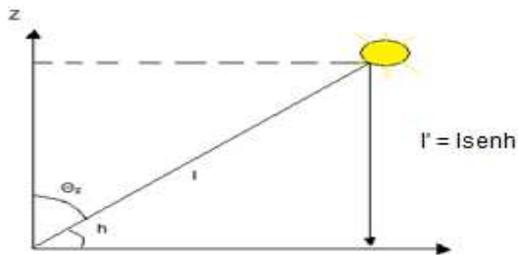
$$H_b = I' = I \sin h \quad (2.4)$$

Donde;

$I$  = es la intensidad de la reacción directa sobre la superficie normal a los rayos solares.

$h$  = ángulo entre la recta que une el sol con un punto de la superficie terrestre.

Figura 5. Componente directa de la radiación solar



Tomado de: Méndez Javier, Cuervo Rafael, Energía Solar Fotovoltaica, capítulo 1, fundación comfemetal.

**2.4.2 DIFUSA ( $H_d$ ).** Es la que sufre cambios en su dirección principalmente debido a la reflexión y difusión en la atmosfera.

**2.4.3 ALBEDO (A).** Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas, se determina mediante la ecuación 2.5.

$$A\% = \frac{R}{H} * 100 \quad (2.5)$$

Donde  $A\%$  = Albedo

$R$  = radiación reflejada

H = radiación incidente

Aunque las tres componentes están presentes en la radiación total que recibe la tierra, la radiación directa es la mayor y más importante en las aplicaciones fotovoltaicas, solo cuando la radiación directa no puede incidir sobre una superficie debido a un obstáculo, el área en sombra también recibe radiación gracias a la radiación difusa.

## **2.5 PROPORCIONES DE RADIACION**

Las proporciones de radiación directa, difusa y albedo que recibe una superficie depende de: condiciones metereologicas, inclinación de la superficie respecto al plano horizontal y la presencia de una superficie reflectante.

**2.5.1 CONDICIONES METEOROLOGICAS.** En un día nublado la radiación es prácticamente difusa, mientras en soleado es directa.

### **2.5.2 INCLINACION DE LA SUPERFICIE RESPECTO AL PLANO HORIZONTAL**

Una superficie horizontal recibe la máxima radiación difusa y la mínima reflejada.

**2.5.3 PRESENCIA DE SUPERFICIE REFLECTANTE.** Las superficies claras son las más reflectantes por lo que la radiación reflejada aumenta en invierno por el efecto de la nieve. [2]

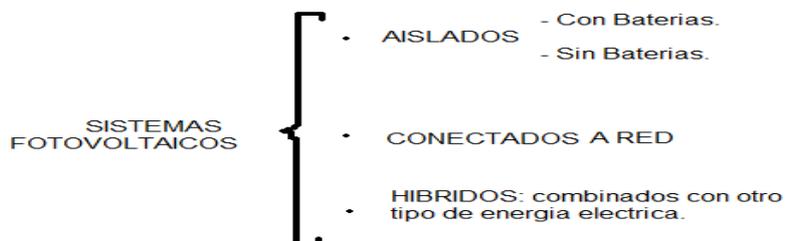
### 3. APLICACIONES DE LA RADIACION SOLAR

Entre las aplicaciones de la radiación solar es común encontrar los sistemas fotovoltaicos, y la energía solar térmica.

#### 3.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Son el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar disponible y transformarla en utilizable como energía eléctrica. Estos sistemas independientemente de su utilización y de su potencia, se pueden clasificar en: sistemas aislados, conectados a red e híbridos. (figura 6)

Figura 6. Sistemas fotovoltaicos



Tomado de: Méndez Javier, Cuervo Rafael, Energía Solar Fotovoltaica, capítulo 1, fundación confemetal.

**3.1.1 Sistemas aislados.** Tienen como objeto satisfacer total o parcialmente la demanda de energía eléctrica de aquellos lugares donde no existe red eléctrica de distribución o esta es de difícil acceso.

Los sistemas aislados normalmente están equipados con sistemas de acumulación de energía, ya que solo pueden proporcionar energía durante el día y la demanda se produce a lo largo del día y de la noche, esto implica que el campo fotovoltaico ha de estar dimensionado de forma que permita, durante las horas de insolación, la alimentación de la carga y la recarga de las baterías de acumulación.

Los principales componentes de los sistemas aislados son:

- Módulos fotovoltaicos: captan la energía solar y la transforman en energía eléctrica.
- Reguladores de carga: protege a los acumuladores de un exceso de carga, y de la descarga por exceso de uso.
- Sistema de acumulación: almacena la energía sobrante para que pueda ser reutilizada cuando se demande energía.
- Inversor: transforma la corriente continua producida por los módulos, en corriente alterna para la alimentación de las cargas que así lo necesiten.
- Elementos de protección del circuito: protegen la descarga y derivación de elementos en caso de fallo o situaciones de sobrecarga.

**3.1.2 Sistemas de conexión a red.** Los sistemas conectados a red no tienen sistemas de acumulación ya que la energía producida durante las horas de insolación es canalizada a la red eléctrica.

Estas instalaciones cuentan con sistemas de seguimiento del estado de la tensión de la red de distribución, de manera que se garantice el correcto funcionamiento de las mismas en lo referente a la forma de entregar la energía, tanto en modo como en tiempo, evitando situaciones peligrosas.

Los principales componentes son:

- Módulos fotovoltaicos.
- Elementos de protección al circuito.
- Contador de energía: mide la energía producida por el sistema fotovoltaico durante su periodo de funcionamiento.
- Inversor para la conexión a red: es uno de los componentes más importantes, maximiza la producción, transforma la corriente continua en alterna y decide el momento de introducirla en la red de distribución.

**3.1.3 Sistemas híbridos.** Cuando un sistema fotovoltaico además del generador incorpora otro generador de energía se denomina sistema híbrido, y en general se utiliza la energía eólica, estas combinaciones se dan para aprovechar algún recurso energético localizado cerca de la instalación o para tener mayor fiabilidad en el suministro de energía.

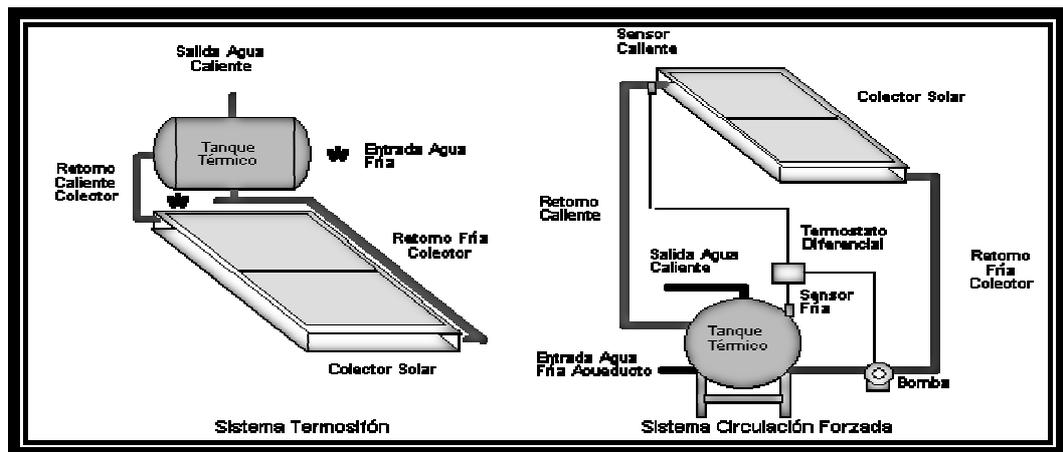
La configuración de los sistemas híbridos puede ser variable, depende del tipo de equipos que se empleen para adaptar la potencia necesaria. [2]

### 3.2 ENERGIA SOLAR TERMICA

La energía solar térmica o energía termosolar consiste en el aprovechamiento de la energía del Sol para producir calor que puede aprovecharse para cocinar alimentos o para la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstico, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción, o para producción de energía mecánica y a partir de ella, de energía eléctrica.

#### 3.2.1 Calentadores solares de agua.

Figura 7. Proceso de un calentador solar de agua.



Tomada de: Aprotéc, calentador: [www.aprotec.com.co/pages/solar\\_term.html](http://www.aprotec.com.co/pages/solar_term.html).

El calentador solar (figura 7) recibe la energía térmica de la luz solar y la transfiere al agua fría que circula, a medida que el agua aumenta su temperatura, y disminuye su densidad asciende a la parte superior del tanque térmico de almacenamiento. [4]

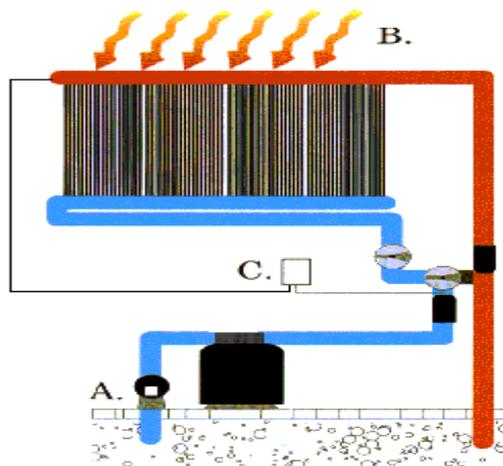
El agua caliente en ascenso desplaza al agua fría obligándola a circular a través de los colectores. En su movimiento a través de los colectores el agua desplazada aumenta de temperatura y asciende nuevamente al tanque. El ciclo se repite siempre y cuando existan diferencias de temperaturas en el sistema. Este proceso de circulación natural se llama termosifón.

Por razones de diseño, el tanque no siempre puede ubicarse por encima del nivel superior de los colectores, en tal caso el agua debe ser forzada a circular a través de los colectores por medio de una bomba. La circulación debe llevarse a cabo únicamente si la temperatura de los colectores es mayor a la temperatura del agua en el tanque.

**3.2.2 Climatización de piscinas.** Para diseñar el calentador solar de una piscina se debe hacer un balance de energía. Una piscina obtiene su única entrada de energía de la radiación solar incidente, en cambio pierde energía por conducción al entrar en contacto la masa de agua con el terreno a través de las paredes y el fondo; pierde energía por convección al ser enfriada por el viento; pierde energía por radiación ya que el agua tiene una mayor temperatura que la atmósfera; y pierde una gran cantidad de energía durante el proceso natural de evaporación del agua superficial. [8]

La bomba de purificación existente se encarga de circular el agua entre los colectores y la piscina a través de las tuberías, un termostato diferencial C (figura 8), gobernará la bomba y controlará el flujo de agua por los colectores si su temperatura es mayor que la del agua en la piscina.

Figura 8. Esquema básico del sistema para la climatización de piscinas



Tomada de: Aprotec, calentador: [www.aprotec.com.co/pages/solar\\_term.html](http://www.aprotec.com.co/pages/solar_term.html).

**3.2.3 Cocinas solares.** Una cocina solar utiliza la luz solar para calentar aire que se encuentra atrapado en un espacio térmicamente aislado y herméticamente sellado. La temperatura del aire en la cocina aumenta creándose un "efecto de invernadero" el cual da como resultado calor en espacios cerrados en los que el sol incide a través de un material transparente como el vidrio o el plástico, la luz visible pasa fácilmente a través del vidrio y es absorbida y reflejada por los materiales que estén en el espacio cerrado, la energía de la luz que es absorbida por las ollas negras y la plancha negra debajo de las ollas se convierte en energía calorífica que tiene una mayor longitud de onda, e irradia desde el interior de los materiales. La mayoría de esta energía radiante, a causa de esta mayor longitud de onda, no puede atravesar el vidrio y por consiguiente es atrapada en el interior del espacio cerrado. La luz reflejada, se absorbe por los otros materiales en el espacio o atraviesa el vidrio si no cambia su longitud de onda.

Debido a la acción de la cocina solar, el calor que es recogido por la plancha y las

ollas de metal negro absorbente es conducido a través de esos materiales para calentar y cocinar la comida.

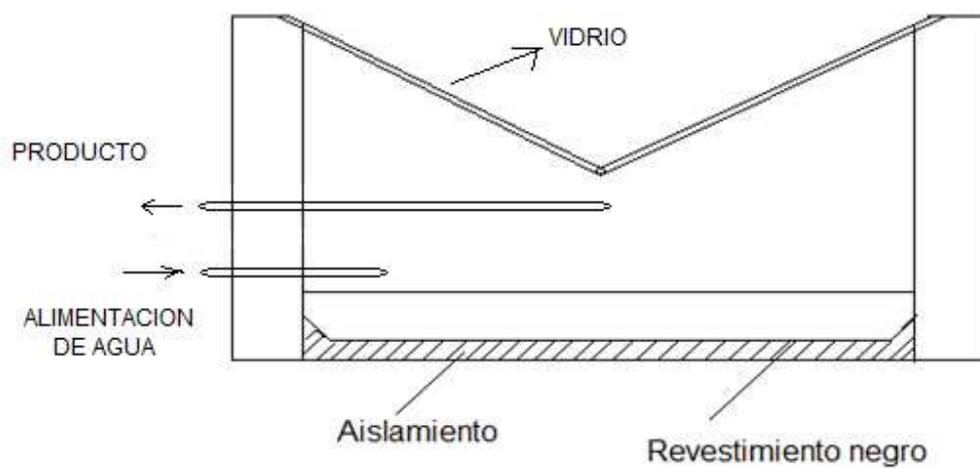
Las cocinas solares se dividen en dos familias:

- De concentración. Se basan en concentración de la radiación solar en un punto, típicamente a través de un reflector parabólico. En dicho punto se coloca la olla que cocinará los alimentos. Generan altas temperaturas entre 180°C y 200°C, que permiten freír alimentos o hervir agua. Son particularmente peligrosas al usuario si no se tiene cuidado.
- Horno o caja. Es una caja térmicamente aislada, para capturar la energía solar y mantener caliente su interior. Los materiales generalmente son de baja conducción de calor, lo que reduce el riesgo de quemaduras a los usuarios y evita la posibilidad de incendio tanto de la cocina como en el lugar en el que se utiliza. [9]

**3.2.4 Destilador solar.** Consiste en un recipiente de fondo negro para absorber la luz del sol, cubierto con láminas de vidrio transparentes que forman un recinto hermético. Las cubiertas transparentes se inclinan sobre un canal colector. Cuando el destilador está en funcionamiento, la energía solar pasa a través de las cubiertas transparentes y es absorbida por el agua y el revestimiento interior del recipiente. La energía absorbida calienta el agua y hace que se evapore parte de ella y aumente la humedad ambiental junto a la superficie de la misma, produciéndose así corrientes de convección dentro del recinto del destilador. El aire húmedo, más caliente, asciende hasta el vidrio, más frío, en cuya superficie

parte del vapor de agua se condensa, se desliza hacia abajo y cae goteando en el canal colector, saliendo por los extremos en forma de agua potable (figura 9). [6]

Figura 9. Esquema, en corte transversal de un destilador solar



Tomada de: Technology for solar energy utilization, pagina 121. New york : 1978.

## 4. DESTILACION SOLAR

### 4.1 CONCEPTO

La destilación de agua es la realización de dos procesos consecutivos: evaporación que es el proceso físico por el cual una sustancia en estado líquido pasa al estado gaseoso, tras haber adquirido energía suficiente para vencer la tensión superficial, y condensación que viene siendo el cambio de gas a líquido que es el producto final de la operación.

El objetivo de la destilación solar es ser capaz de remover cantidades relativamente pequeñas de contaminación, por lo tanto no se recomienda para purificar aguas negras, ni residuos industriales, es adecuada para potabilizar aguas superficiales (ríos, depósitos y lagos), agua de mar o aguas subterráneas.

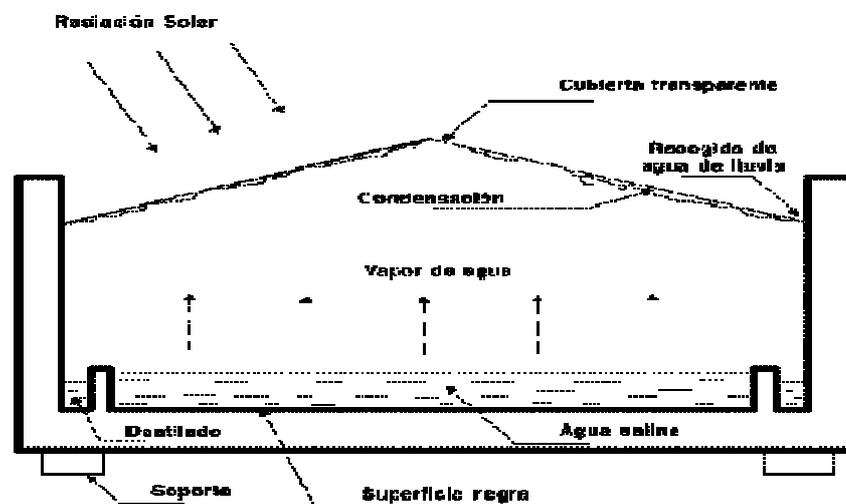
Su funcionamiento es sencillo, el agua contaminada se coloca en una bandeja de fondo negro, expuesta al sol, la temperatura del absorbedor se eleva progresivamente, al calentarse el agua se evapora, quedando libre de sólidos y bacterias, y al momento de la condensación en el vidrio, ya el agua sin bacterias ni sólidos, apta para el consumo humano desliza a un canal y es recolectada en un recipiente a través de una manguera o tubería. [10]

### 4.2 TIPOS DE DESTILADOR SOLAR

**4.2.1 De poceta** El destilador de poceta (figura 10) se caracteriza por su sencillez y su facilidad de construcción, está formado por una poceta hecha generalmente

con materiales de la construcción (ladrillos o bloques, piedra de arena), angulares de acero y láminas de vidrios. Su construcción es sencilla y en situaciones es realizada por un albañil. Se recomienda su uso en instalaciones relativamente grandes. La eficiencia es de 30 a 50%. [11]

