



21
2^o

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**Análisis Teórico Experimental
de un Destilador Solar Tipo
Caseta**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F I S I C O

P R E S E N T A :

Rodolfo Fabián Estrada Guerrero

Director UAM M. en C. Manuel Gordon Sánchez

Asesor UNAM Dr. Luis Enrique Sansores Cuevas

MEXICO, D. F.

1993

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

CAPITULO I ANTECEDENTES

I.1	INTRODUCCION.	1
I.2	DESCRIPCION DE LA DESTILACION SOLAR.	3
I.3	FENOMENOS QUE OCURREN EN LA DESTILACION SOLAR.	5
I.4	REVISION BIBLIOGRAFICA.	7

CAPITULO II FUNDAMENTOS TEORICOS

II.1	FORMULACION NUMERICA.	9
II.2	FORMULACION EN DIFERENCIAS FINITAS.	17

CAPITULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL

III.1	DESCRIPCION DEL APARATO EXPERIMENTAL.	21
III.2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.	26
III.3	CALIBRACION DE TERMOPARES.	28
III.4	RESULTADOS EXPERIMENTALES.	30

CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS

IV.1	DISCUSION DE RESULTADOS NUMERICOS.	51
IV.2	DISCUSION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.	55
IV.3	ANALISIS DE DATOS EXPERIMENTALES.	57
IV.4	COMPARACION DE RESULTADOS.	86

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1	CONCLUSIONES.	87
V.2	RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES.	88
	BIBLIOGRAFIA.	89

CAPITULO I ANTECEDENTES

I.1 INTRODUCCION

El agua es una necesidad básica del hombre al igual que el aire y los alimentos; el ser humano siempre ha dependido de los ríos, lagos y los manantiales subterráneos para satisfacer sus necesidades de abastecimiento de agua potable. Sin embargo el uso de estas fuentes de agua no siempre es posible o deseable debido a la presencia de sales y materia orgánica.

Las fuentes más extensas de agua son los mares donde el problema principal es su alta salinidad; una forma de resolver este problema es la destilación que da como resultado la desalinación (eliminación de las sales).

Algunos procesos convencionales de destilación tales como la evaporación por efecto múltiple, la destilación por capa delgada, y la electrodiálisis, requieren gran cantidad de energía y no son muy económicos para requerimientos pequeños de agua potable, los desarrollados en el uso de la energía solar han demostrado ser ideales cuando la demanda de agua no es demasiado grande. En regiones áridas ésta es la única alternativa. Lo que se puede decir en favor de la destilación solar es que es una opción viable para proveer de agua potable en pequeñas comunidades donde los procesos convencionales de destilación resultan ser costosos.

Los tipos de destiladores solares son:

- 1) Destilador tipo escalera, consiste en un arreglo de contenedores en forma escalonada con una cubierta de vidrio que sirve como superficie de condensación, la alimentación se hace en forma de cascada comenzando a llenar la charola superior.
- 2) destilador con evaporador de tela, en el se utiliza un trozo de tela negra de un metro cuadrado como superficie evaporadora, la cual se tiene permanentemente húmeda y en ella se produce la evaporación. La cubierta de condensación es de vidrio.
- 3) Destilador con captador solar auxiliar, éste utiliza un captador para calentar el agua antes de introducirla al destilador, el cual consiste en una charola metálica ennegrecida y una cubierta de vidrio en donde se condensa el destilado.

4) Destilador esférico, consiste en una charola de metal negra que funciona como captador y contenedor del agua a destilar, la cubierta condensadora es un domo de acrílico transparente semiesférico y tiene en su interior un limpiador semejante al de un automóvil para remover el destilado.

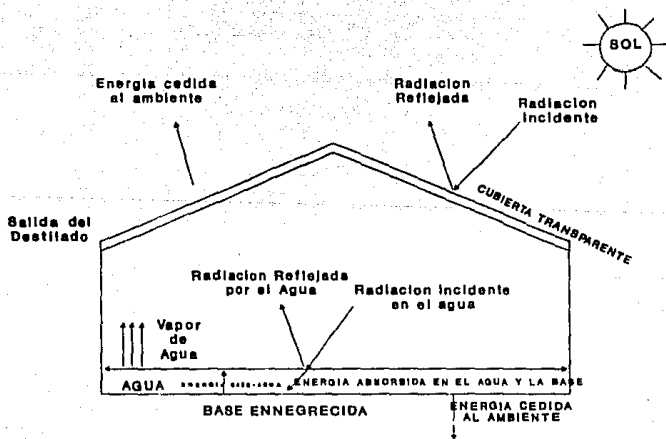
5) Destilador tipo caseta, se construye con una base de metal ennegrecida que sirve como captador y contenedor de agua, la que se encierra en una caseta de vidrio con techo de dos aguas en el cual se condensa el agua destilada.

En el presente trabajo se analiza el destilador solar tipo caseta, el motivo del análisis de este destilador es realizar un experimento para probar el modelo matemático propuesto por Israel Ortega Zamudio en la U.A.M. Azcapotzalco. Se utiliza una red de termopares dentro del destilador por lo que se contará con datos experimentales en cada punto de medición (datos discretos), por lo tanto se utiliza el método numérico de diferencias finitas para la solución teórica, esta solución se compara con los resultados experimentales.

Un destilador solar convencional usualmente se construye de una lámina galvanizada rectangular, dentro de una caseta con una cubierta hecha de cualquier material transparente, la lámina que forma la base se ennegrece para lograr la máxima absorción de la energía solar. El agua salada se coloca dentro del destilador llenando parcialmente la base y se expone a la radiación solar. La cubierta transparente permite que la radiación penetre al destilador y sea absorbida por la base ennegrecida, consecuentemente el agua se calienta y se vaporiza formando una mezcla de aire y vapor de agua entre la cubierta y la superficie del agua que se destila; la cubierta se inclina para permitir que el destilado resbale y se recolecte fuera del dispositivo.

El parámetro más importante que interviene en la destilación solar es la intensidad de la radiación solar que incide sobre el destilador, aparte la energía absorbida en la base se trasfiere parcialmente al agua ya que una pequeña fracción de ella se pierde hacia los alrededores por conducción en la base. Parte de la energía se transfiere del agua hacia la cubierta transparente principalmente por la evaporación de agua que al condensarse en la cubierta transmite esa energía, Una parte de la energía incidente se absorbe y se refleja en la cubierta y luego se transmite por convección y radiación. En la siguiente figura se presenta un diagrama de estos fenómenos (ref 1).

FIG. 1.1 Diagrama del destilador solar tipo caseta



I.3 FENOMENOS QUE OCURREN EN LA DESTILACION

Los fenómenos físicos que intervienen en la destilación solar son convección natural, transferencia de calor por conducción y radiación, evaporación y condensación.

La convección natural o libre, es el resultado del movimiento del fluido debido a cambios de densidad que provienen del proceso de calentamiento. El movimiento del fluido en convección libre, es el resultado de las fuerzas de flotación, cuando su densidad cerca de la superficie de transferencia de calor disminuye debido al calentamiento. Estas fuerzas no estarían presentes si el fluido no sufriera la acción de una fuerza externa como la gravedad. Las fuerzas de flotación que dan lugar a la convección libre se llaman fuerzas de cuerpo. En la convección libre el fluido que se calienta tiene menor densidad y tiende a moverse hacia arriba, el fluido frío tiene mayor densidad y tiende a moverse hacia abajo dando origen a la corriente de convección.

La transferencia de calor por radiación en un destilador es proporcionada por la radiación solar y su intensidad depende en gran parte de las condiciones atmosféricas, la estación del año y el ángulo de incidencia de los rayos solares, la radiación solar total es 1353 Watts/m^2 conocida como constante solar. La radiación solar se transmite desde la cubierta transparente hacia la base, donde parte de la energía se absorbe y otra se aprovecha para el calentamiento del agua, proporcionándole energía suficiente para la evaporación.

Evaporación : Esta se debe a que las moléculas de la superficie adquieren energía suficiente para abandonar el resto del cuerpo de agua, esta energía la obtienen por el calentamiento del líquido. Solamente las moléculas que tienen energía cinética por encima de un valor particular pueden escapar a la fase gaseosa. A temperaturas más elevadas, un mayor número de moléculas tienen energía suficiente para abandonar la superficie líquida y pasar a la fase gaseosa provocando la evaporación del líquido.

Condensación : Este fenómeno se realiza cuando un vapor hace contacto con una superficie que está a una temperatura inferior a la temperatura de saturación de vapor. Cuando se forma la condensación el líquido sobre la superficie condensadora resbala

por efecto de la gravedad. El líquido moja la superficie, se esparce y forma una película, a este proceso se le llama condensación en película, si forma gotitas que escurren uniéndose al hacer contacto con otras gotas, la condensación se llama por gotas [ref 2].

Ali M El-Nashar [3] reporta un procedimiento computarizado para la simulación del funcionamiento de una planta destiladora, se describe el modelo matemático utilizado para la simulación de la planta solar destiladora que utiliza evaporadores de etapas múltiples. Concluye que los resultados experimentales medidos diariamente tienen un alto grado de concordancia por lo que la simulación de la planta destiladora solar con el modelo matemático usado puede predecir la cantidad de agua destilada por día.

J.L. Fernández, Roberto Perez y Rafael Camacho, reportan el análisis de un destilador solar de agua de mar en La Paz Baja California, formulan un modelo matemático dinámico que describe la evolución de las temperaturas, flujos de calor, masa y producción de agua destilada en un destilador de $23m^2$ de área de captación. El destilador reusa el calor rechazado en periodos de 24 horas, el agua es precalentada en un sistema de colectores planos, se pasa a los destiladores donde se aprovecha una cantidad adicional de radiación, el calor rechazado en la condensación es recogido por medio de un fluido secundario y se reusa posteriormente. Concluyen que si el destilador no reusa el calor rechazado en la condensación la producción de agua destilada al día es menor.

J.L Fernández y Norberto Chargoy [4] reportan un destilador solar de etapas múltiples, donde el calor es proporcionado al recipiente de la parte baja que al igual que los de la parte superior contienen el agua a destilar, el vapor producido en la parte baja se condensa en el contenedor que esta inmediatamente arriba a menor temperatura produciendo agua destilada y calor que fluye hacia arriba. Concluyen que la destilación por etapas múltiples es de operación simple y se debe investigar el dimensionamiento del destilador sobre todo en el área de captación con la finalidad de aumentar el rendimiento.

Moustafa y Brusewitz [5] reportan que los factores más importantes que afectan la destilación solar son : la temperatura en la base del destilador, la temperatura de la superficie condensadora y la temperatura del medio ambiente. La reflexión y radiación térmica de la superficie de agua que se evapora y la cubierta transparente son las principales fugas de energía térmica. Concluyen que la eficiencia de la destilación solar, puede mejorarse controlando la

pérdida de radiación en la base y reusando el calor latente de condensación.

N. Rudraiah y T.P. Ssikumar reportan que el efecto de transferencia radiativa en la convección térmica, inhibe la convección en un medio poroso, esto es debido al incremento en la conductividad térmica por los efectos combinados de la porosidad del medio y la radiación. En conclusión, la radiación contrae los poros y causa una estabilización y un incremento en el número de Rayleigh definido en términos de la diferencia de temperaturas de las superficies.

J.J. Close y J. Sheridan [7] reportan que la convección natural en una cavidad llena con vapor y un gas no condensable, donde el vapor es generado en una superficie caliente, las ecuaciones encontradas son las mismas que se aplican a un fluido solo, los parámetros que gobiernan el sistema son los números de Grashof y Prandlt, incluyendo modificaciones en los términos para la fuerza boyante y el calor específico, el estudio es teórico y necesitan un respaldo experimental.

H.K. Wee y R.B. Keey [8] reportan que la transferencia simultánea de calor y aire húmedo por convección natural en una cavidad que contiene aire, toma en cuenta los números de Prandlt y Schmidt. Las ecuaciones que modelan a la cavidad se resuelven por métodos numéricos (Alternación dinámica de dirección implícita D.A.D.I). Concluyen que la transferencia de calor y aire húmedo en una cavidad vertical y una horizontal considerando flujo ascendente es cinco o nueve veces mayor que el flujo descendente. En el caso de convección natural que resulta de la diferencia de temperatura y concentración de vapor de agua, la fuerza boyante corresponde a la diferencia de temperatura. El acuerdo entre el experimento y el modelo matemático hace que este modelo prediga la transferencia de vapor de agua para cualquier gradiente de temperatura, y se puede extrapolar más allá de los límites experimentales especialmente en la región de baja temperatura y concentración de aire húmedo donde el experimento tiene limitaciones.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS

II.1 FORMULACION NUMERICA

Se considera una mezcla de aire-vapor de agua contenida en el interior de un destilador tipo caseta, como se muestra en la figura. Centraremos nuestra atención en el plano X-Y, es decir consideramos el caso bidimensional.

Inicialmente nuestro sistema se encuentra a la temperatura T_0' y a la concentración C_0' , como se observa en la misma figura. En el extremo $Y=L$ se tienen las condiciones C_1' y T_1' . La caída de temperatura que nos interesa es $\Delta T = T_1' - T_0'$ y el cambio en la concentración de la humedad esta dado por $\Delta C = C_1' - C_0'$.

