



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

**CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL
COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN
DESTILADOR SOLAR TIPO CASETA DE
UNA PENDIENTE, CON DIVERSAS
VARIACIONES DE DISEÑO**

TESIS RECEPCIONAL

Para obtener el Grado de
Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTAN

Juan Carlos Romero Dzib
David Reyes Coronado
Fandor Eloy Hernández Rodríguez

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Fernando Enrique Flores Murrieta

Chetumal, Quintana Roo 2000



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité de asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:


INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGIA

COMITÉ:

DIRECTOR:


M.C. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA

ASESOR:


M.C. JOSE HERNANDEZ RODRIGUEZ

ASESOR:


M.C. JOSE MARTÍN RIVERO RODRIGUEZ

Chetumal, Quintana Roo. Diciembre de 2000

DEDICATORIA

A Dios y nuestros padres.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos:

A los M.C. Fernando Enrique Flores Murrieta, José Hernández Rodríguez, José Martín Rivero Rodríguez y Vicente Flores Lara por su apoyo en la revisión de la Tesis.

A todos nuestros familiares y amigos que siempre confiaron y apoyaron moralmente.

A la Sra. Angela Dzib Zapata por su amabilidad al permitirnos utilizar su equipo de computo.

Al Ex-Gobernador de Quintana Roo Dr. Miguel Borge Martín por contribuir en la creación de la Universidad de Quintana Roo.

CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN
DESTILADOR SOLAR TIPO CASETA DE UNA PENDIENTE, CON DIVERSAS
VARIACIONES DE DISEÑO.

JUAN CARLOS ROMERO DZIB

DAVID REYES CORONADO

FANDOR ELOY HERNANDEZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERIA

/DICIEMBRE/2000

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE GRAFICAS	vi
LISTA DE TABLAS	vii
NOMENCLATURA	ix
RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
I.- LA ENERGIA SOLAR	
I.1.- EL SOL COMO FUENTE DE ENERGIA.	8
I.2.- RADIACION SOLAR.	10
I.3.- ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR A PARTIR DE MODELOS EMPÍRICOS.	15
I.4.- APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR.	17

II.- METODOS DE PURIFICACIÓN DE AGUA	
II.1.- METODOS DE PURIFICACION DE AGUA.	21
II.1.1- DESTILACIÓN.	21
II.1.2- OSMOSIS INVERSA.	23
II.1.3- CONGELACIÓN.	24
II.2.- DESTILACION SOLAR DE AGUA.	25
II.2.1- CONSUMO DE AGUA DESTILADA.	28
II.3.- CLASIFICACIÓN DE LOS DESTILADORES SOLARES.	30
III.- DESTILADOR SOLAR EXPERIMENTAL TIPO CASETA DE UNA PENDIENTE Y SUS VARIANTES DE DISEÑO.	
III.1.- MATERIALES UTILIZADOS EN LA COSTRUCCION DE DESTILADORES SOLARES.	41
III.2.- CONSTRUCCION DEL DESTILADOR SOLAR EXPERIMENTAL Y LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.	42
III.3.- VARIANTES DE DISEÑO.	45
III.4.- DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LOS DESTILADORES SOLARES TIPO CASETA.	48
IV.- DESARROLLO EXPERIMENTAL	
IV.1.- PRUEBAS EXPERIMENTALES.	50
IV.2.- INSTRUMENTOS DE MEDICION.	50
IV.3.- METODOLOGIA PARA LA COMPARACION EXPERIMENTAL CON DIFERENTES AREAS.	54
IV.4.- METODOLOGIA PARA LA COMPARACION EXPERIMENTAL CON EL DOBLE EFECTO.	58
IV.5.- METODOLOGIA PARA LA COMPARACION EXPERIMENTAL CON ESPEJOS REFLEJANTES.	63
IV.6- COSTO POR CONSTRUCCIÓN DE LOS DESTILADORES.	66
V.- RESULTADOS Y ANALISIS	
V.1.- AREAS.	68
V.2.- DOBLE EFECTO.	73

V.3.- ESPEJOS REFLEJANTES.	79
V.4.- COSTOS.	84
V.5.- RESULTADOS DE ANALISIS MICROBIOLOGICO.	85
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFIA	89
GLOSARIO	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta es agua.	3
Figura 2	En el sureste del país la precipitación pluvial es alrededor de 2600 mm al año.	3
Figura 3	La energía proveniente del sol es limpia y sin costo alguno.	5
Figura 4	El destilador tipo caseta.	6
Figura I.1	El sol.	8
Figura I.2	Localización de la tierra en el sistema solar.	8
Figura I.3	Espectro electromagnético.	10
Figura I.4	Radiación solar.	13
Figura I.5	Piranómetro.	14
Figura I.6	Piranografo.	14
Figura I.7	Sistema pasivo.	18
Figura I.8a	Sistema fotovoltaico en una casa habitación.	19
Figura I.8b	Sistema fotovoltaico en alumbrado exterior.	19
Figura I.9a	Sistema térmico en calentamiento de agua para uso habitacional.	20
Figura I.9b	Sistema térmico en destilación solar.	20
Figura II.1	Osmosis inversa.	23
Figura II.2	Ciclo hidrológico.	27
Figura II.3	Destilador solar.	27
Figura II.4	Destilador tipo caseta.	32
Figura II.5	Diseños de destiladores solares.	33
Figura II.6	Destiladores solares largos.	34

Figura II.7	Destilador esférico.	35
Figura II.8	Destilador múltiple efecto.	36
Figura II.9	Destilador escalera.	38
Figura II.10	Destilador por calentamiento indirecto.	40
Figura III.1	Destilador comparativo.	42
Figura III.2	Partes que componen el destilador.	44
Figura III.3	Diferentes áreas de captación.	45
Figura III.4	Destilador doble efecto.	46
Figura III.5	Destilador con superficies reflejantes.	47
Figura IV.1	Termopares (cobre-constantan.)	52
Figura IV.2	Multímetro digital.	52
Figura IV.3	Termohigrómetro.	53
Figura IV.4	Probetas.	53
Figura IV.5	Anemómetro.	53
Figura IV.6	Solarímetro.	53
Figura IV.7	Brújula.	53
Figura IV.8	Comparación experimental con diferentes áreas.	55
Figura IV.9	Disposición de los termopares.	56
Figura IV.10	Comparación experimental del destilador doble efecto vs destilador comparativo.	60
Figura IV.11	Comparación experimental del destilador con espejos vs destilador comparativo.	64

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica V.1.1	Eficiencias de los destiladores (promedio durante los días de prueba).	72
Gráfica V.1.2	Radiación vs producción de los destiladores durante un día de prueba (22/08/96).	72
Gráfica V.2.1	Eficiencias de los dos destiladores (promedio durante los días de prueba).	77
Gráfica V.2.2	Radiación vs producción de los destiladores durante un día de prueba (26/02/97).	77
Gráfica V.2.3	Comparación de Producción instantánea de los dos destiladores (26/02/97).	78
Gráfica V.2.4	Relación de temperaturas y producciones durante el día (26/02/97).	78
Gráfica V.3.1	Eficiencia de los destiladores (promedio durante los días de prueba).	82
Gráfica V.3.2	Radiación vs Producción de los destiladores durante un día de prueba (11/08/97).	83
Gráfica V.3.3	Temperatura vs producción de destilado en los destiladores durante un día de prueba (11/08/97).	83
Gráfica V.4.1	Costos para construir los destiladores de 1m^2 de área de captación.	84

LISTA DE TABLAS

Tabla IV.1	Instrumentos de medición empleados durante pruebas experimentales.	52
Tabla IV.2	Formato empleado para realizar las mediciones de las variables en diferentes áreas.	57
Tabla IV.3	Formato empleado para realizar las mediciones de las variables en el destilador Doble Efecto.	61
Tabla IV.4	Tabla IV.4. Formato empleado para realizar las mediciones de las variables en el destilador Simple Efecto.	62
Tabla IV.5	Formato empleado para realizar las mediciones de las variables de los destiladores con y sin espejos.	65
Tabla IV.6	Costos para construir un destilador.	66
Tabla V.1.1	Promedios de las variables medidas en los días de prueba.	71
Tabla V.2.1	Promedios diarios Simple Efecto.	75
Tabla V.2.2	Promedios diarios Dos Efectos.	75
Tabla V.2.3	Volúmenes de suministro y destilado por día en los destiladores.	76
Tabla V.2.4	Productividades y eficiencias de los dos destiladores.	76
Tabla V.3.1	Promedios diarios Sin Espejos.	80

Tabla V.3.2	Promedios diarios Con Espejos.	81
Tabla V.3.3	Diferencia de producción entre los destiladores.	81
Tabla v.3.4	Productividades y eficiencias de los dos destiladores.	82

NOMENCLATURA

%	: por ciento
δ	: declinación solar
η	: eficiencia térmica del destilador [%]
λ	: factor de latitud
ϕ	: latitud del lugar
Φ, RH	: humedad relativa (%)
ψ	: factor de estación
C_p	: capacidad calorífica
C_{pw}	: calor específico del agua
E	: energía
G	: radiación solar instantánea [W/m^2]
H	: radiación solar promedio al día [W/m^2 -día]
h_s	: ángulo horario
H_t	: energía solar recibida [$Kcal/m^2$ -día]
I_{sc}	: constante solar, 1353 [W/m^2]
k	: conductividad Térmica
K	: constante de conductividad
Kg	: Kilogramo
Km	: Kilómetro
Le	: valor promedio del calor latente de vaporización del agua
ly	: Langley
M	: número de días en el mes
m	: metro
m^2	: metro cuadrado
μm	: micrometro
mm	: milímetro
na	: número de día en el año
$^{\circ}C$: grado Centígrado

°K	: grado Kelvin
Pa	: cantidad de agua destilada [Kg/m ² -día]
Pw	: agua cargada al destilador
Qu	: Calor útil
r	: número de días lluviosos en el mes
s,n	: horas de brillo de sol promedio al día
Ta	: temperatura ambiente [°C]
Tch	: temperatura de la charola [°C]
Te	: temperatura de equilibrio del agua
Tg	: temperatura superficie de condensación [°C]
Tge	: temperatura exterior de la cubierta [°C]
Ti	: temperatura inicial de evaporación
ts	: tiempo transcurrido entre el orto y ocaso del sol
Tv	: temperatura del vapor de agua [°C]
Tw	: temperatura del agua a destilar [°C]
V	: volumen destilado [ml]
Vw	: velocidad del viento [m/s]
W	: watts
z,N	: longitud del día promedio en el mes
α	: absortancia
ε	: emitancia
τ	: transmitancia

SUBÍNDICES:

0.25	: 0.25 m ² área de captación
0.50	: 0.50 m ² área de captación
1.00	: 1.0 m ² área de captación
s	: simple efecto, sin espejo
D	: dos efectos
1	: primer efecto
2	: segundo efecto
E	: con espejos

RESUMEN

En el presente trabajo se lleva a cabo la construcción y el estudio del comportamiento de operación del destilador solar tipo caseta de una pendiente convencional con diferentes áreas de captación, implementando un doble efecto y adaptando espejos planos.

Este trabajo inicia con la determinación de la radiación solar a partir de modelos empíricos y su aprovechamiento indirecto, principalmente en la destilación de agua. Para la construcción de los destiladores se tomó en cuenta los diversos tipos de materiales que existen, sus propiedades térmicas y las dimensiones que se emplearon. Se construyeron tres destiladores convencionales con diferente área de captación, 0.25m^2 , 0.50m^2 y 1.0m^2 . Asimismo se construyeron dos destiladores con las mismas características del destilador de 0.25m^2 con la diferencia que a uno se le agregó un segundo efecto y al otro espejos planos.

El modo de operar fué el siguiente: Primero se trabajó con los destiladores de diferente área de captación; segundo se procedió a establecer el comportamiento del destilador convencional vs doble efecto y tercero se hizo la comparación del destilador convencional vs espejos reflejantes. Cada etapa de operación fué a las mismas condiciones ambientales. Las variables medidas en las diferentes etapas de operación fueron para conocer el comportamiento térmico, producción de destilado, análisis microbiológico y el costo de construcción de los destiladores.

Los resultados obtenidos indican que la producción de destilado es mayor en el destilador convencional y doble efecto, no así en su costo inicial de construcción que un poco elevado. Los resultados obtenidos de destilado en los destiladores son satisfactorios.

INTRODUCCION

Indudablemente el agua es un elemento indispensable para la vida humana. El hombre la utiliza como bebida o como integrante de alimentos para su nutrición. También la requiere para lavado de trastos y ropa, aseo personal, riego, uso industrial, etc.

Desde la antigüedad el hombre ha obtenido este vital líquido a través de diversas fuentes, como son las aguas subterráneas y superficiales, considerando también el agua de lluvia, que resulta de la evaporación de éstas mismas. Sin embargo, el abastecimiento de agua potable, no ha sido una tarea fácil para el hombre, porque no obstante la conformación terrestre está distribuida de tal manera que las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta es agua, como lo muestra la figura 1; la mayor parte es no potable (aguas salinas y salobres), y tan sólo un pequeño porcentaje es potable. Aunado a esto, su distribución geográfica no es uniforme en los continentes, por ello la disparidad de disponibilidad de la misma entre lugares como los desiertos y regiones hidrográficamente abundantes.

En nuestro país la distribución hidrográfica es muy heterogénea, al grado de que existen regiones con abundancia de agua dulce, mientras que en otros no se dispone fácilmente de ella. Es importante señalar que en el sureste la precipitación pluvial es alrededor de 2600 mm anuales contrastando con la zona noroeste con apenas 29 mm al año aproximadamente[4] . El sureste mexicano es señalado en la figura 2.



Figura 1.- tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta es agua [12]

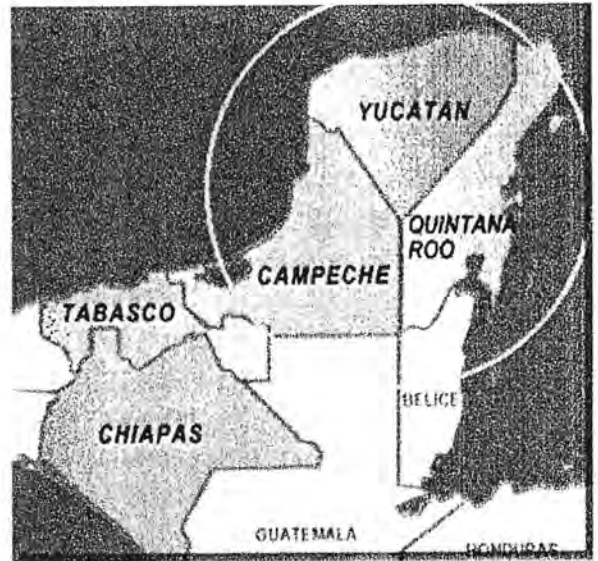


Figura 2.- En el sureste mexicano la precipitación pluvial es alrededor de 2600mm al año [4 y 14]

Además, el crecimiento poblacional ha provocado una excesiva demanda de agua, que ligado al problema de la contaminación ha dado como resultado la escasez de agua potable.

La contaminación del agua se debe principalmente a la aportación de residuos desechados por las industrias, las actividades agropecuarias, domésticas y comerciales, que van a terminar a los ríos, lagos, mares, aguas subterráneas y aguas salobres, destruyendo o modificando la fauna y flora, afectando el equilibrio de los ecosistemas, repercutiendo tarde o temprano en el hombre.

El empleo de agua proveniente de las diversas fuentes naturales requiere de un tratamiento adecuado que garantice su calidad física, química y bacteriológica de acuerdo a las exigencias de uso. De lo contrario, al consumirse sin un tratamiento previo, provoca la proliferación de enfermedades

gastrointestinales, en el caso del agua potable. Asimismo, deteriora los equipos de los procesos industriales como son las calderas, intercambiadores de calor, etc., ya que genera incrustaciones de sales minerales en el interior de la tubería de dichos equipos causando una deficiencia en la transferencia térmica.

El desarrollo de tecnologías adecuadas para el tratamiento de agua ha establecido diferentes metodologías, entre éstas podemos mencionar: la destilación, ósmosis inversa y otros métodos físicos y químicos.

La reaparición de enfermedades gastrointestinales genera gran interés en el consumo de agua envasadas, como lo es el agua purificada obtenida generalmente por ósmosis inversa. Sin embargo, ésta alternativa requiere de una cantidad considerable de energía para su obtención, envasado y transporte, además del impacto provocado al ambiente a largo plazo a causa de millones de envases plásticos empleados, desechables y retornables.

En lugares donde escasea el suministro de agua potable como es el caso del estado de Quintana Roo, que cuenta con extensas zonas costeras, islas, poblados remotos, comunidades dispersa ó apartadas de centros urbanos e incluso en las zonas urbanas (considerando una comparación económica por el consumo frecuente de aguas envasadas), es aplicable un método que garantice la obtención de agua potable, y sin lugar a dudas la destilación, utilizando como fuente de energía la radiada por el sol, es decir, la destilación solar, nos resuelve el problema.

La utilización de la energía solar para la destilación de agua (sobre todo agua marina) tiene la ventaja de que es una tecnología limpia y simple porque el usuario puede fácilmente

operar un equipo de destilación solar, en comparación con las plantas desaladoras convencionales donde su operación y mantenimiento resultan complejos, además de sus altísimos costos [8]. Por otro lado, la destilación utiliza una fuente alternativa que resulta ecológica, y que contribuye con la política de desarrollo sustentable y con la de ahorro de energía que actualmente están en boga. Ver figura 3.



Figura 3- La energía proveniente del sol es limpia y sin costo alguno

El dispositivo más sencillo para llevar a cabo la destilación solar es el destilador solar tipo caseta [7] como se aprecia en la figura 4. Los principales trabajos de investigación sobre destiladores solares tipo caseta, se han enfocado especialmente a mejorar su eficiencia empleando materiales accesibles y de bajo costo. Para ello se han hecho estudios sobre el doble ó múltiple efecto en estos destiladores (Barrera et al. 1992; Finck et al. 1994), su funcionamiento o comportamiento (Cota y Cabanillas 1994; Fernández y Chargoy 1992; Ramírez Vargas y Borrego Salazar 1994 y Rodríguez Montes et al. 1994), efecto de la distancia vidrio-agua (Porta et al. 1994), así como el análisis de prototipos de laboratorio (Amauri y Barrera 1994), entre otras investigaciones similares.

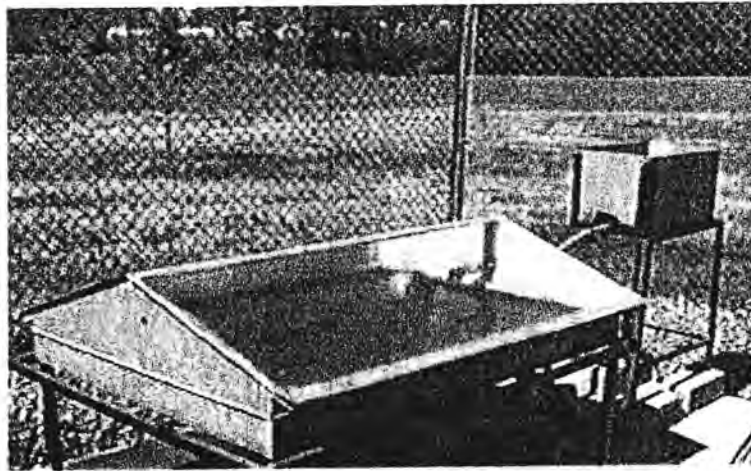


Figura 4- El destilador tipo caseta [13]

Es un hecho que en el comportamiento (eficiencia, productividad, etc.) de un destilador, son determinantes las condiciones ambientales. Por lo tanto, un mismo equipo variará su comportamiento de acuerdo a las condiciones ambientales del lugar donde se opere. Estas circunstancias establecen la necesidad de probar el funcionamiento de un determinado equipo para conocer con certeza su comportamiento real. Por tal motivo, en este trabajo se experimentará con un destilador solar tipo caseta de una pendiente para verificar la relación de producción de agua destilada con respecto a la variación del área de captación solar, Por otra parte, se aborda la investigación sobre la producción de agua destilada con doble efecto en el destilador. Por último se analiza el comportamiento del destilador cuando se le adaptan superficies reflejantes para la concentración de la radiación solar. Por lo tanto, se requiere saber que comportamiento térmico tendrá el destilador solar, experimentando con áreas de captación diferentes, implementando el doble efecto y adaptando superficies reflejantes. Para ello es necesario determinar el comportamiento térmico de un destilador solar tipo caseta de una pendiente, considerando las siguientes variantes:

- a) Operación del equipo con áreas diferentes de captación solar.
- b) Operación del equipo con doble efecto. (Dos superficies de condensación)
- c) Utilizando superficies reflejantes de la radiación solar.

Partiremos asumiendo para cada variante lo siguiente:

- a) La eficiencia del destilador se mantiene aún en diferentes áreas de captación, por lo que la producción de agua destilada aumenta en forma lineal con el área.
- b) La operación del destilador con doble efecto permite obtener una eficiencia mayor que con un sólo efecto.
- c) La producción de agua destilada aumenta al aplicar concentradores de la radiación solar mediante superficies reflejantes.

I.- LA ENERGÍA SOLAR

I.1.- El sol como fuente de energía.