Figura 10. Tipo poceta

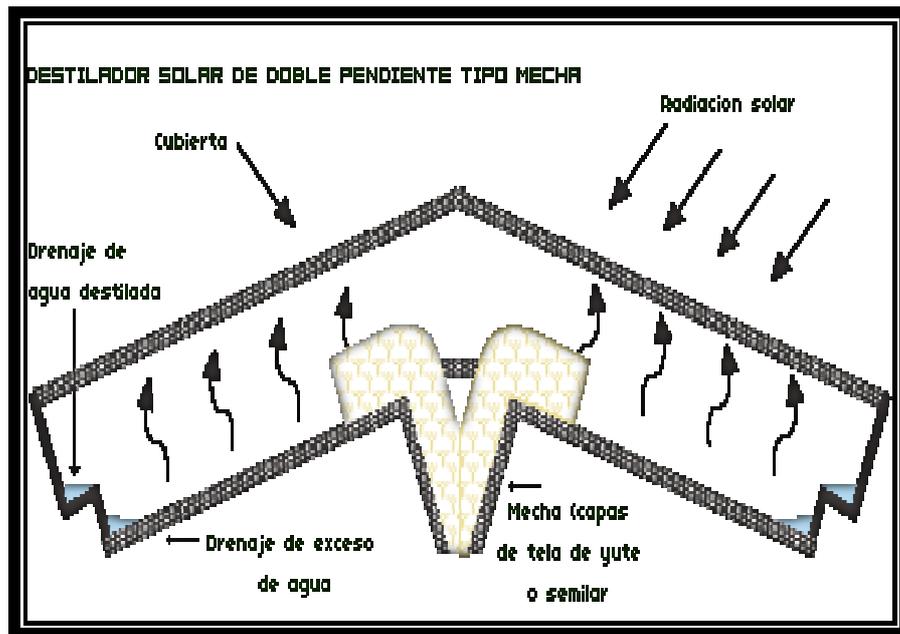


Tomadas de: [www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/HTML/articulo03.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/HTML/articulo03.htm)

**4.2.2 De mecha.** En estos destiladores (figura 11), 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 caseta. La primera es que permite que el material poroso por el que escurre el agua pueda inclinarse, con lo que se consigue un mejor ángulo con el Sol, esto se traduce en una menor reflexión de los rayos solares y una mayor superficie efectiva. La segunda ventaja radica en que el material que conforma la mecha permite tener una capa de agua a destilar con un espesor muy fino, que puede ser calentada

más rápidamente y hasta una temperatura superior, al presentar una menor capacidad calorífica.[10]

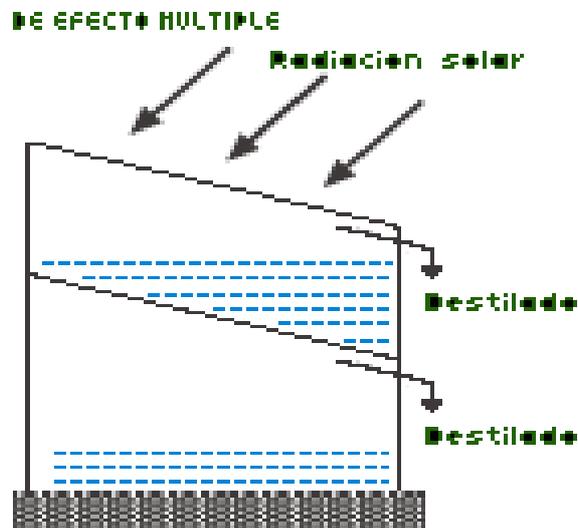
Figura 11. Tipo mecha



Tomadas de: [www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/HTML/articulo03.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/HTML/articulo03.htm)

**4.2.3 Destilador multiefecto** Como una alternativa para solucionar la pérdida de energía en estos destiladores surge la opción de diseñar equipos multiefecto (Figura 12).

Figura 12. Prototipo de un destilador multiefecto



Tomada de: [news.solisclima.com/?seccio=noticiesprof&accio=veure&id=131](http://news.solisclima.com/?seccio=noticiesprof&accio=veure&id=131)

Con estos equipos, 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 reutilizando dicho calor en dos o más etapas. Así, en un destilador solar tipo caseta se puede incorporar una superficie (o incluso más) entre la bandeja y la cubierta. Sobre esta superficie, que sirve de fondo de un recipiente que contiene agua contaminada, se condensa el vapor de agua que proviene de la bandeja. En dicha condensación el vapor cede su calor latente y calienta el agua contenida en este recipiente intermedio.

El proceso que ocurre en los destiladores multiefecto consiste en una bandeja que forma la primera etapa en la que hay agua contaminada pero esta podría ser

calentada por medio de un colector y concentrador solar, la siguiente lleva una inclinación para que las gotas que se formen deslicen y sea recolectadas, la última etapa igualmente inclinada esta enfriada por disipación al aire ambiente pero esta permite establecer el gradiente de temperatura entre el agua y el cubierta necesario para el sistema.[10]

**4.2.4 De caseta.** El destilador solar de caseta es el más conocido en el mundo y consiste en una cubierta de material semitransparente, generalmente vidrio, que se coloca sobre una bandeja que contiene agua contaminada. Por la forma de caseta y la forma en que ésta atrapa el calor, proveniente de la energía solar, les ha valido el nombre de “destiladores de invernaderos”. (figura 13)

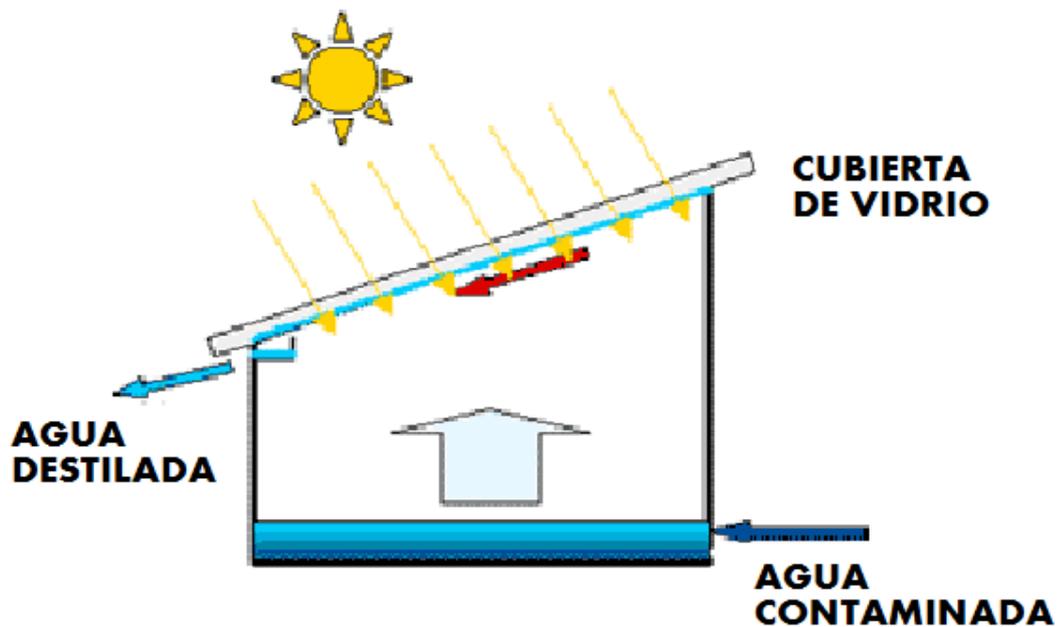
El principio de funcionamiento es muy sencillo, la bandeja de pequeña profundidad que contiene agua con microorganismos está herméticamente tapada con un vidrio liso transparente. La radiación solar pasa a través del vidrio y calienta el agua, ya que el fondo de la bandeja se pinta de color negro, lo que resulta que el agua alcanza más altas temperaturas que el vidrio. El contenido de vapor de agua del aire interior es elevado y al entrar en contacto con la superficie interna del vidrio, alcanza la temperatura de rocío, empezando a condensar el vapor de agua contenido en el aire formando gotas de agua que se deslizan por el plano inclinado hasta el canal recolector. Esta agua condensada está prácticamente potable. El efecto “invernadero” hace que la temperatura del interior se eleve hasta del orden de 50 a 70°C.

Estos equipos cuando tienen láminas de agua de 1,5 a 2 cm de espesor, bajo condiciones de alta insolación, baja temperatura del aire ambiente y vientos apreciables (2 m/s o más) llegan a producir hasta un máximo de 3 a 5 L de agua

destilada por cada metro cuadrado de superficie cada día, en el caso de destiladores tipo caseta con una sola pendiente su producción se encuentra entre 1 y 4 litros por cada  $m^2$  de superficie. [10]

El valor característico de producción de los destiladores solares es del orden de  $1 m^3$  de agua por metro cuadrado de captación por año, esto puede parecer un volumen muy pequeño, sin embargo, desde el punto de vista de obtener agua potable a escala familiar o para pequeñas comunidades, en muchos casos puede resultar adecuado, especialmente donde esta alternativa sea económica.[11]

Figura 13. Destilador de caseta con una pendiente.



Tomada de: [www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/HTML/articulo03.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/HTML/articulo03.htm)

### 4.3 EFICIENCIA DE UN DESTILADOR

La eficiencia térmica de un destilador solar en general se define como el producto entre la cantidad de destilado y su calor latente de vaporización dividido entre la irradiación, como se define en la ecuación 4.1.

$$n = \frac{(\dot{m}_d)(h_{fg})}{H * A} \quad (4.1)$$

Donde;

$\dot{m}_d$  = flujo másico de volumen destilado en un día (Kg/seg).

$h_{fg}$  = calor latente de evaporización del agua (KJ/Kg).

$H$  = irradiación durante el día (w/m<sup>2</sup>).

$A$  = área del evaporador (m<sup>2</sup>).

### 4.4 BALANCE TERMICO EN UN DESTILADOR SOLAR

El balance térmico de un destilador solar se realiza en base a dos formas de análisis: desde el punto de vista termodinámico y el punto de vista de los principios de la transferencia de calor. El análisis termodinámico considera al destilador como un conjunto en equilibrio, en el cual la cantidad de calor aprovechado para que el proceso de destilación se realice, es igual a los cambios de energía del fluido de trabajo. El análisis por transferencia de calor, a diferencia del termodinámico, tiene en cuenta los mecanismos por los cuales se presentan los flujos de energía, y en base a estos se evalúa la cantidad de calor transferido entre los diferentes medios y superficies del destilador.

**4.4.1 Balance en la cubierta.** Está definido por la sumatoria de flujos de calor y energía sobre la cubierta, definida en la ecuación 4.2.

$$q_{entra}A = q_c A + q_r A + \dot{Q}_{util} \quad (4.2)$$

El calor de entrada  $q_{entra}$ , puede definirse por la ecuación 4.3

$$q_{entra} = G_s * \alpha_s \quad (4.3)$$

Donde;  $G_s$  es la radiación solar ( $W/m^2$ ),  $\alpha_s$  es la absorptividad.

El calor de salida es la sumatoria del calor por convección  $q_c$ , por radiación  $q_r$  y del calor útil  $\dot{Q}_{util}$ , que se expresan en las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6.

$$q_c = h(T_\infty - T_s) \quad (4.4)$$

Donde;  $h$  es el coeficiente por convección ( $W/m^2K$ ),  $T_\infty$  es la temperatura del ambiente (K) y  $T_s$  es la temperatura en la superficie (K).

$$q_r = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4.5)$$

Donde;  $\varepsilon$  es la emisividad y  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzmann ( $W/m^2K^4$ ).

$$\dot{Q}_{util} = \dot{m} * h_{fg} \quad (4.6)$$

Donde;  $\dot{m}$  es el flujo másico (Kg/seg) y  $h_{fg}$  es la entalpia de vaporización (KJ/Kg).

## 5. CALIDAD DEL AGUA

El agua o dihidruro de oxígeno es un líquido incoloro, inodoro e insaboro, esencial para la vida animal y vegetal, solvente universal compuesto molarmente por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno.

Entre sus propiedades se destacan:

- Punto de fusión: 0°C
- Punto de ebullición: 100°C a presión atmosférica (Nivel del mar)
- Densidad: 1,0 kg/L a 4°C
- Masa molecular o mol: 18g. Como existen tres isótopos de hidrógeno y tres de oxígeno, se pueden tener dieciocho diferentes masas moleculares para el agua.
- El agua se mantiene líquida en un intervalo conveniente de temperatura.
- El agua es un solvente ionizante.
- Es transparente a los rayos solares en una región conveniente del espectro. [3]

## 5.1 IMPUREZAS DEL AGUA

El agua pura no existe en la naturaleza. El agua lluvia recoge impurezas mientras pasa a través del aire. Los ríos y las quebradas recogen impurezas provenientes del suelo y de las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, transportándolas a los lagos, embalses y mares. Existe menos posibilidad de polución en las aguas superiores de un río, donde la población es escasa, pero en ningún caso puede considerarse un agua superficial carente de contaminación, a pesar de que la purificación natural ocurre en todo cuerpo de agua gracias a la sedimentación y muerte de las bacterias patógenas.

Las impurezas en el agua pueden encontrarse en solución o en suspensión. La materia suspendida debe removerse, al igual que toda sustancia disuelta que se halle en exceso o que haga el agua inadecuada para uso doméstico o industrial.

Existen diferentes términos para describir la calidad del agua, por lo que resulta conveniente tener claro el significado de algunos términos para evitar confusiones y errores en su empleo. Por ejemplo, polución es un término de uso general que significa introducir condiciones indeseables a un agua, haciéndola ofensiva al gusto o al olor y no satisfactoria para uso doméstico o industrial. Un tipo específico de polución sería la contaminación, la cual implica la introducción al agua de materiales tóxicos, bacterias u otras sustancias perjudiciales que harían que esa fuente no fuera apta para el consumo humano. [3]

Aguas puras, en el sentido de la palabra, no existen en la naturaleza; por consiguiente, se usa el concepto de agua segura y de agua potable. El agua segura es aquella cuyo consumo no implica ningún riesgo para la salud del

consumidor, mientras que el agua potable es aquella que además de ser segura es satisfactoria desde el punto de vista físico, químico y biológico, es decir, atractiva para su consumo como bebida, debe tomarse que el concepto de agua segura tiene un valor relativo y no absoluto, esto es, que de acuerdo con la técnica y métodos disponibles se puede afirmar que un agua es segura cuando no existe evidencia de riesgo para la salud del consumidor.[3]

## **5.2 ANALISIS FISICO DEL AGUA**

**5.2.1 Sólidos totales.** Se define como sólidos la materia que permanece como residuo después de evaporación y secado. El valor de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto (sólidos suspendidos). Para su determinación, la muestra se vapora en una cazuela pesada con anterioridad, preferiblemente de platino, sobre un baño de María, y luego se seca a 103 - 105°C. El incremento de peso, sobre peso inicial, representa el contenido de sólidos totales o residuo total.

En aguas potables, la determinación de sólidos totales es la de mayor interés, por ser muy pequeña la cantidad existente de sólidos suspendidos. En general, en aguas para suministro público se recomienda un contenido de sólidos totales menor de 1.000 mg/L. [3]

**5.2.2 Sólidos disueltos.** La determinación de sólidos disueltos totales mide específicamente el total de residuos sólidos filtrables (sales y residuos orgánicos) a través de una membrana con poros de 2.0 µm (o más pequeños). Los sólidos disueltos pueden afectar adversamente la calidad de un cuerpo de agua o un efluente de varias formas. Aguas para el consumo humano, con un alto contenido

de sólidos disueltos, son por lo general de mal agrado para el paladar y pueden inducir una reacción fisiológica adversa en el consumidor. [3]

**5.2.3 Sólidos suspendidos.** Son partículas flotantes como trozos de vegetales, animales, basuras, etc. y aquellas que son perceptibles a simple vista. Como parámetro, miden la presencia de materiales corpusculares de tamaño mayor que unos  $10^{-3}$  milímetros. De hecho. Si fuesen menores se clasificarían como materiales coloidales ( $10^{-6}$  a  $10^{-3}$  mm) o, definitivamente, como especies disueltas (menores que  $10^{-6}$  mm). Los sólidos suspendidos, como su nombre lo indica, permanecen en suspensión y sólo pueden ser retirados por una barrera física, como por ejemplo, un filtro.

**5.2.4 Sólidos volátiles y fijos.** Esta determinación se suele hacer en aguas residuales y lodos con el fin de obtener una medida de la cantidad de materia orgánica presente. Este se logra hacer a una temperatura de  $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$  durante 15 a 20 minutos.

La determinación de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles, es importantes para evaluar la concentración o fuerza de aguas residuales y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento. [3]

**5.2.5 Sólidos sedimentables.** Son aquellas partículas más gruesas que se depositaran, por gravedad en los fondos de los receptores.

La determinación de sólidos sedimentables es básica para establecer la necesidad del diseño de tanques de sedimentación como unidades de tratamiento y para controlar su eficiencia.

### **5.3 ANALISIS BACTERIOLOGICO DEL AGUA**

**5.3.1 Grupo coliforme.** La denominación genérica coliformes designa a un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y los alimentos.

**5.3.2 Caracteres bioquímicos** El grupo coliforme agrupa a todas las bacterias entéricas que se caracterizan por tener las siguientes propiedades bioquímicas:

- Ser aerobias o anaerobias facultativas
- Ser bacilos Gram negativos
- Ser oxidasa negativos
- No ser esporógenas
- Fermentar la lactosa a 35 °C en 48 horas, produciendo ácido láctico y gas.

**5.3.3 Hábitat del grupo coliforme** Las bacterias de este género se encuentran principalmente en el intestino de los humanos y de los animales de sangre caliente, es decir, homeotermos, pero también ampliamente distribuidas en la naturaleza, especialmente en suelos, semillas y vegetales.

Los coliformes se introducen en gran número al medio ambiente por las heces de humanos y animales. Por tal motivo suele deducirse que la mayoría de los coliformes que se encuentran en el ambiente son de origen fecal. Sin embargo, existen muchos coliformes de vida libre.

**5.3.4 Los coliformes como indicadores** Tradicionalmente se los ha considerado como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua destinada al consumo humano en razón de que, en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que las bacterias patógenas intestinales y porque su origen es principalmente fecal. Por tanto, su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente segura.

Asimismo, su número en el agua es proporcional al grado de contaminación fecal; mientras más coliformes se aíslan del agua, mayor es la gravedad de la descarga de heces.

Los coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo a los humanos. En general, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo. Por su amplia diversidad el grupo coliformes ha sido dividido en dos grupos: coliformes totales y coliformes fecales. [3]

**5.3.5 Coliformes totales y coliformes fecales.** No todos los coliformes son de origen fecal, por lo que se hizo necesario desarrollar pruebas para diferenciarlos a efectos de emplearlos como indicadores de contaminación. Se distinguen, por lo tanto, los coliformes totales, que comprende la totalidad del grupo, y los coliformes fecales, aquellos de origen intestinal.