Por conveniencia se definen los siguientes parámetros adimensionales

$$T = \frac{T' - T_0'}{T_1' - T_0'} \quad X = \frac{x}{L} \quad U = \frac{uL}{\nu}$$

$$C = \frac{C' - C_0'}{C_1' - C_0'} \quad Y = \frac{y}{L} \quad V = \frac{vL}{\nu}$$

$$W = w \frac{L^2}{\nu} \quad \phi = \frac{\phi'}{\nu} t = \frac{t' \nu}{L^2}$$

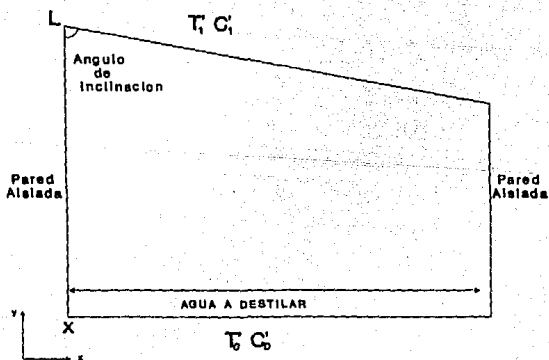
En donde las cantidades primadas representan las correspondientes cantidades dimensionales (ver nomenclatura).

En este análisis se considera que el destilador es muy largo comparado con las dimensiones en x-y. Esto permite considerar el problema como un caso bidimensional.

Se considera que el fluido tiene densidad y viscosidad constantes, esto es $\rho = \text{cte}$; $\nu = \text{cte}$. Bajo estas condiciones las ecuaciones de Navier-Stokes son, en forma vectorial: [ref 2].

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t'} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \right] \mathbf{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{F} \text{-----Ecl}$$

FIG. II.1 Esquema de los prámetros considerados en la solución teórica



Dividiendo la Ec 1 entre ρ nos da:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\nabla\left\{\frac{p}{\rho}\right\} + \nu \nabla^2 v + F \quad \text{con } \nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ ---- Ec 2}$$

Usando la identidad vectorial.

$$(v \cdot \nabla)v = \nabla(1/2 v \cdot v) - v \times (\nabla \times v).$$

Y sustituyéndolo en la Ec 2 tenemos.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla(1/2 v \cdot v) - v \times (\nabla \times v) = -\nabla\left\{\frac{p}{\rho}\right\} + \nu \nabla^2 v + F. \text{----- Ec 3}$$

Como por definición se tiene: $w = \nabla \times v$. La Ec 3 queda.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla(1/2 v \cdot v) - v \times w = -\nabla\left\{\frac{p}{\rho}\right\} + \nu \nabla^2 v + F. \text{----- Ec 4}$$

Aplicando el operador rotacional a la Ec 4 tenemos.

$$\nabla \times \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \times (\nabla(1/2 v \cdot v)) = -\nabla \times (\nabla\left\{\frac{p}{\rho}\right\}) + \nu \nabla \times (\nabla^2 v) + \nabla \times F \text{----- Ec 5}$$

$$\text{Recordando que } \nabla \times \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times v) = \frac{\partial w}{\partial t} \quad \text{y}$$

$$\nu \nabla \times (\nabla^2 v) = \nu \nabla^2 (\nabla \times v) = \nu \nabla^2 w.$$

Sustituyendo estas expresiones en la Ec 5 obtenemos.

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \times (\nabla(1/2 v \cdot v)) - \nabla \times (v \times w) = -\nabla \times (\nabla\left\{\frac{p}{\rho}\right\}) + \nu \nabla^2 w + \nabla \times F \text{ --- Ec 6.}$$

Por otro lado las cantidades $\nabla(1/2 v \cdot v)$ y $-\nabla\left\{\frac{p}{\rho}\right\}$.

son gradientes de funciones, y dado que el rotacional del gradiente de una función escalar es cero, se tiene.

$$\nabla \times (\nabla(1/2 v \cdot v)) = 0 \quad \text{y} \quad -\nabla \times (\nabla\left\{\frac{p}{\rho}\right\}) = 0.$$

y la Ec 6 se transforma en.

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \nabla \times (v \times w) = \nu \nabla^2 w + \nabla \times F. \text{----- Ec 7}$$

Se utiliza la siguiente relación del cálculo vectorial:

$$\nabla \times (v \times w) = v(\nabla \cdot w) - w(\nabla \cdot v) - (v \cdot \nabla)w + (w \cdot \nabla)v.$$

y como por definición $\nabla \cdot w = 0$.

y además de la ecuación de continuidad $\nabla \cdot v = 0$, la expresión anterior da.

$$\nabla \times (v \times w) = (w \cdot \nabla)v - (v \cdot \nabla)w. \quad \text{Sustituyéndolo esto en la Ec 7 se tiene}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t'} + (v \cdot \nabla) - (w \cdot \nabla) v = \nu \nabla^2 w + \nabla \times F. \quad \text{-----Ec 8}$$

En el caso bidimensional, que se considera, el término $(w \cdot \nabla) v$ se anula. Por lo que la ecuación queda:

$$\frac{\partial w}{\partial t'} + (v \cdot \nabla) w = \nu \nabla^2 w + \nabla \times F \quad \text{-----ECUACION DE VORTICIDAD CASO BIDIMENSIONAL.}$$

Escribiendo esta ecuación en forma desarrollada tenemos:

$$\frac{\partial w}{\partial t'} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} = \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \quad \text{---Ec9}$$

Pero de acuerdo con la definición que se hizo de parámetros adimensionales, se pueden escribir los términos de la ecuación 9 de la siguiente forma:

$$X = \frac{x}{L} \quad \text{de donde se tiene} \quad x = XL.$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial X} \quad \text{se tiene} \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2}{\partial X^2}$$

$$Y = \frac{y}{L} \quad \text{despejando y} \quad y = YL.$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial Y} \quad \text{de donde se obtiene} \quad \frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2}{\partial Y^2}$$

$$t' = \frac{t \nu}{L^2} \quad \text{despejando } t' \text{ tenemos } t' = \frac{L t}{\nu} \quad \text{y derivando esta}$$

ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t'} = \frac{\nu}{L^2} \frac{\partial}{\partial t}$$

Esto significa que cada término de la ecuación 9 quedará como.

$$\frac{\partial w}{\partial t'} = \left[\frac{\nu}{L^2} \frac{\partial}{\partial t} \right] \left[\frac{\nu W}{L^2} \right] = \frac{\nu^2}{L^4} \frac{\partial W}{\partial t}$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} = \left[\frac{\nu}{L} U \right] \left[\frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial X} \right] \left[\frac{\nu W}{L^2} \right] = \frac{\nu^2}{L^4} U \frac{\partial W}{\partial X}$$

$$v \frac{\partial w}{\partial y} = \left[\frac{\nu}{L} V \right] \left[\frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial Y} \right] \left[\frac{\nu W}{L^2} \right] = \frac{\nu^2}{L^4} V \frac{\partial W}{\partial Y}$$

Siguiendo un procedimiento análogo para los términos restantes, y ordenando términos semejantes la ecuación 9 queda:

$$\frac{\nu^2}{L^4} \left[\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} \right] = \frac{\nu^2}{L^4} \left[\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right] + \frac{1}{L} \left[\frac{\partial F_y}{\partial X} - \frac{\partial F_x}{\partial Y} \right]$$

Multiplicando toda la ecuación por L^4/ν^2 se obtiene.

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} = \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{L^3}{\nu^2} \left[\frac{\partial F_y}{\partial X} - \frac{\partial F_x}{\partial Y} \right] \quad \text{EC--A.}$$

Si se considera a las fuerzas que actúan sobre el cuerpo como una combinación lineal de ΔT y ΔC , esto es:

$$F_x = -(T\beta_T \Delta T + C\beta_C \Delta C) g \cos\theta$$

$$F_y = -(T\beta_T \Delta T + C\beta_C \Delta C) g \sin\theta$$

De manera que si se toma el último término de la Ec--A, y se sustituye en él las expresiones anteriores se tiene:

$$\frac{\partial F_y}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} [-(T\beta_T \Delta T + C\beta_C \Delta C) g \sin\theta]$$

$$\frac{\partial F_x}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial Y} [-(T\beta_T \Delta T + C\beta_C \Delta C) g \cos\theta]$$

Si se desarrollan estas expresiones:

$$\frac{\partial F_y}{\partial X} = -(\beta_T \Delta T g \sin\theta) \frac{\partial T}{\partial X} - (\beta_C \Delta C g \sin\theta) \frac{\partial C}{\partial X} \quad \text{----Ec10}$$

$$\frac{\partial F_x}{\partial Y} = -(\beta_T \Delta T g \cos\theta) \frac{\partial T}{\partial Y} - (\beta_C \Delta C g \cos\theta) \frac{\partial C}{\partial Y} \quad \text{----Ec11}$$

Se resta la Ec 11 de la Ec 10 para obtener:

$$\left[\frac{\partial F_y}{\partial X} - \frac{\partial F_x}{\partial Y} \right] = -(\beta_T \Delta T) \left[\frac{\partial T}{\partial X} \sin\theta - \frac{\partial T}{\partial Y} \cos\theta \right] -$$

$$-(\beta_C \Delta C) \left[\frac{\partial C}{\partial X} \sin\theta - \frac{\partial C}{\partial Y} \cos\theta \right]$$

Finalmente se multiplica por L^3/ν^2

$$\frac{L^3}{\nu^2} \left[\frac{\partial F_y}{\partial X} - \frac{\partial F_x}{\partial Y} \right] = \frac{g\beta_T \Delta T L^3}{\nu^2} \left[\frac{\partial T}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial T}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] -$$

$$- \frac{g\beta_c \Delta C L^3}{\nu^2} \left[\frac{\partial C}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial C}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right]$$

Pero por definición:

$$Gr_T = \frac{g\beta_T \Delta T L^3}{\nu^2} \quad y \quad Gr_c = \frac{g\beta_c \Delta C L^3}{\nu^2}$$

Se sustituyen estas definiciones en la ecuación anterior:

$$\frac{L^3}{\nu^2} \left[\frac{\partial F_y}{\partial X} - \frac{\partial F_x}{\partial Y} \right] = -Gr_T \left[\frac{\partial T}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial T}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] -$$

$$-Gr_c \left[\frac{\partial C}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial C}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right]$$

Por lo tanto se retoma la ecuación A y se encuentra que.

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} = \nu^2 W - Gr_T \left[\frac{\partial T}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial T}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] -$$

$$-Gr_c \left[\frac{\partial C}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial C}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] \quad \text{-----EcB}$$

La ecuación B expresa la variación de la vorticidad con respecto al tiempo y a las coordenadas x-y. Siguiendo un procedimiento parecido, se pueden obtener ecuaciones diferenciales parciales adimensionales que son de utilidad. Así, por ejemplo, si se utiliza la aproximación de Boussinesq y se supone disipación viscosa despreciable, que no existen fuentes ni sumideros de calor, se llega a la forma adimensional de la ecuación de la

energía, concentración y función corriente. Con esta formulación, se puede escribir el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales parciales acopladas, el cual será el modelo matemático a resolver para analizar el comportamiento del destilador:

$$\frac{1}{a_T} \frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = Pr^{-1} v^2 T \quad \text{ECUACION DE ENERGIA.}$$

$$\frac{1}{a_c} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Y} = Sc^{-1} v^2 C \quad \text{ECUACION DE CONCENTRACION.}$$

$$\frac{1}{a_w} \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} = v^2 W - Gr_T \left[\frac{\partial T}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial T}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] - Gr_c \left[\frac{\partial C}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial C}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] \quad \text{ECUACION DE VORTICIDAD}$$

$$\frac{1}{a_\phi} \frac{\partial \phi}{\partial X} = v^2 \phi + W \quad \text{FUNCION CORRIENTE}$$

$$U = \frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad V = \frac{\partial \phi}{\partial X}$$

Puesto que se considera el caso estacionario, $\partial/\partial t = 0$, por lo que las ecuaciones quedan.

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = Pr^{-1} \nabla^2 T \quad \text{ECUACION DE ENERGIA.}$$

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Y} = Sc^{-1} \nabla^2 C \quad \text{ECUACION DE CONCENTRACION.}$$

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} = \nabla^2 W - Gr_T \left[\frac{\partial T}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial T}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] - \\ - Gr_C \left[\frac{\partial C}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial C}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] \quad \text{ECUACION DE VORTICIDAD}$$

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \phi}{\partial X} = \nabla^2 \phi + W \quad \text{FUNCION CORRIENTE}$$

Y DEFINIENDO

$$U = \frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad V = \frac{\partial \phi}{\partial X}$$

Para mayor detalle en la obtención de las ecuaciones consultar las referencias 2 y de la 9 a la 14.

Las condiciones de frontera usadas para este trabajo están definidas en las siguientes regiones:

I) En $Y = 0$ $T = C = 0$, para flujo paralelo $T = 1$, $C = 0$, o bien $T = 0$, $C = 1$ para flujo a contracorriente.

II) En $Y = 1$ $T = C = 1$, para flujo paralelo $T = 0$, $C = 1$, o bien $T = 1$, $C = 0$ para flujo a contracorriente.