El sol desde la antigüedad ha ejercido una fuerte influencia sobre la humanidad. Considerado como la fuente esencial de la vida, ha sido la gran figura en casi todas las religiones y mitos de la civilización primitiva. Como fuente de energía, el hombre lo ha utilizado tanto de manera directa como indirecta (vientos, caídas de agua, madera, etc.).

Desde el punto de vista energético, el sol es una estrella esférica con un diámetro aproximado de 1.4 millones de Km, cien veces mayor que la Tierra. Situada a una distancia media respecto a la Tierra de 1.5×10^8 Km, su masa es de 2×10^{30} Kg como se aprecia en las figuras I.1 y I.2. Su composición química es semejante al resto del Universo, esto es: Hidrógeno, helio, y pequeñas cantidades de otros elementos entre los que figuran el carbono, nitrógeno y oxígeno [5].



Figura I.1- El sol [15]



Figura I.2- Localización de la Tierra en el Sistema Solar [15]

La fuente de energía proveniente del Sol se divide en tres etapas, la primera inicia en su parte central, donde se llevan a cabo reacciones nucleares, convirtiéndose dos átomos de deuterio (isótopos de hidrógeno) en uno de helio, utilizando como catalizador al carbono. De esas reacciones resulta un exceso de masa que se transforma en energía; el porcentaje de ese exceso es de tan solo 0.007 veces la masa original de la reacción, por lo que se puede decir que la masa del Sol se mantiene casi constante. La fusión de esas partículas atómicas se puede lograr gracias a que existen temperaturas y presiones muy elevadas, liberándose gran cantidad de energía.

En la segunda capa llamada radiactiva, la radiación producida sale en todas direcciones, pero durante el trayecto es dispersada antes de llegar a la superficie del Sol.

En la tercera capa convectiva, la radiación ya no es posible, ya que en esta zona existe una elevada opacidad, entonces el transporte de energía se lleva a cabo a través de la convección mediante el movimiento de materia.

Finalmente tenemos la fotosfera que es una capa muy delgada que se puede observar a simple vista. A partir de ella la radiación puede viajar libremente por el espacio hasta llegar a la Tierra [12].

I.2.- Radiación solar.

La radiación es una propiedad de los cuerpos para emitir energía mediante ondas electromagnéticas en forma de fotones, esto sin la necesidad de un medio material de transporte, es decir, puede propagarse a través del vacío.

Las variedades de forma de energía por radiación se caracterizan por su longitud de onda, como se aprecia en la figura I.3, de tal forma que todas éstas en conjunto constituyen el denominado espectro electromagnético. De la gama de radiaciones electromagnéticas, existe una que es propagada como resultado de una diferencia de temperaturas, denominada radiación térmica.

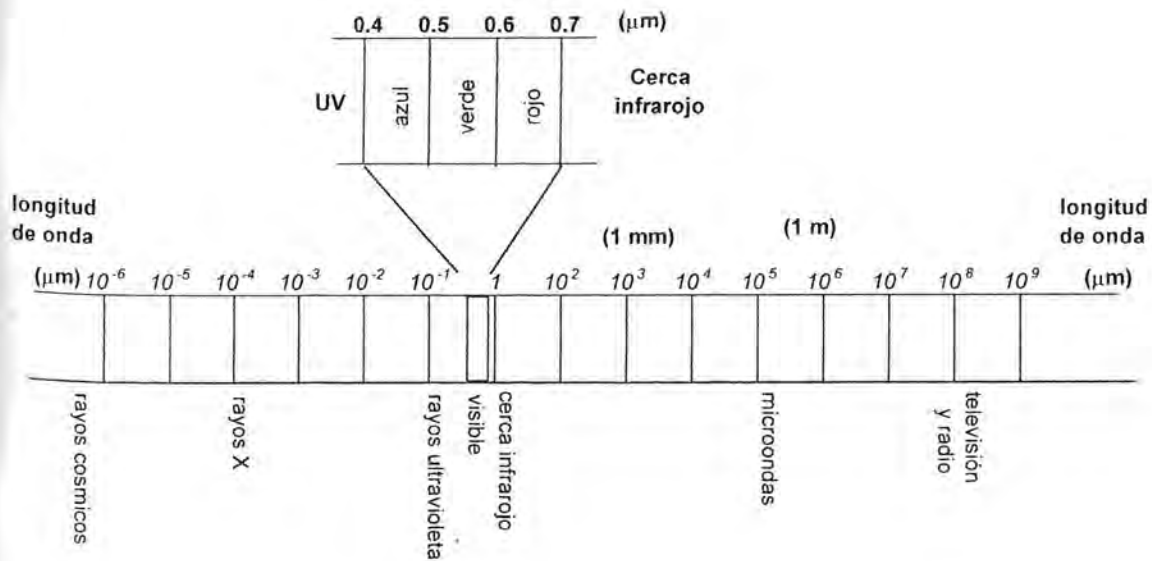


Figura I.3- Espectro Electromagnético.

La radiación solar es una forma de radiación térmica con un rango característico de longitud de onda. La fuente emisora de esta energía es el Sol. Este irradia parte de su masa al espacio en forma de energía electromagnética debido a reacciones de fusión nuclear en su interior [12].

La intensidad de la radiación solar que incide sobre una superficie normal al Sol, ubicada sobre la atmósfera de la Tierra a la distancia promedio Tierra-Sol, es la constante solar y su valor aceptado es $1,353 \text{ W/m}^2$, que es el resultado de diversas mediciones sobre la atmósfera efectuadas por satélite. Este valor puede ser calculado mediante parámetros tales como el diámetro del Sol, distancia media tierra-sol, y temperatura en la fotosfera del mismo, utilizando las siguientes ecuaciones [2]:

La ecuación de Stefan-Boltzman

$$E = \sigma T^4 \quad (1)$$

Flujo de energía

$$q_s = (\omega/\pi)E ; \omega/\pi = (d_s/2l_s)^2 \quad (2)$$

Sustituyendo (1) en (2):

$$q_s = (d_s/2l_s)^2 \sigma T^4$$

$$q_s = ((1.39 \times 10^9 \text{ m}) / (2 \times 1.5 \times 10^{11} \text{ m}))^2 5.6697 \times 10^{-8} \times (\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}) (5762^\circ\text{K})^4 = 1341.64 \text{ W/m}^2$$

Donde:

σ : Cte. de Stefan Boltzman ($5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4$)

T : Temperatura en la fotosfera del sol (5762°K)

E : Energía radiada por unidad de tiempo y área por un radiador ideal (cuerpo negro)

d_s : diámetro del sol (1.39×10^9 m)

l_s : distancia media tierra-sol (1.5×10^{11} m)

ω : ángulo sólido

La intensidad de la radiación solar varía de acuerdo a la posición de la tierra en la eclíptica. En el Perihelio (3 de Enero) la energía en una superficie perpendicular a los rayos del sol es 7% mayor que la recibida en el Afelio (4 de Julio) [3].

La altura angular del sol (ángulo entre los rayos del sol y la tangente de la tierra en el punto de observación) tiene influencia directa sobre la energía que llega a la tierra. Los factores que determinan la altura angular son la latitud del lugar, la hora del día y la estación del año. La mayor cantidad de energía se obtiene cuando el sol está en el cenit.

Adicionalmente, la atmósfera de la tierra no permite que esta radiación llegue totalmente a su superficie. Esto se debe a que en dicha atmósfera están presentes el ozono, vapor de agua, bióxido de carbono, nubosidad, polvo y demás contaminantes, agravándose el caso según el lugar geográfico.

Alrededor del 31% de la radiación solar que llega a la tierra es reflejada hacia el espacio por la atmósfera y las nubes. Un 18% es absorbida por la misma atmósfera, el ozono absorbe toda la radiación ultravioleta con longitud de onda menor a $0.29 \mu\text{m}$, el vapor de agua absorbe parte de la radiación entre $0.9 \mu\text{m}$ y $2.1 \mu\text{m}$. La radiación global que llega a la superficie terrestre es solo 51%, incluida la reflejada y refractada por las nubes y gases de la atmósfera. Se estima que solo un 26% de la radiación llega en forma directa, variando con las condiciones

atmosféricas del lugar. La influencia de la nubosidad depende de su cantidad y espesor.

La radiación solar que llega a la atmósfera terrestre del 51% mencionado anteriormente se divide de manera general en radiación directa y difusa. La primera es el flujo de radiación solar que se recibe directamente del sol (26 %), sin haber sufrido una dispersión al atravesar la atmósfera. La segunda, la radiación que es desviada por dispersión atmosférica debido al polvo, aerosoles y nubes contenidos en la atmósfera (25%) [3].

La radiación solar que llega a la atmósfera se aprecia en la figura I.4.

La elevación y la topografía de un lugar específico repercute en la cantidad de radiación solar que incide en su superficie, a grandes elevaciones menor capa de atmósfera existe sobre ella. A esto se debe la diferencia entre lugares situados a nivel del mar y los que se encuentran a miles de metros sobre dicho nivel. La topografía afecta por la barrera que puede formar a través de cadenas montañosas que reducen el tiempo de exposición de valles y laderas a los rayos del sol.

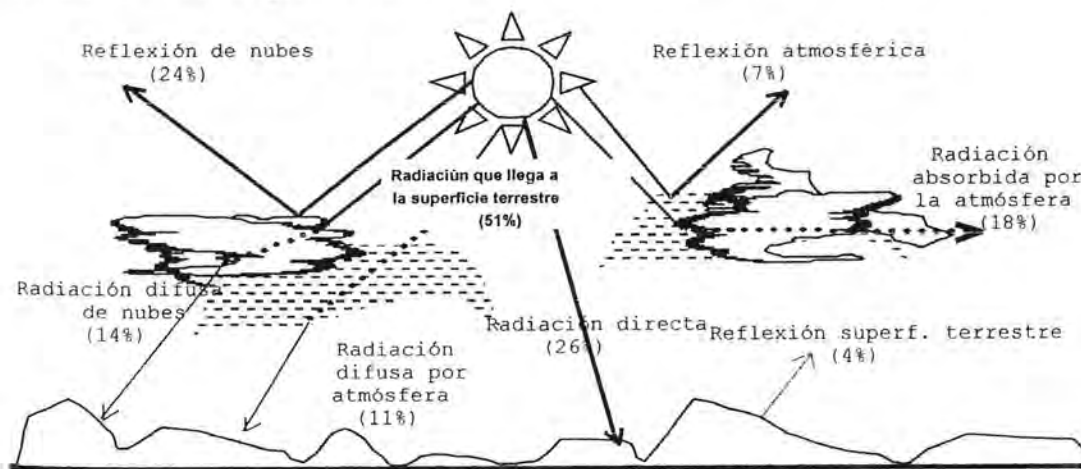


Figura I.4- Radiación solar

Para medir el flujo de energía solar en la superficie de la tierra se emplean diversos instrumentos como son el piranómetro y el pirheliómetro; la diferencia básica entre los dos es que el primero mide el flujo solar global sin seguir al sol y el segundo mide el flujo solar directo siguiendo el movimiento aparente diario y estacional del sol.

Aunque existen varios instrumentos para medir la radiación solar, entre otros el fotorresistor, la celda solar, los fotodiodos, termopilas, pirheliómetro, etc., el piranómetro y piranógrafo (figura I.5 y I.6) son los más utilizados por su gran precisión basando su funcionamiento en la diferencia de temperaturas entre dos superficies, una negra y la otra blanca; mediante un termopar se toma la lectura en milivolts. [9].

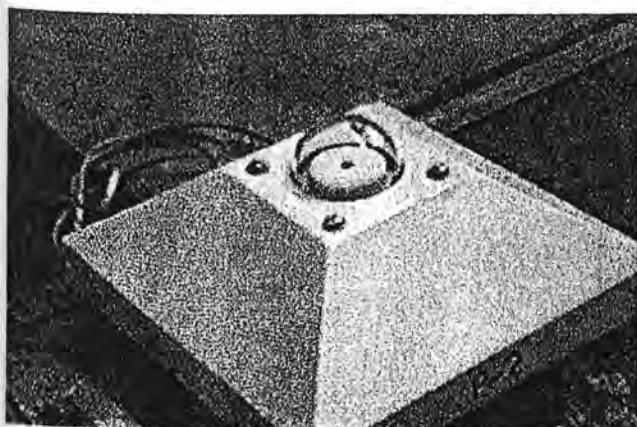


Figura I.5- Piranómetro [13].

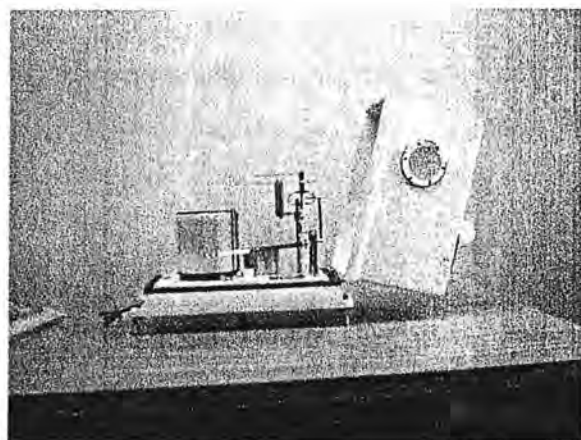


Figura I.6- Piranógrafo

La ventaja de obtener valores de radiación solar mediante estos instrumentos radica en que son reales y más precisos que los obtenidos a través de modelos empíricos. En estos últimos se tienen que considerar factores geográficos y meteorológicos que

pueden variar en forma apreciable en cualquier intervalo de tiempo.

Al tener valores experimentales reales de radiación solar, es correctamente cuantificable dicho recurso y permite presentar estudios de comportamiento de diversos sistemas solares en forma más óptima y con menor incertidumbre.

I.3.- Estimación de la radiación solar a partir de modelos empíricos.

Cuando no se dispone de datos de insolación en una localidad o región y/o no se cuenta con los instrumentos para medirlos, se hace necesario el uso de modelos empíricos para el cálculo de la radiación solar.

Uno de estos modelos es el deducido por Jeevananda, el cual estima la radiación total promedio mensual e implica el uso de parámetros como son: latitud, número de días lluviosos, humedad relativa promedio al día, entre otros [10].

$$H = [K(1 + 0.8p)(1 - 0.2t)] / (\Phi)^{1/2}$$

Donde:

H: Radiación global total (ly/día)

K: $(\lambda N + \psi_{ij} \cos \phi) 10^2$ (ly/día)

ϕ : Latitud del lugar, en grados.

λ : Factor de latitud $0.2 / (1 + 0.1\phi)$

Φ : Humedad relativa media por día en el mes.

Ψ : Factor de estación dependiente del mes y localidad; $j=1$ para tierra adentro y $j=2$ para costa; $I=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12$ correspondiente a los meses de enero a diciembre con los siguientes valores:

I =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ψ_{i1}	1.28	1.38	1.54	1.77	2.05	2.30	2.48	2.41	2.36	1.73	1.38	1.17
ψ_{i2}	1.46	1.77	2.05	2.15	2.05	2.05	2.10	2.17	2.14	1.96	1.60	1.43

I: Número de meses.

p: n/N ; relación de insolación en el mes.

n: Horas promedio de insolación por día durante el mes.

N: longitud promedio del día durante el mes;

N: $(2/15) \cos^{-1} (-\tan\phi \tan\delta)$

δ : declinación solar (posición angular del sol con respecto al ecuador)

δ : $23.45 \sin[360(284+n_a/365)]$

n_a : Número de día del año.

t: r/M ; relación de no insolación en el mes.

r: Número de días lluviosos en el mes.

M: Número de días en el mes.

Otro modelo, que calcula la radiación global diaria promedio horizontal, fue desarrollado por J. K Page y tiene el siguiente procedimiento:

$$H = H_0 [a + b(s/t_s)]$$

Siendo:

$$H_0 = I_{sc} \{ [1 + 0.034 \cos(360n/365)] [0.9972 \cos\phi \cos\delta \cosh s + \sin\phi \sin\delta] \}$$

$$a = -0.14 + 1.2(s/z) - 0.82(s/z)^2$$

$$b = 1.32 - 2.89(s/z) + 2.24(s/z)^2$$

$$z = (2/15) \cos^{-1} (-\tan\phi \tan\delta)$$

Donde:

Ho: Radiación solar extraterrestre. [W/m²]

n=s: Horas de brillo de sol promedio al día.

z: Longitud del día promedio en el mes.

ts: Tiempo transcurrido entre el orto y ocaso del sol.

φ: Latitud del lugar.

na: Número de día en el año.

hs: Angulo horario.

δ: Declinación solar.

Isc: constante solar. 1353 [W/m²]

I.4.- Aprovechamiento de la energía solar.

Las aplicaciones de la energía solar se tornan presentes desde tiempos inmemoriales, quizás cuando las sacerdotisas en los tiempos de Mesopotamia la empleaban para prender el fuego de los altares, mediante vasijas de oro pulidas. Arquímedes (287-212 a. C.) el principal científico de la ciudad-estado de Siracusa, quemó la flota invasora de Marcelo mediante espejos concentradores de los rayos solares en (Meinel y Meinel, 1982).

El ser humano, al darse cuenta de la gran cantidad de energía térmica que recibe la tierra del sol, ha encausado diversas investigaciones y múltiples ensayos con el objeto de aprovecharla, para resolver una serie de necesidades que

impulsan la productividad y elevan la calidad y el nivel de vida de millones de personas.

La energía solar puede aprovecharse de manera natural y tecnológica, por lo que de acuerdo a su utilización se pueden clasificar en los siguientes sistemas.

(a) Sistemas pasivos.

El confort del hábitat mediante la energía solar, por medio de sistemas pasivos, implica una armonía con la naturaleza y la estética del diseño arquitectónico, logrando un ahorro económico y una disminución considerable en el uso de combustibles fósiles, ya sea de manera directa o indirecta como se aprecia en la Figura I.7 [3].



Fig. I.7- Sistema pasivo

(b) Sistemas fotovoltaicos.

El sistema fotovoltaico es un generador de electricidad por medio de celdas solares que aprovecha en forma directa la

energía proveniente del sol y la convierte en corriente continua, tanto para uso habitacional como para uso en alumbrado exterior. Tal como se percibe en las Figura I.8a y b [9].

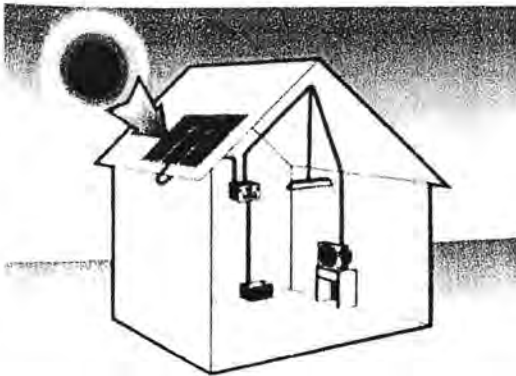


Figura I.8a- Sistema fotovoltaico en una casa habitación



Figura I.8b-Sistema fotovoltaico en alumbrado exterior.

(c) Sistemas fototérmicos.

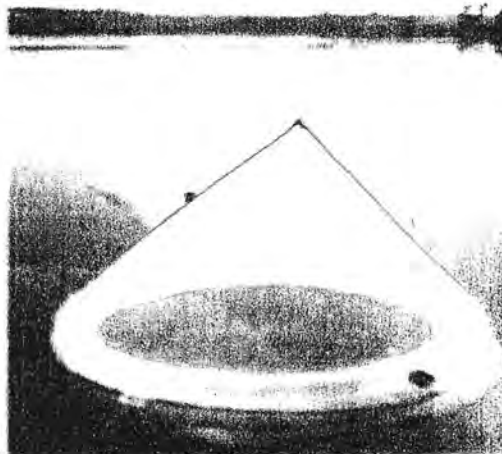
Son sistemas que aprovechan la energía calorífica de los rayos solares para transmitirlo a un fluido ya sea para producir un trabajo o cualquier otra forma de energía útil. Entre otras aplicaciones de este tipo destacan [9]:

- Generación de vapor (concentradores).
- Calentamiento de agua para uso comercial y doméstico (calentadores solares).
- Secado de granos o productos agrícolas (secadores).
- Refrigeración solar.
- Destilación solar.

En las figuras I.9a y b puede verse algunas aplicaciones.



*Fig. I.9a- Sistema Térmico en
Calentamiento de agua para
uso habitacional*



*Fig. I.9b- Sistema Térmico en
Destilación solar*

II.- METODOS DE PURIFICACION DE AGUA

II.1.- Métodos de purificación de agua.

La escasez de agua potable en algunas regiones del mundo, ha originado la búsqueda y el desarrollo en la investigación tecnológica para su obtención. Generalmente, en dichas regiones se cuenta con una fuente de agua no potable: en una gran mayoría de agua salada o salobre y/o con sustancias no deseables.

En este contexto, la destilación juega un papel preponderante como un método usado para separar los componentes de una solución líquida. Existen sin embargo, otros métodos (que se describen más adelante) para purificar o tratar el agua para su posterior consumo[7].

II.1.1.- Destilación.

La Destilación es una operación mediante la cual se separan uno o varios de los componentes de una solución líquida, aprovechando las diferencias de los puntos de ebullición de cada componente. La destilación como proceso tiene diversas aplicaciones en la industria. Esta operación se puede clasificar en cuatro tipos:

1.- Destilación simple.