**5.3.5.1 Coliformes fecales.** Se define como coliformes fecales a aquellos que fermentan la lactosa a 44,5 – 45,5 °C, análisis que permite descartar a Enterobacter, puesto que ésta no crece a esa temperatura. La prueba de coliformes fecales positiva indica un 90% de probabilidad de que el coliforme aislado sea E. coli.

Los niveles recomendados de bacterias coliformes fecales son:

- Agua Potable: menos de 0 colonias por 100 ml de la muestra de agua
- Natación: menos de 200 colonias por 100 ml de la muestra de agua
- Navegar/Pescar: menos de 1,000 colonias por 100 ml de la muestra de agua.

El aislamiento de esta bacteria en el agua da alto grado de certeza de contaminación de origen fecal, alrededor del 99%. No es absoluta porque se han aislado cepas de E. coli que no tienen origen fecal, pero es un grado de certeza es más que razonable para certificar contaminación con ese origen.

Sin embargo, el aislamiento de este microorganismo no permite distinguir si la contaminación proviene de excretas humana o animal, lo cual puede ser importante, puesto que la contaminación que se desea habitualmente controlar es la de origen humano. Esto no significa menospreciar la de origen animal, especialmente dada la existencia de zoonosis, enfermedades que son comunes al hombre y animales, que también se pueden transmitir por el agua.

**5.3.6 Contaminación fecal humana o animal.** La *Escherichia coli* de origen animal y la de origen humano son idénticas. Sin embargo, algunos investigadores han encontrado que las bacterias del género *Rodococcus* se asocian solamente a la contaminación fecal por animales.

**5.3.7 Coliformes y aguas frescas.** La prueba de coliformes totales y fecales también se utiliza para determinar la calidad bacteriológica de los efluentes de los sistemas de tratamiento de aguas servidas. (12)

## 6. DISEÑO

Este capítulo mostrará, cuales aspectos se tomaron en cuenta para diseñar el destilador solar tipo caseta con una pendiente. Se partió de investigaciones ya realizadas en algunos prototipos como se muestra en el capítulo 4, para determinar sus características más comunes.

Como aspecto principal, el ángulo del vidrio con respecto a la horizontal, no debe ser menor de 20° ni mayor de 30°<sup>1</sup>, esto debido a que si es muy inferior las gotas no se deslizaran con facilidad, y si es mayor, la distancia del condensador (vidrio) es muy lejana respecto al agua contaminada, como segundo aspecto, se recomienda un recubrimiento (pintura negra) en la bandeja, ya que absorbe muy bien la radiación solar, y el uso de un aislante térmico en las paredes para evitar pérdidas de energía. Para los materiales se debe tener en cuenta la economía sin despreciar los estándares de calidad.

Se parte de querer destilar 200ml en el transcurso 9:20 a.m a 3:00 p.m. la cual son las horas críticas de radiación solar. (ver Anexo D)

### 6.1 CALCULO DEL AREA DEL DESTILADOR SOLAR

Para hallar el calor útil se usa la ecuación (6.1)

$$\dot{Q}_u = \dot{m} * h_{fg} \quad (6.1)$$

---

<sup>1</sup>Dato tomado de: PANORAMAENERGETICO, [www.panoramaenergetico.com](http://www.panoramaenergetico.com)

Donde;  $\dot{m}[\frac{Kg}{s}]$  es el flujo másico y  $h_{fg}^2$  [KJ/Kg] es la entalpia de vaporización respecto a la temperatura del agua.

Luego;

$$\dot{m} = (Vd * \rho) / t \quad (6.2)$$

Donde; Vd es el volumen deseado a destilar,  $\rho^3$  es la densidad respecto a la temperatura del agua y t es el tiempo de producción diaria.

$$\dot{m} = ((2 \times 10^{-4} \text{ m}^3 * 988 \text{ kg/m}^3) / 20400 \text{ s}) = 9.686 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$$

De la ecuación 6.1 se obtiene:

$$\dot{Q}u = (9.686 \times 10^{-6} \text{ kg/s}) * (2378 \text{ kJ/kg}) = 23.03 \text{ W}$$

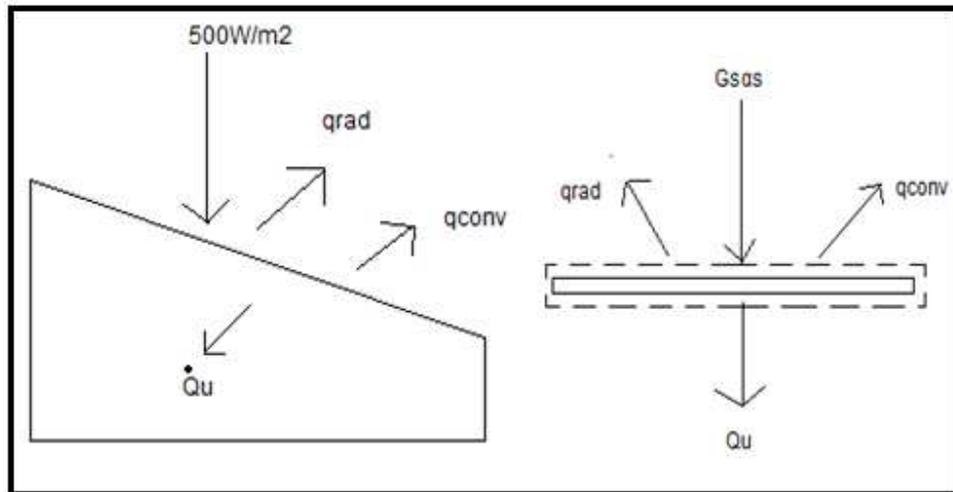
En el balance de energías (figura 14), se tuvo en cuenta la cubierta para calcular el área, suponiendo que el área del vidrio es aproximadamente igual al área de la bandeja y la radiación solar entra perpendicular a la bandeja.

---

<sup>2</sup>Dato tomado de: INCROPERA, DEWITT. Fundamentos de transferencia de calor, Tabla A6, México, Prentice Hall, 1999.

<sup>3</sup>Dato tomado de: CENGEL, YUNUS A. Termodinámica, Anexos, México, Mc Graw Hill, 2003.

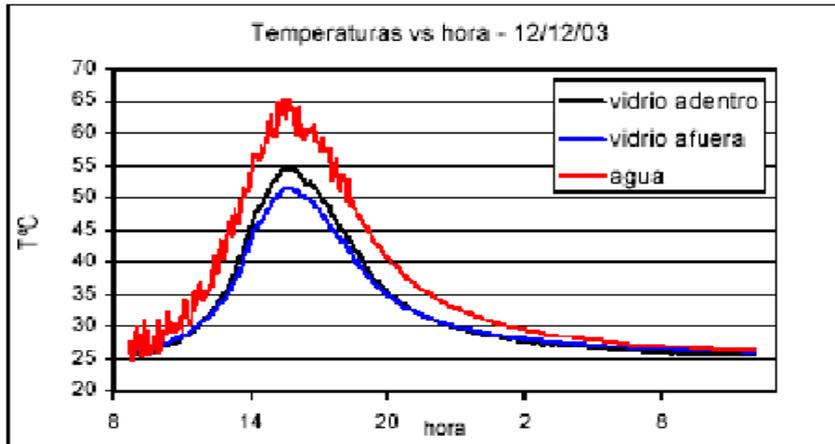
Figura 14. Flujo de calor en la cubierta del destilador.



Por: Melissa Colmenares y Jairo Pinzón

Para el balance de energías (ecuación 6.3), se tomó la temperatura ambiente promedio en Bucaramanga de  $25^\circ\text{C}$ , la temperatura de la superficie del vidrio con un valor de  $39^\circ\text{C}$ , con respecto a una investigación por la revista asades (figura 15) como constante, y la radiación solar promedio ( $G_s$ ) de  $500\text{W/m}^2$ , se obtuvo de los datos publicados por la CDMB.(Ver anexo D)

Figura 15. Temperaturas para un destilador solar de caseta



Tomada de: Revista asades, Argentina.

Balance de energía.

$$E_{\text{entra}} - E_{\text{sale}} = 0 \quad (6.3)$$

Reemplazando se obtiene la ecuación 6.4.

$$G_s \alpha_s A = A q_{\text{conv}} + A q_{\text{rad}} + \dot{Q}_u \quad (6.4)$$

Luego;

$$G_s \alpha_s A = h A (t_s - t_\infty) + \epsilon \sigma A (t_s^4 - t_{\text{air}}^4) + \dot{Q}_u \quad (6.5)$$

Despejando A,

$$A = \frac{\dot{Q}}{(G_s \alpha_s - h(t_s - t_\infty) - \epsilon \sigma (t_s^4 - t_{air}^4))} \quad (6.6)$$

Donde,  $G_s$  es la radiación solar,  $\alpha_s$  absorptividad,  $\epsilon$  <sup>4</sup> emisividad del vidrio,  $\sigma$  constante de Stefan Boltzmann,  $t_s$  temperatura de la superficie externa del vidrio,  $t_\infty$  temperatura ambiente en Bucaramanga,  $t_{air}$  temperatura alrededores, y  $h$  <sup>5</sup> factor de convección por convección libre para gases.

Remplazando se tiene;

$$A = \frac{23.03 \text{ W}}{\left(500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) * 0.9 - \frac{15 \text{ W}}{\text{m}^2 * \text{k}} (14 \text{ k}) - 0.9 * \frac{5.67 \times 10^{-8} \text{ W}}{\text{m}^2 * \text{k}^4} (312^4 - 298^4) \text{ k}} = 0.1449 \text{ m}^2$$

Con base a este valor de área se diseñó el prototipo de destilador solar.

---

<sup>4</sup>Dato tomado de: INCROPERA, DEWITT. Fundamentos de transferencia de calor, Tabla A11, México, Prentice Hall, 1999.

<sup>5</sup>Dato tomado de: INCROPERA, DEWITT. Fundamentos de transferencia de calor, Tabla 1.1, pag 8, México, Prentice Hall, 1999.

## 6.2 CALCULO DEL CALOR CONDUCCION

Para calcular el calor por conducción, utilizamos la ecuación 6.7.

$$Q = \frac{T_2 - T_1}{\frac{L}{A \cdot K_{al}} + \frac{L_{DW}}{A \cdot K_{DW}} + \frac{L}{A \cdot K_{al}}} \quad (6.7)$$

$T_2 = 40^\circ\text{C}$  (valor asumido para la temperatura máxima en el interior del destilador)

$T_1 = 25^\circ\text{C}$  (valor asumido para la temperatura mínima de l medio exterior)

$L = 1\text{mm} = 0.001\text{m}$  (espesor de la lamina de aluminio)

$L_{DW} = 2.5\text{cm}$  (espesor del aislante térmico)

$K_{al} = 238\text{W/m}^\circ\text{C}$  (conductividad térmica del aluminio)

$K_{DW} = 0.041\text{W/m}^\circ\text{C}$  (conductividad térmica del Duct Wrap)

$A = 0.1449\text{m}^2$  (área calculada anteriormente)

Obtenemos al reemplazar:

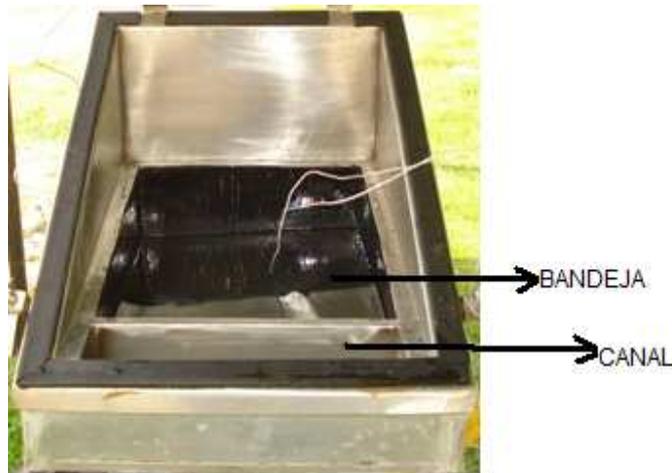
$$Q = 3.5\text{W}$$

## 7. DESCRIPCION DEL EQUIPO

Se diseñó un prototipo de destilador solar tipo caseta, de 51 cm X 37.5 cm, con un área transversal de incidencia con el sol de 0.1495 m<sup>2</sup>, y un área de absorción (bandeja) de 0,09625 m<sup>2</sup>, con una estructura que permite variar el ángulo de la caseta, un espesor de 2.5cm de aislante térmico (DUCT WRAP), esto para evitar pérdidas por las paredes del destilador.

El prototipo consta de un depósito (bandeja) con una pequeña inclinación en su base, para dar nivel al agua en el instante en el que la caseta varié su ángulo, este se construyó de acero inoxidable, con una capa de pintura de color negro como revestimiento del absorbedor (figura 16), que contiene el agua por destilar.

Figura 16. Interior del destilador solar



Por: Melissa Colmenares y Jairo Pinzón

También forma parte del prototipo dos paredes (figura 17), con alturas diferentes, una de las paredes de este equipo (la posterior), tiene una altura de 27cm y otra de 8.5cm para dar la inclinación de 20° necesaria al vidrio, y permitir el deslizamiento de las gotas de agua destilada, hasta el canal de recolección (figura 16) , al cual se acopla una manguera unida directamente a una probeta (100ml) de almacenamiento del agua destilada.

Figura 17. Paredes laterales



Por: Melissa Colmenares y Jairo Pinzón

Tiene además, en la parte superior cerrando el equipo una cubierta de vidrio de 4mm de espesor ajustada a través de dos bisagras (figura 18) cada una en una esquina del destilador, con el fin de permitir que el vidrio se pueda levantar para introducir el agua contaminada a la bandeja.

Figura 18. Sistema para levantar el vidrio



Por: Melissa Colmenares y Jairo Pinzón

En la parte inferior tiene una guía (figura 19) para orientar las gotas hacia el canal, y dos pequeñas prensas en las esquinas inferiores del destilador para el ajuste del vidrio. El ángulo que forma el vidrio respecto a la horizontal es de 20.

Figura 19. Guía del agua y prensas para ajuste del vidrio



Por: Melissa Colmenares y Jairo Pinzón

Para poder desplazar el destilador a diferentes ambientes se diseño una estructura sencilla con ruedas (Figura 20), en esta se encuentra también el tornillo que permite variar el ángulo de la caseta.

Figura 20. Estructura



Por: Melissa Colmenares y Jairo Pinzón

## 7.1 Equipos utilizados

**7.1.1 Pyranometro.** El piranómetro es un instrumento para medir la irradiación solar sobre una superficie plana. Es un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (vatios por metro cuadrado) en un campo de 180 grados.

En las pruebas se uso un Pyranometro CM3 de Kipp and Zone (figura 21), sus especificaciones son:

Respuesta espectral banda de frecuencias: 305 a 2800 nm

Irradiación máxima: 2000 W / m<sup>2</sup>

Señal de salida: 0 a 50 mV

Sensibilidad: 10 a 35  $\mu$  V / W / m<sup>2</sup>

Figura 21. Pyranometro



Por: Melissa Colmenares y Jairo Pinzón

**7.1.2 Indicador de radiación.** Muestra los datos de la radiación solar. En las pruebas se utilizó un indicador de radiación CC20 de Kipp and zone (figura 22).

Figura 22. Indicador de radiación



Por: Melissa Colmenares y Jairo Pinzón

**7.1.3 Multímetro.** Es un instrumento de medida que ofrece la posibilidad de medir la temperatura. Se usó un multímetro Koban KMY65. (figura 23)

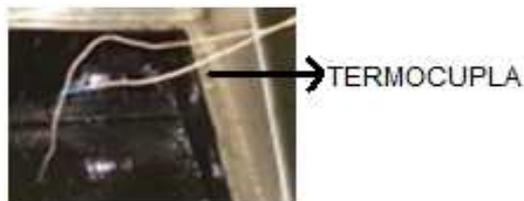
Figura 23. Multímetro



Tomada de: [www.sumelnet.com/multimetro-digital-koban-kmy65-p-505.html](http://www.sumelnet.com/multimetro-digital-koban-kmy65-p-505.html)

**7.1.4 Termocupla.** Una termocupla (figura 24), básicamente es un transductor de temperaturas, es decir un dispositivo que convierte una magnitud física en una señal eléctrica. Está constituida por dos alambres metálicos diferentes que unidos, desarrollan una diferencia de potencial eléctrica entre sus extremos libres que es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre estas puntas y la unión.

Figura 24. Termocupla



Por: Melissa Colmenares y Jairo Pinzón

## **7.2 Comportamiento del destilador**

El destilador consta de dos partes esenciales: el evaporador y el condensador; en el evaporador se realiza el cambio de fase de líquido a gas y en el condensador el de gas a líquido.

**7.2.1 Evaporador.** La bandeja de color negro donde se deposita el agua es el evaporador, porque ahí es donde ocurre el cambio de fase de líquido a gas, para lograr este fenómeno se le suministra calor (radiación solar) al agua logrando que se desprenda vapor, este gas se acumula en el espacio superior del fluido.

La temperatura del agua en el periodo de prueba fue mayor que la temperatura interna del vidrio. (Ver Figura 26)

**7.2.2 Condensador.** El vidrio transparente que sella el destilador, es el condensador, porque es ahí donde se presenta el cambio de fase de gas a líquido.

La condensación ocurre cuando el vapor que está en el espacio entre el fluido y el vidrio, entra en contacto con el condensador que se encuentra a una temperatura más baja; logrando una película líquida o gotitas de agua que cuando se saturan teniendo como ayuda la inclinación y la gravedad, empieza a deslizarse hasta un punto de recolección.

## 8. PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Las pruebas al destilador se realizaron variando el ángulo de la caseta cada seis días, lo anterior se hizo con el fin de evaluar el equipo en cada caso y analizar su comportamiento.

Los parámetros medidos fueron los siguientes:

1. Cantidad de agua destilada recogida diariamente, Vd.
2. Temperatura del agua dentro de la bandeja, Ta.
3. Temperatura interna del vidrio, Ti.
4. Temperatura externa del vidrio, Te.
5. Temperatura interna del aire, Tia (solo en la última inclinación).
6. Radiación solar, RAD.

Se muestra en los anexos A,B,C la tabulación de la información recolectada para determinar la eficiencia del destilador solar.