III) En $X = 0$, y dado que en esta superficie hay aislamiento, las condiciones son constantes en la pared del destilador:

$$\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial C}{\partial X} = 0$$

IV) En $X = H$, donde también hay aislamiento, la velocidad es cero, y se tiene:

$$U = V = \frac{\partial \phi}{\partial n}$$

en donde la dimensión n se refiere a la distancia normal a la pared.

11.2 FORMULACION EN DIFERENCIAS FINITAS

El conjunto de ecuaciones que representa el comportamiento del destilador es:

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = Pr^{-1} \nabla^2 T \quad \text{ECUACION DE ENERGIA.}$$

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Y} = Sc^{-1} \nabla^2 C \quad \text{ECUACION DE CONCENTRACION.}$$

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} = \nabla^2 W - Gr_T \left[\frac{\partial T}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial T}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] - \\ - Gr_C \left[\frac{\partial C}{\partial X} \text{Sen}\theta - \frac{\partial C}{\partial Y} \text{Cos}\theta \right] \quad \text{ECUACION DE VORTICIDAD}$$

$$\frac{1}{a_\phi} \frac{\partial \phi}{\partial X} = \nabla^2 \phi + W \quad \text{FUNCION CORRIENTE Y}$$

$$U = \frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad V = \frac{\partial \phi}{\partial X}$$

La formulación en diferencias finitas está ampliamente desarrollada en las referencias 15 y 16, aplicando este método a las ecuaciones se tiene lo siguiente.

ECUACION DE ENERGIA

$$U_{1,j} \frac{T_{1,j} - T_{1-1,j}}{\Delta X} + V_{1,j} \frac{T_{1,j+1} - T_{1,j}}{\Delta Y} = Pr^{-1} \left[\frac{T_{1-1,j} - 2T_{1,j} + T_{1+1,j}}{\Delta X^2} + \frac{T_{1,j+1} - 2T_{1,j} + T_{1,j-1}}{\Delta Y^2} \right]$$

Para simplificar esta ecuación y manejarla en forma sencilla tomamos una discretización regular, esto es $\Delta X = \Delta Y$, y definimos las siguientes constantes:

$$\alpha_1 = \Delta X^{-1} \quad \text{y} \quad \alpha_2 = \Delta X^{-1} Pr^{-1}$$

sustituyendo tenemos:

$$\begin{aligned} \alpha_1 U_{1,j} (T_{1,j} - T_{1-1,j}) + \alpha_1 V_{1,j} (T_{1,j+1} - T_{1,j}) &= \\ = \alpha_2 (T_{1-1,j} - 2T_{1,j} + T_{1+1,j}) + \alpha_2 (T_{1,j+1} - 2T_{1,j} + T_{1,j-1}) \end{aligned}$$

Factorizando α_1 y α_2 en ambos lados de la ecuación:

$$\begin{aligned} \alpha_1 [U_{1,j} (T_{1,j} - T_{1-1,j}) + V_{1,j} (T_{1,j+1} - T_{1,j})] &= \\ = \alpha_2 (T_{1-1,j} - 4T_{1,j} + T_{1+1,j} + T_{1,j+1} + T_{1,j-1}) \end{aligned}$$

tomando $\alpha_3 = \alpha_2 / \alpha_1$, y factorizando tenemos:

$$\begin{aligned} T_{1,j} (U_{1,j} - V_{1,j}) - U_{1,j} T_{1-1,j} + V_{1,j} T_{1,j+1} &= \\ = \alpha_3 (T_{1-1,j} - 4T_{1,j} + T_{1+1,j} + T_{1,j+1} + T_{1,j-1}) \end{aligned}$$

Reescribiendo la ecuación se tiene:

$$\begin{aligned} T_{1,j} (U_{1,j} - V_{1,j} + 4\alpha_3) - T_{1-1,j} (U_{1,j} + \alpha_3) + T_{1,j+1} (V_{1,j} - \alpha_3) - \\ - \alpha_3 T_{1+1,j} - \alpha_3 T_{1,j-1} = 0 \end{aligned}$$

ECUACION DE CONCENTRACION

Siguiendo un procedimiento similar al de la ecuación de la energía y definiendo las constantes $\beta_1 = \Delta X^{-1}$, $\beta_2 = \Delta X^{-1} Sc^{-1}$ y $\beta_3 = \beta_2 / \beta_1$ tenemos:

$$\begin{aligned} U_{1,j} \frac{C_{1,j} - C_{1-1,j}}{\Delta X} + V_{1,j} \frac{C_{1,j+1} - C_{1,j}}{\Delta Y} = Sc^{-1} \left[\frac{C_{1-1,j} - 2C_{1,j} + C_{1+1,j}}{\Delta X} \right. \\ \left. + \frac{C_{1,j+1} - 2C_{1,j} + C_{1,j-1}}{\Delta Y} \right] \end{aligned}$$

Siguiendo los mismos pasos y factorizaciones hechas en la ecuación de la energía se obtiene la ecuación final:

$$C_{1,j}(U_{1,j} - V_{1,j} + 4\beta_j) - C_{1-1,j}(U_{1,j} + \beta_j) + C_{1,j+1}(V_{1,j} - \beta_j) - \\ - \beta_j C_{1+1,j} - \beta_j C_{1,j+1} = 0.$$

ECUACION DE VORTICIDAD

Aplicando el mismo procedimiento que se siguió para la ecuación anterior, definiendo las constantes:

$$\delta_1 = \Delta X^{-1}, \quad \delta_2 = \Delta X^{-2}, \quad \delta_3 = \Delta X^{-1} Gr_T \text{Sen}\theta, \quad \delta_4 = \Delta X^{-1} Gr_T \text{Cos}\theta$$

$$\delta_5 = \Delta X^{-1} Gr_C \text{Sen}\theta, \quad \text{y } \delta_6 = \bar{\Delta} k Gr_C \text{Cos}\theta.$$

$$\gamma_1 = \delta_2/\delta_1, \quad \gamma_2 = \delta_3/\delta_1, \quad \gamma_3 = \delta_4/\delta_1, \quad \Gamma = \delta_5/\delta_1, \quad \text{Y } \gamma_5 = \delta_6/\delta_1,$$

y haciendo factorizaciones en la ecuación de vorticidad, tenemos:

$$W_{1,j}(U_{1,j} - V_{1,j} + 4\gamma_1) - W_{1-1,j}(U_{1,j} + \gamma_1) + W_{1,j+1}(V_{1,j} - \gamma_1) -$$

$$\gamma_1 W_{1+1,j} - \gamma_1 W_{1,j-1} + \Gamma_{1,j}(\delta_3 + \delta_4) - \delta_3 T_{1-1,j} - \delta_4 T_{1,j+1} +$$

$$C_{1,j}(\delta_5 + \delta_6) - \delta_5 C_{1-1,j} - \delta_6 C_{1,j+1} = 0.$$

FUNCION CORRIENTE

Seguimos el mismo procedimiento, y ahora definimos

$$\Omega = \Delta X^{-2}, \quad \text{y tenemos:}$$

$$\Omega \varphi_{1-1,j} + \Omega \varphi_{1+1,j} + \Omega \varphi_{1,j+1} + \Omega \varphi_{1,j-1} - 4\Omega \varphi_{1,j} + W'_{1,j} = 0.$$

Para las definiciones de U y V, tomamos $K = \Delta X^{-1}$, reescribiendo las ecuaciones y sumándolas se obtiene la siguiente ecuación:

$$V'_{i,j} + U'_{i,j} - K\varphi_{i,j,i} + K\varphi_{i-1,j} + 2K\varphi_{i,j} = 0.$$

Para mayor detalle sobre la discretización de las ecuaciones consultar referencias 14 a 18.

Existen programas de computadora (software) diseñado para realizar los cálculos correspondientes a la discretización hecha para estas ecuaciones, uno de ellos y el más útil es el código PHOENICS desarrollado por D.B Spalding, J. Ludwig y H. Qin en Inglaterra (ref. 22). Entonces, el desarrollo de éstos programas está fuera de los objetivos este trabajo, por lo cual únicamente presentamos los resultados numéricos que se obtienen al correr el código, su respectivo análisis y su comparación con los resultados experimentales de este trabajo se presentan en el capítulo IV.

CAPITULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL

III.1 DESCRIPCION DEL APARATO EXPERIMENTAL

El modelo experimental utilizado en la realización del presente trabajo fué construido en el laboratorio de termofluidos de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

El modelo está construido en acrílico transparente, la base es metálica y en su interior tiene una resistencia eléctrica con la que se simula el calentamiento solar, está eléctricamente aislada para evitar posibles cortocircuitos, también se aísla térmicamente para permitir que solo exista transferencia de calor de la base hacia el agua que se va a destilar; las paredes laterales se aíslan con hule espuma para evitar que el agua destilada se condense en ellas. La cubierta es de vidrio transparente y consta de dos placas separadas un centímetro entre las cuales se hace circular agua para refrescarla y provocar que el vapor se condense. Se dispuso de una toma de agua colocada a 7 cm de la base para alimentar el destilador cada vez que se inicia su uso.

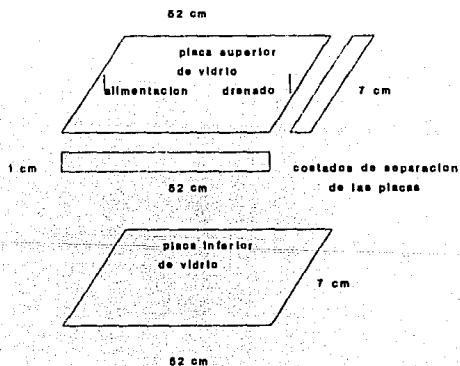
Las dimensiones del destilador son : 47 cm de largo, 7 cm de ancho, y la altura de la cubierta condensadora es variable, en este trabajo se utilizaron tres posiciones de la cubierta con respecto a la superficie de agua, las cuales son 52cm, 37cm y 22cm. Instrumentación : La resistencia utilizada para simular el calentamiento solar tiene un valor de 50 Ohm. Se utilizan termopares de cromel-alumen en parejas de bulbo seco y húmedo en el cuerpo del destilador; cerca de la superficie de agua se colocan cinco termopares para medir la temperatura del vapor producido; en la cubierta también se tienen cinco termopares para medir la temperatura del destilado. Los termopares colocados dentro del cuerpo del destilador están espaciados a intervalos regulares a manera de malla, y miden las temperaturas en esta región con los que se obtienen datos de humedad (concentración de agua). La tensión eléctrica para calentar la resistencia se proporciona con un variador (variac) con el fin de controlar la temperatura y

producir diferentes calentamientos durante la simulación experimental. Para medir la temperatura de estabilización se coloca un termopar sumergido en el agua que se va a destilar.

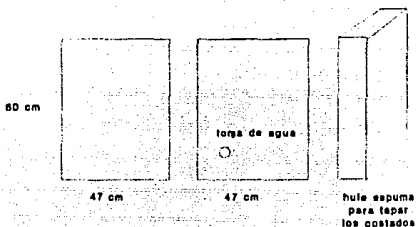
La cubierta se inclina para permitir que el destilado resbale y sea colectado fuera del destilador, para colectar el destilado se hace una ranura en el frente para que parte de la cubierta quede fuera y se pueda tener el agua destilada fuera del destilador. En la siguiente figura se muestra un esquema del destilador.

CONSTRUCCION Y ENSAMBLE DEL DESTILADOR

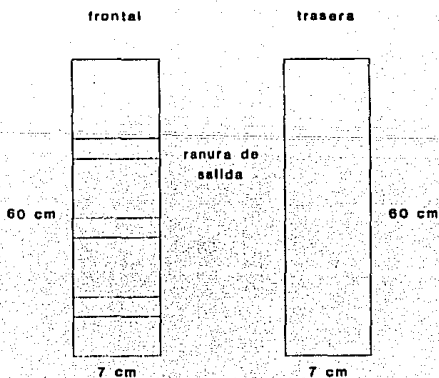
La cubierta consta de dos placas de vidrio de 52cm de largo y 7cm de ancho, la placa superior tiene dos perforaciones un a cada extremo que sirven para alimentarla y drenarla con el agua que la refresca, estas se pegan dejando un centímetro de separación y se sellan con silicón para evitar fugas.



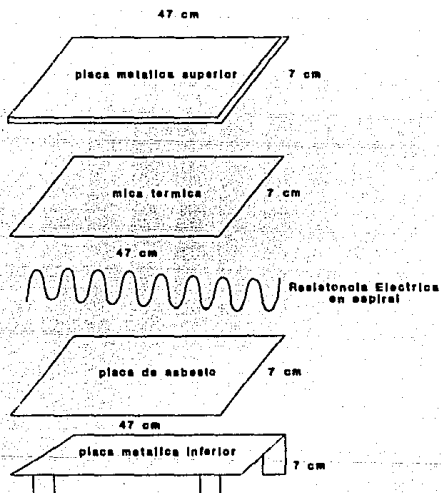
Los costados son de acrílico con un espesor de 8mm y miden 47cm de largo y 60cm de alto, uno de ellos tiene una perforación a 7cm de altura que sirve para alimentarlo cada vez que se usa, se aíslan con hule espuma de 8cm de espesor para evitar que el vapor se condense en ellos.