Generalmente la mezcla o solución se calienta en un evaporador, a los vapores se les hace pasar por un

refrigerante para condensarlos y el líquido se recolecta posteriormente. Ésta se subdivide a su vez en tres:

- a) Cerrada o integral.- Es cuando en la separación y condensación del vapor, existe un equilibrio entre el líquido y el vapor.
- b) Diferencial o abierta.- En este caso los vapores son extraídos y condensados con la misma rapidez con que se van formando.
- c) Destilación con arrastre de vapor.- Utilizada para sustancias con alto punto de ebullición, ya que si éstas se destilan a presión normal, las altas temperaturas las descompondrían. Aprovechando además, que, generalmente, estas sustancias son insolubles o inmiscibles al agua. Dichas sustancias se vaporizarán a una temperatura inferior a su punto de ebullición, debido a que la suma de las presiones parciales de vapor del componente y del agua se iguala a la presión total, a temperaturas más bajas.

2.- Condensación parcial (Deflegmación)

La mezcla se evapora totalmente y el vapor se condensa parcialmente, para obtener un condensado más rico en el componente menos volátil. Si el vapor residual y el condensado se encuentran en equilibrio o no en el momento de su separación, la condensación parcial se puede dividir en integral y diferencial respectivamente.

3.- Rectificación o destilación por etapas con reflujo.

Consiste en repetir en forma múltiple la destilación para obtener un vapor más rico en el componente más volátil. Esto se realiza en unidades llamadas torres de fraccionamiento o

de destilación, en donde el líquido condensado de una etapa anterior se pone en contraflujo con el vapor de la etapa siguiente, dando lugar a sucesivas vaporizaciones y condensaciones debido al intercambio de calor y masa.

4.- Destilación molecular.

Es la separación de un componente a través de la evaporación en alto vacío, en donde el recorrido libre medio de las moléculas del gas (vapor) debe ser mayor a la distancia evaporador-condensador. En este caso el gradiente térmico existente entre ambos no es muy elevado, la distancia es de sólo algunos centímetros y la presión es del orden de 10^{-4} mm de Hg. la presión de vapor de la sustancia a destilar es menor que la existente en el aparato.

II.1.2.- Ósmosis inversa.

La ósmosis inversa es un proceso empleado generalmente para desalinizar el agua de mar, parte del equipo puede ser observado en la figura II.1.

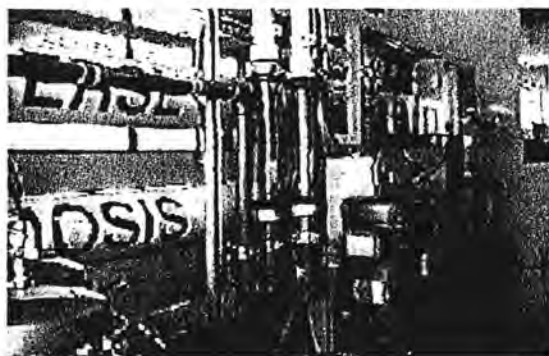


Figura II.1- Osmosis inversa.

Consideremos dos cámaras separadas por una membrana semipermeable, rígida y diatérmica; en una cámara se tiene agua pura y en la otra una disolución de agua y un soluto x . Este último hace que el potencial químico de la disolución

sea menor que en el agua pura, lo que propicia un flujo de agua hacia la disolución hasta que exista un equilibrio en ambos lados. Como resultado, la presión en el lado de la disolución es mayor que en la cámara de agua pura; la diferencia entre esas presiones se denomina presión osmótica. El proceso de flujo de esa agua pura hacia la otra cámara a través de la membrana se llama ósmosis.

La ósmosis inversa es el flujo inverso, es decir el paso de agua de la disolución a través de la membrana hacia el agua pura, debido a la aplicación de una presión externa sobre la disolución de tal manera que el potencial químico en dicha disolución sea mayor que en la cámara de agua pura.

Para el proceso de desalinización del agua de mar, entre las características necesarias de la membrana están:

- Que sea impermeable a los iones salinos.
- Resistencia suficiente para soportar la diferencia de presión.
- Permeable al agua para un flujo rápido.

Actualmente el desarrollo tecnológico de membranas vislumbra un futuro prometedor de este proceso para la desalación de agua.

II.1.3.- Congelación.

Este método consiste en convertir el agua líquida de la solución salina en estado sólido (hielo), para separarlo de la salmuera. A primera instancia parece necesitarse una menor cantidad de energía para este proceso, si se compara el calor latente de fusión y el calor latente de vaporización del

agua. Sin embargo debe observarse que una parte del agua pura obtenida se utiliza para enjuagar el hielo de la salmuera y además se necesita otra cantidad de energía para fundir el hielo.

II.2.- Destilación solar de agua.

De los métodos de purificación de agua mencionados, el más utilizado en el mundo es la destilación. Principalmente, son plantas desaladoras que utilizan técnicas de evaporación en varias etapas o de compresión de vapor, todos accionados por combustibles fósiles; el obstáculo de estas plantas son sus altos costos (en cuanto a la planta en sí y los combustibles).

En México se cuenta con docenas de plantas desaladoras en zonas costeras y la limitante además de la económica es el dominio y la asimilación de la tecnología adecuada. (Fernández J.L. y Chargoy N. 1989).

Por otro lado, a través de plantas pilotos de destiladores solares se ha visto que esta técnica utilizando energía solar es en el proceso de purificación de agua, una opción tecnológica y económicamente viable.

En México, el uso de la energía del sol para la obtención de agua potable data de 1964. Año en que se construyeron en Baja California, dos sistemas con 28,400 m³ de producción al día. Este sistema se consideró el más grande en el mundo hasta la fecha de su construcción.

Tiempo después se han seguido haciendo investigaciones y desarrollando tecnología a través de diversas instituciones

como la UNAM, la UAM, el Centro de Investigaciones Biológicas de La Paz, etc., planteando y resolviendo la cuestión de la producción económica y en serie de los destiladores solares. Mediante los resultados obtenidos cada vez se van mejorando los diseños los cuales son más eficientes. Por lo tanto es necesario darle más divulgación y aplicación para que cada vez más gente tenga conocimiento de los grandes beneficios que podemos obtener haciendo uso de la energía solar, en este caso, para obtener lo más preciado, el agua potable.

Se denomina destilación solar de agua a la transferencia de agua desde una capa de la misma a mayor temperatura en una placa absorbidora hasta una cubierta de menor temperatura, mediante los fenómenos de evaporación, difusión, convección y condensación del agua, permitiendo separar impurezas que contenga el agua inicialmente.

La destilación solar de agua es un proceso que se asemeja al ciclo hidrológico como se aprecia en las figuras II.2 y II.3, en el cual intervienen la evaporación, condensación y recolección. Es un proceso mediante el cual se obtiene agua pura a partir de salmueras o aguas salobres y otras aguas no potables al someterlas a la evaporación utilizando como fuente de energía a la radiada por el sol. Este proceso se lleva a cabo empleando un aparato denominado destilador solar. Un destilador solar es un dispositivo conformado por tres zonas importantes: la zona de captación de radiación solar (colector solar), la zona de calentamiento y evaporación del agua impura (evaporador), y la zona de condensación de vapor (condensador) y recolección del destilado (agua pura).

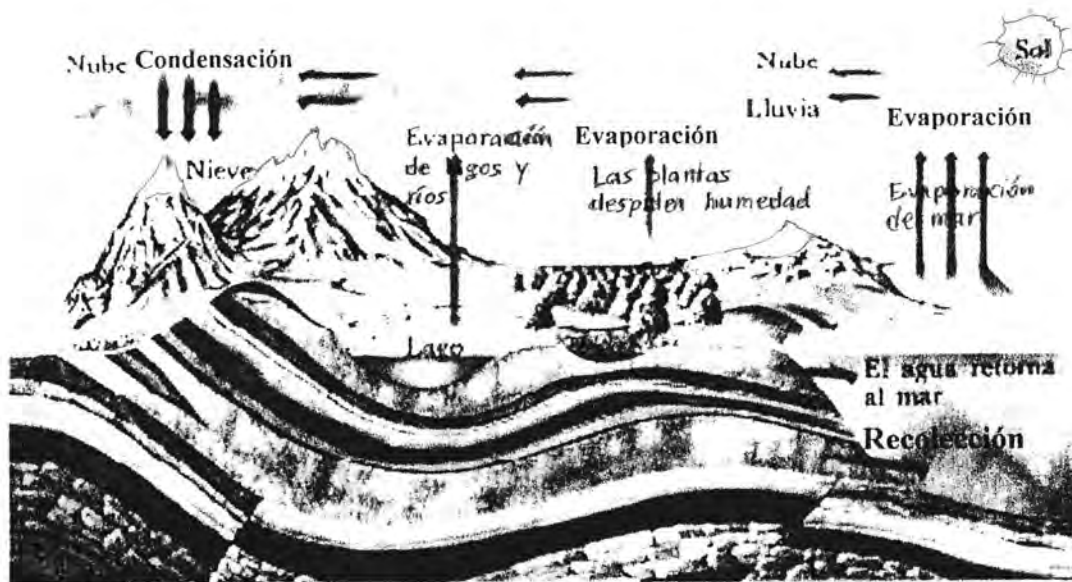


Figura II.2- Ciclo hidrológico

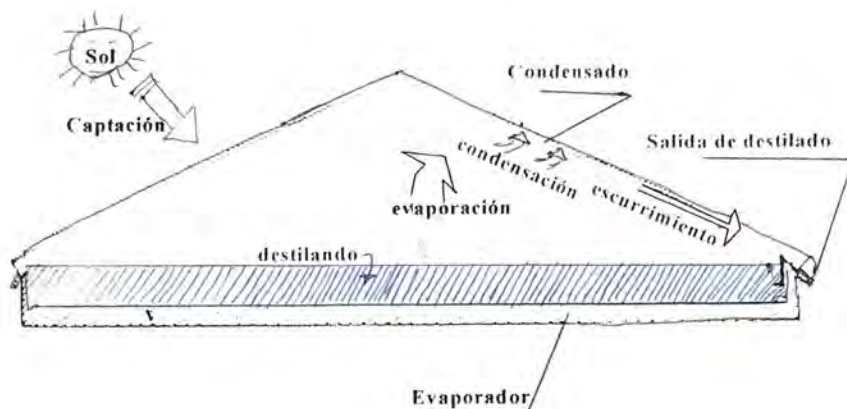


Figura II.3- Destilador solar

Los destiladores solares operan aprovechando el efecto de invernadero. Se caracterizan por tener una cubierta transparente (plástico o vidrio) expuesta a la radiación solar, un gabinete (cuerpo del destilador que soporta la cubierta y mantiene aislado su interior de las condiciones del ambiente) y una superficie absorbidora de la radiación

ubicada en el fondo (charola) generalmente pintado de negro mate, esto, para absorber la mayor energía.

En la operación de un destilador solar, una parte de la radiación solar que llega a la cubierta inclinada, se refleja hacia el cielo, otra parte es absorbida por el material de la cubierta y la parte restante se transmite hacia el interior del dispositivo. Esta porción de energía llega a la superficie externa del agua a destilar, donde parte se refleja hacia las diferentes secciones del interior del aparato, parte es absorbida por el agua impura provocando su calentamiento (incremento de temperatura) y parte se transmite hacia el fondo donde se encuentra la superficie absorbidora (charola), la cual va incrementado su temperatura al grado que le cede su energía al agua para provocar su evaporación. Las paredes así como el fondo sobre todo, se mantienen aislados del ambiente para evitar pérdidas. El vapor producido en la charola asciende hasta llegar a la parte inferior de la cubierta, donde cede la energía ganada en la vaporización, esto debido a que la cubierta se encuentra con una menor temperatura ya que se encuentra expuesta al viento. El vapor al ceder su energía se condensa (se convierte en líquido) en forma de gotas que debido a su peso se precipitan hasta llegar a unas canaletas que recolectan el destilado (agua pura) para dirigirlo hacia un dispositivo almacenador.[4]

II.2.1.- Consumo de agua destilada.

Muchas veces, parte de la necesidad de agua potable ha sido satisfecha con el empleo del agua recolectada de las

lluvias, sin embargo, existen lugares no tan privilegiados que cuentan con apenas 29 mm de precipitación pluvial al año, además de no contar con suministro de agua potable, lo que hace necesario buscar otras fuentes de suministro y que muchas veces suelen ser aguas salobres, de pozos o superficiales, que de una u otra manera no son viables de consumir; las aguas salobres por el exceso de sales, las de los pozos y superficiales ya contaminadas por desechos industriales o por microorganismos patógenos. Por lo tanto, es indispensable contar con un mecanismo capaz de transformar estas aguas para hacerlas potables. Una alternativa convincente sin duda lo es la destilación solar [4].

Otro importante ejemplo del uso de agua destilada por energía solar para consumo humano, es la planta de destiladores solares de Puerto Lobos, Sonora, que cuenta con 20 (veinte) destiladores de diseño y construcción de Horace Mc. Craken, con un área neta de destilación de 480 m² y producciones que van desde los 1,000 lts/día a 2,200 lts/día, dependiendo de las condiciones climáticas. A pesar de los problemas de mantenimiento y operación, esta planta satisface los requerimientos de agua de la población.

Se dice que el agua destilada no debe tomarse por que se arriesga la salud del hombre, al no contener los minerales necesarios, sin embargo, una familia de Guadalajara ha manifestado que ha tomado agua destilada (con energía solar) durante más de cuatro años y no ha tenido problemas de salud; esto es comprensible por la sencilla razón que los minerales son adquiridos por el organismo, mediante el consumo de alimentos. No obstante, para los escépticos, remineralizar el agua destilada es muy sencillo y barato.

II.3.- Clasificación de los destiladores solares.

El destilador solar aprovecha el efecto invernadero para producir agua pura que puede ser utilizada en diversas aplicaciones como lo son principalmente en baterías, laboratorios, industrias, termoeléctricas y consumo humano.

La destilación se lleva a cabo, como se mencionó anteriormente, en tres zonas de importancia: la zona de captación de radiación solar y su conversión en calor; la zona de calentamiento y evaporación, y la zona de condensación de vapor y recolección del destilado. Estas zonas son esenciales en cualquier clasificación, diseño y tipo de destilador.[7]

La base de diseño de los destiladores solares ha sido a partir de un modelo sencillo denominado destilador tipo caseta (convencional) a partir del cual se han desarrollado diversidad de diseños.

Existen dos maneras de clasificar a los destiladores solares:

- 1) Destilador solar con calentamiento directo.
- 2) Destilador solar con calentamiento indirecto.

1) Destilador solar con calentamiento directo.

Cuando en un aparato la energía solar cruza la cubierta y es aprovechada en forma directa en la zona de calentamiento y evaporación, se dice que es un destilador solar con

calentamiento directo. Existen diferentes diseños para esta clasificación entre los cuales destacan:

- a) Los destiladores estáticos o de agua estancada.
- b) Los destiladores de agua corriente.
- c) Los destiladores por convección natural.

a) Los destiladores de agua estancada llamados también "convencionales", se caracterizan por su inercia térmica. Es decir, permiten la acumulación de calor en su interior durante el periodo de insolación, aprovechándolo en el periodo nocturno para continuar con el destilado, debido a que la cubierta y paredes bajan su temperatura, pero el líquido en la charola conserva el calor almacenado en el transcurso del día.

Dentro de los destiladores solares estáticos sobresalen: los de tipo caseta o clásicos, largos, esféricos y de efecto múltiple.

-El diseño de caseta o clásico como el de la figura II.4, se caracteriza por tener una cubierta transparente generalmente de vidrio o plástico; un recipiente (charola) casi siempre de forma cuadrada o rectangular y el fondo de la charola con un recubrimiento absorbente de color negro mate. [4].

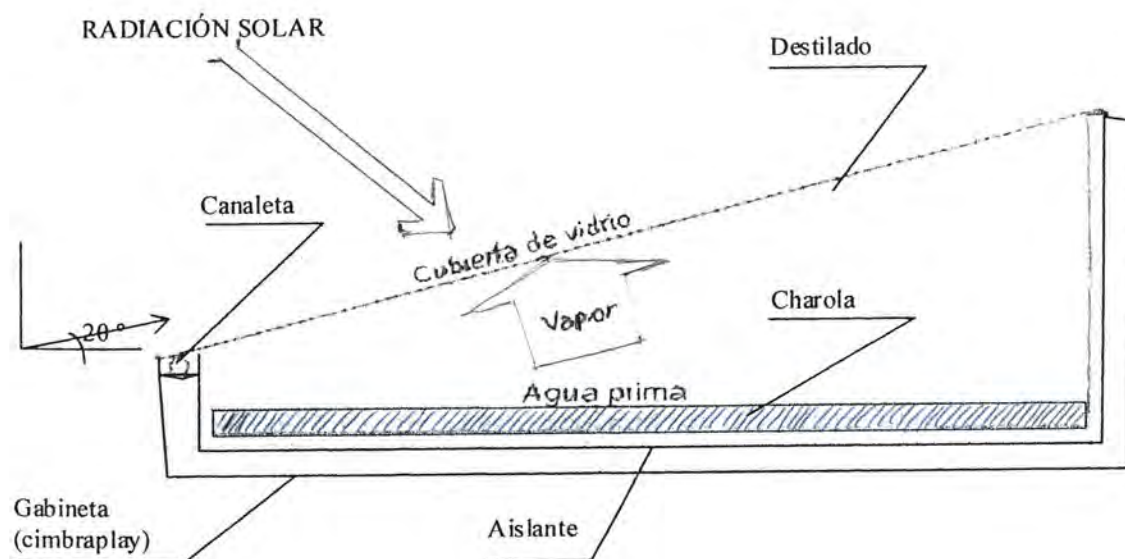
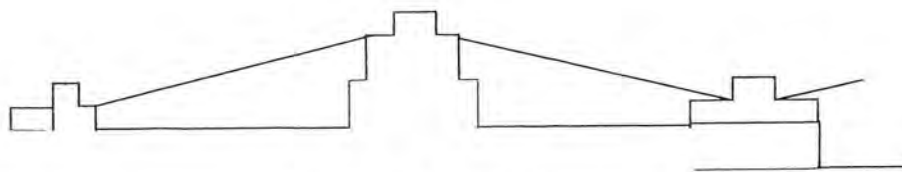
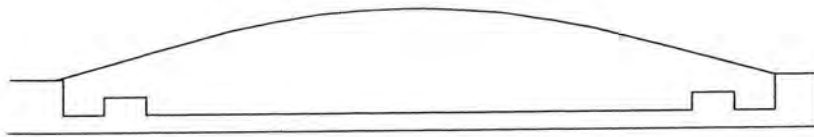


Figura II.4- Destilador tipo caseta

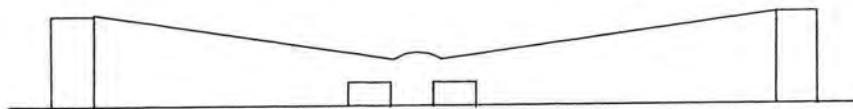
Existen variantes de este diseño que difieren básicamente en su estructura y materiales de construcción. Entre los diseños más experimentados están: Batelle-Lof, cubierta de plástico, cubierta en "V" invertida, cubierta de vidrio inclinada, Australiano (ESIRO), Grecia (Delyanis), Delyanis modificado, una pendiente y doble pendiente. Estos diseños se pueden ver en la figura II.5. [7]



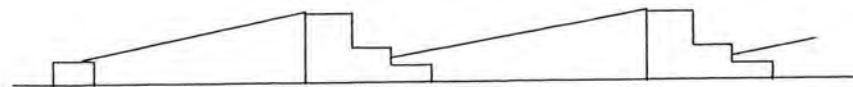
a) Diseño de Batelle-Lof



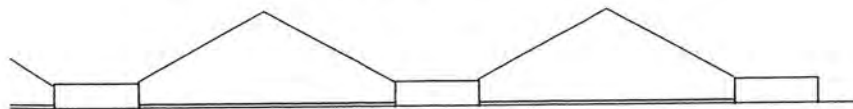
b) Diseño con cubierta curva de plástico



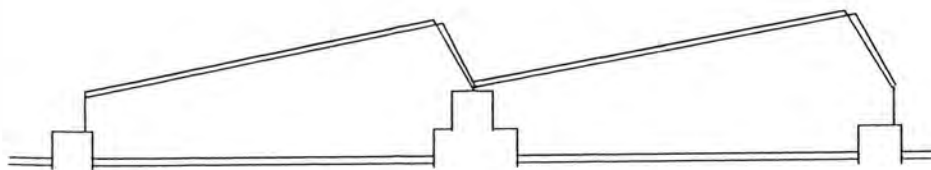
c) Diseño de curva en "V"



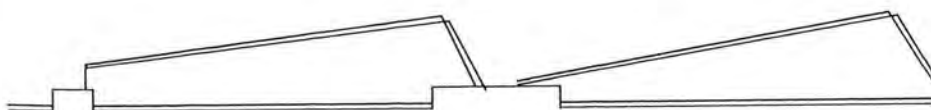
d) Diseño de cubierta de vidrio de baja inclinación



e) Diseño Australiano



f) Diseño de Grecia (Delyanis)



g) Diseño de Delyanis modificado

Figura II.5 Diseños de destiladores solares

-Los destiladores solares largos a diferencia de los de tipo caseta, tienen expuesta la zona de condensación, eliminando las pérdidas por los extremos. Estos destiladores en operación se pueden observar en la figura II.6.[4]