### 8.1 CALCULO DEL RENDIMIENTO DEL DESTILADOR

La eficiencia del destilador se define como el cociente entre el calor útil y el calor incidente diario entregado por la fuente caliente; está definida por la ecuación 8.1.

$$n = \frac{(m_d)(h_{fg})}{\dot{Q}_{cal}} \quad (8.1)$$

Donde:

$\dot{m}_d$  = Flujo másico de agua destilada producida, Kg/s.

$h_{fg}$  = Calor latente de vaporización del agua, KJ/Kg.

$\dot{Q}_{cal}$  = Calor entregado por la fuente caliente, KJ/s.

La eficiencia es calculada para los días en que se hicieron las pruebas, esto es desde mayo 14 hasta junio 13, para cada configuración del destilador (ángulo 0°, ángulo 4.5°, ángulo 6.5°).

**8.1.1 Cálculo del flujo másico de agua destilada producida,  $\dot{m}_d$**  Para el cálculo de este término se toma como tiempo efectivo diario de irradiación solar cinco horas, desde las 9:20 a.m., hasta las 2:20 p.m, y se obtiene a través de la ecuación 8.2

$$\dot{m}_d = \frac{(V_d)(\rho_{\text{agua}})}{t} \text{ Kg/s} \quad (8.2)$$

Donde:

$V_d$  = Producción de volumen de agua destilada (cm<sup>3</sup>). (Ver Anexos)

$\rho_{\text{agua}}$  = Densidad del agua, calculada a la temperatura media diaria (Kg/cm<sup>3</sup>).

$t$  = Tiempo efectivo de producción de condensado = 5\* 3600 = 18000s

En la tabla 1 se muestran los resultados del cálculo de  $\dot{m}_d$  para cada día

Tabla 1. Calculo de flujo másico de agua destilada producida  $m_d$ .

DIA	ANGULO	Vd (cm3)	$\rho_{agua}@T_a$ promedio (Kg/cm3)	$\dot{m}_d = \frac{(V_d)(\rho_{agua})}{t} Kg/s$
Mayo 14	1	183	0.0009859	$1.00 \times 10^{-5}$
Mayo 15	1	196	0.0009866	$1.07 \times 10^{-5}$
Mayo 16	1	220	0.0009861	$1.20 \times 10^{-5}$
Mayo 17	1	10	0.0009936	$1.38 \times 10^{-6}$
Mayo 19	1	114	0.0009907	$6.27 \times 10^{-6}$
Mayo 21	1	91	0.000992	$5.01 \times 10^{-6}$
Mayo 22	2	89	0.0009906	$4.89 \times 10^{-6}$
Mayo 23	2	153	0.0009892	$8.40 \times 10^{-6}$
Mayo 28	2	85	0.0009917	$4.67 \times 10^{-6}$
Mayo 30	2	242	0.0009853	$1.23 \times 10^{-5}$
Mayo 31	2	225	0.0009864	$1.23 \times 10^{-5}$
Junio 03	2	99	0.0009902	$5.44 \times 10^{-6}$
Junio 04	2	149	0.000988	$8.17 \times 10^{-6}$
Junio 05	3	154	0.0009888	$8.45 \times 10^{-6}$
Junio 07	3	80	0.0009909	$4.4 \times 10^{-6}$
Junio 10	3	131	0.0009886	$7.19 \times 10^{-6}$
Junio 11	3	188	0.0009883	$1.03 \times 10^{-5}$
Junio 12	3	224	0.0009844	$1.22 \times 10^{-5}$
Junio 13	3	218	0.000986	$1.19 \times 10^{-5}$

**8.1.2 Calculo del calor entregado por la fuente,  $\dot{Q}_{cal}$ .** El calor entregado por la fuente caliente se define como el producto entre la radiación solar promedio diaria que incide sobre el destilador y el área de este, así tenemos que:

$$\dot{Q} = H * A \text{ [w]} \quad (8.3)$$

Donde:

**$H$**  = Radiación solar promedio diaria (5h) que incide sobre el destilador solar ( $\text{w/m}^2$ ).

**$A$**  = 0.09625m Área de la bandeja del destilador solar.

Para  **$H$** , es necesaria la radiación solar acumulada diaria  $\bar{H}$ , esta se obtiene al graficar los puntos de radiación solar incidente Vs hora y calcular el área bajo la curva en cada caso, estos datos se encuentran en la tabla 2, (Ver Anexo C).

Tabla 2. Radiación promedia ( $w/m^2$ )

HORA DIA	9:20	10:20	11:20	12:20	13:20	14:20	$\bar{H}$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	H[W/m <sup>2</sup> ]
14-May-08	695	820	931	930	937	405	4168	833.5
15-May-08	703	781	855	566	478	466	3264	652.9
16-May-08	410	753	780	791	678	564	3488	697.7
17-May-08	624	350	149	0	0	0	736	368
19-May-08	225	440	467	312	704	437	2253	450.6
21-May-08	720	691	305	285	213	145	1927	385.4
22-May-08	566	583	533	312	296	217	2114	422.9
23-May-08	350	472	604	877	595	379	2911	582.3
28-May-08	376	358	530	527	333	349	2111	422.2
30-May-08	692	773	920	753	420	775	3599	719.9
31-May-08	703	742	840	841	689	224	3575	714.9
3-Jun-08	426	418	450	440	469	435	2206	441.3
4-Jun-08	728	796	933	652	325	260	3201	640.1
5-Jun-08	803	704	477	917	879	664	3710	742.0
7-Jun-08	397	411	640	323	250	177	1911	382.2
10-Jun-08	460	407	693	647	630	515	2865	572.9
11-Jun-08	780	819	858	614	598	413	3485	697.0
12-Jun-08	705	773	763	722	898	443	3730	746.0
13-Jun-08	360	518	736	782	809	831	3439	687.9

**8.1.3 Calculo del calor latente de vaporización del agua,  $h_{fg}$ .** Este parámetro se obtiene de las tablas de vapor y se halla para cada día a la temperatura promedia del agua,  $T_a$  promedio, a una presión de saturación los valores obtenidos se encuentran reportados en la tabla 3.

Tabla 3. Calor latente de vaporización del agua,  $h_{fg}$ .

DIA	TEMPERATURA [°C]	$h_{fg}$ [KJ/Kg]
Mayo 14	53.9	2375.54
Mayo 15	52.6	2376.46
Mayo 16	53.6	2374.06
Mayo 17	34.4	2420.28
Mayo 19	42.4	2400.98
Mayo 21	38.7	2409.79
Mayo 22	42.7	2400.27
Mayo 23	46.6	2390.92
Mayo 28	39.7	2407.41
Mayo 30	55.1	2370.7
Mayo 31	52.9	2375.74
Junio 03	43.7	2397.89
Junio 04	50	2382.7
Junio 05	47.7	2388.26
Junio 07	41.8	2402.41
Junio 10	48.3	2386.81
Junio 11	49	2385.12
Junio 12	56.9	2366.06
Junio 13	53.8	2373.58

**8.1.4 Rendimiento del destilador.** La eficiencia o rendimiento del destilador,  $n$ . Se calcula para cada día en los que se realizaron las pruebas, los valores encontrados se relacionan en la tabla 4.

Tabla 4. Rendimiento del destilador durante las pruebas.

DIA	$\dot{m}_d \left[ \frac{Kg}{s} \right]$	$h_{fg} \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$	$\dot{Q}_{cal} = H * A \left[ \frac{KJ}{s} \right]$	$n = \frac{(\dot{m}_d)(h_{fg})}{\dot{Q}_{cal}}$
Mayo 14	$1.00 \times 10^{-5}$	2375.54	0.08022	29.61
Mayo 15	$1.07 \times 10^{-5}$	2376.46	0.06284	40.46
Mayo 16	$1.20 \times 10^{-5}$	2374.06	0.06715	42.42
Mayo 17	$1.38 \times 10^{-6}$	2420.28	0.03901	9.42
Mayo 19	$6.27 \times 10^{-6}$	2400.08	0.04337	34.69
Mayo 21	$5.01 \times 10^{-6}$	2409.79	0.03709	32.55
Mayo 22	$4.89 \times 10^{-6}$	2400.27	0.04070	28.83
Mayo 23	$8.40 \times 10^{-6}$	2390.92	0.05604	35.83
Mayo 28	$4.67 \times 10^{-6}$	2407.41	0.04063	27.67
Mayo 30	$1.32 \times 10^{-5}$	2370.7	0.06929	45.16
Mayo 31	$1.23 \times 10^{-5}$	2375.74	0.06880	42.47
Junio 03	$5.44 \times 10^{-6}$	2397.89	0.04247	30.71
Junio 04	$8.17 \times 10^{-6}$	2382.7	0.06160	31.60
Junio 05	$9.94 \times 10^{-6}$	2388.26	0.07141	33.24
Junio 07	$4.4 \times 10^{-6}$	2402.41	0.03678	28.74
Junio 10	$7.19 \times 10^{-6}$	2386.81	0.05514	31.12
Junio 11	$1.03 \times 10^{-5}$	2385.12	0.06708	36.62
Junio 12	$1.22 \times 10^{-5}$	2366.06	0.07180	40.20
Junio 13	$1.16 \times 10^{-5}$	2373.58	0.06621	41.58

A continuación se muestran tablas y graficas del comportamiento del destilador solar.

Tabla 5. Datos promedios diarios para ángulo 0°

DIA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	$\Delta T=(T_a-T_i)$ (°C)	Vd (cm3)	RAD. [W/m2]
5/14/2008	52	46.8	53.9	1.9	168	833.5
5/15/2008	43.6	40.8	52.6	9	188	652.9
5/16/2008	45	39.7	53.6	8.6	210	697.7
5/17/2008	31.4	22.8	34.4	3	10	368
5/19/2008	35.8	35.1	42.4	6.6	100	450.6
5/21/2008	35.8	32.7	38.7	2.9	85	385.4

Tabla 6. Datos promedios diarios para ángulo 4.5°

DIA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	$\Delta T(T_a-T_i)$ (°C)	Vd (cm3)	RAD. [W/m2]
5/22/2008	35.5	32.8	42.7	7.2	83	422.9
5/23/2008	42.5	37.1	46.6	4.1	140	582.3
5/28/2008	32	32.8	39.7	7.7	73	422.2
5/30/2008	51.6	43	55.1	3.5	232	719.9
5/31/2008	46.1	43.8	52.9	6.8	210	714.9
6/3/2008	35	34.3	43.7	8.7	91	441.3
6/4/2008	41.5	41.3	50	8.5	143	640.1

Tabla 7. Datos promedios diarios para ángulo 6.5°

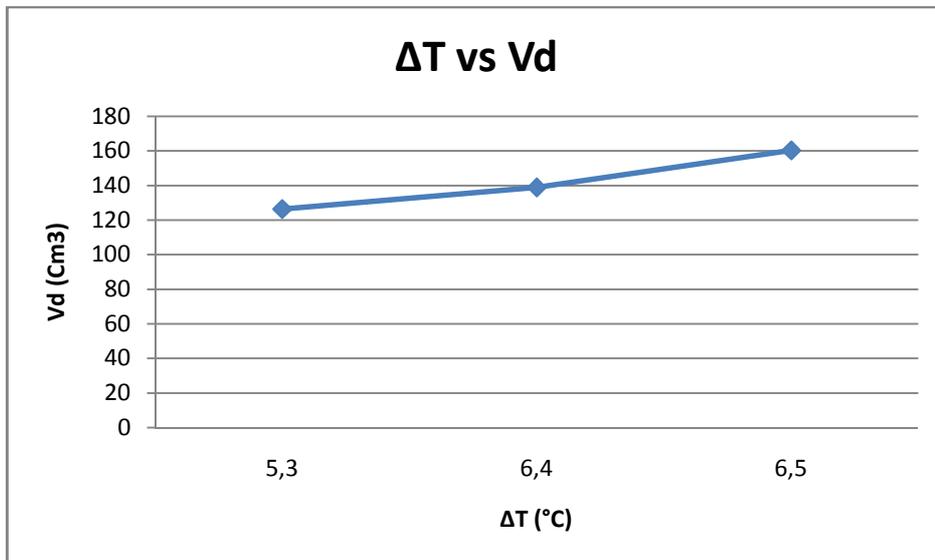
DIA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	$\Delta T(T_a-T_i)$ (°C)	Vd (cm3)	RAD. [W/m2]
6/5/2008	46.7	42.4	47.7	1	181	742
6/7/2008	34.1	35.1	41.8	7.7	76	382.2
6/10/2008	38.9	37.5	48.3	9.4	122	572.9
6/11/2008	44.6	43.9	49	4.4	177	697
6/12/2008	46.9	43	56.9	10	213	746
6/13/2008	47.1	41.1	53.8	6.7	192	687.9

De las tablas 5-7 se calcularon promedios de  $\Delta T$  y  $V_d$  (Tabla 3) para observar la correlación entre estas variables (figura 25).

Tabla 8. Promedios de  $\Delta T$  y  $V_d$

Inclinación	$\Delta T_{prom}(T_a-T_i)(^{\circ}C)$	$V_d$ (cm <sup>3</sup> )
0°	5.3	126.3
4.5°	6.4	138.8
6.5°	6.5	160.1

Figura 25.  $\Delta T$  vs  $V_d$  para cada inclinación

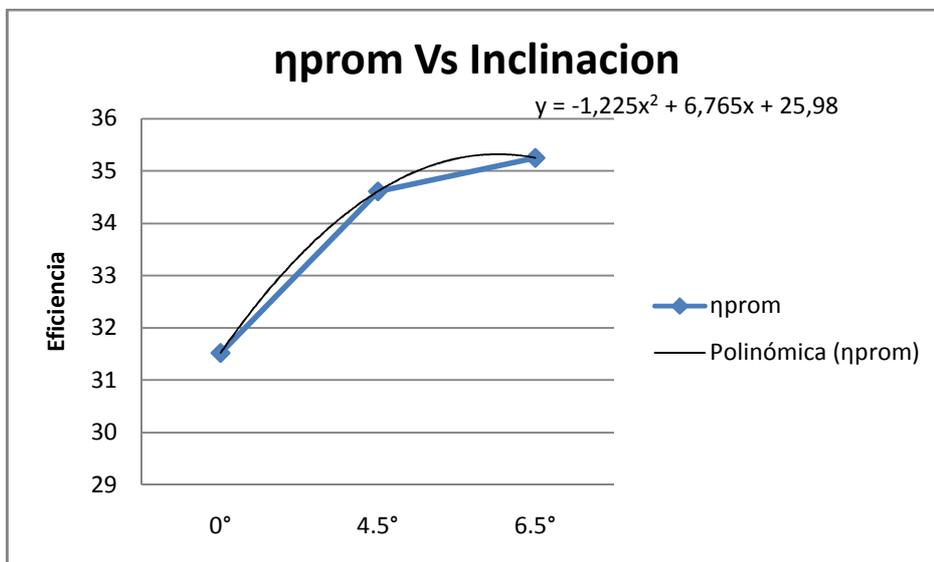


La figura 25 muestra como el volumen de agua destilada es mayor a medida que la diferencia de temperaturas ( $T_a-T_i$ ) aumenta.

Tabla 9. Promedios  $T_i$ ,  $T_e$ ,  $T_a$  y  $\eta_{prom}$  para cada ángulo (figura 26 y 27).

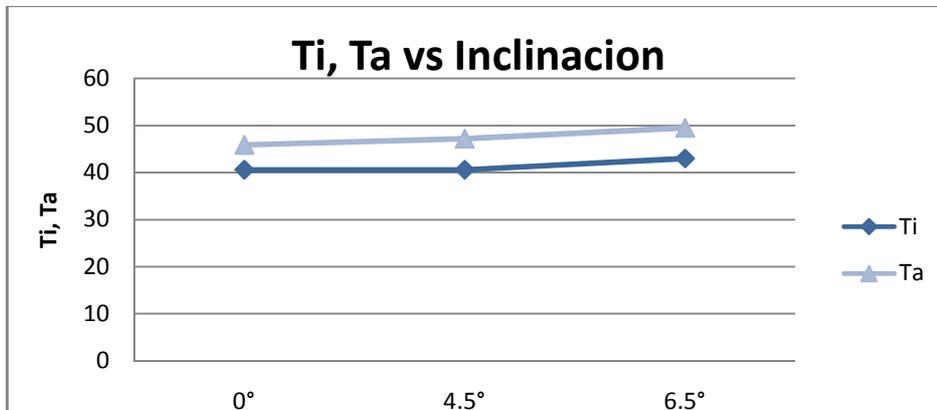
inclinación	$T_i$	$T_e$	$T_a$	$\eta_{prom}$
0°	40.6	36.3	45.9	31.52
4.5°	40.6	37.8	47.2	34.61
6.5°	43	40.5	49.5	35.25

Figura 26. Eficiencia promedio respecto a la inclinación



En la tabla 9 y figura 26 se observa como aumenta la eficiencia térmica aumenta a medida que se varia el ángulo de la caseta

Figura 27. Cambios de temperaturas respecto a la inclinación



La figura 27 permite observar que la temperatura del agua siempre es mayor que la temperatura interna del vidrio, sin importar la inclinación.