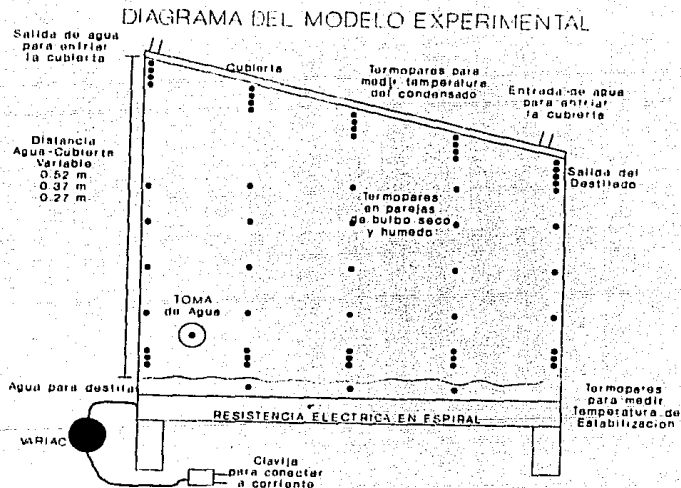
La parte frontal y trasera son del mismo acrílico y miden 7cm de ancho y 60cm de alto, la parte frontal tiene tres ranuras para coleccionar el destilado al variar de posición la cubierta, estas no se aíslan para permitir visibilidad.



La base consta de dos placas metálicas de 47cm de largo y 7cm de ancho entre las que se coloca una resistencia eléctrica, en la placa superior se tiene una mica térmica para permitir el paso de calor hacia el agua, en la placa inferior se pone asbesto para proteger el aparato y al usuario de posibles quemaduras.



Los costados se pegan con las partes frontal y trasera, a ellas se les une la base, la cubierta se deja libre para poder variar la altura, todas las partes pegadas se aíslan con silicón para evitar fugas.



III.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En un destilador solar, la mayor parte de la energía se utiliza en el calentamiento sensible del agua que se va a destilar. Como resultado, el espacio dentro del destilador se llena con una mezcla de aire-vapor. La cubierta está a menor temperatura que la mezcla aire-vapor, como consecuencia el vapor se condensa en la cubierta, este condensado resbala a través de la cubierta inclinada y se colecta fuera del destilador.

Suponemos que el movimiento de la mezcla aire-vapor tiene una regularidad, esto es: la circulación de la mezcla en una cavidad se efectúa por convección natural. Es decir, el proceso de calentar y enfriar (evaporación y condensación) se lleva a cabo en una capa relativamente delgada de la mezcla aire-vapor cerca de la superficie del agua y la cubierta del destilador.

Para nuestro estudio se construyó el destilador descrito anteriormente. El proceso de transferencia de calor y masa se examina bajo condiciones estacionarias, (independiente del tiempo), el agua se calienta por medio de la resistencia eléctrica, el voltaje se regula con el variac para controlar la temperatura del agua y mantener las condiciones de estado estacionario.

La superficie de condensación (cubierta del destilador), se refresca con agua que circula entre ella, de esta manera el modelo experimental nos permite establecer una diferencia de temperatura presente en un destilador solar convencional.

Las mediciones de la distribución de temperaturas en la superficie del agua, cubierta condensadora y cuerpo del destilador, se hicieron con un arreglo de termopares en forma de malla a lo largo y ancho dentro del destilador. Los termopares en la superficie de agua y en la cubierta son sencillos (un solo termopar), en la cavidad se utilizan los arreglos de parejas de bulbo seco y húmedo con la finalidad de obtener las concentraciones de vapor mediante el uso de cartas psicrométricas. Esto no se usa en la superficie del agua y la cubierta porque en estos lugares la concentración del vapor de agua es del 100% .

El agua se calienta con la resistencia eléctrica a un voltaje

determinado, esto se hace para alcanzar la temperatura donde se tiene el estado estacionario, el cual se alcanza cuando la temperatura del agua no cambia mientras el destilador funciona.

El voltaje proporcionado con el variac se varió en el intervalo del 50 al 80 % de salida, tomando intervalos del 10% .

La altura de la cubierta condensadora con respecto a la superficie del agua se varió tomando tres posiciones distintas, en cada una de ellas se hacen las mediciones de temperatura en la superficie, cubierta y cavidad del destilador, en cada posición de la cubierta se toman los mismos rangos de calentamiento.

Las posiciones de la cubierta con respecto a la superficie de agua fueron 21 cm, 37 cm y 52 cm con una inclinación de 40 grados con respecto a la horizontal para permitir que el condensado resbale fuera del destilador.

Los termopares se colocan a intervalos regulares de distancia con una separación de 10 cm, la distancia de los termopares que miden la temperatura en la superficie del agua se colocan a 0.5 cm de ella, los que miden la temperatura del condensado se pegan a la cubierta.

Los datos experimentales obtenidos se grafican tomando las diferentes posiciones de la cubierta, con estos datos se localizan puntos de igual temperatura y humedad para determinar los flujos preferenciales del vapor dentro del destilador y las corrientes de convección.

Los datos de las humedades se obtienen con ayuda de cartas psicrométricas, tomando las lecturas de bulbo seco y húmedo para la cavidad del destilador: en la carta psicrométrica las lecturas se hacen tomando el punto de intersección de la lectura para bulbo seco y la lectura para bulbo húmedo, la lectura de las humedades se hace con la carta que corresponde a la presión atmosférica de la ciudad de México 585 mm de Hg ; pues el experimento se lleva a cabo con esta condición de presión.

III.3 CALIBRACION DE LOS TERMOPARES

Los termopares se construyen con un alambre de cromel y otro de alumen trenzados en uno de los extremos, se funde la trenza para soldarlos y formar un bulbo, no se debe usar soldadura en su construcción porque afecta las mediciones.

Para obtener datos confiables en las mediciones con los termopares, se procedió a calibrarlos a la temperatura de bulbo húmedo. Esto consiste en usar una temperatura equivalente a la de saturación adiabática para mezclas vapor de agua-aire. Para lograr esta calibración se ocupó un higrómetro digital cuyo sensor de humedad es una celda de cloruro de litio y un sensor de temperatura de estado sólido (circuito integrado) encerrados en una caja metálica con ranuras, un termopar para medir la temperatura de bulbo seco, otro para la temperatura de bulbo húmedo y un ventilador para proporcionar un flujo de aire uniforme en todas las mediciones durante la calibración.

Durante las mediciones de calibración se deja que la temperatura de bulbo húmedo se estabilice, se toman las medidas de humedad con el higrómetro y las temperaturas en los termopares de bulbo seco y húmedo. Todos estos datos obtenidos para bulbo húmedo se comparan con los obtenidos en una carta psicrométrica diseñada para la ciudad de México, tomando el dato de humedad del higrómetro y la correspondiente temperatura leída en la carta.

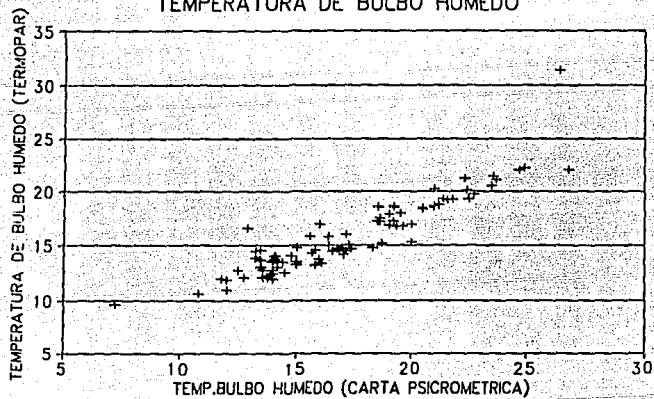
Los datos se analizaron por regresión lineal (mínimos cuadrados) tomando las lecturas para la lectura de bulbo húmedo con el termopar, y la temperatura de bulbo húmedo obtenida de la carta psicrométrica obteniendo la siguiente relación:

$$T_{\text{termopar}} = 1.8 + 0.81T_{\text{carta}}$$

con un coeficiente de correlación de 0.91. Este coeficiente se considera bastante aceptable por lo cual consideramos que los termopares son adecuados para el experimento.

Para mayor detalle sobre la calibración de termopares consultar la referencia 19.

CALIBRACION DE UN TERMOPAR A TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO



III.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales se muestran tabulados a continuación, en cada una de las tablas se muestra la temperatura de estabilización. La temperatura leída en los termopares se da en grados centígrados.

De la tabla 1 a la 4 corresponde a la primera posición de la cubierta con respecto a la superficie de agua que es de 52 cm, de la tabla 5 a la 8 corresponde a la segunda posición que es de 37 cm, y de la tabla 9 a la 11 corresponde a la tercer posición que es de 22 cm. Se muestra la cantidad de agua inicial, la cantidad de agua final y la cantidad de agua destilada para cada una de las posiciones; así como el tiempo de duración de cada prueba.

En las medidas hechas para la tercer posición de la cubierta, no se tomaron en cuenta las mediciones para el 80% debido a que el agua alcanzó su punto de ebullición, lo cual no sucede en un destilador solar.

TABLA No.1

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 48 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	0	1	2	3	4
1	43.0	32.6	31.6	37.0	35.0
2	24.3	30.2	24.7	23.6	33.9
3	27.2	28.4	30.5	25.3	34.4
4 HUMEDO	24.1	24.2	28.2	31.5	27.1
SECO	28.8	29.1	28.4	33.4	28.2
5 HUMEDO	29.8	29.4	30.9	26.4	25.2
SECO	32.8	34.7	33.3	31.7	33.6
6 HUMEDO	22.8	23.6	23.5	23.2	22.8
SECO	26.3	26.4	26.4	24.6	26.3
7 HUMEDO	25.3	28.1	28.0	26.5	26.3
SECO	27.4	34.9	34.6	34.6	30.9
8 HUMEDO	26.1	24.5	25.5	25.6	26.1
SECO	26.3	25.9	26.1	26.6	26.3
9 HUMEDO	33.1	25.7	33.3	25.4	25.7
SECO	33.9	34.2	35.1	34.0	34.2
10 HUMEDO	24.9	25.1	27.2	32.4	26.8
SECO	31.8	30.5	31.5	32.7	34.6

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

//////////	26.9	27.2	26.8	26.4	26.7
------------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué del 50% que corresponde a 61 volts aplicado
La potencia suministrada fué de 74.4 Watts.

Volumen de agua inicial 690.9 cm³

Volumen de agua final 625.1 cm³

Volumen de destilado 65.8 cm³

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 2

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 56.1 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	1	2	3	4	5
1	31.3	30.3	32.0	34.0	33.8
2	34.8	26.7	25.8	29.2	30.4
3	34.3	34.1	31.6	32.1	33.4
4 HUMEDO	26.6	25.0	24.7	28.2	28.4
SECO	26.8	28.9	26.1	30.9	30.3
5 HUMEDO	25.5	29.4	25.4	26.9	23.1
SECO	30.2	31.6	27.6	29.0	23.7
6 HUMEDO	22.4	22.1	22.4	23.6	22.3
SECO	34.7	23.4	23.6	32.1	23.1
7 HUMEDO	25.4	24.9	24.5	25.6	25.1
SECO	33.3	27.3	25.2	34.6	34.0
8 HUMEDO	24.8	24.5	25.8	28.1	26.1
SECO	25.4	25.5	28.4	30.7	26.8
9 HUMEDO	23.9	23.3	23.3	23.6	23.7
SECO	26.7	34.6	26.7	25.3	24.1
10 HUMEDO	24.7	26.8	25.7	28.2	26.6
SECO	29.5	34.6	34.6	35.3	33.3

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

///////	34.2	40.2	41.3	39.8	39.8
---------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué 60% que corresponde a 73.2 volts aplicados. La potencia suministrada fué de 107.2 Watts.

Volumen de agua inicial 853.4 cm³

Volumen de agua final 658 cm³

Volumen de destilado 197.4 cm³

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 3

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 63 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	0	1	2	3	4
1	27.9	25.4	31.2	28.7	29.8
2	25.0	32.4	29.1	34.2	25.8
3	33.0	28.0	31.0	31.1	29.2
4 HUMEDO SECO	29.0 33.9	31.3 31.5	29.5 32.8	27.6 29.7	29.6 30.1
5 HUMEDO SECO	30.7 33.4	30.2 33.3	28.9 30.0	26.3 26.7	25.0 31.3
6 HUMEDO SECO	23.6 33.4	23.1 31.4	23.6 33.2	24.0 33.4	25.1 29.2
7 HUMEDO SECO	25.4 26.9	24.4 25.5	25.8 32.7	26.8 29.9	26.3 30.8
8 HUMEDO SECO	25.2 25.9	23.8 28.8	26.1 27.2	26.0 32.3	25.4 28.9
9 HUMEDO SECO	24.1 28.9	23.2 28.6	25.4 26.6	32.3 34.8	25.0 25.5
10 HUMEDO SECO	24.0 27.7	26.5 28.8	30.3 30.3	29.2 33.3	27.3 31.4

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

//////////	38.8	39.9	43.3	43.9	39.4
------------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué 70% que corresponde a 85.4 volts aplicados.
La potencia suministrada fué 145.9 Watts.

Volumen de agua inicial 855.4 cm³.

Volumen de agua final 658.0 cm³.

Volumen de destilado 197.4 cm³.