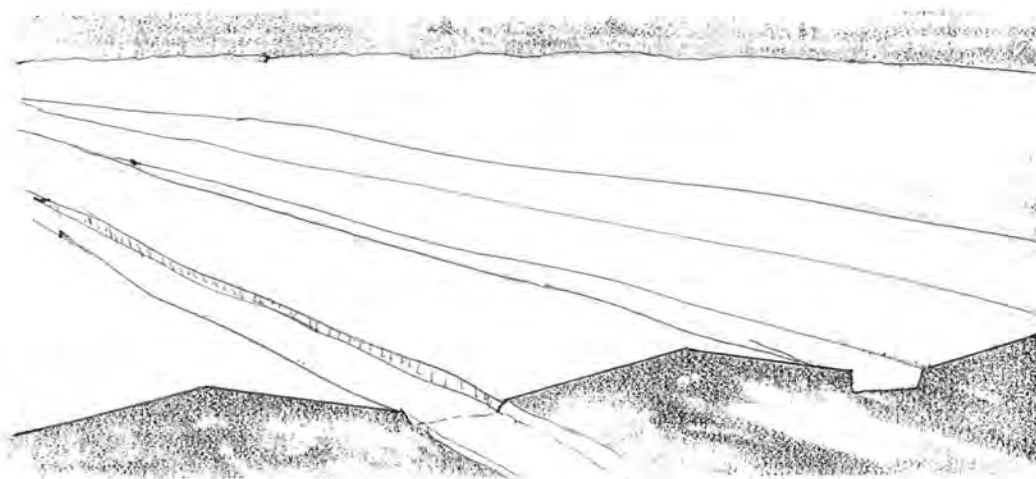


Figura II.6- Destiladores solares largos

-Los destiladores solares esféricos, por lo general emplean como cubierta una semiesfera de acrílico, tienen un funcionamiento similar al destilador tipo caseta, con la variante de tener adaptado, en la parte interna, un limpiador giratorio, logrando con ello recolectar el condensado y disminuir en lo posible el efecto reflectivo de las pequeñas gotas en la cubierta. Además de poseer una charola circular y evitar producir sombras en la misma este destilador se presenta en la figura II.7.[4]

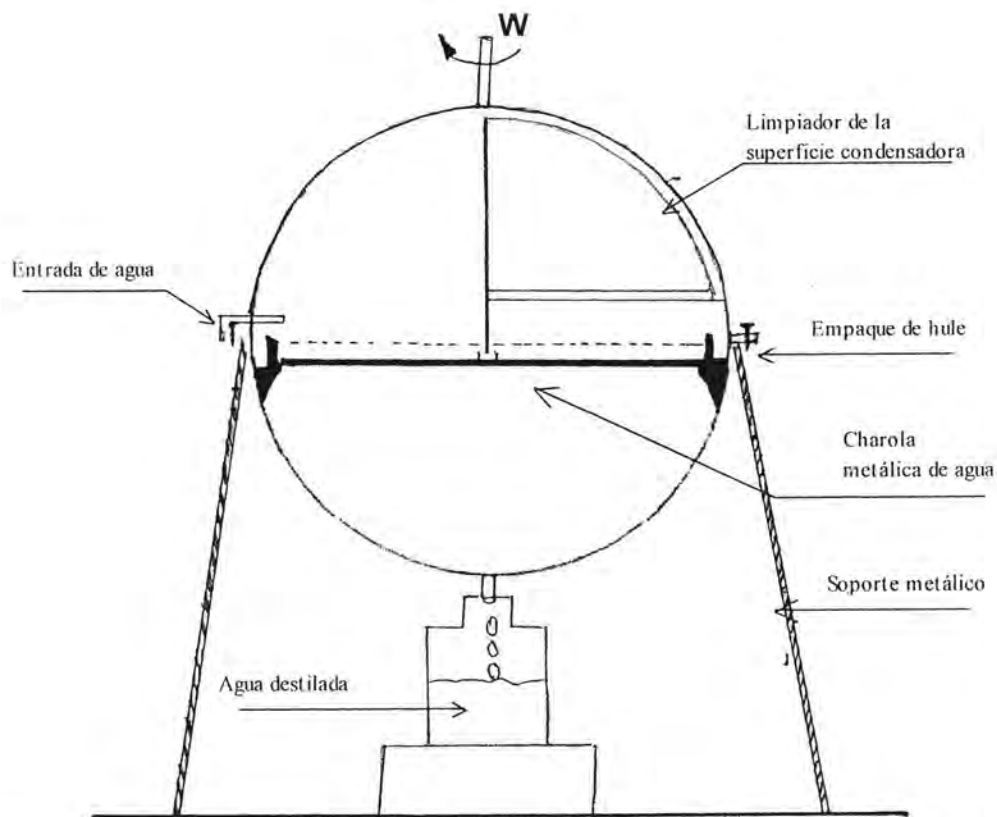


Figura. II.7-Destilador Esférico

-Destiladores solares de efecto múltiple: en este diseño se aprovecha el calor latente de condensación liberado por el vapor de agua que proviene de un primer sistema conocido como zona de condensación, para el calentamiento y evaporación de un segundo sistema y éste a su vez transmitirlo al siguiente sistema inmediato superior, y así sucesivamente. Esta forma de aprovechar el calor latente de condensación de un primer efecto se observa en la figura II.8. [7]

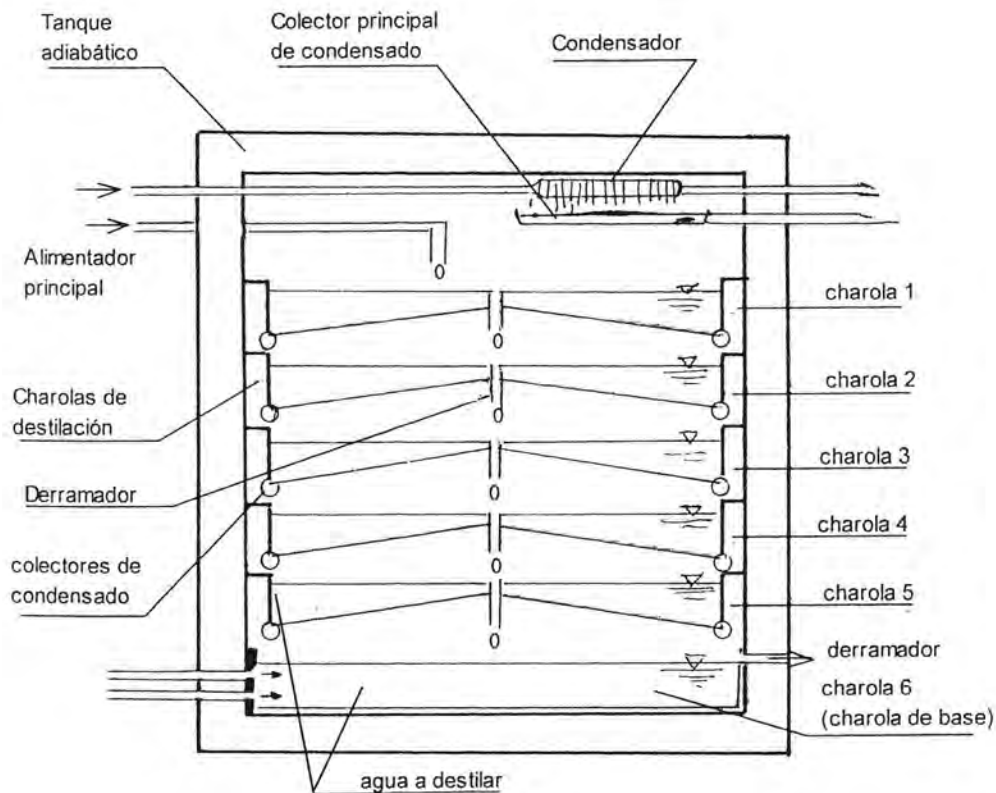


Figura II.8- Destilador múltiple efecto

b) Destiladores de agua corriente: en estos tipos de destiladores se procura tener pequeños tirantes de agua en la zona de evaporación, con un gasto del doble de la productividad esperada. El pequeño espesor del líquido tiende a alcanzar altas temperaturas rápidamente mientras se presente la insolación, pero de igual manera tiende a bajar rápidamente la temperatura cuando no hay insolación. Estos dispositivos por lo general se apoyan de equipos auxiliares para lograr un gasto constante. [4]

El destilador representativo es el de tipo escalera, que circula el agua en sus charolas paralelas para procurar evitar el acumulamiento de sarro y aumentar su productividad.

c) Destiladores de convección natural

El diseño de estos destiladores solares procura favorecer el proceso de transferencia de masa desde la superficie de evaporación hasta la superficie condensadora. Comúnmente en los destiladores tipo caseta, el mecanismo más importante de transferencia de masa es la difusión, mientras la convección tiene muy poca participación. El objetivo de los destiladores solares de convección natural es crear las condiciones para que el mecanismo de transferencia convectiva de masa tenga mayor desarrollo y por ende aumente la productividad.

Los destiladores de este tipo más importantes, son:

- Destilador convectivo de escalera:

Consiste en una serie de charolas paralelas largas, a diferentes niveles, dando forma a una escalera como se observa en la figura II.9. El diseño favorece el proceso de convección natural, donde el aire húmedo que recibe la radiación solar sube a través del espacio charola-condensador y después baja por el ducto posterior (existente debajo del aislante de las charolas) mientras disminuye su temperatura y humedad. [4]

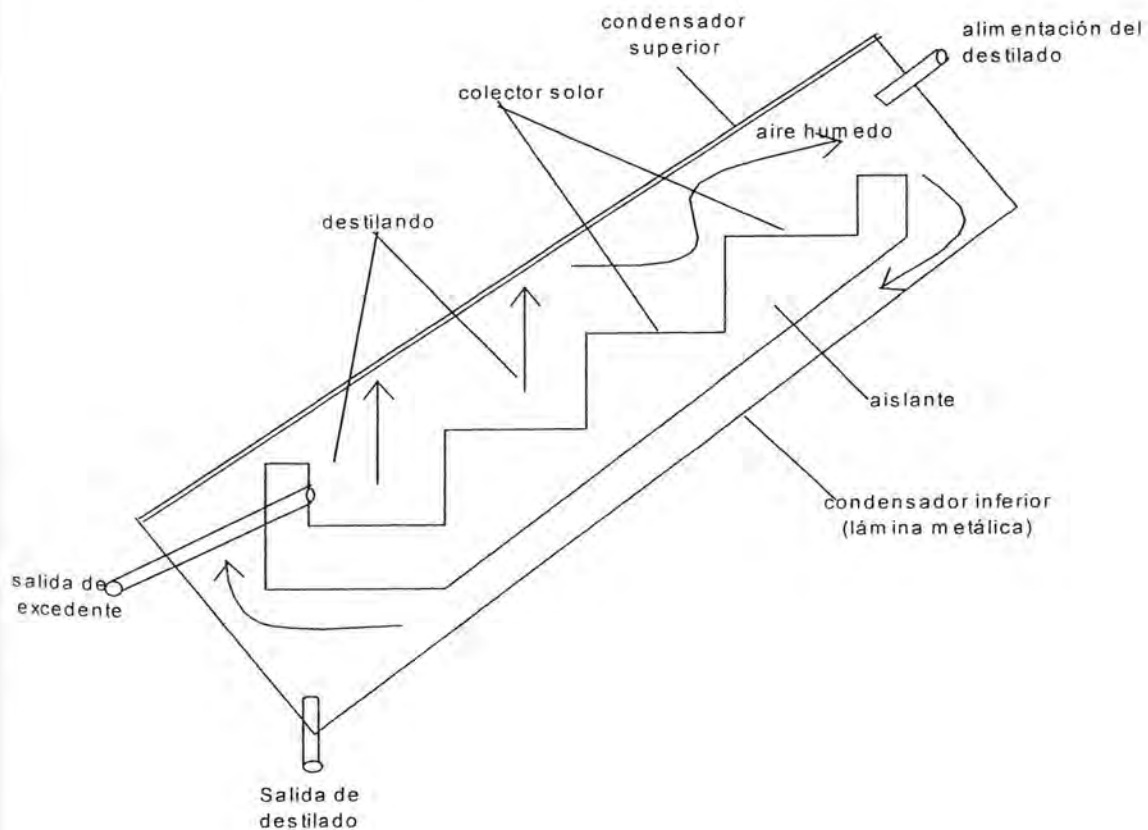


Figura II.9- Destilador Escalera

- Destilador con cubierta de gran inclinación:

Estos son destiladores de canal largo que cuentan con una gran inclinación y altura. Mediante estudios teóricos y experimentales se llegó a determinar que el mecanismo de transferencia de calor por convección es de 6 a 10 veces mayor que el de la difusión (J.L. Fernández et. al., 1989).

- Destilador tipo Moustafa:

La estructura es como la de un calentador solar plano con la diferencia de que la superficie absorbadora es textil

tensado por donde circula de arriba hacia abajo el agua a destilar; la condensación se lleva a cabo en la cubierta y en el fondo del dispositivo, ocurriendo un fenómeno de convección semejante al de escalera. Han sido desarrollados varios prototipos a partir del original, con diversas modificaciones o variantes buscando siempre mejorar la eficiencia [4].

2) Destilador solar con calentamiento indirecto.

En este tipo de destilador la zona de captación de la radiación solar y su conversión en calor se lleva a cabo en un lugar separado de las zonas de calentamiento y evaporación, y de condensación y recolección del destilado.

Un ejemplo de destilador solar con calentamiento indirecto (Bartali et. al., 1976) opera bajo la siguiente forma: en una caja con doble compartimiento, por la parte superior (parte fría) se hace circular agua cruda para acelerar la condensación. El paso siguiente es calentar el líquido por medio de un calentador solar para aumentar su temperatura y de ahí se lleva a la parte inferior (charola) del compartimiento, para su evaporación.

Existen también los de efecto múltiple en los cuales, el calor que garantiza la evaporación del primer sistema proviene de un intercambiador que es alimentado por colectores solares. El funcionamiento del destilador es el siguiente: la destilación se lleva a cabo en un recipiente aislado térmicamente, en donde existe una fila de charolas una sobre la otra. Para iniciar el proceso, es necesario calentar el agua contenida en la charola inferior (calor proporcionado por un arreglo de colectores solares)

provocándose su evaporación y luego su condensación por debajo de la superficie de la charola siguiente, dando inicio al efecto múltiple. Esto se puede observa en la figura II.10. [7]

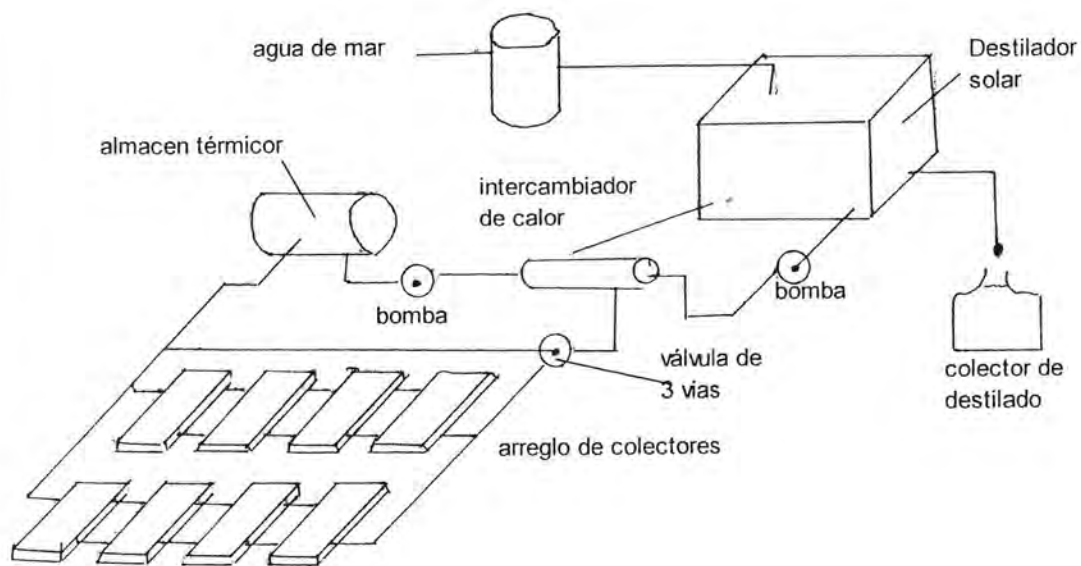


Figura II.10- Destilación por calentamiento indirecto.

III.- DESTILADOR SOLAR EXPERIMENTAL TIPO CASETA DE UNA PENDIENTE Y SUS VARIANTES DE DISEÑO.

III.1.- Materiales utilizados en la construcción de destiladores solares.

Los materiales de construcción de los destiladores solares para agua, influyen en su rendimiento productivo de agua destilada, en su costo y durabilidad.

Los materiales aislantes se hacen necesarios en la base del dispositivo, cubriendo las paredes y el fondo, la superficie de absorción de energía donde se encuentra el agua a destilar, procurándose con ello la disminución de las pérdidas de calor al ambiente. Los materiales aislantes empleados en la construcción de destiladores han sido diversos, entre estos podemos mencionar el poliestireno, fibra de vidrio, poliuretano, etcétera. Su elección se basa en la disponibilidad y los costos. En ocasiones suele usarse como aislante la capa de tierra donde se construye el equipo.

El cuerpo, caja o base de los destiladores solares puede ser de madera, concreto, plástico ó metal, según el diseño o el tipo de destilador.

La superficie absorbedora, generalmente es de metal, siendo la lámina galvanizada la más empleada; otros materiales son la tela, el ferrocemento, plásticos y resinas. Se les pinta de color negro mate o se les agrega una superficie selectiva para aumentar su capacidad de absorción. El empleo de lámina galvanizada tiene el inconveniente de presentar problemas de corrosión después de un periodo de uso, sin embargo el cobre, el latón y el acero inoxidable son resistentes, pero bastante caros y difíciles de

trabajar, en comparación con la lámina galvanizada. Aunque el cobre reacciona al contacto con las sales, las temperaturas que alcanza la charola y la limpieza para su carga diaria, la hacen resistentes a la corrosión.

La superficie de condensación (cubierta) en los destiladores solares ha sido frecuentemente de vidrio comercial, esto, por el costo, disponibilidad y características ópticas. En cuanto menor sea su espesor, mayor cantidad de radiación solar dejará pasar hacia la superficie absorbedora.

III.2.- Construcción del equipo de destilación solar experimental y las propiedades de los materiales.

Los materiales utilizados en la construcción del destilador solar experimental fueron seleccionados de acuerdo con su costo y disponibilidad en el mercado (Chetumal).

Se construyó un destilador solar tipo caseta (DSC) de una pendiente como se aprecia en la figura III.1 con las características siguientes:



Figura III.1- Destilador comparativo

Cubierta transparente.

Se utilizó vidrio comercial espesor con una conductividad térmica (K) de $0.879 \text{ W/m-}^\circ\text{K}$, Capacidad Calorífica (Cp) de 0.15

Cal/g-°K, Emitancia (ϵ) de 0.94, Transmitancia de (τ) 0.94 y una Absortividad (α) de 0.05; de 5mm de espesor al igual que las laterales (menor espesor existente en el mercado en el momento de la construcción del equipo). La inclinación de 20° en la cubierta, fue con el objeto de asegurar que las partículas de vapor condensado (gotas) no cayeran al evaporador antes de ser recolectadas. Para la unión y sellado entre la caja, las laterales y la cubierta se aplicó silicón transparente, al igual que en las uniones entre vidrios.[1]

Charola.

Esta superficie, llamada evaporador, consiste en una lámina galvanizada con una conductividad térmica (K) de 0.28 cal/m-°K calibre 30 con 71.4 cm de largo, 35 cm de ancho y 4cm de alto. Esta última, facilita la experimentación con diferentes espesores de agua. En la charola se aplicó pintura anticorrosiva color negro mate para tener mayor capacidad de absorber la energía solar. Esta pintura tiene una emitancia (ϵ)de 0.96 .[1 y 9]

Gabinete y aislamiento.

La caja que contiene la charola es de madera cimbraplay con una conductividad térmica de(K) de 0.08 w/m-°K (con 1.2 cm. de espesor) en la parte interior y exterior, la parte intermedia está aislada con planchas de unicel de 2cm de espesor. La pared posterior de la caja se proyecta hacia arriba, con el objeto de que al colocar la cubierta, ésta tenga una inclinación determinada. En una lateral de la caja hay una ventana que permite que la charola pueda ser extraída del destilador para darle mantenimiento, por las incrustaciones que pueda tener al

estar operando. El suministro del agua a destilar en la charola es por medio de esta ventana.

Canales recolectores.