Tabla 10. Promedios de cada valor por hora, para ángulo 0° (figura 28)

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Vd (cm3)	RAD PROMEDIO (w/m2)
9:20	31.3	28	27.5	0	562.8
10:20	42.7	38.4	46	10.1	639.2
11:20	45.1	40.1	51	34	581.1
12:20	43.4	39.9	51.2	36.5	577
1:20	42.4	38.7	48.8	32.6	602
2:20	37.5	34.8	43.5	22.8	403
3:00	30.7	29.4	36	10.6	48

Tabla 11. Promedios de cada valor por hora, para ángulo 4.5°(figura 29)

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Vd (cm3)	RAD PROMEDIO (w/m2)
9:20	27.7	25.4	27.4	0	548.7
10:20	39.8	35.7	41.9	6.7	591.6
11:20	47.4	46.4	54.5	35	687.1
12:20	46.5	44.1	55.7	42.4	628.8
1:20	39.4	37.4	48.3	32.4	446.6
2:20	34.1	32.7	42	22.2	376.9
3:00	28.2	29.3	35.8	10	553.3

Tabla 12. Promedios de cada valor por hora, para ángulo 6.5°(figura 30)

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Vd (cm3)	RAD PROMEDIO (w/m2)
9:20	27.3	26.8	24.5	0	584.2
10:20	39.5	36.5	42.7	7	605.4
11:20	48.9	46.8	55.6	37.8	694.3
12:20	47.7	46.2	56.8	41.6	667.2
1:20	44.1	42.5	52.7	35.6	677.3
2:20	40.4	38.7	47.6	38	507.2
3:00	31.8	32	40.8	12.1	34.3

Figura 28. Inclinación 0°

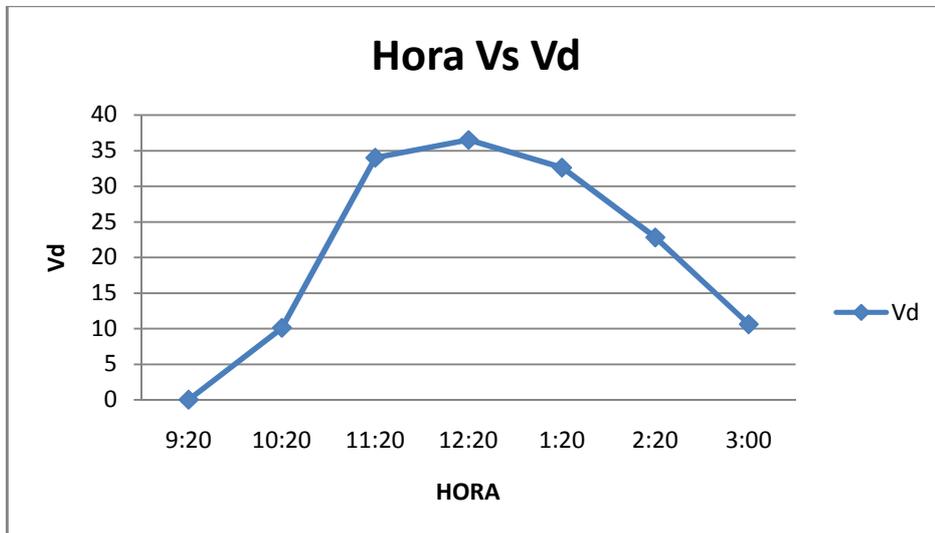


Figura 29. Inclinación 4.5°

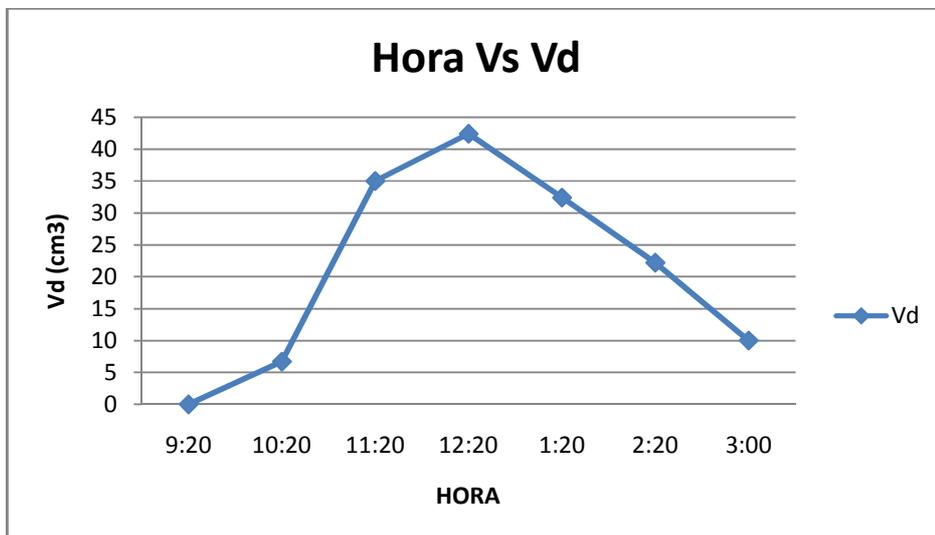
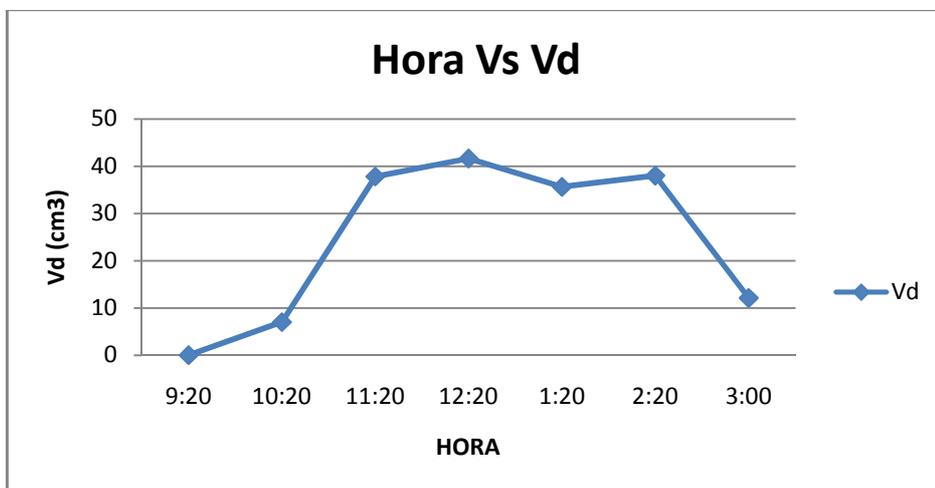


Figura 30. Inclinación 6.5°



De las figuras 28-30 es claro apreciar que el mayor volumen destilado ocurre a las 12:20 p.m.

## 8.2 ANALISIS DEL AGUA

La primera prueba muestra que el agua está libre de coliformes y E. coli, luego es apta para el consumo humano, ya que presenta cero en ambos parámetros, a diferencia de la segunda que con el hecho de tener 2 coliformes totales no es recomendable su utilidad para el consumo humano.

Tabla 13. Resultados del amb.

PARAMETRO	CRUDA	PRUEBA 1	PRUEBA 2
RECuento DE COLIFORMES TOTALES	4200	0	2
E. COLI	1300	0	0

## CONCLUSIONES

- Se construyó un prototipo de destilador solar que permite variar el ángulo de la caseta entre 0° y 15°, además de facilitar la instalación de termocuplas para medir las temperaturas del agua, del aire y del vidrio dentro del equipo. (Ver Anexo F y figura 19)
- Las pruebas realizadas al prototipo muestran que a medida que se varió el ángulo de la caseta, la eficiencia térmica en el destilador solar aumentaba. (Ver figura 25)
- El proceso de destilación depende de la cantidad de energía almacenada dentro del prototipo y no de la radiación solar instantánea que llegue al equipo, esto se demuestra mediante la generación de destilado en los periodos de tiempo durante los cuales el sistema estuvo en la sombra. (Ver Anexo B)
- La cantidad de destilado y la eficiencia del equipo depende principalmente de las diferencias de temperatura que se logren obtener entre el agua y la superficie interna del vidrio, teniendo un comportamiento directamente proporcional entre estas. (Ver figura 24)
- La destilación solar es un método aceptable para la desinfección microbiológica del agua proveniente de afluentes naturales como ríos, quebradas, lagos, e.t.c; sin alcanzar siempre los requerimientos exigidos por el decreto No. 475 de 1998 sobre normas técnicas de calidad del agua potable.
- El prototipo construido permite inferir una cantidad máxima de destilado de 2.3l/m<sup>2</sup> en las cinco horas de pruebas, este valor concuerda con la literatura

- encontrada, donde los valores oscilan entre 1 y 4 litros/m<sup>2</sup> durante un día. La cantidad de destilado puede ser mayor si se aprovecha las doce horas diarias donde existe radiación.(Anexo x).
- Para validar algunos resultados del destilador solar se tuvo en cuenta estudios de, soliclíma energía solar y centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES).

## BIBLIOGRAFIA

- [1] **INCORPERA, Frank P.** *Fundamentos de transferencia de calor.* Mexico, Prentice Hall, 1999.
- [2] **MENDEZ, javier maria.** *Energia solar fotovoltaica*, Capitulo 1, pagina 37-42, Fundacion Confemetal.
- [3] **ROMERO Jairo alberto.** *Calidad del agua*, paginas 107-114, 337-343, Bogota : Escuela Colombiana de Ingenieria, 2005.
- [4] **FRANSON Mary ann h.** *Metodos normalizados para el analisis de aguas potables y residuales.*
- [5] **DONALD R. Pitts** *Teoria y problemas de transferencia de calor.* MacGraw-Hill.
- [6] *Technbology for solar energy utilization*, paginas 121. New york : 1978.
- [7] **INCONTEC.** Tesis y otros trabajos de grado.
- [8] **APROTEC.** [Online] [www.aprotec.com.co/pages/solar\\_term\\_html](http://www.aprotec.com.co/pages/solar_term_html).

[9] **WIKIPEDIA.** [Online] [es.wikipedia.org/wiki/cocina\\_solar](http://es.wikipedia.org/wiki/cocina_solar).

[10] **SOLOICLIMA.**[Online][news.soloclima.com/?seccio=noticiesprof&accio=veure&id=131](http://news.soloclima.com/?seccio=noticiesprof&accio=veure&id=131).

[11] **CUBASOLAR.** [Online] [www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/html/articulo03.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/html/articulo03.htm)

[12] **WIKIPEDIA.** [ONLINE] [es.wikipedia.org/wiki/Coliforme](http://es.wikipedia.org/wiki/Coliforme)

[13] **IDEAM.** [Online] [www.ideam.gov.co/radiacion.htm](http://www.ideam.gov.co/radiacion.htm).

[14] **SOLARPEDIA.** [Online] [www.solarpedia.es/index.php/Piranómetro](http://www.solarpedia.es/index.php/Piranómetro)

## **ANEXOS**

## Anexo A. Tablas de la radiación solar en el periodo de pruebas (W/m<sup>2</sup>)

HORA FECHA	9:20	9:25	9:30	9:35	9:40	9:45	9:50	9:55	10:00	10:05	10:10	10:15
14-may-08	695	698	759	791	800	809	821	833	848	859	866	866
15-may-08	703	712	727	740	762	774	781	764	771	806	834	854
16-may-08	410	483	768	767	755	765	772	783	779	796	799	802
17-may-08	624	438	549	318	446	263	319	343	363	308	262	242
19-may-08	225	232	258	265	271	316	403	424	876	836	394	447
20-may-08	720	851	892	847	933	527	792	931	685	313	514	503
21-may-08	566	584	576	580	612	585	622	613	577	510	524	592
23-may-08	350	359	397	403	405	421	467	467	469	505	543	581
28-may-08	376	380	303	410	391	467	330	310	365	349	359	345
30-may-08	692	694	688	722	742	766	782	865	873	887	613	807
31-may-08	703	664	724	745	736	750	799	761	696	761	732	746
03-jun-08	426	431	420	417	408	420	402	403	408	412	413	413
04-jun-08	728	738	746	757	763	797	776	805	822	838	856	854
05-jun-08	803	839	930	509	426	510	706	666	456	548	784	950
07-jun-08	397	382	414	378	382	368	390	367	508	512	393	359
10-jun-08	460	416	480	520	465	507	514	524	515	330	228	268
11-jun-08	780	785	800	784	785	792	803	810	824	835	850	859
12-jun-08	705	719	728	740	744	757	770	777	788	795	807	812
13-jun-08	360	380	415	400	477	468	472	488	505	526	627	694

HORA FECHA	10:20	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15
14-may-08	880	896	908	915	916	906	927	948	939	930	955	955
15-may-08	841	861	885	896	873	892	847	926	923	978	995	190
16-may-08	784	786	820	856	832	875	946	1014	520	976	520	401
17-may-08	257	179	200	153	172	143	111	142	142	138	155	103
19-may-08	432	1075	538	694	480	473	387	354	374	312	302	311
20-may-08	343	385	390	313	275	270	520	175	179	297	270	287
21-may-08	620	646	636	410	567	572	572	581	563	508	505	448
23-may-08	591	598	577	599	603	566	549	581	600	614	650	656
28-may-08	401	428	488	414	385	419	400	444	1082	451	458	611
30-may-08	829	857	916	899	903	896	954	958	988	940	950	780
31-may-08	794	842	885	861	839	826	809	814	843	855	829	825
03-jun-08	468	514	385	365	407	485	302	427	372	358	572	589
04-jun-08	801	863	859	877	894	939	1068	1053	1112	1090	860	443
05-jun-08	929	458	446	428	426	513	502	514	503	492	488	474
07-jun-08	439	342	376	535	643	575	699	735	809	723	837	822
10-jun-08	221	317	415	681	718	703	765	784	871	889	720	726
11-jun-08	876	894	899	910	925	932	938	939	962	982	1016	460
12-jun-08	823	827	834	840	842	861	868	892	842	835	729	247
13-jun-08	710	740	727	706	744	722	759	793	840	358	777	823

FECHA \ HORA	HORA											
	11:20	11:25	11:30	11:35	11:40	11:45	11:50	11:55	12:00	12:05	12:10	12:15
14-may-08	975	959	971	975	1013	991	463	823	1008	992	976	973
15-may-08	992	947	226	1046	1053	356	1133	316	413	365	344	319
16-may-08	813	798	896	634	319	301	519	780	1121	1030	930	1030
17-may-08	151	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19-may-08	304	299	287	228	162	149	154	210	266	336	379	530
20-may-08	301	428	334	460	320	231	252	216	119	229	289	264
21-may-08	389	367	231	122	160	259	380	296	367	278	367	444
23-may-08	653	698	719	782	824	886	1041	1083	1116	1040	438	1124
28-may-08	780	519	602	535	714	563	672	472	485	356	379	441
30-may-08	999	1023	278	345	1005	997	1033	1057	625	1220	693	418
31-may-08	848	856	772	814	838	813	748	815	853	850	863	916
03-jun-08	622	425	374	673	662	569	320	298	356	455	388	393
04-jun-08	1138	1078	261	826	1152	372	1236	826	546	377	396	406
05-jun-08	477	491	509	1083	1118	1034	978	973	979	977	975	945
07-jun-08	578	500	663	662	212	201	188	146	183	641	213	131
10-jun-08	726	690	726	720	640	756	660	645	647	598	601	557
11-jun-08	441	1120	1108	1041	1124	501	790	643	196	210	211	200
12-jun-08	540	257	244	267	322	281	1063	1046	1010	1056	1074	1035
13-jun-08	837	854	765	719	693	694	720	835	838	866	828	794

FECHA \ HORA	HORA											
	12:20	12:25	12:30	12:35	12:40	12:45	12:50	12:55	13:00	13:05	13:10	13:15
14-may-08	1012	1038	1001	990	934	912	955	930	945	918	906	881
15-may-08	273	331	597	675	278	983	990	331	213	777	165	126
16-may-08	1128	741	446	989	338	331	394	820	1152	1122	276	396
17-may-08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19-may-08	741	800	750	790	822	780	793	771	419	646	474	660
20-may-08	283	154	260	374	450	227	250	112	108	121	96	116
21-may-08	469	555	548	261	268	182	151	157	196	320	276	164
23-may-08	767	753	677	607	611	456	605	574	423	632	667	368
28-may-08	589	525	435	364	299	270	260	272	256	235	218	272
30-may-08	346	346	351	558	329	305	249	382	391	373	302	1104
31-may-08	949	914	870	706	1032	1063	1079	413	420	468	207	150
03-jun-08	367	525	454	396	727	738	745	694	274	223	228	251
04-jun-08	349	313	273	219	227	253	410	378	379	314	340	450
05-jun-08	940	928	896	920	923	938	936	975	943	919	335	897
07-jun-08	135	63	70	117	98	217	116	172	673	808	271	261
10-jun-08	520	525	594	664	687	717	796	547	581	623	714	595
11-jun-08	221	253	339	401	631	723	1166	295	534	1185	1154	268
12-jun-08	1004	1022	998	903	977	997	1010	226	817	946	940	938
13-jun-08	774	383	849	816	760	785	877	884	854	897	917	911

HORA FECHA	13:20	13:25	13:30	13:35	13:40	13:45	13:50	13:55	14:00	14:05	14:10	14:15	14:20
14-may-08	833	874	298	340	262	192	300	185	782	450	446	360	372
15-may-08	877	205	229	438	2261	286	252	208	266	210	179	178	165
16-may-08	682	979	285	427	551	734	540	557	242	1008	259	500	378
17-may-08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19-may-08	616	534	538	420	396	409	401	404	376	364	422	360	359
20-may-08	330	251	200	193	113	124	128	79	74	76	93	78	69
21-may-08	116	147	163	208	249	269	269	265	246	240	226	203	201
23-may-08	304	225	160	790	367	883	198	687	410	177	138	207	207
28-may-08	484	568	367	361	302	266	243	239	259	331	363	405	312
30-may-08	1006	946	448	874	844	344	988	906	923	780	313	927	240
31-may-08	181	128	159	197	227	252	252	239	239	246	277	292	306
03-jun-08	415	341	428	369	536	597	378	334	325	597	460	435	500
04-jun-08	382	338	241	222	229	236	306	226	227	215	276	222	225
05-jun-08	620	977	320	1026	925	1043	304	272	1055	740	485	197	120
07-jun-08	333	115	85	182	220	268	190	180	154	153	87	159	205
10-jun-08	530	432	490	605	630	647	521	501	361	420	470	572	630
11-jun-08	387	650	404	352	681	1000	266	233	336	124	248	278	208
12-jun-08	955	940	959	941	178	190	210	183	217	224	145	174	184
13-jun-08	869	860	857	886	866	839	808	792	814	793	798	795	785

**Anexo B. Tablas de temperatura y volumen de agua destilada diaria.**

Mayo 14 de 2008 – Angulo 0°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	36	32	27
9:40	45	38	41
10:00	48	47	50
10:20	53	47	58
10:40	57	51	60
11:00	58	52	62
11:20	58	54	63
11:40	58	52	62
12:00	55	49	59
12:20	56	51	59
12:40	56	50	59
13:00	59	51	59
13:20	57	48	58
13:40	50	46	54
14:00	43	41	47
14:20	44	40	45
Ta promedio: 53.9°C		Vd: 168 cm <sup>3</sup>	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	38	35	42
3:00	36	33	40
Vd: 15cm <sup>3</sup>			

Mayo 15 de 2008 – Angulo 0°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	38	34	33
9:40	47	42	48
10:00	51	46	56
10:20	52	51	62
10:40	54	47	65
11:00	54	53	66
11:20	54	49	65
11:40	51	44	61
12:00	46	45	58
12:20	41	41	53
12:40	38	35	49
13:00	39	38	49
13:20	36	35	46
13:40	34	34	43
14:00	32	33	42
14:20	31	27	40
Ta promedio: 52.6°C		Vd: 188 cm3	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	29	27	37
3:00	29	26	35
Vd: 8cm3			