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 4

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 63 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	1	2	3	4	5
1	25.9	33.3	32.3	28.2	32.7
2	29.9	26.1	32.1	24.8	23.6
3	31.3	28.3	29.4	25.3	29.4
4 HUMEDO	25.6	30.1	28.1	28.2	28.2
SECO	25.8	32.6	28.6	29.9	29.9
5 HUMEDO	23.5	24.0	24.9	22.9	24.4
SECO	28.4	29.4	30.2	30.2	24.8
6 HUMEDO	27.6	21.7	21.6	21.7	21.6
SECO	34.1	34.2	21.9	22.1	29.9
7 HUMEDO	25.7	25.9	25.4	23.6	24.6
SECO	28.5	26.1	26.8	25.9	34.1
8 HUMEDO	22.9	24.3	23.6	23.1	24.4
SECO	33.9	28.1	26.9	26.4	28.0
9 HUMEDO	28.2	23.3	23.6	22.7	22.8
SECO	33.6	34.6	23.8	23.7	25.4
10 HUMEDO	23.8	26.6	25.4	25.4	24.4
SECO	34.1	29.8	26.8	34.4	34.6

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

//////////	33.6	34.3	33.7	33.7	34.6
------------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué 80% que corresponde a 97.6 volts aplicados.
La potencia suministrada fué 190.5 Watts.

Volumen de agua inicial 855.4 cm³.

Volumen de agua final 658 cm³.

Volumen de destilado 197.4 cm³.

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 5

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 43 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	1	2	3	4	5
1	40.0	36.1	43.4	43.3	37.3
2	28.5	24.1	30.4	23.4	23.2
3	26.4	26.1	26.4	27.2	35.0
4 HUMEDO	24.3	27.1	27.4	24.9	25.7
SECO	29.7	29.6	27.6	31.3	30.5
5 HUMEDO	24.6	26.3	28.7	25.7	26.2
SECO	31.1	29.5	29.4	28.3	32.1
6 HUMEDO	26.5	26.8	26.1	25.9	27.4
SECO	34.7	28.0	26.3	32.1	34.2
7 HUMEDO	27.2	22.6	26.7	28.6	23.4
SECO	27.3	31.6	31.8	35.4	34.3
8 HUMEDO	24.1	23.9	23.0	23.4	23.7
SECO	34.5	25.2	24.6	24.5	23.8

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

//////////	28.6	30.2	29.1	28.7	30.4
------------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué 50% que corresponde a 61 volts aplicados.
La potencia suministrada fué 74.4 Watts.

Volumen de agua inicial 658.0 cm³.

Volumen de agua final 592.2 cm³.

Volumen de destilado 65.8 cm³.

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 6

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 56 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	1	2	3	4	5
1	52.9	38.6	51.2	50.2	52.3
2	34.2	25.0	24.3	35.2	33.9
3	34.9	31.3	35.1	28.6	28.6
4 HUMEDO	26.8	31.6	30.2	25.3	26.6
SECO	30.1	32.6	30.6	30.2	29.9
5 HUMEDO	29.7	29.7	24.0	24.2	26.6
SECO	32.5	30.7	33.7	26.9	32.3
6 HUMEDO	26.1	29.7	28.2	27.0	27.6
SECO	30.7	30.8	34.3	28.3	28.0
7 HUMEDO	31.3	27.4	25.7	34.8	25.1
SECO	35.1	34.9	26.4	35.3	33.7
8 HUMEDO	24.4	25.4	26.1	25.1	24.3
SECO	25.2	25.8	29.1	27.6	33.8
TERMOPARES DE LA CUBIERTA					
//////////	31.6	35.1	35.5	35.6	34.5

La lectura en el variac fué 60% que corresponde a 73.2 volts aplicados.
La potencia suministrada fué 107.2 Watts.

Volumen de agua inicial 658.0 cm³.

Volumen de agua final 526.4 cm³.

Volumen de destilado 131.6 cm³.

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 7

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 63.4 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	1	2	3	4	5
1	59.1	59.7	58.8	58.9	58.2
2	35.4	37.4	35.3	32.6	34.5
3	26.4	24.2	35.4	39.3	24.2
4 HUMEDO	28.5	24.8	27.0	27.6	28.9
SECO	28.7	27.7	28.9	29.9	30.4
5 HUMEDO	29.7	29.6	27.1	24.4	27.5
SECO	30.0	32.0	30.2	31.4	34.2
6 HUMEDO	29.9	26.7	27.1	26.9	26.8
SECO	31.8	34.0	29.8	27.9	34.4
7 HUMEDO	27.6	26.5	29.1	26.8	24.4
SECO	39.4	30.1	32.4	32.8	34.2
8 HUMEDO	27.6	25.3	24.8	26.5	24.3
SECO	33.7	31.3	36.1	32.4	24.5

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

//////////	34.2	44.6	43.6	43.6	45.2
------------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué 70% que corresponde a 85.4 volts aplicados.
La potencia suministrada fué 145.9 Watts.

Volumen de agua inicial 658.0 cm³.

Volumen de agua final 559.3 cm³.

Volumen de destilado 98.7 cm³.

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 8

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 70.1 °C

TERMOPAR #	POSICIONES				
	1	2	3	4	5
1	64.4	63.5	64.5	62.9	65.6
2	45.6	34.6	37.8	26.1	32.9
3	34.3	34.6	35.9	35.4	25.9
4 HUMEDO	28.4	25.8	27.1	26.7	27.2
SECO	30.7	28.5	29.4	28.9	28.1
5 HUMEDO	26.9	30.4	30.0	31.7	27.6
SECO	32.9	33.2	31.8	33.6	32.9
6 HUMEDO	27.6	27.6	30.4	34.7	30.4
SECO	28.9	31.6	34.7	42.6	34.7
7 HUMEDO	27.7	25.5	33.4	25.4	31.8
SECO	29.9	30.0	35.2	35.6	35.4
8 HUMEDO	26.7	28.8	30.0	25.0	25.3
SECO	27.1	30.4	30.6	27.1	28.4

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\	32.3	50.6	52.3	53.3	46.2
----------------------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué 80% que corresponde a 97.6 volts aplicados.
La potencia suministrada fué 190.5 Watts.

Volumen de agua inicial 658.0 cm³.

Volumen de agua final 329.0 cm³.

Volumen de destilado 329.0 cm³.

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 9

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 50.2 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	1	2	3	4	5
1	46.1	41.1	44.5	45.1	44.8
2	30.4	27.2	30.9	34.8	35.4
3	25.1	26.4	35.1	25.5	26.8
4 HUMEDO	31.3	24.9	25.2	26.7	25.8
SECO	31.9	33.9	32.1	30.7	33.3
5 HUMEDO	28.1	26.1	26.1	24.1	24.4
SECO	30.2	26.7	27.8	25.1	27.3
6 HUMEDO	28.1	25.7	27.0	25.6	33.6
SECO	29.2	34.1	27.3	34.6	35.0
7 HUMEDO	25.7	24.6	24.1	24.7	24.6
SECO	31.2	24.7	24.9	28.9	24.9
8 HUMEDO	27.9	31.2	24.9	25.1	25.7
SECO	28.8	34.9	31.9	25.1	26.6

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\	33.1	30.1	29.8	28.9	29.9
----------------------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué 50% que corresponde a 61 volts aplicados.
La potencia suministrada fué 74.4 Watts.

Volumen de agua inicial 658.0 cm³.

Volumen de agua final 559.3 cm³.

Volumen de destilado 98.7 cm³.

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 10

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 68.1 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	1	2	3	4	5
1	47.3	47.6	55.3	60.6	63.3
2	34.9	32.6	33.1	35.3	35.1
3	28.3	35.7	33.8	24.4	33.7
4 HUMEDO SECO	25.7 31.3	23.6 32.3	24.5 33.7	23.6 33.7	33.4 35.0
5 HUMEDO SECO	26.3 29.7	25.9 28.6	27.2 29.5	25.4 32.4	23.2 27.8
6 HUMEDO SECO	26.2 27.7	24.5 28.2	26.1 27.2	29.2 29.4	25.1 34.6
7 HUMEDO SECO	27.0 31.7	23.0 24.6	24.1 25.7	23.0 24.4	22.7 23.1
8 HUMEDO SECO	25.2 29.8	33.4 33.9	25.4 27.7	24.8 34.0	23.9 26.8

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

//////	34.2	52.6	52.8	53.3	52.7
--------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué 60% que corresponde a 73.2 volts aplicados.
La potencia suministrada fué 107.2 Watts.

Volumen de agua inicial 658.0 cm³.

Volumen de agua final 493.5 cm³.

Volumen de destilado 164.5 cm³.

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

TABLA No. 11

TEMPERATURA DE ESTABILIZACION 78.1 °C

TERMOPAR	POSICIONES				
	#	1	2	3	4
1	59.8	64.3	62.2	69.3	60.6
2	32.4	29.6	24.9	22.5	25.5
3	34.9	26.8	34.6	34.2	35.5
4 HUMEDO SECO	24.7 32.1	23.2 33.2	25.1 33.4	30.8 35.2	23.6 25.8
5 HUMEDO SECO	29.0 29.1	24.8 31.0	23.3 23.7	23.6 27.1	23.1 32.6
6 HUMEDO SECO	25.0 27.7	25.4 27.2	25.1 34.6	25.9 34.8	32.0 32.0
7 HUMEDO SECO	23.7 32.9	24.0 26.7	23.7 26.7	23.2 24.2	22.6 26.3
8 HUMEDO SECO	24.6 26.1	23.2 25.1	23.3 23.7	23.6 27.1	23.1 32.6

TERMOPARES DE LA CUBIERTA

//////////	32.1	47.2	34.6	35.3	36.7
------------	------	------	------	------	------

La lectura en el variac fué 70% que corresponde a 85.4 volts aplicados.
La potencia suministrada fué 145.9 Watts.

Volumen de agua inicial 658.0 cm³.

Volumen de agua final 493.5 cm³.

Volumen de destilado 164.5 cm³.

Duración de la prueba en estado estacionario : 5 horas.

Las tablas anteriores contienen los datos experimentales de las temperaturas obtenidas de la siguiente manera.

La temperatura de estabilización se mide con un termopar sumergido en el agua, esta nos sirve para tener las condiciones de estado estacionario y realizar las mediciones en el volumen dentro del destilador, los termopares 1, 2 y 3 miden la temperatura del vapor cerca de la superficie de agua en donde se tiene el 100% de humedad por lo que no es necesario un termopar para bulbo húmedo; esta consideración también se hace para las mediciones en la cubierta.

El resto de los datos se obtienen con los termopares dentro del volumen del destilador arreglados en parejas de bulbo seco y húmedo, a uno de los termopares se le une un depósito pequeño con agua y una mecha de algodón que enreda el bulbo para mantenerlo húmedo.

A continuación se muestran tabulados los datos correspondientes a las concentraciones de humedad obtenidas de la carta psicrométrica, los datos se dan en porcentajes de humedad (concentración de vapor). Las posiciones de la cubierta son las mismas que se utilizaron para medir las temperaturas.

De la tabla 1 a la 4 corresponden a la primera posición, de la 5 a la 8 a la segunda y de la 9 a la 11 a la tercera. Las lecturas correspondientes a el 80% se desecharon por la misma razón que en el caso de las temperaturas.

TABLA No. 1

TERMOPAR		POSICIONES			
#	1	2	3	4	5
4	68	68	100	85	90
5	80	72	90	72	55
6	76	76	85	90	85
7	85	60	60	55	72
8	100	90	95	90	100
9	90	50	95	50	50
10	57	72	76	100	55

Lectura en el variac 50% correspondiente a 61 volts aplicados.
Potencia suministrada 74.4 Watts.

TABLA No. 2

TERMOPAR		POSICIONES			
#	1	2	3	4	5
4	100	76	90	85	90
5	68	85	76	85	100
6	36	90	90	53	90
7	55	85	90	50	50
8	100	90	85	76	100
9	85	40	76	85	90
10	64	55	50	46	60

Lectura en el variac 60% correspondiente a 73.2 volts aplicados.
Potencia suministrada 107.2 Watts.

TABLA No. 3

TERHOPAR	POSICIONES				
	#	1	2	3	4
4	68	100	80	85	100
5	85	85	90	100	65
6	45	64	45	50	72
7	85	90	60	76	72
8	100	68	95	68	76
9	72	64	90	85	100
10	76	85	100	44	48

Lectura en el variac 70% correspondiente a 85.4 volts aplicados.
Potencia suministrada 145.9 Watts.

TABLA No. 4

TERHOPAR	POSICIONES				
	#	1	2	3	4
4	100	56	100	92	92
5	64	64	64	56	100
6	60	36	100	90	48
7	76	100	85	90	46
8	40	68	68	85	68
9	72	40	100	90	80
10	40	76	90	49	43

Lectura en el variac 80% correspondiente a 97.6 volts aplicados.
Potencia suministrada 190.5 Watts.

TABLA No. 5

TERMOPAR	POSICIONES				
8	1	2	3	4	5
4	64	85	100	60	72
5	58	76	90	76	68
6	55	90	100	60	60
7	100	46	64	60	40
8	46	80	90	90	100

Lectura en el variac 50% correspondiente a 61 volts aplicados.
Potencia suministrada 74.4 Watts.