Para la recolección del agua destilada en las laterales se colocaron canaletas en forma de "U" cuadrangular de 6mm de ancho que se unen con la canaleta principal (de la cubierta) de 12mm, todas éstas con cierta inclinación para que el agua pueda ser conducida finalmente hacia un recipiente receptor. La figura III.2 muestra las partes que componen al destilador. [1 y 9]

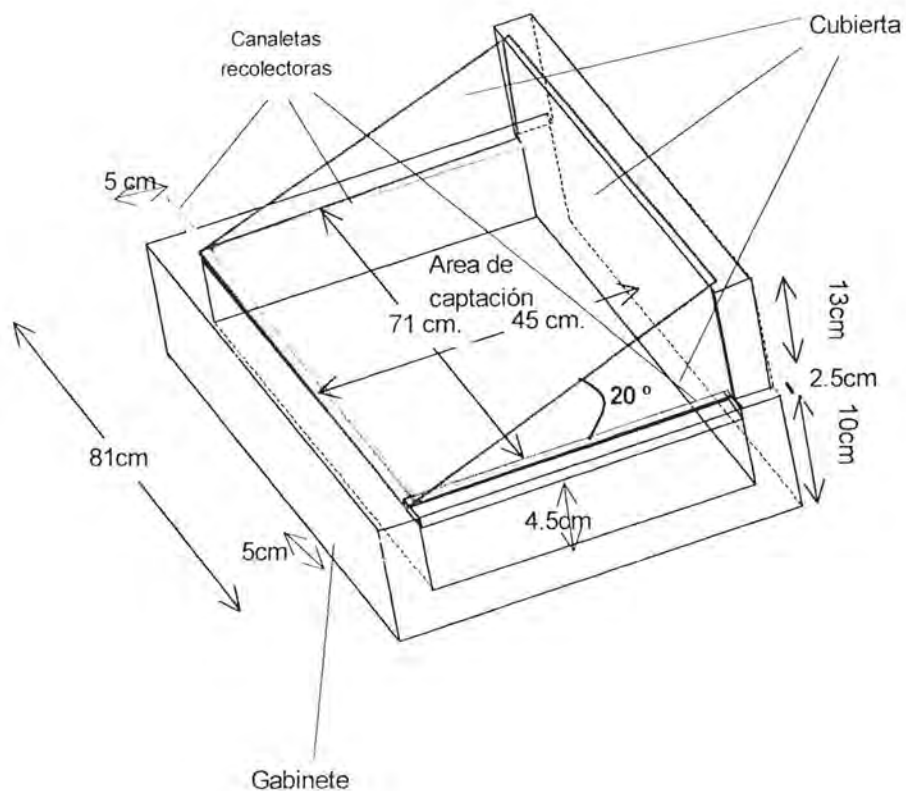


Figura III.2- Partes que componen el destilador

III.3.- Variantes de diseño.

1^a- Etapa diferentes áreas de captación solar.

Se construyeron un destilador de 0.5m^2 y otro de 1m^2 de área de captación solar. Los materiales, el diseño, así como, el procedimiento de construcción son similares al destilador tipo caseta de 0.25m^2 descrito con anterioridad. La única diferencia radica en el área de captación solar. Por lo tanto el de 0.5m^2 y el de 1m^2 son dos y cuatro veces mayores que el destilador de 0.25m^2 respectivamente. Esta etapa puede verse en la Figura III.3.



Figura III.3- Diferentes áreas de captación.

2^a- Etapa implementación de un doble efecto.

Se construyó un destilador solar de 0.25m^2 de área de captación solar con las mismas características que el destilador solar experimental ya mencionado. Sobre éste se anexó un segundo efecto (el primer o simple efecto lo representa el destilador sencillo), es decir, se colocó encima una caja con paredes de vidrio comercial de 5mm de espesor, abarcando toda el área de

captación solar del simple efecto (0.25m^2). La altura de las paredes de la caja es de 8cm; el ancho, largo y la cubierta de igual longitud a la cubierta del destilador sencillo.

En el interior de la caja, sobre la cubierta del simple efecto se colocaron perpendicularmente 5 rectángulos de vidrio (mamparas) de 74.7 cm de largo por 2cm de alto y 5mm de espesor; colocados equidistantes ocupando todo el espacio de la cubierta, esto con la finalidad de formar una cavidad por cada mampara y servir de charola para el doble efecto. El suministro de agua se realizaba a través de un orificio en la parte posterior derecha de la caja. El agua se recolectaba por canaletas ubicadas en las laterales y el frente de dicha caja de vidrio. La parte posterior de ésta estaba provista por fuera con una capa de papel aluminio y otra de unicel de 20 mm de espesor. Estas características se pueden ver en la figura III.4.

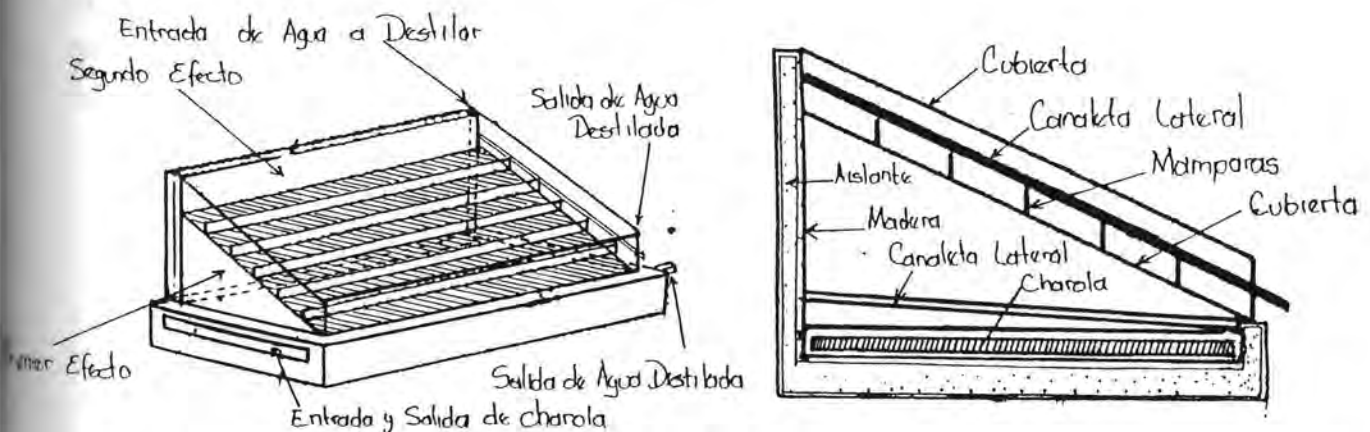


Figura III.4-Destilador Doble efecto.

3ª- Etapa superficies reflejantes para la concentración de la radiación solar.

Este destilador se construyó con las mismas características del destilador experimental pero con la diferencia de que se le anexaron dos espejos (planos) reflejantes (comercial de 5 mm) de

75.5 x 40 cm cada uno; ya que son fáciles de conseguir en el mercado. Los espejos son colocados en la parte frontal y posterior del destilador teniendo una inclinación de 60° con respecto a la horizontal por la parte posterior del espejo.

Para establecer la inclinación de los 60° , se realizaron pruebas durante una semana cuando el sol se encuentra en el cenit y variando la inclinación de los espejos, se observó que cuando se tiene 60° de inclinación respecto a la horizontal por la parte posterior del espejo, la reflexión de los rayos del sol en las horas pico (entre las 11 de la mañana hasta las 2 tarde) alcanzan a cubrir toda la superficie absorbedora.

Cada espejo cuenta con un marco de madera de pino de una pulgada en la parte posterior que está sujeto al destilador por un par de bisagras. Estos espejos lograran la inclinación con la ayuda de un par de puntales de madera de pino de una pulgada adheridos al marco y apoyándose en una mesa. La recolección del destilado en ambos destiladores es similar. Ver figura III.5.

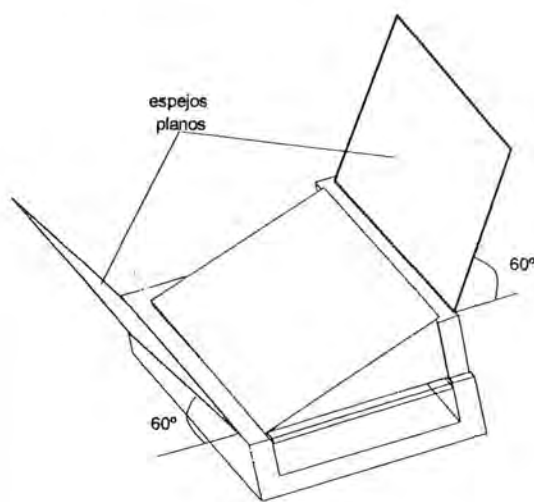
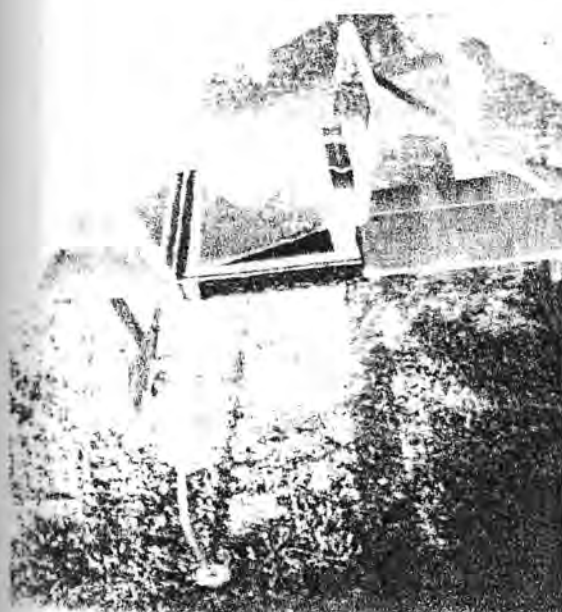


Figura III.5- Destilador con superficies reflejantes

III.4.- Determinación de la eficiencia en los destiladores solares tipo caseta.

En el modelo del destilador solar el interés se centra en conocer la producción de agua destilada (destilado) y la eficiencia que logra alcanzar.

Como sabemos la eficiencia de un sistema térmico se basa en la relación de producción a la energía radiante que incide en el destilador.

La ecuación de un destilador solar se puede calcular de varias formas. Una de ellas es calcular el calor útil con la siguiente fórmula:

$$Q_u = P_w C_{pw} (T_e - T_i) + P_a \lambda_e \quad (1)$$

Donde:

P_w : agua cargada al destilador [Kg/m²-día]

C_{pw} : Calor específico del agua [J/Kg-°C]

T_e : Temperatura del equilibrio del agua [°C]

T_i : temperatura inicial de evaporación [°C]

P_a : producción de agua destilada [Kg/m²-día]

λ_e : Es el valor promedio del calor latente de evaporación del agua [580 Kcal/kg]

Q_u : Calor útil

Sabemos que:

$P_w C_{pw} (T_e - T_i)$ es aproximadamente igual a cero por lo que se desprecia su valor.

Esto es la inercia térmica que contiene el agua tanto al inicio como al final de la producción de destilado y que no interviene de manera significativa en este proceso.

Por lo tanto:

$$Q_u = Pa\lambda e \quad (2)$$

La Eficiencia corresponde a:

$$\eta = Q_u / H_t \quad (3)$$

H_t : es la energía solar [Kcal/m²-día]

Sustituyendo (2) en (3)

$$\eta = Pa\lambda e / H_t \quad (4)$$

Por lo tanto:

$$\eta = Pa * 580 / H_t \quad (5)$$

IV.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

IV.1.- Pruebas experimentales.

Las pruebas experimentales se realizaron en tres etapas, de acuerdo a cada una de las tres variantes. Los equipos experimentales descritos en el capítulo anterior, fueron puestos a prueba en las inmediaciones del estacionamiento principal de la Universidad, por periodos de aproximadamente 15 horas por día. Las variables climatológicas medidas fueron las siguientes: la intensidad de la radiación solar, la velocidad del aire, la temperatura de bulbo seco y humedad relativa del ambiente.

La orientación que tuvieron los destiladores solares experimentales fue fija y hacia el sur, para la 1a. y 2a. etapas (Otoño e Invierno, respectivamente) y para la última etapa (3a.) también fue fija pero hacia el norte (Verano).

Los equipos experimentales se colocaron cada uno sobre una mesa de 0.8m de altura, previamente nivelada y orientada.

IV.2.- Instrumentos de medición.

Todas las temperaturas registradas, excepto la temperatura ambiente, se midieron con termopares (Cobre-Constantan) calibre 16 duplex con una longitud de 25 cm. como se observa en la figura IV.1 acoplados a un multímetro digital a través de un selector. El multímetro se puede ver en la figura IV.2. La temperatura ambiente y la humedad relativa se midieron con un termohigrómetro digital que se ve en la figura IV.3.

Para el volumen de agua destilada se utilizaron probetas graduadas de 1000 ml para el destilador solar de 1 m², 500 ml para el de 0.5 m²; y 200 ml para los destiladores de 0.25 m². En la comparación experimental con dos efectos, se utilizaron probetas de 100 ml. En el caso de los espejos reflejantes se usaron dos probetas de 100 ml. Estos equipos se aprecian en la figura IV.4

Los demás instrumentos empleados fueron: un anemómetro figura IV.5, un solarímetro, Figura IV.6 y una brújula, figura IV.7. La tabla IV.1 muestra los instrumentos, sus características y las variables medidas.

INSTRUMENTO	CARACTERISTICAS	VARIABLE MEDIDA	UNIDADES
Anemómetro	Digital, Turbo Meter, Wind Speed Indicator, Davis Instruments. Con una resolución de 0.1 m/s +- 3%	Velocidad del viento.	m/s
Termohigrómetro	Digital, TES 1360, Humidity & Temperature, Semiconductor Sensor Temperature, Precision Capacitance Sensor Humidity. Resolución de 51	Temperatura Ambiente, Humedad Relativa.	°C %RH
Solarímetro	Analógico, dp Solar Meter, Modelo 776E. Con resolución 50W/m ² +- 3%	Radiación Solar.	W/m ²

Probetas	Graduadas, USA. con precisión de 10ml para las probetas de 1000ml y 1 ml para las de 100 ml.	Volumen de destilado.	ml
Brújula	Marca LUFT de 1 grado de precisión.	Orientación.	Grados °
Multímetro y Termopares	Digital marca DM-6055c Cobre-Constantan	Temperaturas Temperaturas	°C °C

Tabla IV.1.- Instrumentos de medición empleados durante las pruebas experimentales.



Figura IV.1 Termopares (cobre-constantan)



Figura IV.2- Multímetro digital

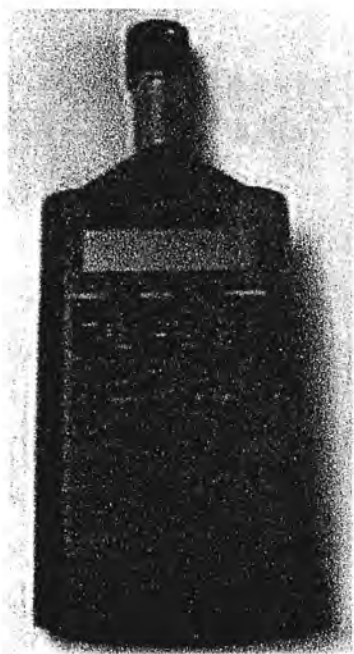


Figura IV.3- Termohigrómetro

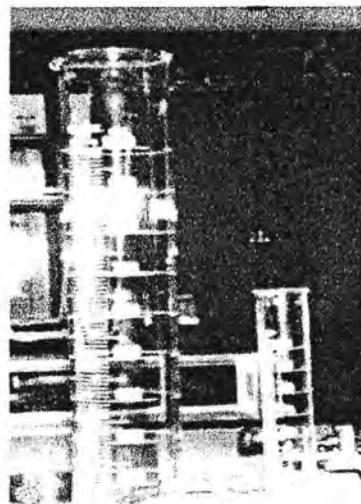


Figura IV.4- Probetas



Figura IV.5- Anemómetro

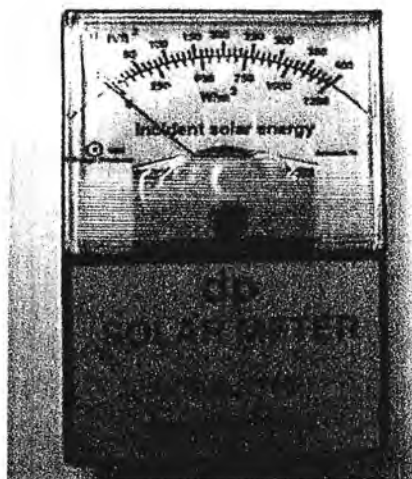


Figura IV.6- Solarímetro

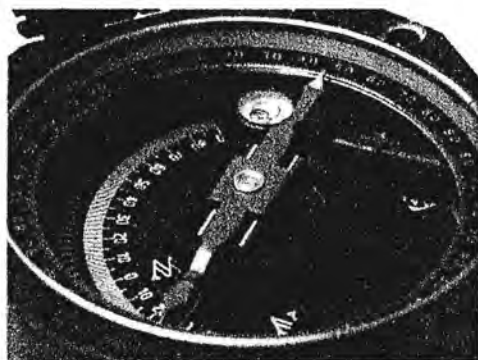


Figura IV.7- Brújula

IV.3.- Metodología para la comparación experimental con diferentes áreas.

Como primer paso el destilador solar experimental de 0.25 m^2 de área de captación junto con sus similares de 0.50 m^2 y 1.0 m^2 se colocaron cada uno sobre una mesa de 0.8 m de altura previamente nivelada y orientada hacia el sur (debido a la latitud y estación del año). Se probaron a las mismas condiciones atmosféricas, con un mismo espesor de agua, orientación y altura de asentamiento.

Segundo paso se cargo con el fluido de trabajo (agua a destilar) fue agua salobre (de la Bahía de Chetumal) con un espesor inicial de 1.2 cm con respecto a la base de la charola, y como consecuencia con volumen de 3 , 6 y 12 litros en los destiladores solares de 0.25 m^2 , 0.50 m^2 y 1.0 m^2 , respectivamente.

Tercer paso las variables se midieron en intervalos de 15 minutos, empezando entre las $6:00$ y $7:00 \text{ A.M.}$; periodo en que aparecen los primeros rayos del Sol, y, finalizando entre las $9:00$ y $10:00 \text{ P.M.}$, aproximadamente 3 horas después del ocaso del Sol y cuando la producción de agua destilada era prácticamente insignificante.

Cuarto paso al llegar el término de operación de los equipos, el agua restante se desalojaba mediante el vaciado del agua aun contenida en las charolas y se llevaban a guardar para otro día de prueba.

En la siguiente figura IV.8 se aprecia los destiladores funcionando.



Figura IV.8- Comparación experimental con diferentes áreas.

Las variables medidas fueron las siguientes:

*Parámetros del equipo de destilación de agua:

- Temperatura de la placa absorbadora.
- Temperatura del agua en la charola.
- Temperatura del vapor de agua.
- Temperatura interior de la cubierta (superficie condensadora)
- Temperatura exterior de la cubierta.

La disposición de los termopares para medir las variables de temperatura se observa en la figura IV.9.

*Producción de agua destilada

*Variables climatológicas:

- Velocidad del viento.
- Intensidad de la radiación solar.
- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa.

*Velocidad del aire.

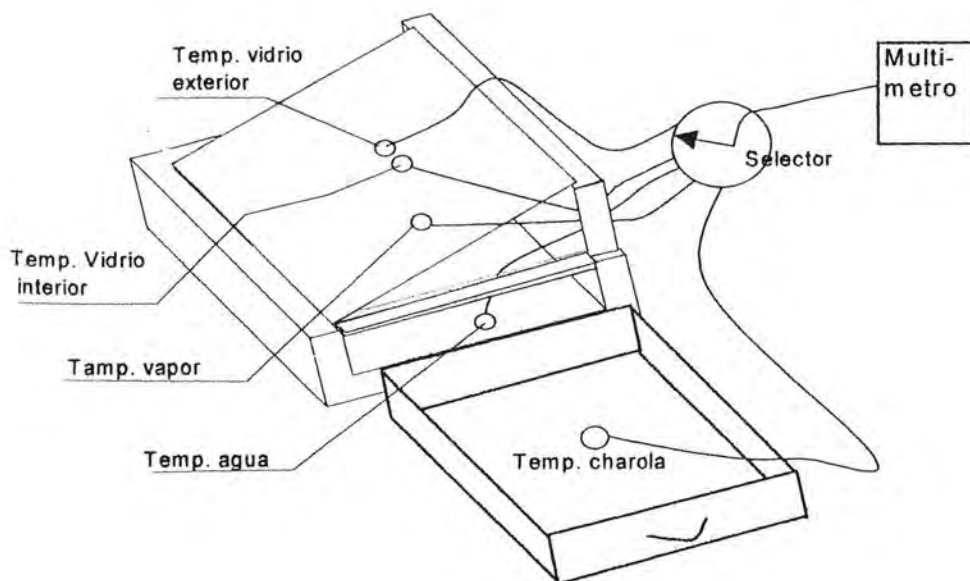


Figura IV.9- Disposición de los termopares

El formato utilizado para recabar la información se muestra en la tabla IV.2.

FECHA: _____ AREA: _____

HORA	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)		VEL. VIENTO (M/S)	TEMP. AMBIENTE (°C)	% HUMEDAD RELATIVA	TEMP. CHAROLA (°C)	TEMP. AGUA (°C)	TEMP. VAPOR (°C)	TEMP. VIDRIO INTERIOR (°C)	TEMP. VIDRIO EXTERIOR (°C)	VOLUMEN INSTANTANEO (ML)	VOLUMEN ACUMULADO (ML)	OBSERVACIONES
	DIRECTA	HORIZONTAL											
6:00													
6:15													
6:30													
6:45													
7:00													
7:15													
7:30													
7:45													
8:00													
8:15													
.													
.													
.													
23:15													
23:30													
23:45													
PROMEDIO													

Tabla IV.2. Formato empleado para realizar las mediciones de las variables en diferentes áreas.