Mayo 16 de 2008 – Angulo 0°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	27	27	27
9:40	38	35	39
10:00	45	43	56
10:20	50	49	59
10:40	53	45	63
11:00	54	42	65
11:20	51	46	62
11:40	52	46	62
12:00	45	37	56
12:20	51	45	59
12:40	47	43	58
13:00	43	39	54
13:20	41	36	52
13:40	43	35	50
14:00	41	34	49
14:20	39	34	47
Ta promedio: 53.6°C			Vd: 210 cm3

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	32	33	42
3:00	28	28	38
Vd: 10cm3			

Mayo 17 de 2008 – Angulo 0°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	31	22	26
9:40	36	30	35
10:00	34	24	38
10:20	33	23	39
10:40	30	21	35
11:00	29	20	34
11:20	27	20	34
Ta promedio: 34.4°C Vd:10cm3			

Mayo 19 de 2008 – Angulo 0°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	23	23	25
9:40	26	25	27
10:00	34	31	34
10:20	37	36	43
10:40	42	40	49
11:00	41	40	48
11:20	37	37	46
11:40	33	34	42
12:00	29	31	40
12:20	28	29	38
12:40	40	39	46
13:00	43	40	49
13:20	43	41	50
13:40	41	41	49
14:00	38	39	47
14:20	39	36	45
Ta promedio: 42.4°C		Vd: 100 cm3	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	31	32	39
3:00	29	30	37
Vd: 14cm3			

Mayo 21 de 2008 – Angulo 0°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	33	30	27
9:40	46	40	42
10:00	49	44	51
10:20	45	41	51
10:40	41	38	47
11:00	38	36	44
11:20	34	31	41
11:40	38	33	41
12:00	35	32	40
12:20	33	30	38
12:40	33	30	36
13:00	31	28	35
13:20	30	28	32
13:40	30	28	33
14:00	29	28	31
14:20	29	27	31
Ta promedio: 38.7°C		Vd: 85 cm3	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	28	26	30
3:00	27	24	29
Vd: 6cm3			

Mayo 22 de 2008 – Angulo 4.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	24	25	26
9:40	36	34	38
10:00	43	36	48
10:20	44	39	50
10:40	44	38	51
11:00	45	38	52
11:20	42	38	50
11:40	37	34	46
12:00	36	33	44
12:20	35	34	44
12:40	34	33	45
13:00	31	30	41
13:20	30	29	38
13:40	28	27	37
14:00	29	28	37
14:20	30	29	37
Ta promedio: 42.7°C		Vd: 83 cm3	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	28	27	35
3:00	27	27	32
Vd: 6cm3			

Mayo 23 de 2008 – Angulo 4.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	24	18	24
9:40	31	26	29
10:00	35	31	34
10:20	41	36	41
10:40	44	39	46
11:00	44	39	50
11:20	47	41	52
11:40	49	44	54
12:00	49	47	58
12:20	52	48	60
12:40	50	45	58
13:00	47	41	55
13:20	43	37	51
13:40	42	36	45
14:00	44	35	44
14:20	38	31	43
Ta promedio: 46.6°C			Vd: 140 cm3

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	32	28	39
3:00	30	26	37
Vd: 13cm3			

Mayo 28 de 2008 – Angulo 4.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	23	24	21
9:40	26	27	27
10:00	29	30	33
10:20	31	31	36
10:40	34	34	40
11:00	39	38	43
11:20	42	38	48
11:40	39	40	48
12:00	40	41	50
12:20	37	39	49
12:40	36	37	45
13:00	33	34	43
13:20	26	29	40
13:40	27	29	39
14:00	27	29	37
14:20	24	26	36
Ta promedio: 39.7°C		Vd: 73 cm3	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	23	26	34
3:00	22	24	31
Vd: 12cm3			

Mayo 30 de 2008 – Angulo 4.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	33	27	26
9:40	44	35	43
10:00	52	42	53
10:20	56	47	58
10:40	59	51	63
11:00	60	52	66
11:20	62	53	68
11:40	61	52	67
12:00	60	51	66
12:20	55	47	63
12:40	49	41	55
13:00	45	37	51
13:20	47	38	50
13:40	48	40	52
14:00	48	38	51
14:20	47	37	50
Ta promedio: 55.1°C		Vd: 232 cm <sup>3</sup>	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	39	34	44
3:00	34	30	39
Vd: 10cm <sup>3</sup>			

Mayo 31 de 2008 – Angulo 4.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	29	28	28
9:40	42	37	41
10:00	45	41	51
10:20	49	46	56
10:40	53	49	60
11:00	54	50	62
11:20	55	50	62
11:40	54	51	63
12:00	54	50	63
12:20	56	51	63
12:40	54	52	62
13:00	52	50	51
13:20	42	42	52
13:40	35	36	46
14:00	33	34	43
14:20	32	34	41
Ta promedio: 52.9°C		Vd: 210 cm <sup>3</sup>	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	30	32	38
3:00	29	28	36
Vd: 15cm <sup>3</sup>			

Junio 03 de 2008 – Angulo 4.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	28	26	29
9:40	31	29	34
10:00	34	31	39
10:20	35	34	31
10:40	36	35	44
11:00	36	37	45
11:20	42	38	49
11:40	41	41	51
12:00	38	39	49
12:20	36	37	48
12:40	38	38	49
13:00	40	38	50
13:20	30	30	44
13:40	31	31	43
14:00	33	33	43
14:20	31	32	40
Ta promedio: 43.7°C		Vd: 91 cm3	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	28	29	36
3:00	25	27	34
Vd: 8cm3			

Junio 04 de 2008 – Angulo 4.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	33	30	38
9:40	38	34	36
10:00	44	38	46
10:20	50	46	56
10:40	50	50	62
11:00	54	53	66
11:20	55	56	67
11:40	53	53	65
12:00	52	51	63
12:20	44	44	57
12:40	35	38	47
13:00	33	34	45
13:20	34	33	44
13:40	31	34	42
14:00	30	30	41
14:20	29	38	36
Ta promedio: 50°C		Vd: 143 cm3	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	26	27	35
3:00	27	24	32
Vd: 6cm3			

Junio 05 de 2008 – Angulo 6.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
9:20	28	28	15
9:40	36	32	29
10:00	42	36	40
10:20	48	44	47
10:40	46	43	49
11:00	47	43	49
11:20	47	43	49
11:40	51	47	53
12:00	56	50	59
12:20	57	53	61
12:40	55	49	60
13:00	52	47	56
13:20	46	41	52
13:40	47	41	49
14:00	47	42	49
14:20	43	40	47
Ta promedio: 47.7°C		Vd: 181 cm <sup>3</sup>	

SOMBRA			
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)
2:40	35	34	39
3:00	32	31	35
Vd: 12cm <sup>3</sup>			

Junio 07 de 2008 – Angulo 6.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tia(°C)
9:20	24	27	27	27
9:40	29	30	32	34
10:00	35	34	38	39
10:20	39	36	43	42
10:40	41	38	36	47
11:00	44	43	51	50
11:20	48	46	55	56
11:40	43	43	55	53
12:00	36	39	48	45
12:20	33	36	44	41
12:40	29	33	40	36
13:00	30	32	37	37
13:20	32	33	40	29
13:40	29	32	39	27
14:00	28	31	38	35
14:20	27	30	36	33
Ta promedio: 41.8°C			Vd: 76cm3	

SOMBRA				
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tiv (°C)
2:40	24	26	34	31
3:00	22	24	31	30
Vd: 4cm3				

Junio 10 de 2008 – Angulo 6.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tia(°C)
9:20	27	26	21	21
9:40	30	28	34	39
10:00	31	30	40	43
10:20	31	31	40	41
10:40	35	34	44	47
11:00	41	40	52	54
11:20	44	42	57	58
11:40	46	43	57	58
12:00	45	43	57	56
12:20	44	43	56	56
12:40	44	43	55	56
13:00	45	42	55	56
13:20	42	41	54	54
13:40	41	40	52	53
14:00	39	38	51	50
14:20	38	37	48	49
Ta promedio: 48.3°C			Vd: 122cm3	

SOMBRA				
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tiv (°C)
2:40	31	33	38	39
3:00	28	29	34	35
Vd: 9cm3				

Junio 11 de 2008 – Angulo 6.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tia(°C)
9:20	29	30	27	39
9:40	38	36	37	49
10:00	48	45	50	59
10:20	50	51	56	65
10:40	55	54	61	68
11:00	56	55	62	68
11:20	53	52	60	62
11:40	58	56	64	69
12:00	47	48	56	57
12:20	37	39	45	65
12:40	35	37	42	64
13:00	40	41	46	50
13:20	41	42	47	50
13:40	40	41	45	48
14:00	41	40	45	48
14:20	47	36	41	43
Ta promedio: 49°C			Vd: 177 cm <sup>3</sup>	

SOMBRA				
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tiv (°C)
2:40	35	34	35	34
3:00	29	30	34	31
Vd: 11cm <sup>3</sup>				

Junio 12 de 2008 – Angulo 6.5°

HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tia(°C)
9:20	30	23	32	40
9:40	42	25	47	52
10:00	48	44	57	60
10:20	53	50	62	64
10:40	54	52	66	68
11:00	57	55	68	69
11:20	52	50	64	64
11:40	43	42	55	52
12:00	49	46	60	59
12:20	51	47	63	61
12:40	53	48	62	65
13:00	51	46	60	60
13:20	51	46	61	60
13:40	47	43	58	54
14:00	37	38	48	45
14:20	33	34	43	40
Ta promedio: 56.9°C			Vd: 213 cm <sup>3</sup>	

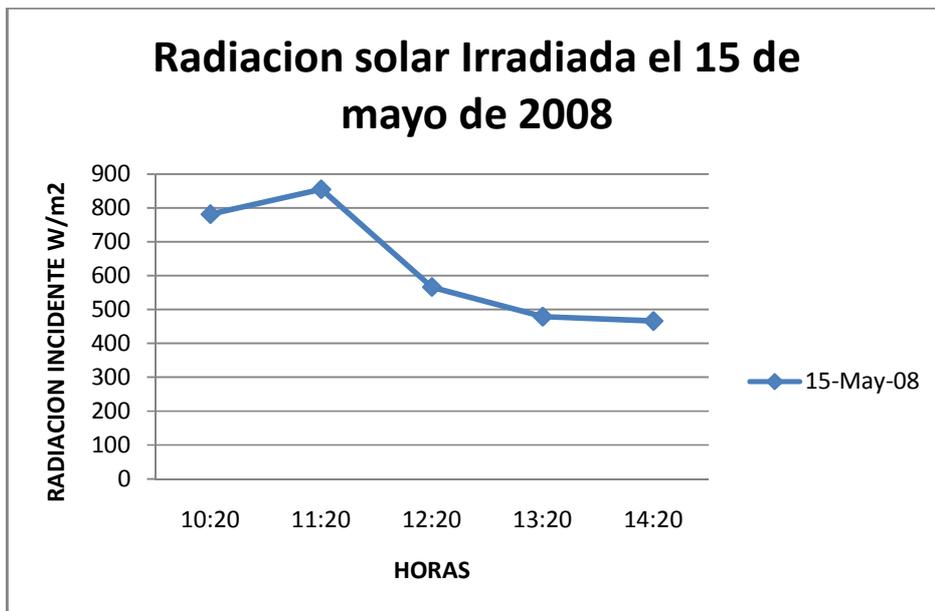
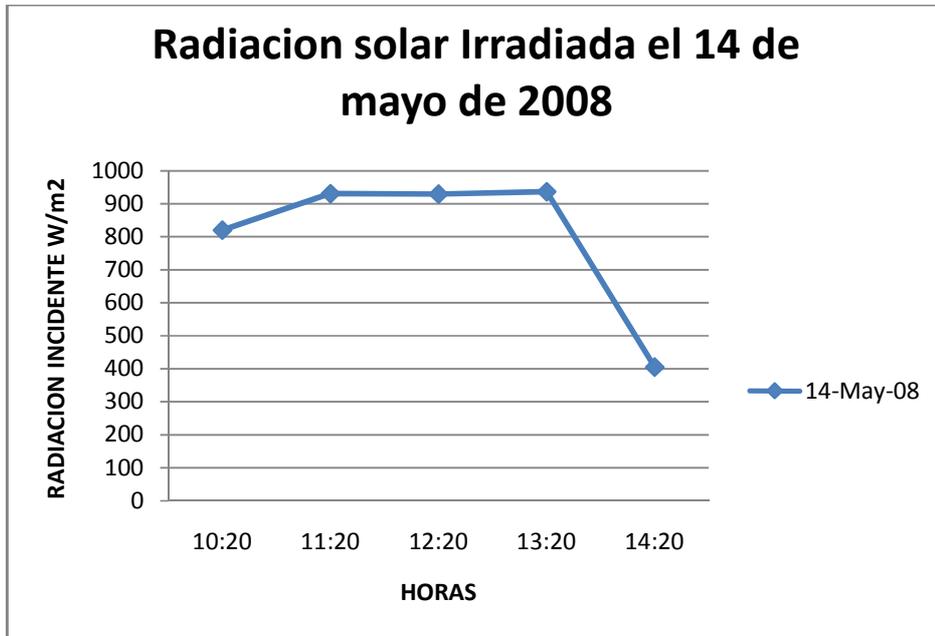
SOMBRA				
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tiv (°C)
2:40	31	32	40	39
3:00	30	32	39	37
Vd: 11cm <sup>3</sup>				

Junio 13 de 2008 – Angulo 6.5°

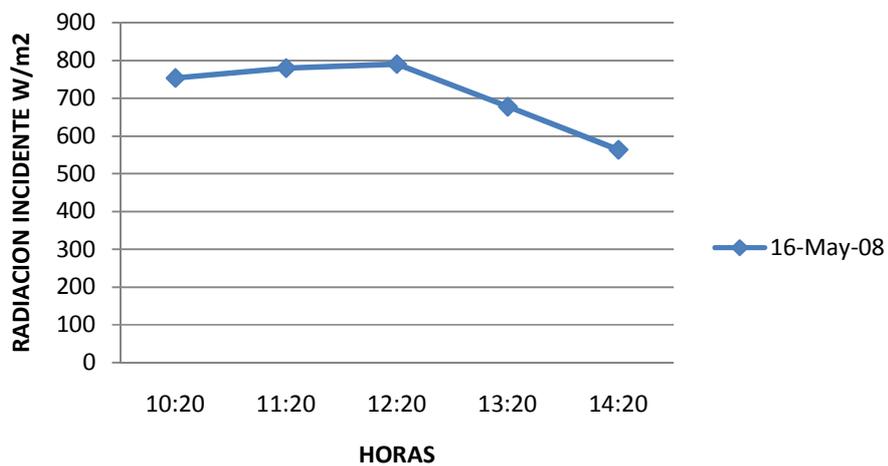
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tia(°C)
9:20	26	27	25	28
9:40	31	30	31	32
10:00	37	35	39	40
10:20	44	41	48	50
10:40	50	48	55	56
11:00	55	52	61	62
11:20	56	53	63	63
11:40	52	52	63	62
12:00	54	52	63	62
12:20	57	53	64	63
12:40	49	49	61	59
13:00	49	48	61	60
13:20	50	48	60	59
13:40	50	48	59	59
14:00	48	43	57	57
14:20	46	44	52	54
Ta promedio: 53.8°C			Vd: 192 cm3	

SOMBRA				
HORA	Ti (°C)	Te (°C)	Ta (°C)	Tiv (°C)
2:40	44	41	48	45
3:00	41	38	43	42
Vd: 20cm3				

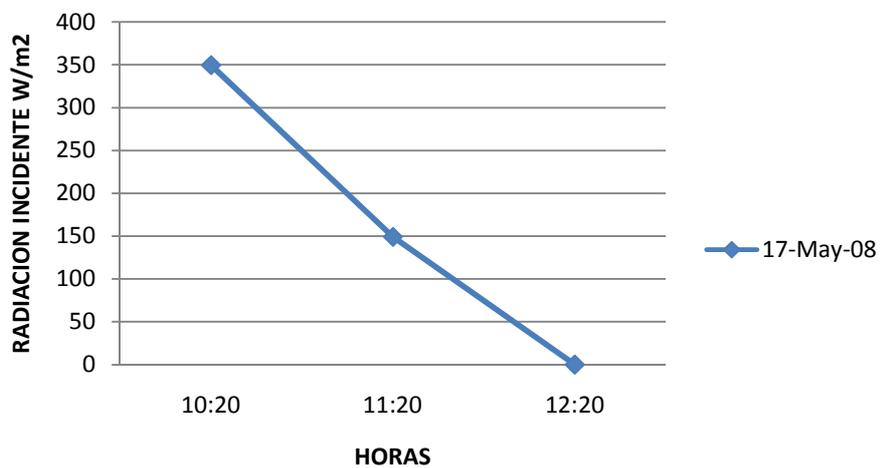
**Anexo C. Graficas del comportamiento de la radiación solar diaria.**



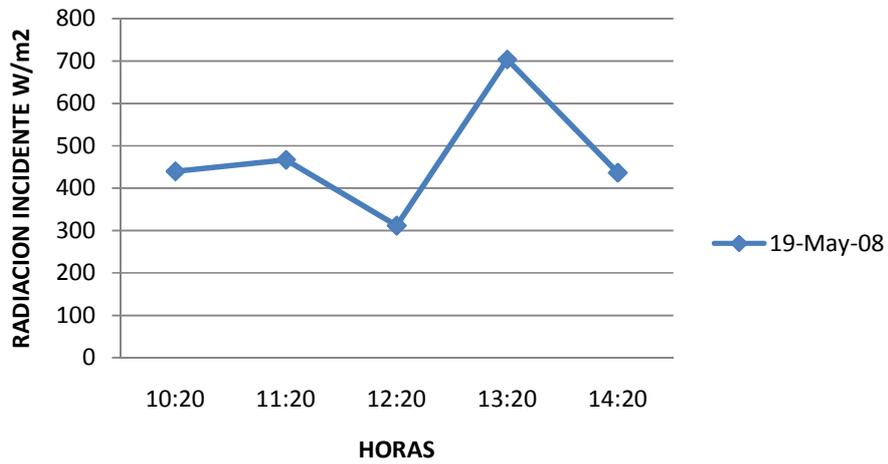
### Radiacion solar Irradiada el 16 de mayo de 2008