TABLA No. 6

TERMOPAR	POSICIONES				
8	1	2	3	4	5
4	76	95	100	72	76
5	85	90	50	85	68
6	76	95	68	95	100
7	72	60	100	100	55
8	100	100	85	85	50

Lectura en el variac 60% correspondiente a 73.2 volts aplicados.
Potencia suministrada 107.2 Watts.

TABLA No. 7

TERMOPAR	POSICIONES				
#	1	2	3	4	5
4	100	76	95	85	95
5	100	85	85	58	60
6	95	55	85	95	55
7	40	72	85	68	46
8	68	64	36	68	100

Lectura en el variac 70% correspondiente a 85.4 volts aplicados.
 Pptencia suministrada 145.9 Watts.

TABLA No. 8

TERMOPAR	POSICIONES				
#	1	2	3	4	5
4	95	76	85	85	95
5	60	80	85	85	68
6	95	76	72	60	72
7	85	72	85	46	72
8	95	95	100	85	76

Lectura en el variac 80% correspondiente a 97.6 volts aplicados.
 Pptencia suministrada 190.5 Watts.

TABLA No. 9

TERMOPAR	POSICIONES				
#	1	2	3	4	5
4	100	50	55	76	55
5	95	100	95	95	76
6	95	52	100	52	85
7	64	100	100	68	100
8	95	80	55	100	95

Lectura en el variac 50% correspondiente a 61 volts aplicados.
 Pptencia suministrada 74.4 Watts.

TABLA No. 10

TERMOPAR	POSICIONES				
#	1	2	3	4	5
4	64	50	50	43	85
5	76	76	85	60	72
6	95	72	95	100	50
7	72	90	90	90	100
8	72	100	85	100	85

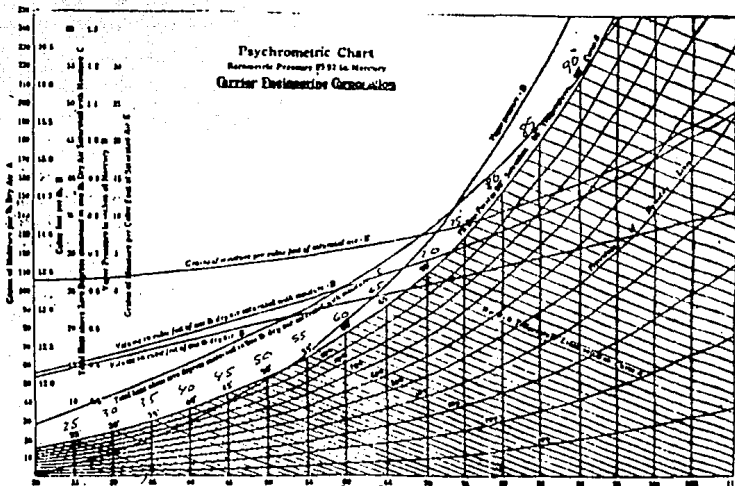
Lectura en el variac 60% correspondiente a 73.2 volts aplicados.
 Pptencia suministrada 107.2 Watts.

TABLA No. 11

TERNOPAR	POSICIONES				
0	1	2	3	4	5
4	55	43	55	72	80
5	100	64	36	55	50
6	85	85	50	50	100
7	43	85	76	95	68
8	85	80	100	72	50

Lectura en el variac 70% correspondiente a 85.4 volts aplicados.
 Pptencia suministrada 145.9 Watts.

Las tablas anteriores contienen los datos de humedad relativa, estos dan en porcentajes la concentración de vapor y se obtienen con ayuda de una carta psicrométrica mostrada a continuación.



CARTA PSICROMETRICA

Para leer los datos de la carta anterior se procede de la siguiente manera.

Se toma el dato que corresponde a bulbo seco y se localiza en el eje que tiene las temperaturas de bulbo seco, se hace lo mismo con el dato para bulbo húmedo, se busca la intersección de las líneas que corresponden a cada temperatura la cual indica la cantidad de humedad para las temperaturas tomadas, este procedimiento se hace con cada pareja de datos obtenidos para bulbo seco y húmedo.

Los datos leídos de la carta psicrométrica se utilizan para construir gráficas y localizar zonas de igual humedad, esto sirve para determinar si se tiene convección o difusión del vapor en el aire que hay dentro del destilador.

CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS

IV.1 DISCUSION DE RESULTADOS NUMERICOS

Los resultados obtenidos resolviendo numéricamente las ecuaciones se hacen considerando un estado estacionario, la transferencia de calor entre la cavidad y los alrededores se calcula tomando un coeficiente global de transferencia de calor (U), al que se le dieron los valores de 5, 10 y 20 W/m^2K . El número de Prandtl para la mezcla aire vapor se toma menor que el dado para aire puro ($Pr=0.1$), las temperaturas de estado estacionario se toman $95^{\circ}C$ para la base y de $20^{\circ}C$ para la cubierta condensadora.

los resultados numéricos se obtienen usando el código PHOENICS, se toma un dominio de discretización con 35 celdas en el eje X y 25 en el eje Y dando un total de 725 celdas obteniendo los siguientes resultados:

Para el coeficiente global de transferencia de calor con un valor de $U = 10 W/m^2K$, se tiene que el vapor asciende por la parte central de la cavidad y desciende a lo largo de la cubierta dando evidencia de que la convección se lleva a cabo a cada lado del destilador. Para los otros valores de U se obtienen resultados similares.

Para el mismo valor de U se tiene que las isoterms muestran las regiones de mayor temperatura agrupadas al centro de la cavidad siguiendo la trayectoria de ascenso del vapor, la menor temperatura se presenta en la parte inferior de la cubierta donde se condensa el vapor. Para los otros valores de U se obtienen resultados similares.

Cuando se considera el caso en el que sólo hay difusión, el perfil de temperatura muestra una isoterma con un valor ligeramente superior a la temperatura ambiente. Cuando se considera el efecto de la convección y el global (convección y difusión) se obtienen resultados muy similares mostrando que el efecto de difusión es poco relevante comparado con la convección.

Los datos numéricos se obtuvieron en el instituto de ingeniería usando el código PHOENICS con la ayuda de José Luis Fernández Zayas y Arturo Palacio.

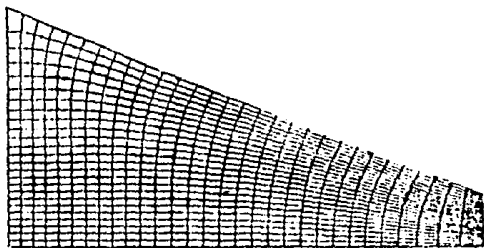


Fig 4.1 malla tomada para la simulación numérica 750 celdas

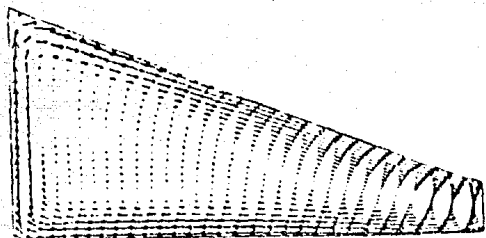


Fig. 4.2 campo de velocidades obtenido numericamente.

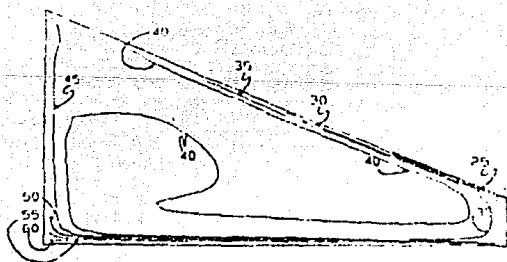


Fig. 4.3 lineas isotérmicas obtenidas numericamente.

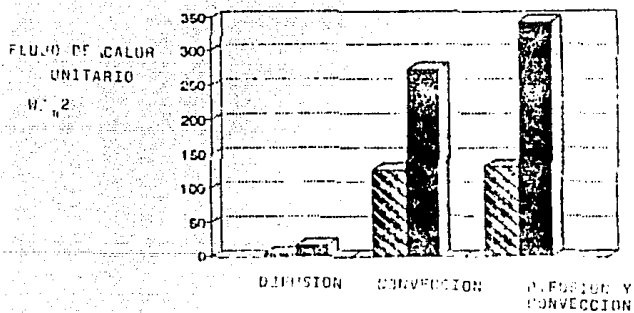
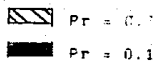


Fig. 4.4 mecanismos de transferencia de energía.



IV.2 DISCUSION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Haciendo un análisis de los resultados experimentales tenemos lo siguiente:

Para la altura correspondiente a la primera posición encontramos que las isotermas se agrupan al centro de la cavidad mostrando una región de mayor temperatura en la dirección de ascenso del vapor, indicando que la convección se lleva acabo al centro de la cavidad siguiendo la trayectoria de la cubierta. En la segunda posición las isotermas se agrupan más en la parte baja y alta del destilador y disminuyen en la parte central, esto muestra que la convección tiene menor influencia en este caso comenzando a manifestarse más el fenómeno de difusión en la dirección de ascenso del vapor. Para la tercer posición de la cubierta se observa que es más notable el agrupamiento de isotermas en la zona baja cercana a la superficie de agua, por lo que indica una disminución de la temperatura en la dirección de ascenso del vapor, esto indica que la difusión tiene mayor influencia que la convección a menor altura de la cubierta. Con respecto a las gráficas de concentración de humedad se observa lo siguiente.

Para la primer posición de la cubierta las zonas de humedad se agrupan al centro y en la parte alta de la cavidad indicando una disminución de la cantidad de humedad en la dirección de ascenso del vapor, el mayor agrupamiento se tiene en la parte alta cerca de la superficie de condensación, esto muestra que la convección está presente en el destilador. En la segunda posición observamos que la concentración de humedad se manifiesta en la parte baja siendo mayor al centro y en la parte alta de la cavidad, lo que indica que la difusión del vapor en el aire de la cavidad se efectúa en la dirección de ascenso del vapor, la convección sigue estando presente aunque es menor su influencia. Para la tercer posición observamos que la concentración de humedad se agrupa en mayor cantidad en la parte baja, disminuye un poco en la parte central y aumenta en la parte alta, la concentración de humedad va disminuyendo en la dirección de ascenso del vapor, este mayor agrupamiento en la cantidad de humedad en las regiones mencionadas indica que la difusión del vapor en el aire de la cavidad tiene mayor influencia que la convección libre del mismo.

Del analisis anterior podemos decir que conforme la distancia entre la cubierta y el espejo de agua es menor, la difusi3n del vapor tiene mayor influencia que la convecci3n.

Experimentalmente se observ3 que en algunas zonas del destilador las isotermas y la cantidad de humedad se agrupan, dando evidencia de una circulaci3n del vapor en esas zonas, esto se debe a que el vapor al ir subiendo choca con las paredes y origina pequenos remolinos, por otro lado; cuando choca con la cubierta el vapor desciende y se mezcla con el vapor que va hacia arriba y provoca la circulaci3n en esas zonas, a esto se debe que la temperatura y cantidad de humedad en estos lugares no varíe mucho.

Con respecto a la cantidad de agua destilada que se obtuvo en cada una de las pruebas, se tiene en promedio que la diferencia en la cantidad de destilado para cada posici3n no es grande, por lo que se puede decir que un destilador en el que predomina la convecci3n tambi3n es eficiente comparado con uno en el que la difusi3n predomina.

Para la primera posición de la cubierta con respecto a la superficie del agua, que corresponde a 52 cm de altura y 50% en el variac correspondiente a 61 volts aplicados se tiene lo siguiente: En la gráfica hecha para las isotermas (fig 4.5) con los datos obtenidos para bulbo seco en los termopares, se observa que en la parte baja cerca de la superficie del agua se tienen zonas de igual temperatura ligeramente aisladas, subiendo en dirección de la cubierta se encuentra un mayor agrupamiento de estas zonas, aproximadamente a tres cuartos de altura encontramos un agrupamiento de isotermas que indican un aumento del gradiente temperatura que va de 31 a 34 °C. Con respecto a la gráfica hecha para las humedades (fig 4.6), se observa que aproximadamente a tres cuartos de altura se tiene un agrupamiento de zonas de igual humedad en donde se detecta una disminución del porcentaje de vapor que va de 72 a 60 % de humedad.

En la misma posición de la cubierta y con una lectura en el variac de 60 % que corresponde a 73.2 volts aplicados se observa lo siguiente. En la gráfica para las isotermas (fig 4.7) se observa que aproximadamente a un tercio de altura se tienen zonas isotérmicas aisladas, un ligero agrupamiento en la parte baja cercano a la superficie de agua que indica un descenso en la temperatura que va de 28 a 25 °C, otro agrupamiento de isotermas a dos tercios de altura indicando que la temperatura desciende de 25 a 23 °C. En la gráfica correspondiente a la humedades (fig 4.8) se observan algunos puntos de igual humedad aislados aproximadamente a un tercio de altura, un ligero agrupamiento en la parte baja indicando un descenso de la cantidad de humedad que va del 85 al 76 %, aproximadamente a dos tercios de altura otro agrupamiento donde la humedad también desciende del 50 al 36 %, en la parte alta cercano a la cubierta se observa que la humedad desciende del 85 al 40 %, aproximadamente a la misma altura se detecta que la humedad aumenta del 90 al 100 %. En la misma posición de la cubierta y una lectura en el variac de 70 % correspondiente a 85.4 volts aplicados se tiene: En la gráfica construida para las isotermas (fig 4.9) se observa que en la parte central hay zonas isotérmicas aisladas, se

tiene un agrupamiento en la parte izquierda aproximadamente a tres cuartos de altura que indica un descenso de temperatura que va de 30 a 25 °C. En la gráfica correspondiente a las humedades (fig 4.10) se observan dos agrupamientos de zonas de igual humedad en la parte baja donde ambos indican un descenso en la concentración de humedad que va del 80 al 66 % pegado a la parte izquierda y otro al centro que va del 90 al 80 % , aproximadamente a la mitad de altura se observa que la humedad desciende del 60 al 45 % , aproximadamente a tres cuartos de altura se observa del lado izquierdo un aumento en la humedad que va del 80 al 100 % y en la parte central un ligero aumento del 80 al 85 % de humedad.