IV.4.- Metodología para la comparación experimental con el doble efecto.

La metodología fue similar a la empleada en las pruebas con diferentes áreas.

Como primer paso los equipos se colocaron cada uno sobre una mesa de 0.8 m de altura previamente nivelada y orientada hacia el sur (debido a la latitud y estación del año). Las pruebas experimentales se realizaron mediante la puesta en operación del destilador de doble efecto, al mismo tiempo y bajo las mismas condiciones ambientales, que las del destilador de simple efecto. (Fig. IV.10).

Segundo paso: para la puesta en marcha se suministró agua de la bahía y para la charola del destilador sencillo se emplearon 3 litros al día. Para el otro destilador se suministraron 3 litros en la charola del efecto simple (primer efecto) y 3 litros al segundo efecto al día. Los equipos operaron bajo este régimen durante 4 días. Después de este periodo se varió el régimen de carga en el destilador de doble efecto suministrando 2 y 1 litro al segundo efecto.

En el paso tres todas las mediciones se llevaron a cabo a partir de las 6:30 hrs., durante un intervalo de 30 minutos finalizando hasta las 20:00 hrs.

Como cuarto paso, diariamente, al terminar la operación de los equipos, el agua restante se desalojaba del destilador mediante el vaciado de la charola extraída a través de la compuerta ubicada en un extremo del destilador. Mientras que para

el agua aún contenida en el segundo efecto se realizaba el drenado por medio de una manguera ubicada en la parte inferior del segundo efecto.

Las variables medidas en el destilador sencillo fueron las mismas que en las pruebas con áreas diferentes. Para el destilador con dos efectos se registraron los siguientes datos:

- Efecto Simple:

- Temperatura de la placa absorbadora.
- Temperatura del agua a destilar (destilando).
- Temperatura del vapor de agua.
- Temperatura interior de la cubierta.
- *Volumen de destilado.

- Efecto Doble:

- Temperatura de la charola (cubierta parte exterior efecto simple).
- Temperatura del agua a destilar (destilando).
- Temperatura del vapor de agua.
- Temperatura de la cubierta interior.
- Temperatura de la cubierta exterior.
- *Volumen de destilado.

Las variables climatológicas medidas al igual que en los otros experimentos fueron:

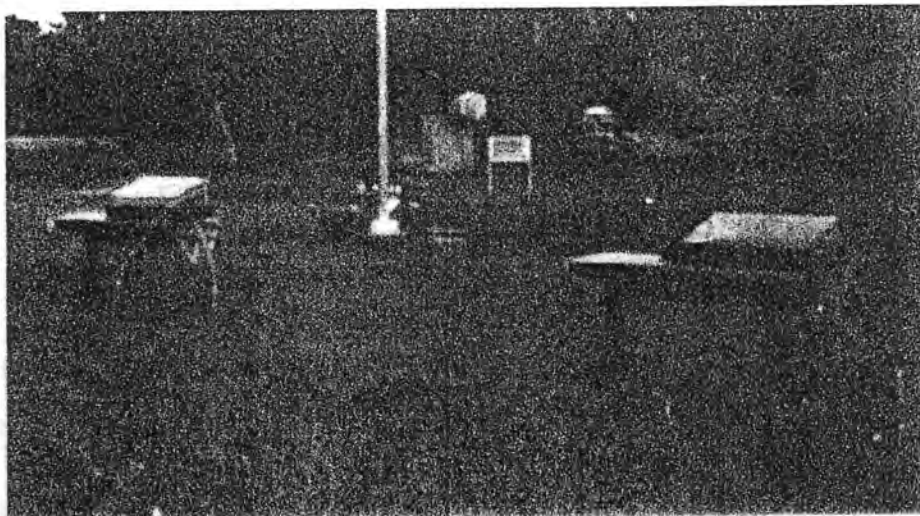
- *Radiación solar.

- *Velocidad del aire.

- *Temperatura ambiente.

- *Humedad relativa.

Los formatos utilizados para recabar la información se muestran en las tablas IV.3. y IV.4.



*Fig. IV.10- Comparación experimental del destilador
Doble efecto vs destilador comparativo*

FECHA: _____

AREA: _____

HORA	RADIACION (W/M ²)		VEL VIENTO (M/S)	TEMP AMBIENTE (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRIMER EFECTO						SEGUNDO EFECTO									
	DIRECTA	HORIZONTAL				TEMP. CHAROLA	TEMP. AGUA	TEMP. VAPOR	TEMP. SUPERFICIE CONDENSACION	VOL. INSTANTANEO	VOL. ACUMULADO	TEMP. VIDRIO EXTERIOR	TEMP. SUPERFICIE CONDENSACION	TEMP. VAPOR	VOL. INSTANTANEO	VOL. ACUMULADO					
																	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
6:00																					
6:30																					
7:00																					
7:30																					
8:00																					
8:30																					
9:00																					
9:30																					
10:00																					
10:30																					
11:00																					
11:30																					
12:00																					
12:30																					
13:00																					
13:30																					
14:00																					
14:30																					
15:00																					
15:30																					
16:00																					
16:30																					
17:00																					
17:30																					
18:00																					
18:30																					
19:00																					
19:30																					
20:00																					
20:30																					
21:00																					
21:30																					
PROMEDIO																					

Tabla IV.3. Formato empleado para realizar las mediciones de las variables en el destilador Doble Efecto.

FECHA: _____

AREA: _____

SIMPLE EFECTO

HORA	RADIACIÓN (W/M ²)		VELOCIDAD VIENTO (M/S)	TEMP. AMBIENTE (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	TEMP. CHAROLA (°C)	TEMP. AGUA (°C)	TEMP. VAPOR (°C)	TEMP. SUPERFICIE CONDENSACION (°C)	TEMP. VIDRIO EXTERIOR (°C)	VOL. INSTANTANEO (ML)	VOL. ACUMULADO (ML)	OBSERVACIONES
	DIRECTA	HORIZONTAL											
6:00													
6:30													
7:00													
7:30													
8:00													
8:30													
9:00													
9:30													
10:00													
10:30													
11:00													
11:30													
12:00													
12:30													
13:00													
13:30													
14:00													
14:30													
15:00													
15:30													
16:00													
16:30													
17:00													
17:30													
18:00													
18:30													
19:00													
19:30													
20:00													
20:30													
21:00													
21:30													

PROMEDIO:

Tabla IV.4. Formato empleado para realizar las mediciones de las variables en el destilador Simple Efecto.

IV.5.- Metodología para la comparación experimental con espejos reflejantes.

En este caso se comparó experimentalmente el destilador solar de 0.25 m²(comparativo), con otro similar pero, con la diferencia de que este último tenía espejos concentradores. Estos fueron puestos en operación al mismo tiempo y bajo las mismas condiciones meteorológicas. Los destiladores operando se observan en la figura IV.10.

Las condiciones de operación fueron las siguientes:

Primero los destiladores se colocaron sobre una mesa de 0.80m. de altura y orientados hacia el norte.

Como segundo paso, se utilizó agua de la Bahía para destilar y con suministro de 3 (tres) litros de agua diariamente.

Tercer paso las mediciones se llevaron a cabo a partir de la 7:00 hrs. en intervalos de 30 minutos finalizando hasta las 21:30 hrs. cuando la producción de destilado era prácticamente nula; las mediciones fueron durante 3 días.

Y cuarto paso, del mismo modo que en las anteriores pruebas, al terminar el día el agua aun contenida en la charola se desalojaba del destilador, mediante el retiro de la charola por la ventana ubicada en un costado del mismo.

Las variables medidas fueron las siguientes:

Climatológicas:

- Intensidad de la radiación solar.
- Velocidad del viento.

- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa.

Producción de agua destilada (destilado).

Temperaturas en los destiladores:

- Temperatura de la placa absorbadora (charola).
- Temperatura del agua a destilar (destilando).
- Temperatura del vapor de agua.
- Temperatura de la superficie condensadora.
 - Temperatura exterior de la cubierta.

El formato utilizado para recabar la información se muestra en la tabla IV.5.

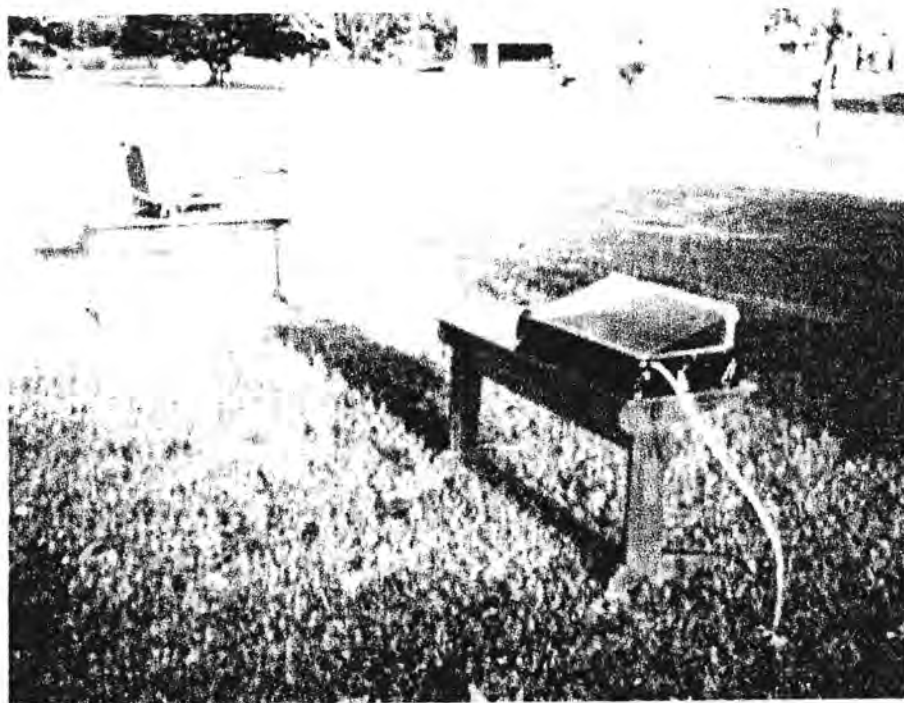


Fig. IV.11- Comparación experimental destilador con espejos vs destilador comparativo

FECHA: _____

AREA: _____

HORA	RADIACION (W/M ²)		VEL. VIENTO (M/S)	TEMP. AMBIENTE (°C)	HUMEDAD RELATIVA %	TEMP. CHAROLA (°C)	TEMP. AGUA (°C)	TEMP. VAPOR (°C)	ESPEJOS				NORMAL				OBSERVACIONES		
	DIRECTA	HORIZONTAL							TEMP. SUPERFICIE CONDENSACION	TEMP. VIDRIO EXTERIOR	VOL. INSTANTANEO	VOL. ACUMULADO	TEMP. AGUA (°C)	TEMP. VAPOR (°C)	TEMP. SUPERFICIE CONDENSACION (°C)	TEMP. VIDRIO EXTERIOR (°C)		VOL. INSTANTANEO	VOL. ACUMULADO
6:00																			
6:30																			
7:00																			
7:30																			
8:00																			
8:30																			
9:00																			
9:30																			
10:00																			
10:30																			
11:00																			
11:30																			
12:00																			
12:30																			
13:00																			
13:30																			
14:00																			
14:30																			
15:00																			
15:30																			
16:00																			
16:30																			
17:00																			
17:30																			
18:00																			
18:30																			
19:00																			
19:30																			
20:00																			
20:30																			
21:00																			
21:30																			
PROMEDIO:																			

Tabla IV.5. Formato empleado para realizar las mediciones de las variables

de los destiladores con y sin espejos

IV.6.- Costos por construcción de los destiladores.

La elección de los materiales se basó en: su disponibilidad en el mercado, menor costo y facilidad para trabajarlos.

En la tabla IV.6. se muestran los precios de los materiales para construir un destilador tipo caseta de una pendiente, y con las variantes de doble efecto y espejos reflejantes. Estos costos son para destiladores con 1m^2 de área de captación.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U. \$	SUBTOTAL \$
DESTILADOR SIMPLE				
Vidrio comercial	m ²	3.30	231.00	762.30
Lamina galvanizada	ml	1.50	22.00	33.00
Canaleta	ml	4.00	6.10	24.40
Unicel	hoja	4.00	11.00	44.00
Cimbraplay	hoja	2.00	325.00	650.00
Bisagras	pza	2.00	9.00	18.00
Silicón	pza	3.00	35.00	105.00
Papel aluminio	paquete	1.00	25.00	25.00
Manguera	ml	1.00	3.50	3.50
Pintura	lt	1.00	54.00	54.00
Resistol	lt	1.00	65.00	65.00
Clavos	kg	0.50	8.00	4.00
Tineer	lt	2.00	7.00	14.00
Costo total para la construcción del Destilador Simple :				1,802.20
AGREGANDO DOBLE EFECTO:				
Vidrio comercial	m ²	1.70	231.00	392.70
Silicón	pza	2.00	35.00	70.00
Manguera	ml	1.00	3.50	3.50
Costo total para la construcción del Destilador con Doble Efecto :				2,268.40
ANEXANDO ESPEJOS REFLEJANTES:				
Espejos	m ²	2.35	250.00	587.50
Bisagras	pza	6.00	9.00	54.00
Madera de marco y puntales	pza	6.00	8.51	51.06
Silicón	pza	1.00	35.00	35.00
Costo total para la construcción del Destilador con Espejos Reflejantes :				2,529.76

Tabla IV.6. Costos para construir un Destilador.

En estos precios no se considera la mano de obra, ya que estos destiladores los consideramos como auto construibles por su fácil diseño.

V.- RESULTADOS Y ANALISIS

V.1.- Áreas

Los resultados de las variables medidas durante los días de experimentación se muestran por promedio diario y se encuentran en la tabla V.1.1.

Los resultados obtenidos al comparar las producciones de destilado, eficiencia y temperaturas en los destiladores son:

- Se tiene 25.21% y 1.17% de mayor producción de agua destilada ($\text{kg}/\text{m}^2\text{-día}$) del destilador de 1m^2 con respecto a los destiladores de 0.25m^2 y 0.5m^2 . Y 23.76% de destilado del destilador de 0.5m^2 respecto al de 0.25m^2 , en el día de mayor insolación (22/11/96), como puede apreciarse en la tabla V.1.1.
- También la tabla V.1.1 nos muestra que mientras se mantenga el mismo tirante de agua al iniciar la prueba, mayor es la temperatura que se alcanza en el interior de los destiladores con relación al área de captación.
- De la tabla V.1.1 se observa que la velocidad del aire influye en la cantidad producción de destilado, al mantener una temperatura menor en la parte exterior del vidrio y provocar la condensación del vapor de agua que llega al vidrio en su parte inferior, es decir, en el interior del destilador.

- Se tiene 8.53% y 2.58% de mayor eficiencia en el destilador de 1m^2 respecto a los destiladores de 0.25m^2 y 0.50m^2 . Y 8.28% del destilador de 0.50m^2 respecto al de 0.25m^2 durante todos los días de prueba tal y como se observa en la Gráfica V.1.1.
- La gráfica V.1.2 muestra la comparación de la radiación y producción de destilado instantáneo en un día de prueba (22/11/97); es decir nos muestra que cuando mayor sea la radiación mayor cantidad de agua destilada se obtiene. Al igual observamos que entre las once de la mañana y las 3 de la tarde (cuando el sol se encuentra en el cenit), la producción instantánea de agua es mayor.

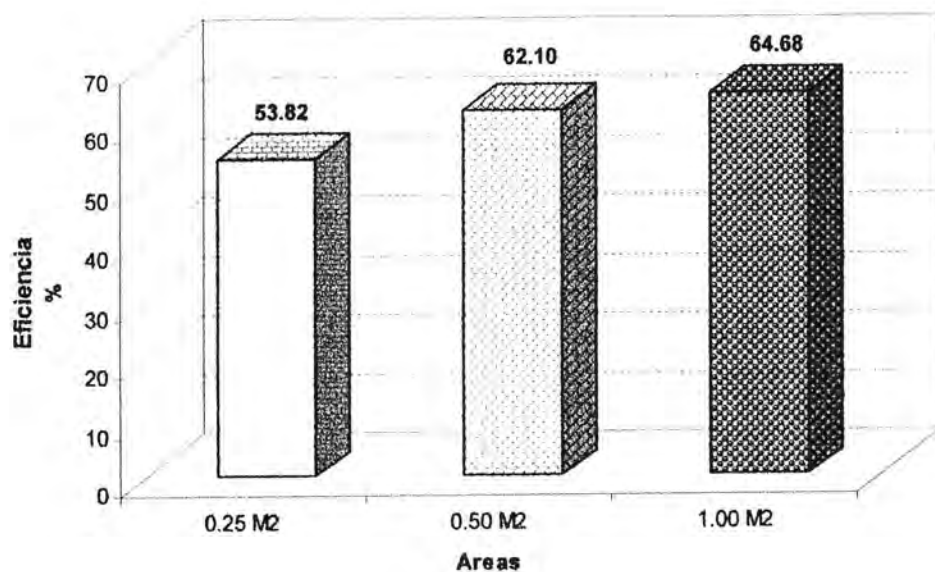
En este trabajo se obtuvieron resultados diferentes a lo supuesto en un principio, dada la idea que se tiene al representar las producciones lineales de destilado en función de m^2 . Cuando se comparan los resultados se observa sólo una aproximación de lo que sería una linealidad entre los destiladores de 0.50m^2 y 1m^2 , mientras que en el de 0.25m^2 la producción se mantuvo por debajo del promedio de los dos anteriores.

Esto significa que intervinieron otros factores en la operación de los destiladores que repercutieron en la cantidad de agua destilada y por consecuencia en la eficiencia del destilador. Estos factores tienen que ver con el área de los destiladores ya que si bien se mantuvieron las relaciones en sus formas y dimensiones en la charola, también se modificaron ciertos parámetros del destilador por ejemplo, la altura entre el espejo del agua y el área del condensado hacia la parte

posterior. Otra observación es que en los destiladores de mayor área se tiene una mayor capacidad de retención del calor ya que se registraron mayores temperaturas en su interior.

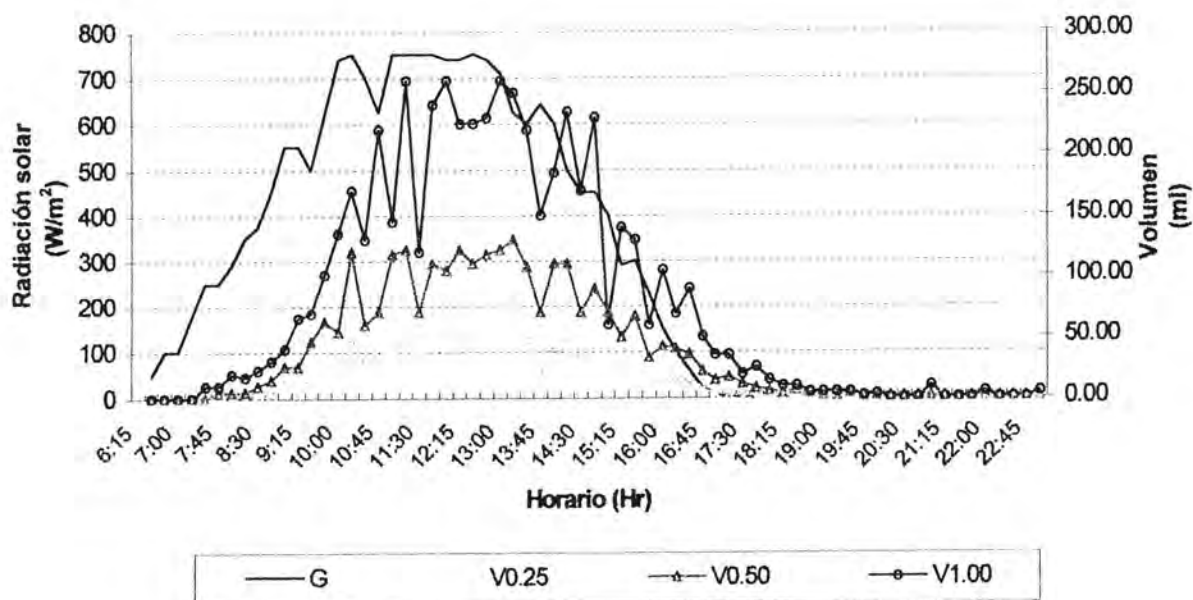
FECHA	AREA DESTILADOR M ²	RADIACION SOLAR Wh/M2-DIA	VELOCIDAD AIRE M/S	TEMP. AMBIENTE °C	TEMP. CHAROLA °C	TEMP. AGUA DESTILADA °C	TEMP. VAPOR °C	TEMP. VIDRIO INTERIOR °C	TEMP. VIDRIO EXTERIOR °C	PRODUCCION ML	AGUA DESTILADA Pa KG/M ² -DIA	EFICIENCIA η %
10/11/96	0.25				41.84	41.75	43.55	41.57	31.13	813.00	3.252	56.70
	0.50	3,740.00	1.63	24.68	41.38	42.11	43.29	41.54	31.07	1,761.00	3.522	63.50
	1.00				43.25	43.48	45.70	42.66	31.18	3,360.00	3.660	66.00
12/11/96	0.25				37.60	37.48	38.80	37.54	31.34	413.00	1.652	47.20
	0.50	2,362.50	1.00	25.57	37.04	37.46	39.98	37.34	30.42	972.00	1.944	55.50
	1.00				38.06	37.86	40.00	37.82	31.02	1,915.00	1.915	54.70
21/11/96	0.25				51.54	52.00	55.34	52.09	41.34	1,062.00	4.248	64.50
	0.50	4,445.49	0.82	27.80	51.82	52.30	56.57	53.88	41.04	2,345.00	4.690	71.20
	1.00				53.80	53.00	58.61	55.88	42.57	4,725.00	4.725	71.70
22/11/96	0.25				47.31	49.97	51.07	48.16	38.39	1,067.00	4.268	59.00
	0.50	4,882.54	0.62	26.20	47.72	48.33	52.39	50.01	38.03	2,641.00	5.282	73.00
	1.00				49.01	48.27	53.61	50.97	39.91	5,344.00	5.344	73.80
16/01/97	0.25				41.09	40.67	41.96	39.68	32.42	484.00	1.936	42.80
	0.50	3,052.45	1.11	25.64	41.02	41.07	42.82	40.47	31.33	1,272.00	2.544	56.20
	1.00				42.32	41.67	44.33	41.82	30.61	2,790.00	2.790	61.70
17/01/97	0.25				44.56	43.94	46.07	42.61	34.07	805.00	3.220	50.70
	0.50	4,285.05	1.01	24.14	43.78	43.89	46.72	44.30	33.15	1,691.00	3.382	53.20
	1.00				45.13	44.00	48.11	45.10	32.22	3,824.00	3.824	60.20

Tabla V.1.1- Promedios de las variables medidas en los días de prueba.