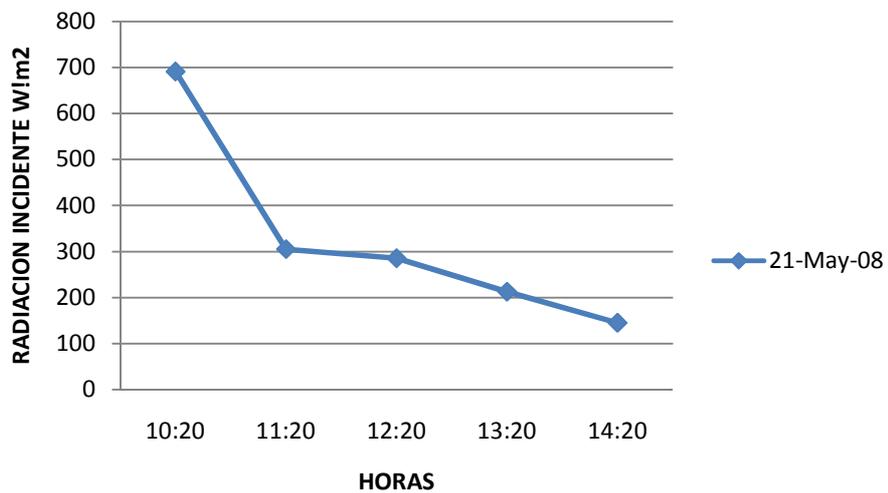
### Radiacion solar Irradiada el 17 de mayo de 2008



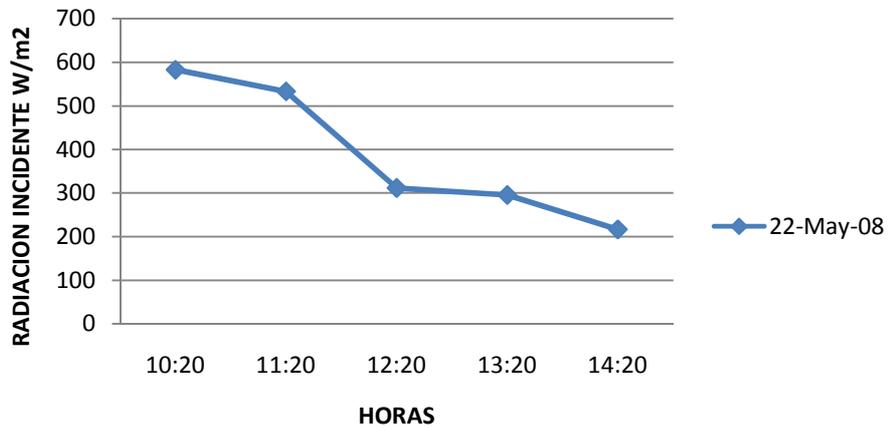
### Radiacion solar Irradiada el 19 de mayo de 2008



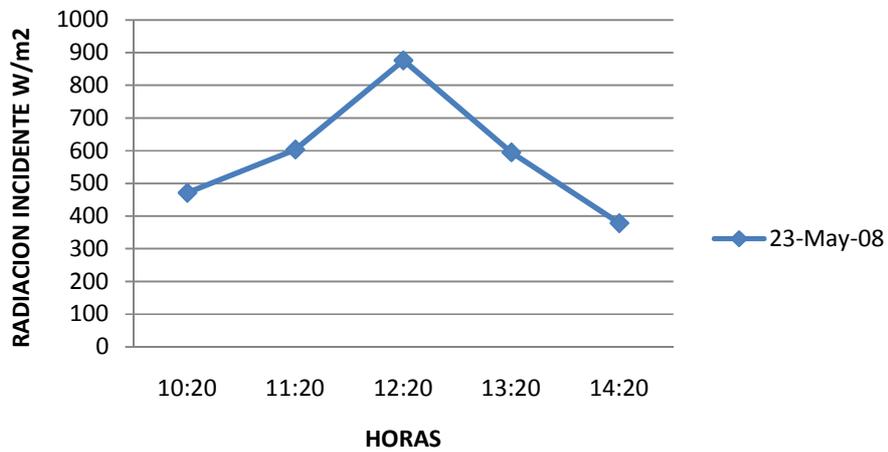
### Radiacion solar Irradiada el 21 de mayo de 2008



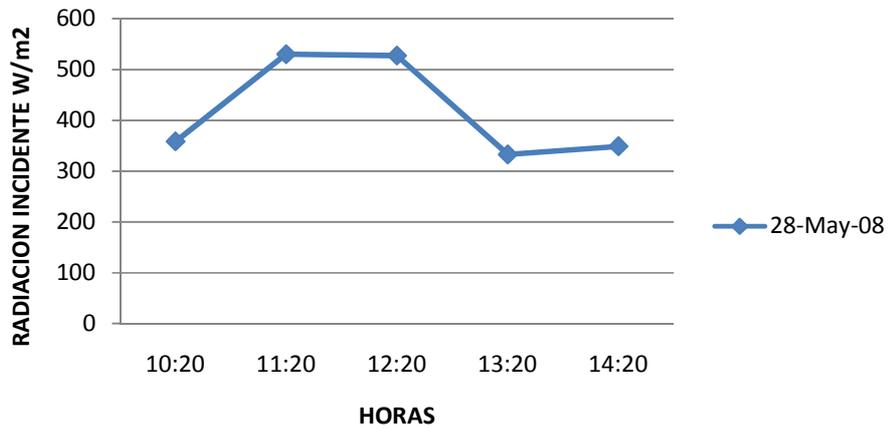
### Radiacion solar Irradiada el 22 de mayo de 2008



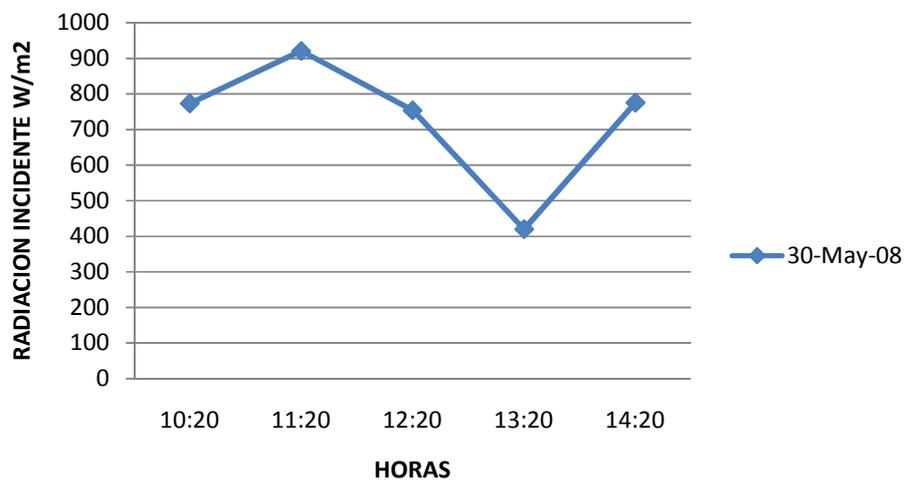
### Radiacion solar Irradiada el 23 de mayo de 2008



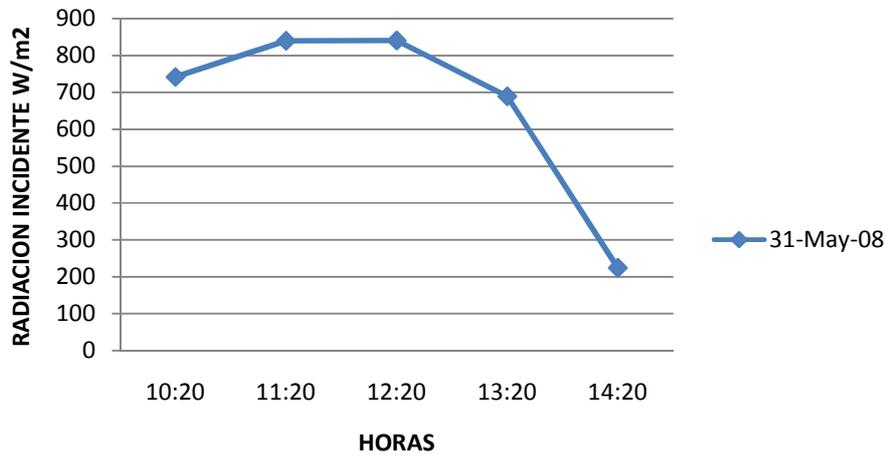
### Radiacion solar Irradiada el 28 de mayo de 2008



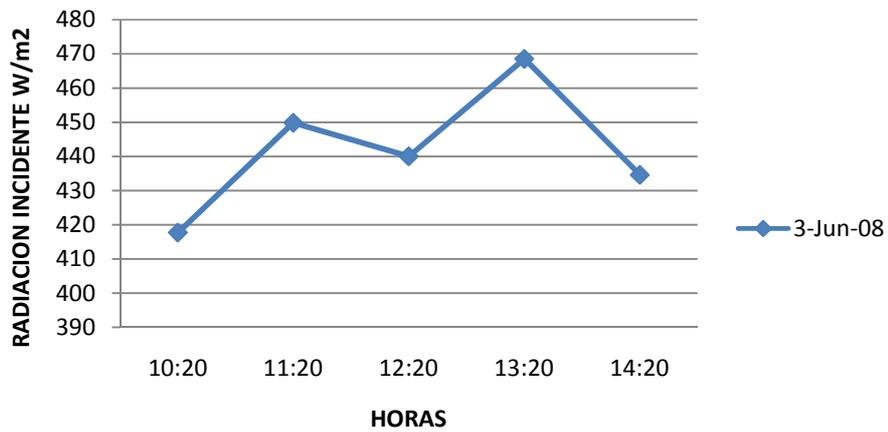
### Radiacion solar Irradiada el 30 de mayo de 2008



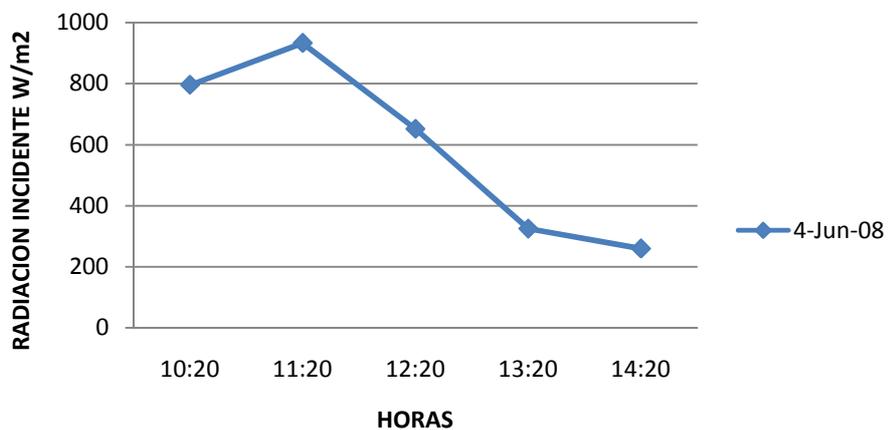
### Radiacion solar Irradiada el 31 de mayo de 2008



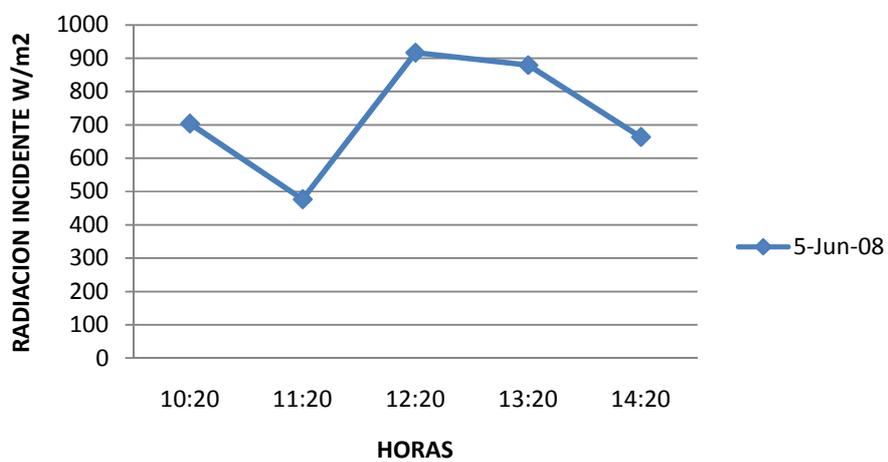
### Radiacion solar Irradiada el 3 de Junio de 2008



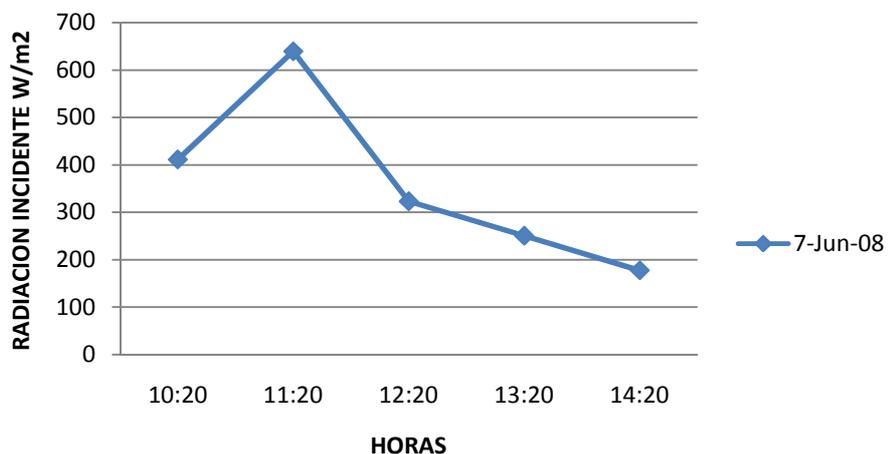
### Radiacion solar Irradiada el 4 de Junio de 2008



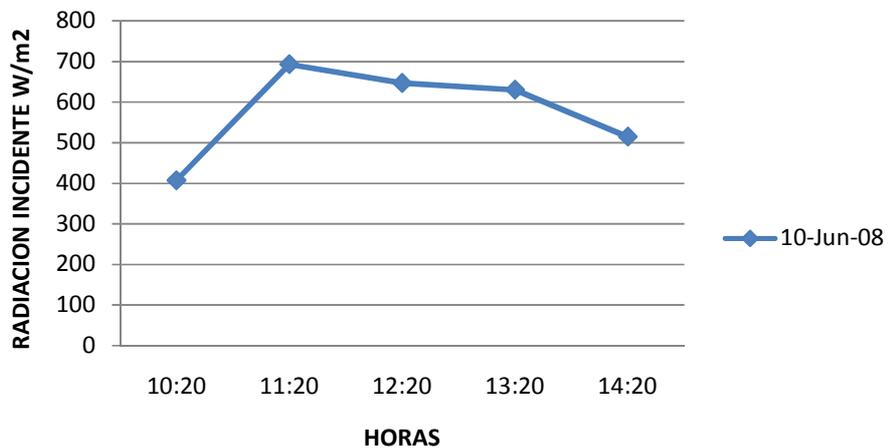
### Radiacion solar Irradiada el 5 de Junio de 2008



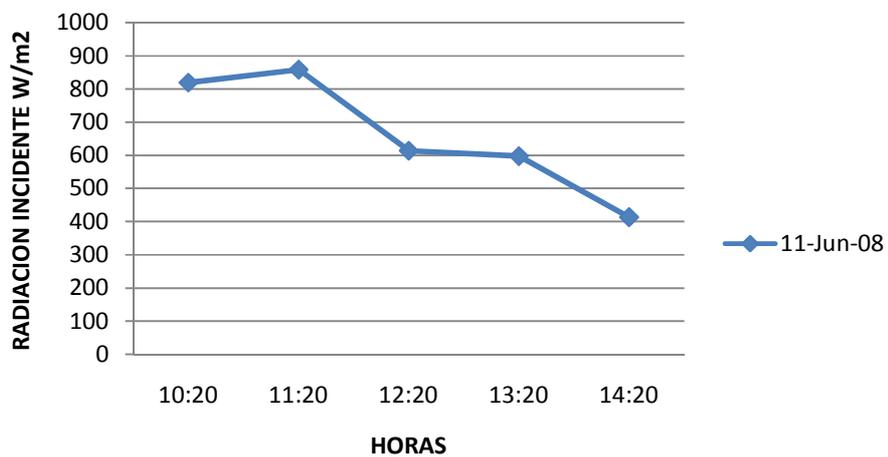
### Radiacion solar Irradiada el 7 de Junio de 2008



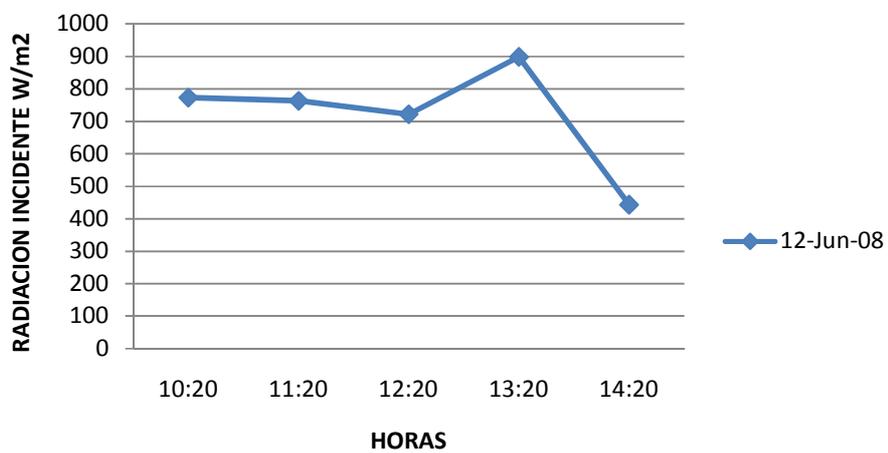
### Radiacion solar Irradiada el 10 de Junio de 2008