En la misma posición de la cubierta y una lectura del 80 % en el variac correspondiente a 97.6 volts aplicados, se observa en la gráfica para las isoterms (fig 4.11) que hay zonas aisladas de igual temperatura en la parte superior e inferior, aproximadamente al centro cerca del costado izquierdo se tiene un agrupamiento de isoterms indicando un aumento de temperatura que va de 31 a 34 °C y en la parte central otra zona de isoterms donde se observa un descenso de temperatura de 24 a 22 °C. En la gráfica correspondiente a la humedad (fig 4.12), se observa que aproximadamente a la mitad de altura hay un agrupamiento de zonas de igual humedad indicando un descenso del 65 al 35 % , en la parte superior cerca de la cubierta se observa un descenso en la humedad que va del 76 al 45 % , aproximadamente a un tercio de altura se tiene un descenso en la cantidad de humedad que va del 64 al 56 % . Para la segunda posición de la cubierta con respecto a la superficie de agua, que corresponde a 37 cm de altura y 50% en el variac correspondiente a 61 volts aplicados se tiene lo siguiente (fig 4.13):

En la parte baja cerca de la superficie de agua se observa una zona de isoterms que indican un descenso de temperatura de 38 a 26 °C, una zona isotérmica que ocupa aproximadamente la mitad del volumen en la cavidad del destilador, en la parte superior cerca de la cubierta un par de isoterms que van de 28 a 25 °C. En la gráfica correspondiente a las humedades (fig 4.14), se observa aproximadamente a un tercio de altura en el costado derecho una zona de humedad indicando una reducción de 72 a 60%, en el costado izquierdo se observa que la humedad se reduce apartir de un tercio

de altura hasta aproximadamente dos tercios del 76 a 55%, en el mismo costado cerca de la cubierta se tiene otra zona donde la humedad disminuye de 80 a 46%..

En la misma posición de la cubierta y con una lectura en el variac de 60 % correspondiente a 73.2 volts, se tiene para la gráfica de isotermas (fig 4.15), que hay en la parte baja una zona de isotermas indicando una reducción de temperatura de 31 a 24 °C, a un tercio de altura en el lado izquierdo otro grupo de isotermas mostrando una reducción de temperatura de 32 a 30 °C , a dos tercios de altura en la parte central tenemos isotermas que muestran un ligero aumento de temperatura de 31 a 34 °C y algunas isotermas aisladas en la parte alta. En la gráfica correspondiente a las humedades (fig 4.16), observamos que a un tercio de altura en el lado derecho se tienen zonas de igual humedad que indican una reducción del 76 al 70% , al centro del destilador otra zona que va de 58 a 50% , en la parte superior cerca de la cubierta al costado derecho se tiene otra zona de humedad en donde se tiene una reducción de 1 85 al 60%.

En la misma posición de la cubierta y una lectura en el variac del 70 % correspondiente a 85.4 volts se tiene (fig 4.17), para la gráfica de las isotermas en la parte baja cerca de la superficie de agua algunas zonas isotérmicas aisladas, a dos tercios de altura en el lado izquierdo una zona de isotermas indicando un ligero aumento de temperatura de 32 a 34 °C, aproximadamente al centro una zona donde la temperatura disminuye de 30 a 27.9 °C y en el lado derecho un ligero aumento de 33 a 34 °C. En la gráfica correspondiente a las humedades (fig 4.18), tenemos que en el lado izquierdo a un tercio de altura, una zona de humedad indicando una reducción del 85 al 76% , del mismo lado a tres cuartos de altura otra zona donde la humedad disminuye del 82 al 56% , a la misma altura cerca de la parte central una zona que indica un aumento de humedad del 85 al 95% , en la parte superior al centro otra zona donde se aprecia una disminución del 64 al 34% .

En la misma posición de la cubierta y una lectura en el variac del 80% correspondiente a 97.6 volts, tenemos (fig 4.19), en la gráfica para las isotermas zonas aisladas en la parte baja y a un tercio de altura, un grupo de isotermas del lado izquierdo a dos tercios de altura en donde la temperatura aumenta ligeramente de 32 a 33.2 °C,

del mismo lado cerca de la cubierta una zona donde la temperatura disminuye de 32 a 28 °C, aproximadamente a dos tercios de altura se observa una zona de isoterms que indican un aumento de temperatura de 32 a 42 °C. En la gráfica que corresponde a las humedades (fig 4.20), se observa a un tercio de altura una zona de humedad que indica una disminución del 86 al 72% , aproximadamente a dos tercios de altura una zona en donde la humedad se reduce del 75 al 60% , aproximadamente a tres cuartos de altura otra zona de reducción de la humedad que va del 72 al 60% .

Para la tercera posición de la cubierta con respecto a la superficie de agua, que corresponde a 27 cm de altura se tiene lo siguiente:

Para una lectura en el variac del 50 % , correspondiente a 61 volts se tiene para la gráfica de las isoterms (fig 4.21): en la parte baja cerca de la superficie de agua una zona de isoterms indicando una reducción de temperatura de 30 a 26 °C, a un tercio de altura aproximadamente en la parte central una zona indicando un ligero aumento de 32 a 33.9 °C, a la misma altura en el costado derecho se observa un aumento de temperatura de 31 a 33.3 °C, aproximadamente a dos tercios de altura se tienen zonas isotérmicas aisladas , en la parte superior cerca de la cubierta aproximadamente al centro de la cavidad del destilador se tiene una zona de isoterms en donde la temperatura disminuye de 27 a 24 °C. En la gráfica correspondiente a las humedades (fig 4.22), se observa que a un tercio de altura aproximadamente al centro se tiene una zona de humedad indicando una ligera reducción de 55 a 52% , a la misma altura en el costado derecho otra zona donde la humedad disminuye del 76 al 55% , a dos tercios de altura del lado izquierdo se observa que la humedad varía del 95 al 60% , a la misma altura del lado derecho una zona donde la humedad se reduce de 68 a 52% , en la parte alta cerca de la cubierta se observan dos zonas una en la parte central que va del 80 al 65% y otra del lado derecho que va del 100 al 95% .

En la misma posición de la cubierta y una lectura en el variac del 60 % correspondiente a 73.2 volts, se tiene para la gráfica de las isoterms (fig 4.23), en la parte baja tres zonas, una en el costado izquierdo indicando una reducción de temperatura de 32 a 28 °C, otra zona donde la temperatura aumenta de 33 a 35 °C y en el lado derecho otra zona donde la temperatura se reduce de 35 a 29

°C, en la parte central cerca del costado derecho se tiene una zona donde la temperatura se reduce ligeramente de 30 a 28 °C, en la parte alta se tienen zonas isotérmicas aisladas. Con respecto a la gráfica de las humedades (fig 4.24), se tiene en la parte baja cerca de la superficie de agua y hasta aproximadamente un tercio de altura una zona de humedades indicando una reducción del 60 al 45% , a dos tercios de altura del lado izquierdo se tienen zonas aisladas de igual humedad, al centro en la parte alta una zona donde la humedad varía del 95 al 85% , a la misma altura en el costado derecho una zona donde la humedad se reduce de 100 a 82% . En la misma posición de la cubierta y una lectura en el variac del 70 % correspondiente a 85.4 volts, se tiene en la gráfica correspondiente a las isotermas (fig 4.25), en la parte baja , cerca de la superficie de agua dos zonas de isotermas del lado izquierdo, una pegada al costado donde la temperatura baja de 38 a 34 °C, otra donde la temperatura varía ligeramente de 29 a 27 °C, aproximadamente a un tercio de altura casi al centro se observa que la temperatura sube ligeramente de 34 a 35 °C, pegado al costado derecho a la misma altura la temperatura desciende de 33 a 28 °C, en la parte superior cerca de la cubierta en ambos extremos se tienen dos zonas donde la temperatura baja ligeramente de 26 a 25 °C. En la gráfica para las humedades (fig 4.26), se tiene que a un tercio de altura del lado izquierdo hay una zona donde la humedad desciende del 55 al 44% , a dos tercios de altura pegado al costado izquierdo se observa un aumento en la humedad del 85 al 100% , a la misma altura en la parte central una zona que indica una reducción del 52 al 36% , en la parte alta cerca de la cubierta se observa una reducción del 86 al 75% .

En la descripción cualitativa de los datos experimentales, se hizo un análisis de las gráficas construidas para las lecturas de bulbo seco y las correspondientes a las humedades, ahora daremos una explicación en la que justificaremos lo observado en las gráficas. Observamos que conforme aumenta el calentamiento de 74.42 watts a 190.51 watts las isotermas obtenidas se encuentran más aisladas, es decir las zonas de agrupamiento de las isotermas se observan a mayor altura en el cuerpo del destilador conforme se aumenta el calentamiento , esto se debe a que al aumentar la temperatura el gradiente térmico es mayor favoreciendo la convección natural del

vapor generado, en consecuencia el vapor se enfría cada vez más cerca de la superficie condensadora y está más caliente cerca de la superficie del agua, es por esto que las zonas isotérmicas se aíslan en la parte baja y se agrupan conforme se asciende en el cuerpo del destilador.

El gradiente de temperatura que se tiene en los grupos de isotermas para cada uno de los calentamientos es debido a la corriente de convección que existe dentro del destilador, el vapor caliente asciende y se enfría, el vapor enfriado baja, esto se observa en las zonas isotérmicas que se obtienen como curvas cerradas en cada una de las gráficas. En algunas zonas encontramos que la temperatura aumenta y en la misma zona en la gráfica para las humedades la cantidad de humedad se reduce, y en donde la temperatura baja la cantidad de humedad aumenta, ésta es otra evidencia de la corriente de convección; pues una reducción de temperatura ocasiona que el vapor se condense y la cantidad de humedad aumente en esa zona, por otro lado si la temperatura aumenta la cantidad de humedad disminuye puesto que no hay condensación, esto es lo que se observa en las gráficas.

Por otro lado con respecto a las gráficas de humedad observamos que cuando el vapor asciende hacia la cubierta condensadora, la cantidad de humedad disminuye, esto se debe a que en la superficie del agua donde se genera el vapor hay mayor concentración, conforme el vapor asciende se difunde en el aire dentro de la cavidad del destilador formando una mezcla aire-vapor en la cual la cantidad de humedad disminuye al aumentar la altura.

Las diferencias que se tienen en la cantidad de humedad nos indican que hay una transferencia de masa, ya que la cantidad de vapor avanza de una zona de mayor concentración a otra de menor concentración en dirección de la superficie condensadora, este comportamiento también nos da evidencia de las corrientes de convección dentro del destilador. También la diferencia de temperatura que se tiene en las gráficas de las isotermas nos indican que hay una transferencia de calor, por esto podemos decir que en el proceso de destilación solar se llevan a cabo los fenómenos de transferencia de masa y calor, así como la convección libre del vapor generado durante este proceso.