Gráfica V.1.1-Eficiencias de los destiladores (promedio durante los días de prueba)

Radiación vs producción



Gráfica V.1.2.-Radiación vs producción de los destiladores durante un día de prueba (22/11/96)

V.2.- Doble efecto.

Los resultados de las variables medidas durante los días de experimentación se muestran por promedio diario y se encuentran en las tablas V.2.1 y V.2.2.

Los resultados obtenidos al comparar las producciones de destilado y la eficiencia en los destiladores son:

- Un 16% de mayor productividad en el destilador de Dos Efectos respecto al de Efecto Simple.
- Un 9.3% de mayor eficiencia promedio en el destilador de Dos Efectos respecto al Efecto Simple. (gráfica V.2.1).

Respecto al destilador de Dos Efectos el comportamiento en la producción de destilado es el siguiente:

- El volumen destilado en el Primer Efecto representa el 47.3% del total producido por el destilador, mientras que el Segundo Efecto representa el 52.7%. Este porcentaje en el Primer Efecto fue menor (45%) en los primeros días de prueba con una relación de volumen de suministro de agua a destilar de 3:3 litros (Primero y Segundo Efecto respectivamente), este último destiló 55% .

Sin embargo estas tendencias se invirtieron cuando la relación de volúmenes de suministro fue de 3:1 y 3:2 respectivamente, donde el Primer Efecto destiló 51% y el Segundo Efecto 49% del destilado total.

Los resultados anteriores se obtienen de las tablas V.2.3 y V.2.4.

Las gráficas V.2.2 y V.2.3 muestran la comparación de la producción instantánea en un día de prueba (26/02/97) en los

destiladores y la gráfica V.2.4 la relación entre las temperaturas del agua y la producción instantánea.

De acuerdo a los resultados anteriores, se verifica que el calor latente de condensación de un Primer Efecto es aprovechado por el Segundo Efecto en un destilador de Dos Efectos. Efectivamente, en el destilador de Dos Efectos se obtiene una mayor cantidad de destilado con respecto a lo obtenido en el de Simple Efecto, pero esta diferencia es un poco menor que la de los datos registrados en la bibliografía de trabajos similares. Sin embargo, la veracidad de los resultados de este trabajo tiene un fuerte sustento al realizarse las pruebas en igualdad de condiciones como las ya mencionadas en la Introducción.

Si bien el destilador de Dos Efectos tiene dos sistemas de producción (primer y segundo efecto), uno afecta al otro, como se observó al cambiar los volúmenes de suministro en los mismos. Otros factores importantes a considerar son el espesor del vidrio empleado y el grado de transparencia del agua suministrada en el segundo efecto, los cuales merman la eficiencia del destilador en su conjunto. A pesar de ello, la capacidad de producción de los dos destiladores fue satisfactoria.

Fecha	Radiación solar promedio H_t [W/m ² -día]		Velocidad viento V_w [m/s]	Temp. ambiente T_a [°C]	Humedad relativa ϕ [%]	Temp. charola T_{chs} [°C]	Temp. agua T_{ws} [°C]	Temp. vapor T_{vs} [°C]	Temp. superficie condensación T_{gs} [°C]	Temp. vidrio exterior T_{ges} [°C]	Volumen destilado V_s [ml]
	Horizontal										
	Directa	Horizontal									
Lunes 24/02/97	503.48	448.20	2.28	28.02	88.97	49.1	49.07	52.76	51.14	35.03	1217.00
Martes 25/02/97	347.92	247.08	1.50	27.21	98.39	39.61	39.29	40.82	39.93	31.03	573.00
Miércoles 26/02/97	612.29	427.50	3.35	28.25	89.67	46.07	45.83	49.59	47.69	33.69	1177.00
Jueves 27/02/97	571.14	434.35	3.13	29.21	97.57	45.69	45.48	48.66	47.17	33.1	1083.00
Lunes 3/03/97	682.29	479.79	2.48	29.12	90.21	48.97	48.97	53.52	51.72	36.28	1257.50
Martes 4/03/97	696.25	470.00	2.69	29.12	86.23	47.1	47	52.07	50.27	33.73	1308.00
Miércoles 5/03/97	628.33	464.38	2.52	29.04	88.66	47.21	47.28	51.62	50.03	33.9	1295.00

Tabla V.2.1.- Promedios diarios Simple Efecto

Fecha	Radiación solar promedio H_t [W/m ² -día]		Temp. ambiente T_a [°C]	Humedad relativa ϕ [%]	Temp. charola T_{ch1} [°C]	Temp. agua T_{w1} [°C]	Temp. vapor T_{v1} [°C]	Temp. superficie condensación T_{g1} [°C]	Volumen destilado V_1 [ml]	Temp. superficie evaporador T_{ch2} [°C]	Temp. agua T_{w2} [°C]	Temp. vapor T_{v2} [°C]	Temp. superficie condensación T_{g2} [°C]	Temp. vidrio exterior T_{ge2} [°C]	Volumen destilado V_2 [ml]
	Horizontal														
	Directa	Horizontal													
Lunes 24/02/97	503.48	448.20	2.30	28	50.43	50.7	52	50.33	662.00	46.8	46.8	50.87	47.4	34.97	803.00
Martes 25/02/97	347.92	247.08	1.50	27.21	40.36	40.39	40.61	39.36	297.00	37.43	37.04	39.54	37.5	28.82	312.00
Miércoles 26/02/97	612.29	427.50	3.35	28.25	47.86	48.03	49.21	47.28	619.00	43.97	43.9	48	44.31	30.34	783.00
Jueves 27/02/97	571.74	434.35	3.13	29.21	46.79	46.9	48.1	46.34	559.00	43.38	42.93	47.17	43.62	30.69	721.00
Lunes 3/03/97	682.29	479.79	2.48	29.12	50.48	50.93	53.31	51.31	753.50	48.1	50.59	51.62	47.55	31.48	730.50
Martes 4/03/97	696.25	470.00	2.69	29.12	48.5	48.77	50.77	48.93	734.50	45.43	45.87	49.5	46.74	31.16	696.50
Miércoles 5/03/97	628.33	464.38	2.52	29.04	49.38	49.45	51	48.97	731.50	45.76	46.03	49.83	45.83	45.76	782.00

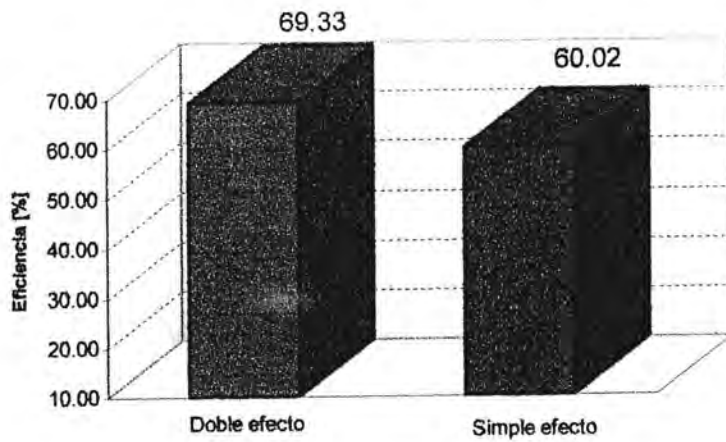
Tabla V.2.2.- Promedios diarios Dos Efectos.

Fecha	Radiación solar Ht [Kcal/m ² -día]	Dos efectos					
		Primer efecto		Segundo efecto		Simple efecto	
		Volumen Suministrado [ml]	Volumen destilado V ₁ [ml]	Volumen Suministrado [ml]	Volumen destilado V ₂ [ml]	Volumen Suministrado V ₀ [ml]	Volumen destilado V _s [ml]
Lunes 24/02/97	4,432.70	3000.00	662.00	3000.00	803.00	2000.00	1217.00
Martes 25/02/97	2,551.10	3000.00	297.00	3000.00	312.00	2000.00	573.00
Miércoles 26/02/97	4,413.80	3000.00	619.00	3000.00	783.00	2000.00	1177.00
Jueves 27/02/97	4,297.70	3000.00	559.00	3000.00	721.00	2000.00	1083.00
Lunes 3/03/97	4,953.75	3000.00	753.50	1000.00	730.50	2000.00	1257.50
Martes 4/03/97	4,852.65	3000.00	734.50	2000.00	696.50	3000.00	1308.00
Miércoles 5/03/97	4,796.73	2000.00	731.50	2000.00	782.00	2000.00	1295.00

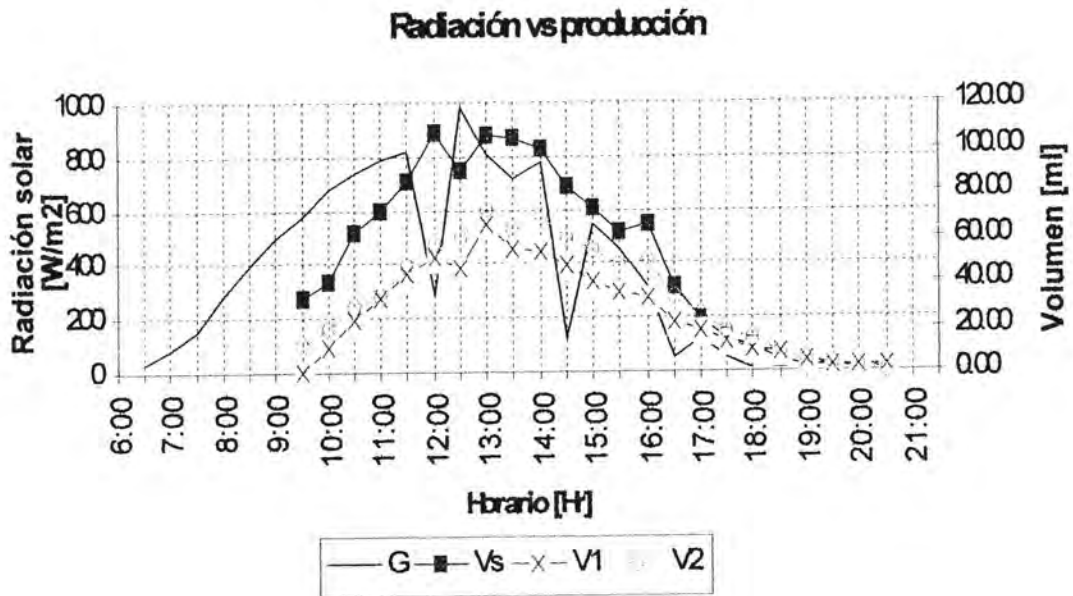
Tabla V.2.3.- Volúmenes de suministro y destilado por día en los destiladores.

Fecha	Radiación solar Ht [Kcal/m ² -día]	Dos efectos						Simple efecto		Eficiencia $\Delta\eta$ ($\eta_D - \eta_S$) [%]
		Primer efecto		Segundo efecto		Cantidad de agua destilada dos efectos Pa ₀ [Kg/m ² -día]	Eficiencia total dos efectos η_D [%]	Cantidad de agua destilada V _s [Kg/m ² -día]	Eficiencia η_S [%]	
		Cantidad de agua destilada Pa ₁ [Kg/m ² -día]	eficiencia η_1 %	Cantidad de agua destilada Pa ₂ [Kg/m ² -día]	eficiencia η_2 [%]					
Lunes 24/02/97	4,432.70	2.648	34.65	3.212	42.02	5.860	76.67	4.868	63.70	12.97
Martes 25/02/97	2,551.10	1.188	27.01	1.248	28.37	2.436	55.38	2.292	52.10	3.28
Miércoles 26/02/97	4,413.80	2.426	32.54	3.132	41.15	5.558	73.03	4.708	61.86	11.17
Jueves 27/02/97	4,297.70	2.236	30.18	2.884	38.92	5.120	69.10	4.332	58.46	10.64
Lunes 3/03/97	4,953.75	3.014	35.29	2.922	34.21	5.936	69.50	5.030	58.89	10.61
Martes 4/03/97	4,852.65	2.938	35.11	2.786	33.30	5.724	68.41	5.232	62.53	5.88
Miércoles 5/03/97	4,796.73	2.926	35.38	3.128	37.82	6.054	73.20	5.180	62.63	10.57
Promedio	4,328.35	2.482	32.88	2.759	36.54	5.241	69.33	4.520	60.02	9.30

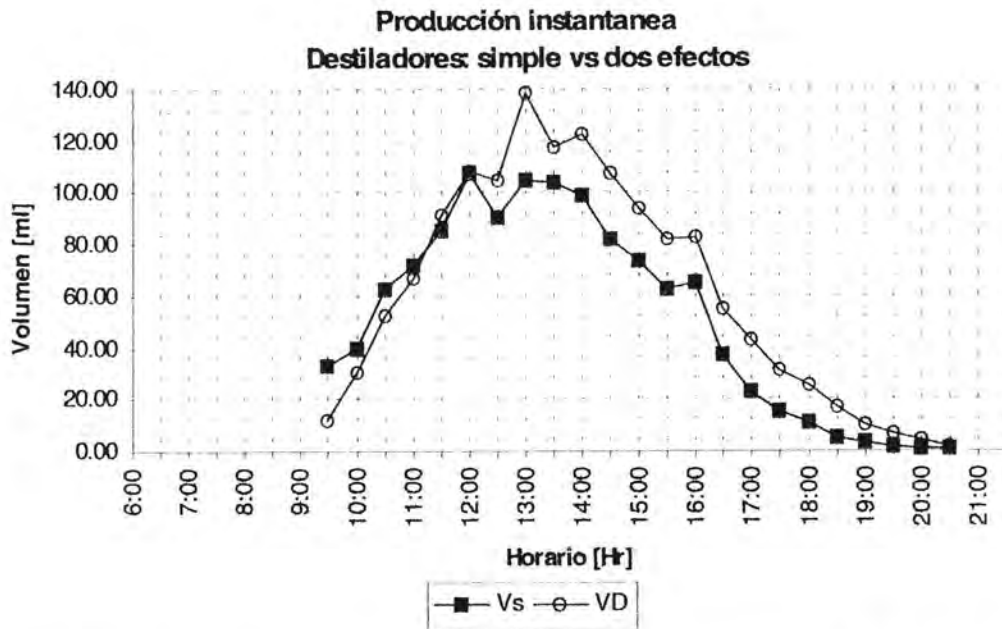
TABLA V.2.4.- Productividades y eficiencias de los dos destiladores.



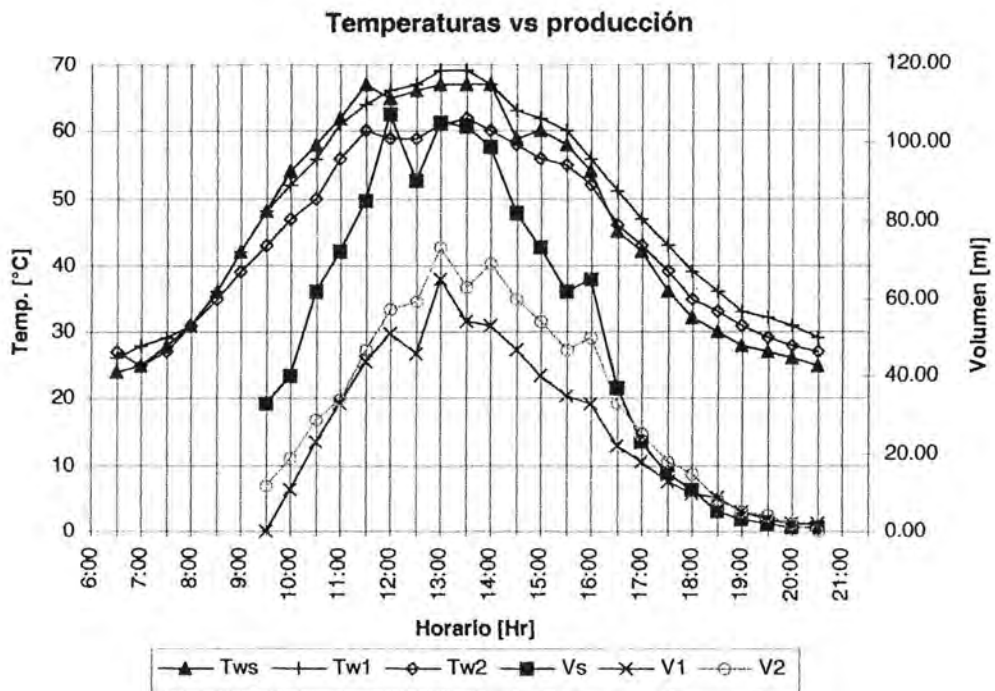
Gráfica V.2.1.- Eficiencias de los dos destiladores (promedio durante los días de prueba)



Gráfica V.2.2.- Radiación vs producción de los destiladores durante un día de prueba (26/02/97).



Gráfica V.2.3.- Comparación de Producción instantánea de los dos destiladores (26/02/97).



Gráfica V.2.4.- Relación de temperaturas y producciones durante el día (26/02/97).

V.3.- Espejos reflejantes.

Los resultados de las variables medidas durante los días de experimentación se muestran por promedio en cada día y se encuentran en las tablas V.3.1 y V.3.2.

Los resultados obtenidos al comparar las producciones de destilado y la eficiencia en los destiladores son:

- Un 45.45% de mayor productividad de destilado en el destilador con espejos respecto al destilador sin espejos en un día particular (11/08/97), como puede apreciarse en la tabla V.3.3.
- La gráfica V.3.1 nos muestra un 17.02 de mayor eficiencia promedio en el destilador con espejos respecto al destilador sin espejos durante todos los días de prueba estos datos son obtenidos de la tabla V.3.4.
- Las gráfica V.3.2 muestra el comportamiento de la radiación y producción de destilado instantáneo en un día de prueba (11/08/97). Observando nos damos cuenta que la radiación solar influye significativamente en la producción del agua destilada; es decir mientras mayor sea la insolación mayor cantidad de agua destilada obtenemos.
- La gráfica V.3.3 señala la relación de las temperaturas del agua en la charola y la producción de destilado donde el comportamiento de temperaturas y producción de

destilado instantáneo en ambos destiladores es muy similar y también podemos observar que en el intervalo de tiempo de las once de la mañana hasta las cuatro de la tarde tanto la temperatura del agua en la charola como la producción de destilado en el destilador son mayores que en el destilador sin espejos.

De acuerdo a los resultados anteriores, se obtiene que en un destilador de caseta de una pendiente con espejos reflejantes anexos se produce una mayor cantidad de destilado con respecto a lo obtenido en uno sin espejos.

Ya que se cuenta con datos registrados en la bibliografía de trabajos similares se puede considerar que la veracidad de los resultados de este trabajo tiene un fuerte sustento al realizarse las pruebas en igualdad de condiciones como las ya mencionadas en la Introducción

Si bien el destilador con espejos tiene una mayor producción de destilado, uno de los factores importantes a considerar es si la cantidad de agua suministrada es la optima en este destilador. A pesar de ello, la capacidad de producción de los dos destiladores fue satisfactoria.

Fecha	Radiación solar promedio H_s [W/m ² -día]		Velocidad viento Vw [m/s]	Temp. ambiente Ta [°C]	Humedad relativa ϕ [%]	Sin espejos					Volumen destilado V _d [ml]
	Directa	Horizontal				Temp. charola Tch _s [°C]	Temp. agua Tw _s [°C]	Temp. vapor Tv _s [°C]	Temp. superficie condensación Tg _s [°C]	Temp. vidrio exterior Tge _s [°C]	
	Domingo 10/08/97	694.38				550.63	1.48	31.45	89.75	54.96	
Lunes 11/08/97	505.8	409.20	2.02	30.77	91.25	47.14	45.83	49.1	47.93	34.93	955.00
Martes 12/08/97	357.05	280.91	2.28	28.63	98	38.92	38.5	40.96	40.33	30.5	655.00

Tabla V.3.1.- Promedios diarios Sin Espejos.