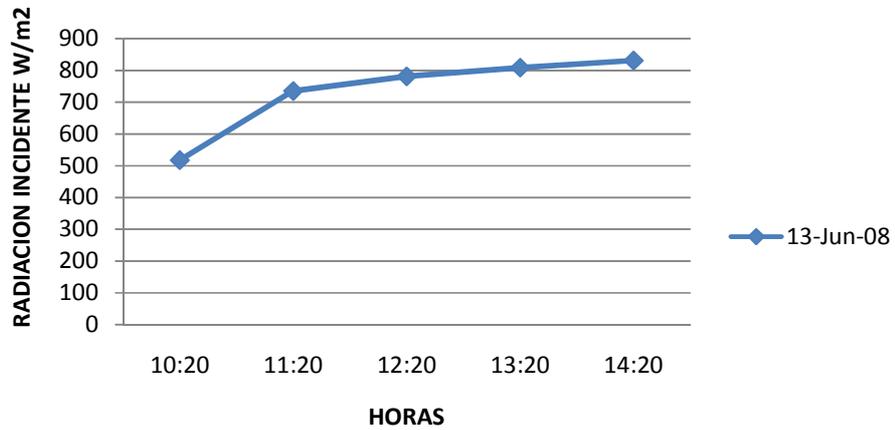
### Radiacion solar Irradiada el 11 de Junio de 2008



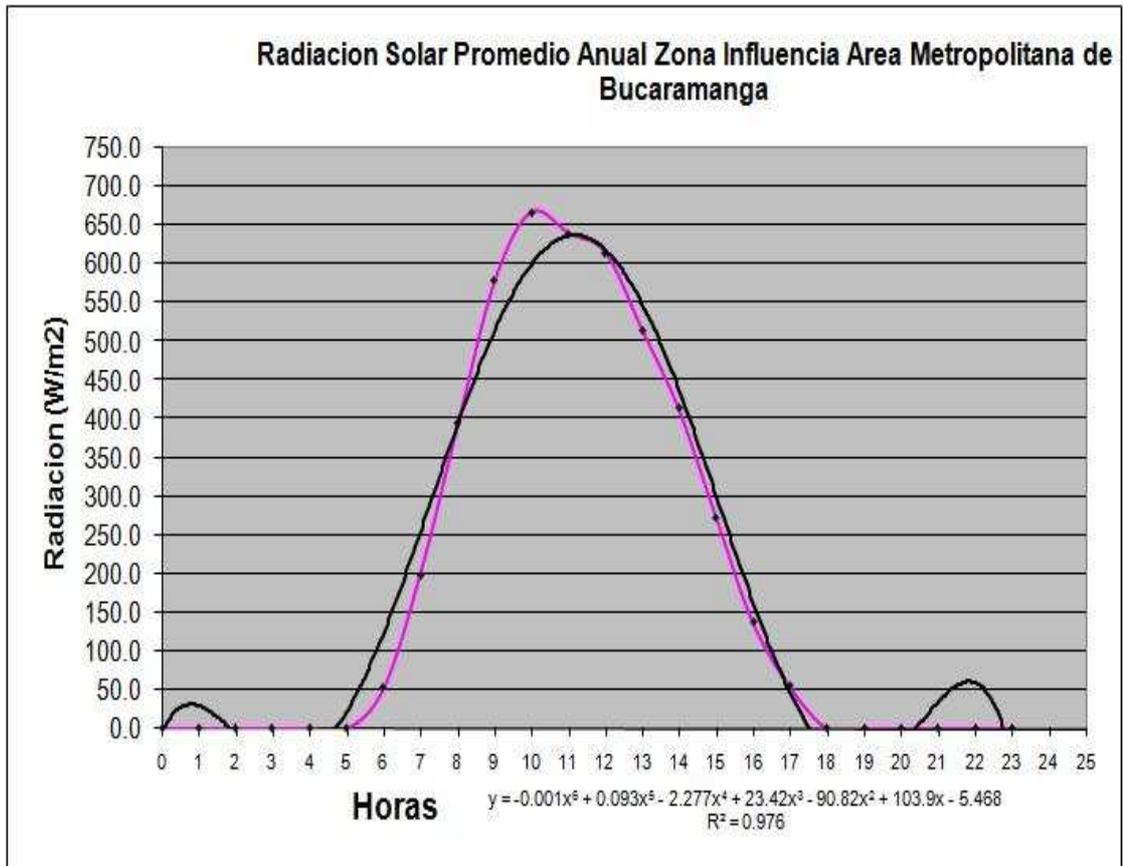
### Radiacion solar Irradiada el 12 de Junio de 2008



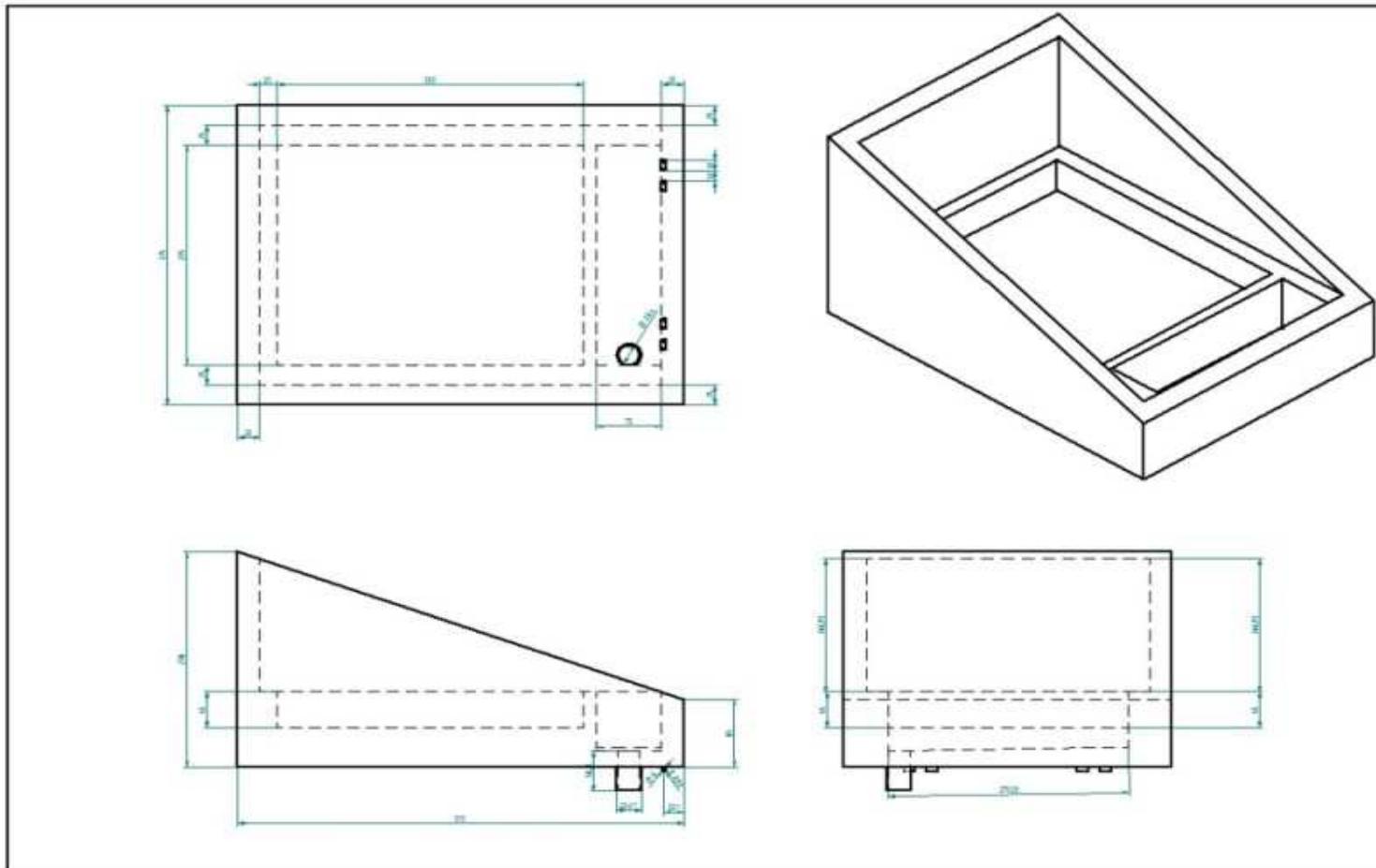
### Radiacion solar Irradiada el 13 de Junio de 2008



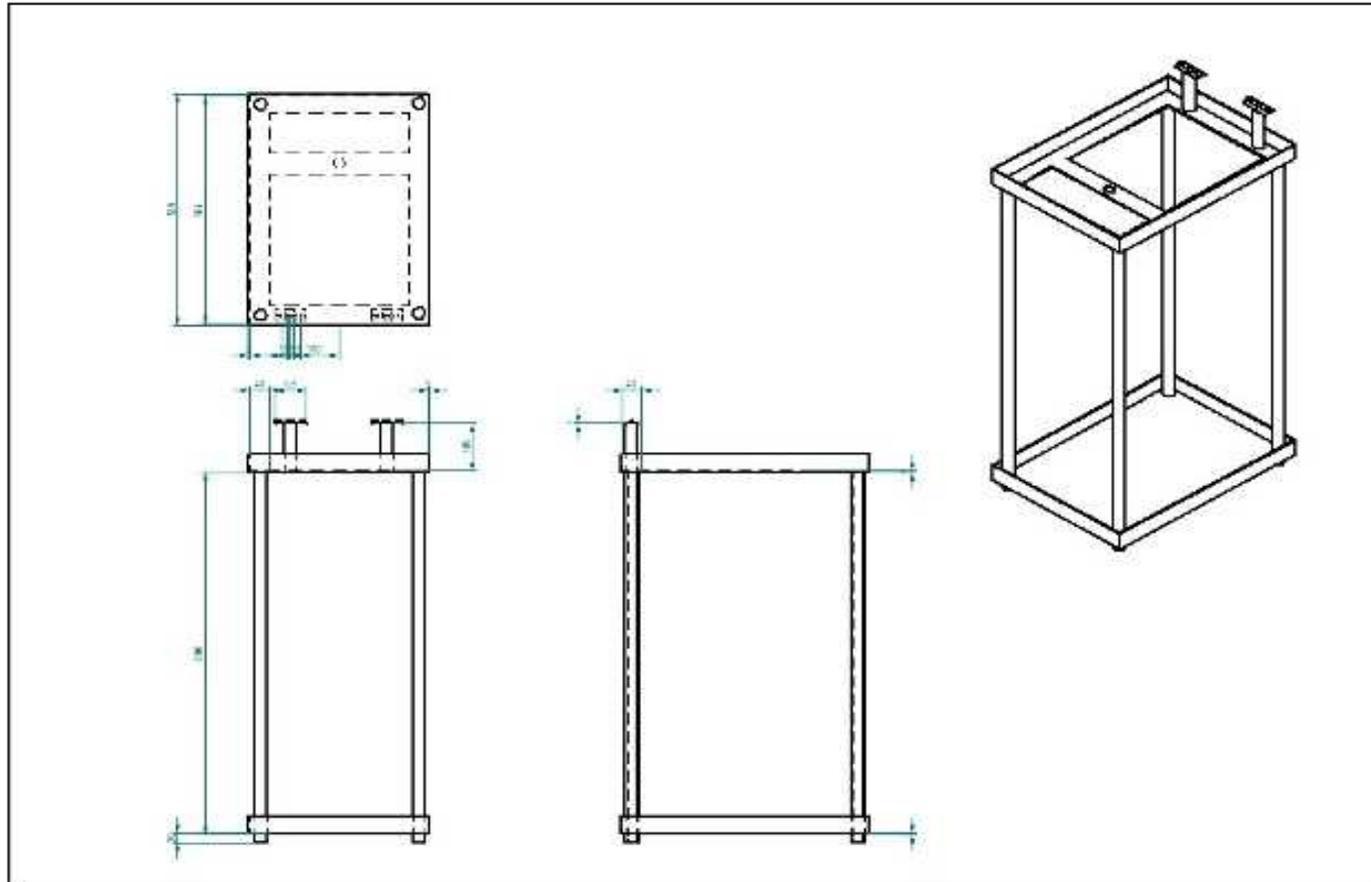
**ANEXO D. Radiación solar en el área metropolitana de Bucaramanga.**



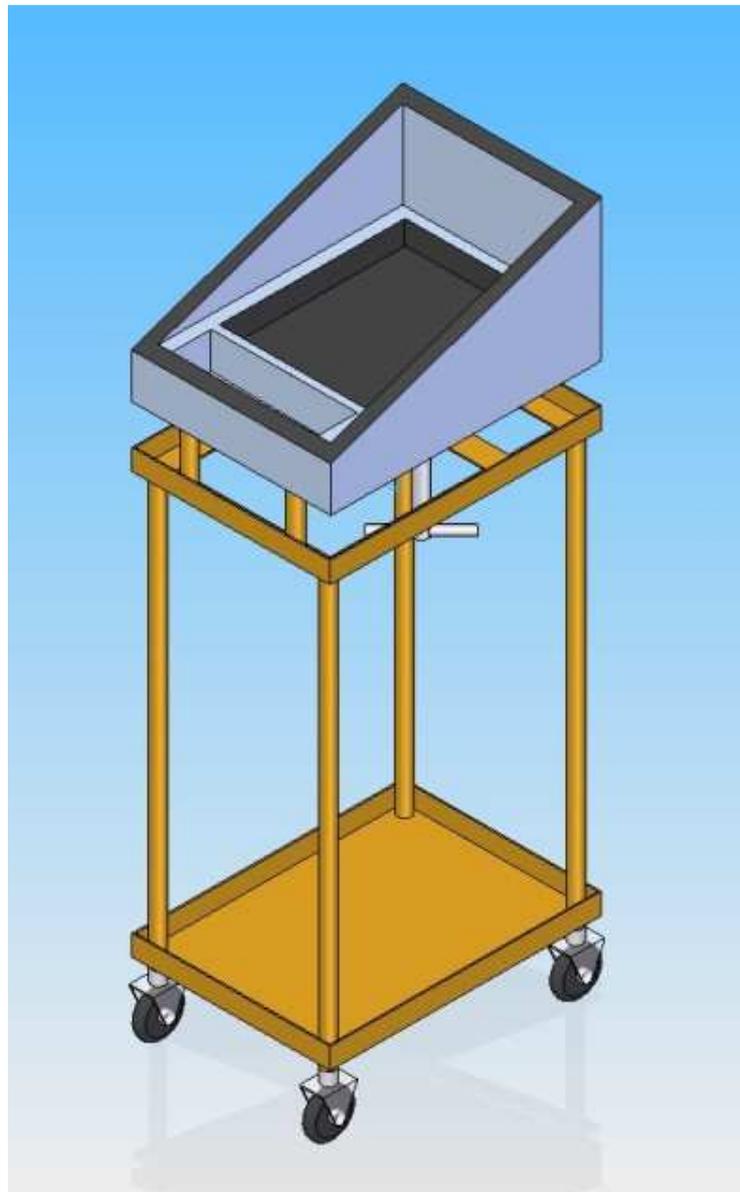
### Anexo E. Planos del destilador



## Anexo F. Planos de la estructura



## Anexo G. Conjunto solid edge



**Anexo H. Proceso de condensación por goteo en el vidrio (en sol)**



**Anexo I. Proceso de condensación por goteo en el vidrio (en sombra)**



**Anexo J. Vista trasera del destilador**



**Anexo K. Vista frontal del destilador solar**



**Anexo L. Interior del destilador solar**



## Anexo M. Guía de laboratorio del destilador

### 1. Introducción

La tecnología de destilación solar reduce la problemática que existe entre las actuales condiciones de agua de muchos lugares del mundo y los sistemas centralizados de purificación de agua que se planean para el futuro. En muchas regiones del país donde hay mínimas posibilidades de establecer cualquier tipo de sistema centralizado para el tratamiento de agua, los destiladores proporcionan una solución inmediata, barata y sencilla para la obtención de agua limpia y buena para el consumo humano.

La tecnología solar trae beneficios inmediatos a los usuarios evitándoles problemas de salud, defectos de nacimiento, muertes causadas por enfermedades transmitidas por el agua. Los destiladores incluso reducen las posibilidades de dolores e incomodidades debido a problemas de salud causados por agua contaminada. Esto a su vez, ayuda a la población a ser más activa y tener una vida más productiva. Además los destiladores pueden usarse en cualquier lugar donde brille el sol.

### 2. Objetivos de la guía

#### 2.1 Objetivo general

Comprender el funcionamiento de un destilador de simple efecto.

#### 2.2 Objetivos específicos

- 1) Entender de manera general el fenómeno físico de la destilación solar.
- 2) Calcular el rendimiento de agua destilada por unidad de área de incidencia de la radiación solar.

3) Analizar las posibles pérdidas, por transferencia de calor.

4) Establecer un diagrama con los flujos de calor presentes en el destilador solar.

### 3. Fundamento

Para el caso de la destilación solar, el sol representa el único requerimiento de energía en este proceso.

Un destilador consiste en una superficie cubierta con un material transparente y expuesta a los rayos del sol, el agua sufre un calentamiento debido a que la radiación solar que atraviesa la cubierta no es reirradiada, completamente, hacia el exterior, a que los materiales tienen la capacidad de absorber la radiación y a que la cubierta solo permite la salida parcial de la radiación.

El factor más importante que afecta a la producción es la intensidad y cantidad de energía solar que llega al destilador. La producción de agua destilada (medida en  $\text{kg}/\text{m}^2$  día) es la cantidad de energía utilizada en vaporizar el agua en el destilador ( $\text{Joules}/\text{m}^2$  día), dividida por el calor latente de vaporización del agua ( $\text{J}/\text{Kg}$ ). La eficiencia del destilador es entonces la cantidad de energía utilizada para vaporizar el agua en el destilador dividido entre la cantidad de energía incidente en el destilador ( $\text{J}/\text{m}^2$  día).

### 4. Materiales

- Destilador solar
- Pyranometro

- Multimetro
- Termocuplas
- Probeta de 100ml

## **5. Metodología**

1. Alimentar el destilador.
2. Medir con el Pyranometro la radiación incidente en el lapso de la destilación.
3. Medir la cantidad de agua recolectada por unidad de tiempo.
4. Con el dato anterior y con el calor latente de vaporización del agua calcular la energía utilizada para destilar dicha agua.
5. Determinar la eficiencia del destilador solar mediante los datos obtenidos con el Piranómetro y con la energía utilizada para destilar el agua.
6. Determinar las posibles pérdidas, por transferencia de calor en el destilador solar.

## **6. Bibliografía**

- [1] DONALD R. Pitts Teoría y problemas de transferencia de calor. MacGraw-Hill.
- [2] INCORPERA, Frank P. Fundamentos de transferencia de calor. México, Prentice Hall, 1999
- [3] Technology for solar energy utilization, paginas 121. New York: 1978.