Fecha	Radiación solar promedio H _t [W/m ² -día]		Velocidad viento Vw [m/s]	Temp. ambiente Ta [°C]	Humedad relativa Φ [%]	Con espejos					
	Directa	Horizontal				Temp. charola Tch _s [°C]	Temp. agua Tw _s [°C]	Temp. vapor Tv _s [°C]	Temp. superficie condensación Tg _s [°C]	Temp. vidrio exterior Tge _s [°C]	Volumen destilado V _s [ml]
Domingo 10/08/97	694.38	550.63	1.48	31.45	89.75	56.67	62.26	62.52	59.81	45.67	1651.00
Lunes 11/08/97	505.8	409.20	2.02	30.77	91.25	50.28	50.72	54.21	52.41	37.1	1389.00
Martes 12/08/97	357.05	280.91	2.28	28.63	98	40.75	40.83	44.33	42.88	33.63	779.00

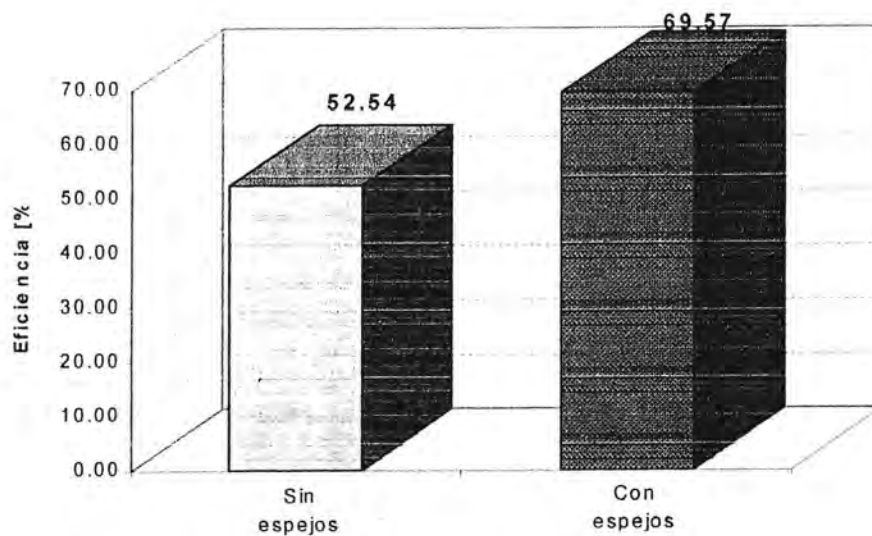
Tabla V.3.2.- Promedios diarios Con Espejos.

Fecha	Radiación solar H _t [Kcal/m ² -día]	Volumen Suministrado [ml]	Sin Espejos	Con Espejos	Diferencia de Producción
			Volumen destilado V _s [ml]	Volumen destilado V _E [ml]	Volumen destilado V _E -V _s [ml]
Domingo 10/08/97	5,681.48	3000.00	1226.00	1651.00	425.00
Lunes 11/08/97	4,398.11	3000.00	955.00	1389.00	434.00
Martes 12/08/97	2,656.93	3000.00	655.00	779.00	124.00

Tabla V.3.3.- Diferencia de producción entre los destiladores.

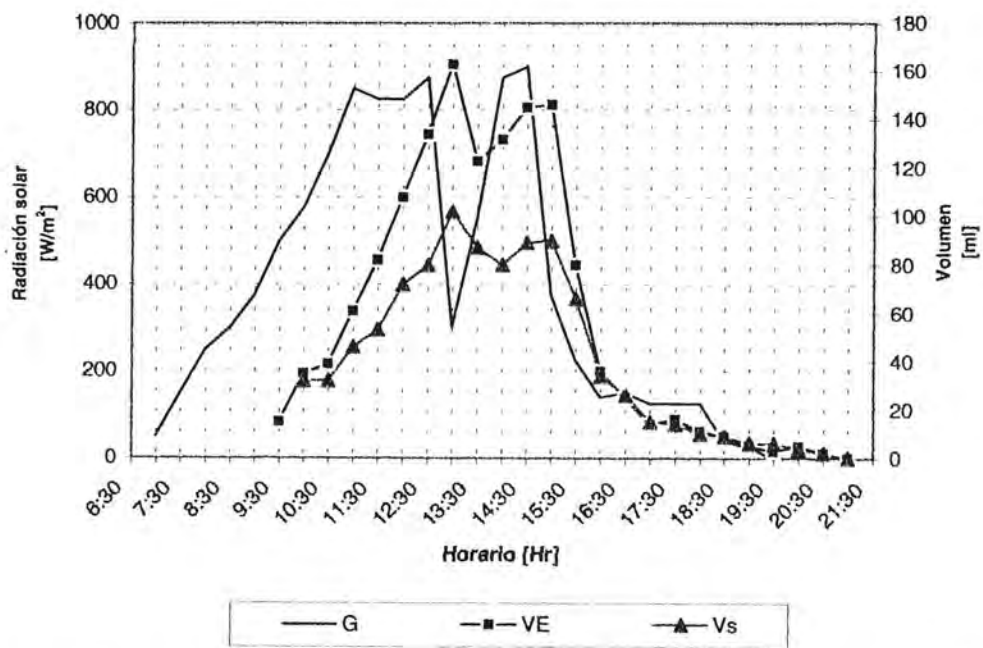
Fecha	Radiación solar Ht [Kcal/m ² - día]	Volumen Suministrado [ml]	Sin Espejos			Con Espejos			Eficiencia $\Delta\eta$ ($\eta_E - \eta_s$) %
			Volumen destilado V_s [ml]	Cantidad de agua destilada Pa_s [Kg/m ² -día]	eficiencia η_s %	Volumen destilado V_E [ml]	Cantidad de agua destilada Pa_E [Kg/m ² - día]	eficiencia η_E %	
Domingo 10/08/97	5,681.48	3000.00	1226.00	4.90	50.06	1651.00	6.60	67.42	17.35
Lunes 11/08/97	4,398.11	3000.00	955.00	3.82	50.38	1389.00	5.56	73.27	22.89
Martes 12/08/97	2,656.93	3000.00	655.00	2.62	57.19	779.00	3.12	68.02	10.83
Promedio	4,245.51	3,000.00	945.33	3.78	52.54	1,273.00	5.09	69.57	17.03

TABLA V.3.4.- Productividades y eficiencias de los dos destiladores.



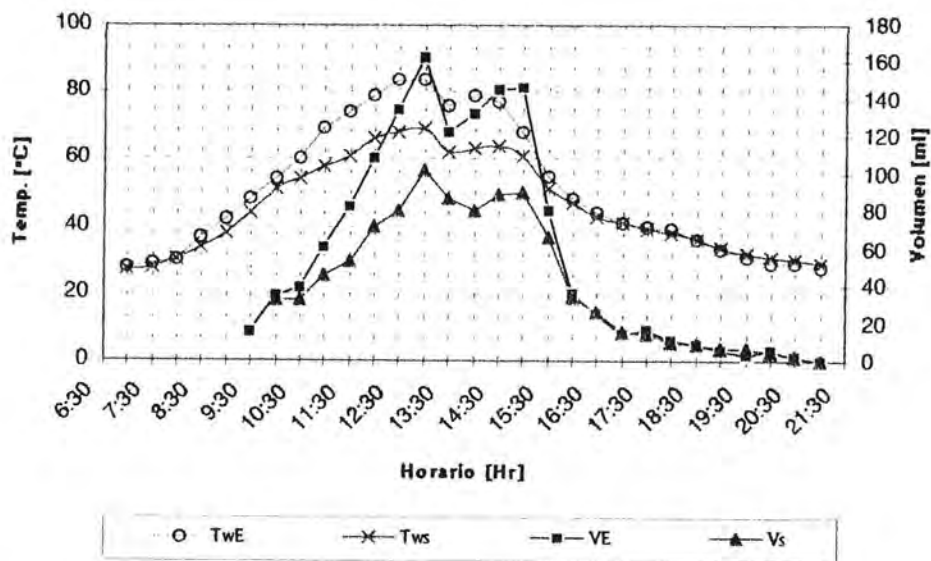
Gráfica V.3.1 -Eficiencia de los destiladores
(promedio durante los días de prueba)

Radiación vs producción



Gráfica V.3.2.- Radiación vs Producción de los destiladores durante un día de prueba (11/08/97)

Temperaturas vs producción



Gráfica V.3.3.- Temperatura vs producción destilado en los destiladores durante un día de prueba (11/08/97)

V.4.- Costos.

En la gráfica V.4.1. se observa el comportamiento de los precios en los diferentes diseños del destilador.

En esta misma gráfica se puede observar que el costo para la construcción del destilador con espejos reflejantes es mucho mayor con \$ 727.56 (40.37%) y 261.36 (11.52%) respecto a los destiladores de simple efecto y doble efecto. Mientras que el destilador de doble efecto es mayor por \$ 466.20 (25.86%) con respecto al simple efecto. Estos precios están en pesos (moneda nacional).



Gráfica V.4.1 Costos para construir los destiladores de 1m² de área de captación

Esta gráfica nos indica que el monto de construcción de los destiladores, se incrementa en costo conforme se le adicionan materiales para mayor producción de destilado.

V.5.- Resultados de análisis microbiológico.

Los análisis microbiológicos se llevaron a cabo en la Secretaría de Salud del Gobierno Estado, en la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

Las muestras que se analizaron son el fluido de trabajo (agua de la bahía de Chetumal) y del destilado, para conocer la calidad de destilado obtenido.

SECRETARIA DE SALUD GOBIERNO DEL ESTADO DE QUINTANA ROO
DIRECCIÓN DE REGULARIZACION SANITARIA
LABORATORIO ESTATAL DE SALUD PUBLICA

REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUA

LOCALIDAD: CHETUMAL, "UQROO"

FECHA DE RECEPCIÓN: 18-06-96

No. mtra	LOCALIZACION	Mesofilicos Col/ml	N.M.P. Coliformes Totales	N.M.P. Coliformes Fecales/ml	E. Coli
AG-036	AGUA DE MAR DESTILADA	-10	NO DETECTABLES	-	-
AGN-022	AGUA DE MAR	4,000	200	3.6	POSITIVO

ANALIZO
BIOL. MARICRUZ MORENO CARDENA

Vo. Bo.
Q.F.B. TERESA A. MARTÍN ESCOBAR

FECHA DE REPORTE: 28-JUN-96

La anterior tabla está transcrita tal como la Secretaría de Salud entrego los resultados; en la cual nos señala que el agua destilada por energía solar está libre de contaminación microbiológica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se determinó tanto el comportamiento real del destilador tipo caseta de una pendiente con las variantes de: diferentes áreas, doble efecto y con espejos reflejantes; así como sus capacidades de producción de agua destilada y las eficiencias que logran alcanzar, siendo sometidos a las condiciones ambientales de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

Se logró determinar que la producción de destilado para diferentes áreas de captación se acercó al comportamiento lineal; La operación del destilador con doble efecto no justifica su incremento en costo de \$ 466.20 (25.86% mayor), 16 % de aumento en Eficiencia y una producción de destilado de 16% mayor, con respecto al destilador simple; Mientras que en el destilador con espejos reflejantes se tuvieron \$ 727.56 (40.37%) de aumento en costo, 17.03 % de aumento en eficiencia y una producción de destilado 45.45% mayor respecto al destilador simple; y 261.36 (11.52%) de aumento en costo con respecto al destilador de doble efecto. Se observa que al adicionar al destilador los elementos que permitan aumentar su producción (de destilado) y eficiencia, se incrementa el costo del equipo, lo cual no se justifica.

A pesar de ello, la capacidad de producción de los destiladores fue satisfactoria.

De acuerdo a la prueba realizada por la Secretaría de Salud del Gobierno del Estado de Quintana Roo, el agua obtenida (destilada) esta libre de contaminantes microbiológicos, faltando realizar las pruebas para conocer su composición química y determinar con exactitud si es apta para consumo humano. Cabe señalar que existen lugares donde consumen agua destilada para

beber [7]; suministrando a su dieta frutas y verduras que compensen los minerales que le faltan al agua.

Queda demostrado que la energía solar aprovechada en la destilación de agua; es funcional y es una alternativa de solución para los lugares apartados de nuestro estado, donde no existe fuente de agua potable, e inclusive para zonas urbanas.

Ya que no se cuenta con datos registrados en la bibliografía de trabajos similares realizados en el estado, se concluye que la veracidad de los resultados de este trabajo tiene un fuerte sustento al realizarse las pruebas en igualdad de condiciones como las ya mencionadas en la Introducción.

RECOMENDACIONES

Al determinarse las condiciones de operación, funcionamiento, análisis microbiológico y costos de construcción de los destiladores solares tipo caseta de una pendiente; se logra entender el modo de estos en el estado, quedando abierta la posibilidad de mejorarlos realizando las siguientes pruebas:

- Diferente espesores de agua.
- Utilizando diferentes fluidos de trabajo.
- Análisis Químicas y Microbiológicos.
- Variando los materiales de construcción.

También hay que tomar en cuenta que si la energía solar nos llega limpia, gratis e inagotable; ¿por que imaginarla fuera de nuestro alcance en su transformación?.

Conociendo los resultados de este trabajo sabemos que la destilación solar es aplicable en el estado, surgiendo ahora la necesidad de fomentar una cultura energética en energía solar.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Barrera, C. E.; Mejía, P. C., Alonso, S. J. , 1992, "Construcción y Prueba de un Destilador Doble Efecto Tipo Caseta". Memorias de la XVI Reunión Nacional de ANES, pp 151-155.
- [2] Curso de Actualización, Colectores Solares Planos, XVIII Semana Nacional de Energía Solar; Hermosillo, Son.
- [3] Curso de Actualización, Diseño Bioclimático de Edificios, XVIII Semana Nacional de Energía Solar; Hermosillo, Son.
- [4] Curso de Actualización, Destilación Solar de Agua, XVII Semana Nacional de Energía Solar; Colima, Col.
- [5] David Lambert, "La Tierra y el Espacio", Ed. Sigmar-Buenos Aires
- [6] Flores, L. V., Hernández, R.F., Reyes, C. D., Romero, D. J., "Análisis Experimental de un Destilador Solar de una Pendiente con y sin Orientación", Memorias de la XX Reunión Nacional de ANES, pp 19-21.
- [7] La revista solar, ANES, ISES. Publicación No. 37, Primavera 1998.
- [8] La revista solar, ANES, ISES. Publicación No. 27, Primavera 1995.

- [9] Notas del Curso de Actualización de Energía solar 1996, Laboratorio de Energía Solar Del Instituto de Investigaciones en Materiales; Temixco, Mor.
- [10] Rafael Almanza Salgado y Felipe Muñoz Gutierrez, "Ingeniería de la Energía Solar", Ed. El colegio Nacional, México; 1994.
- [11] <http://www.bucanero.urg.es/wwwcurso/ccordoba/modelo.html>
- [12] <http://www.geocites.com/capecanavera/3840/interior.html>
- [13] <http://www.iteso.mx/acad/detecno/invest/solar/descriphtml>
- [14] <http://www.cna.com.mx>
- [15] <http://www/photojournal.jpl.nasa.gov/>

GLOSARIO

Absortancia: Relación de la Radiación solar absorbida a la radiación solar incidente.

Absortividad: Es la propiedad de absorción de la radiación solar que poseen los materiales.

Absorbedor: Componente de un colector solar (generalmente metálico), la función de este es captar y retener la máxima cantidad posible de radiación proveniente del sol.

Agua destilada: Agua formada por la condensación del vapor de agua.

Agua natural: El agua tal como se presenta en la naturaleza.

Agua potable: Agua adecuada para beber, cuya ingestión no ocasiona efectos nocivos a la salud.

Agua pura: Compuesto químico formado por el conjunto de moléculas de dos átomos de Hidrógeno y uno de oxígeno.

Agua salobre: Agua con bajo contenido de sales disueltas.

Azimuth: Es el ángulo entre la línea sur norte en un lugar dado y la proyección de la línea tierra-sol en el plano horizontal.

Celda solar: Material semiconductor que presenta un voltaje eléctrico, al absorber energía los electrones periféricos del

material de los fotones que transporta la luz y concentrarse en una región debido a un campo magnético.

Cenit: Punto del hemisferio celeste superior al horizonte que corresponde verticalmente a un lugar de la Tierra.

Colector: Es un elemento que se encarga almacenar y retener la máxima cantidad cómo sea posible la radiación solar.

Conducción: Es la transferencia de calor a través de la materia por intercambio de energía cinética de partícula a partícula.

Conductividad Térmica: Cantidad de calor que puede transferirse por conducción a través de un material por unidad de área y espesor y por unidad de diferencia de temperatura.

Constante solar: Es la intensidad de la radiación solar que llega sobre la atmósfera de la tierra a la distancia promedio tierra-sol, sobre una superficie perpendicular a los rayos del sol. El valor de la constante solar es 1353 W/m^2 , 1.940 cal/cm^2 , o $429.2 \text{ btu/ft}^2\text{.hr}$ (+-1.6%).

Convección: Es la transferencia de calor resultado del movimiento del fluido en la presencia de una diferencia de temperatura.

Cubierta (transparente): Material transparente usado para cubrir la placa colector-absorbedor, de esta manera la energía solar es atrapada por el efecto de invernadero.

Cuerpo negro: Es una superficie ideal que absorbe toda la radiación incidente sobre está y no emite; alternativamente, es

un cuerpo que emite el máximo posible de radiación a una temperatura dada.

Destilación: Operación para separar una sustancia volátil de otra u otras que no son volatizables.

Dureza: Es el término usado para expresar el contenido en el agua de compuestos de Calcio y Magnesio, causantes del consumo elevado de jabón y de incrustaciones en tuberías.

Efecto de invernadero: Es un efecto de transferencia de calor en el que las pérdidas de calor desde la superficie son controladas suprimiendo las pérdidas por convección.

Eficiencia de un destilador solar: Es la relación de la energía colectada por un destilador solar a la energía radiante incidente en el destilador[%].

Emitancia: Relación de la radiación emitida por una superficie real a la radiación emitida por un radiador perfecto a la misma temperatura.

Energía solar: Energía en forma de radiación, emitida desde el sol y generada mediante una reacción nuclear de fusión dentro del sol.

Fotorresistor: Dispositivo hecho principalmente de sulfuro de cadmio(CdS). Al aplicar un voltaje mediante pilas, fluye una corriente proporcional a la intensidad de la Luz que incide sobre él.

pH: Es la expresión que indica el grado de "acidez" o "alcalinidad". El valor 7.0 es "neutro". Valores superiores a 7 son "alcalinos" y valores inferiores a 7 son "ácidos".

Intercambiador de calor: Equipo usado para transferir calor entre dos corrientes de fluido.

Irradiación (irradiancia): Energía radiante que incide en una superficie plana por unidad de área y por unidad de tiempo, normalmente establecida en W/m^2

Langley: Una unidad de la intensidad de la radiación solar, equivalente a 1 cal/cm^2 .

Latitud: Distancia angular norte (+) o sur (-) desde el ecuador medida en grados.

Partes por millón[p.p.m.]: Miligramos de alguna sustancia con relación a un litro de agua. Término que tiende a desaparecer en su uso substituido por "miligramo por litro" [mg/lt].

Piranografo: Dispositivo utilizado para medir la radiación solar directa y difusa en el cual se lleva su registro por gráficas.

Piranómetro: Radiómetro solar que mide la radiación total, directa y difusa.

Pirheliómetro: Instrumento usado para medir la radiación la radiación solar directa.

Placa absorbidora: placa cuya función es captar y retener la máxima cantidad posible de radiación proveniente del sol.

Potabilización: Serie de procesos para hacer el agua apta para beberse.

Radiación difusa: Radiación esparcida proveniente del sol y que llega a una superficie plana con una orientación dada, en un periodo establecido [W/m^2].

Radiación directa: Radiación solar recibida desde un ángulo sólido estrecho medido desde un punto sobre la superficie de la tierra [W/m^2].

Radiación Global: Es la suma de la radiación directa más la radiación difusa que incide en una superficie horizontal [W/m^2].

Radiación infrarroja: Radiación térmica con longitud de onda más larga que el extremo del rojo en el espectro visible.

Radiación solar: Irradiancia monocromática de una superficie por unidad de ancho de banda a una longitud de onda particular [W/m^2].

Radiación terrestre: Es aquella que es dispersada por objetos terrestres [W/m^2].

Radiación total: Es la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se recibe sobre una superficie [W/m^2].

Radiómetro: Instrumento para medir cualquier efecto de radiación.

Reflectancia: Relación de la radiación reflejada desde una superficie con respecto a la que incide sobre la misma.

Superficie selectiva: Es la superficie que absorbe mayor o menor energía de la que emite.

Termopila: Conjunto de termopares conectados en serie configurados de tal manera que existan juntas frías (a temperatura ambiente) y juntas calientes (calentadas por la radiación). La fuerza electromotriz total es igual a la suma de las fuerzas electromotrices de sus elementos (efecto Seebeck).

Transmitancia: Relación de la energía radiante transmitida por un material cualquiera entre la energía radiante incidente sobre la superficie del material; depende del ángulo de incidencia.