FIG. IV.5 PR. ... YLON

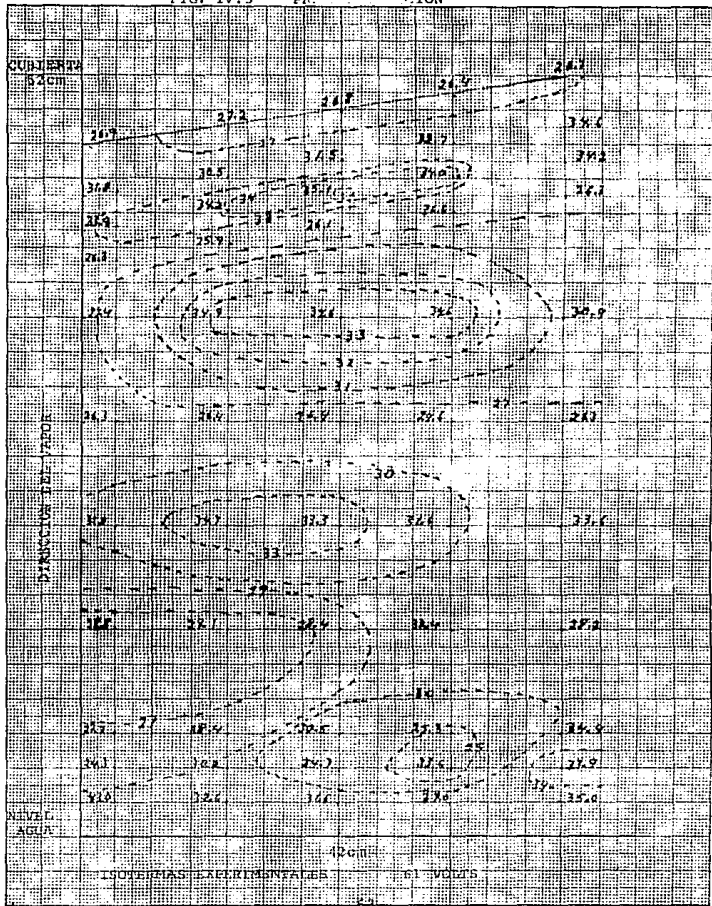


FIG IV.6

PRIMERA POSICION:

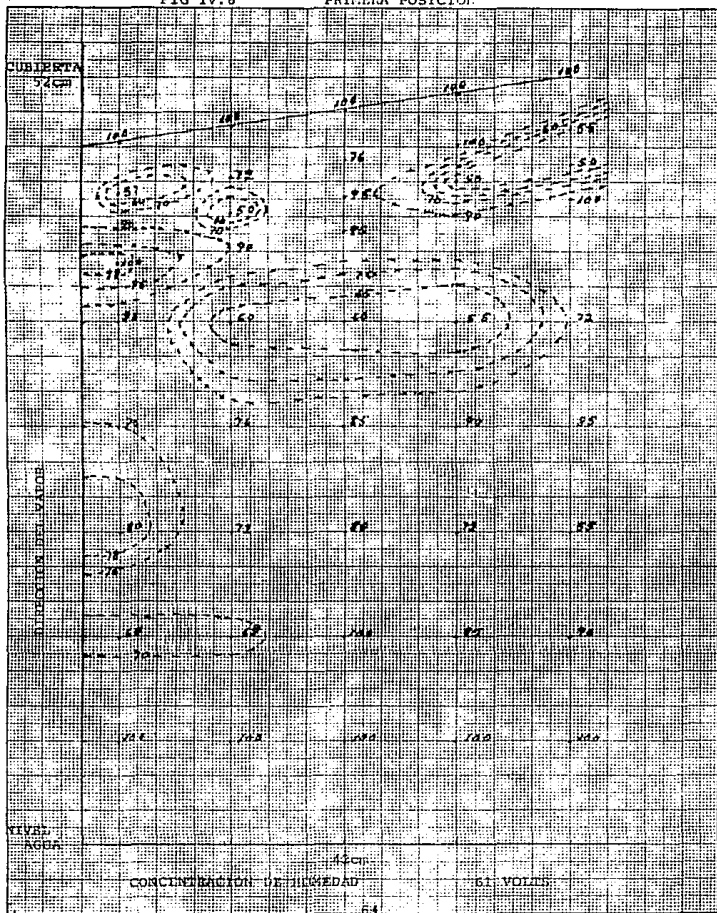


FIG. IV.7

PRIMERA POSICION

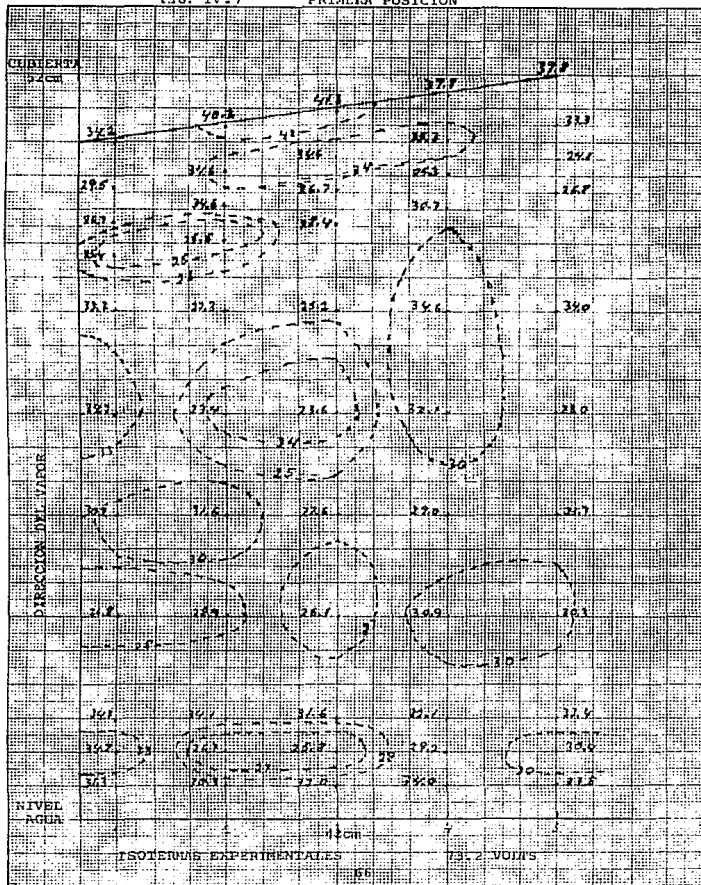


FIG IV.8

PRIMERJ. POSICION

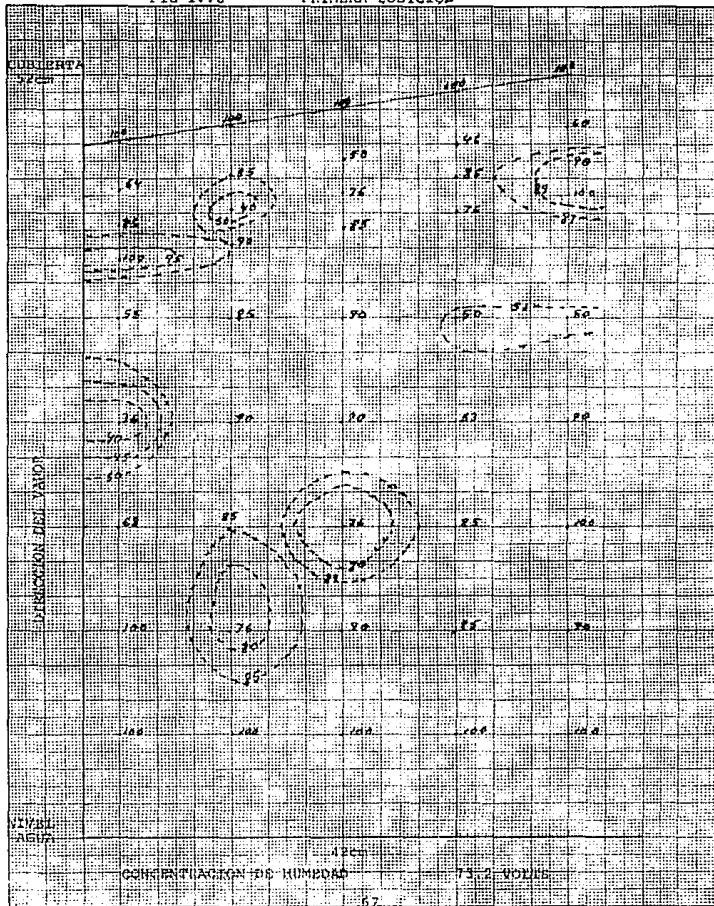


FIG. IV 10

PRIMERA POSICION

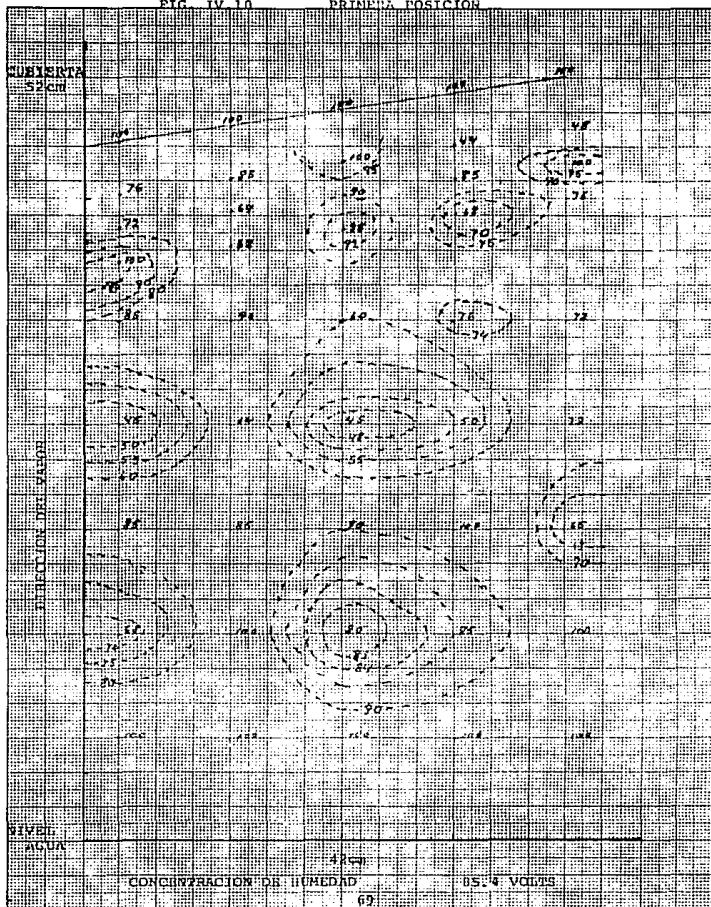


FIG IV. 11

PRIMERA POSICION

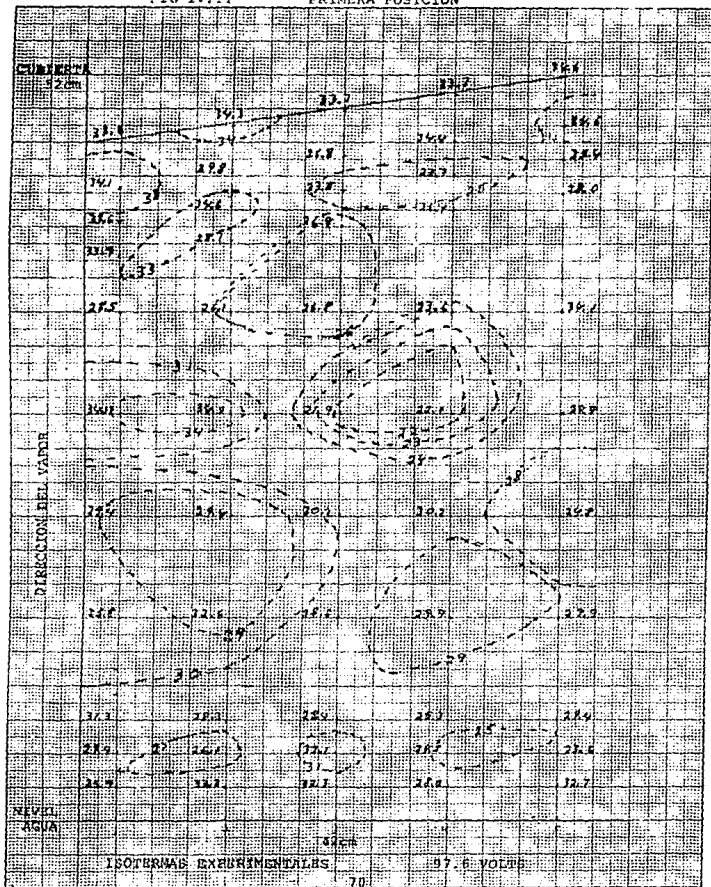


FIG IV.12

"PRIMERA POSICION"

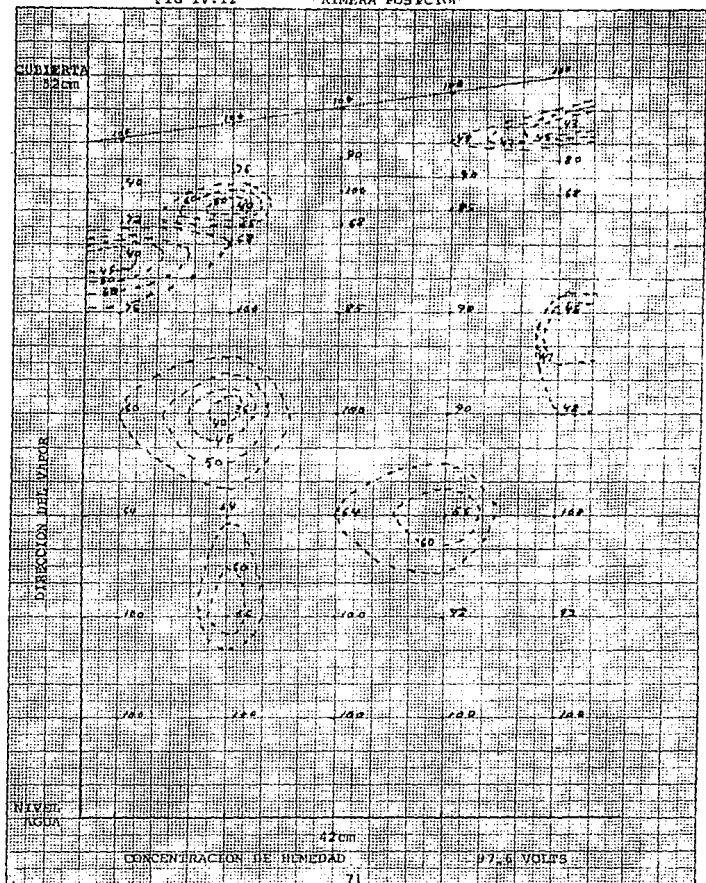


FIG IV.13

SEGUNDA POSICION

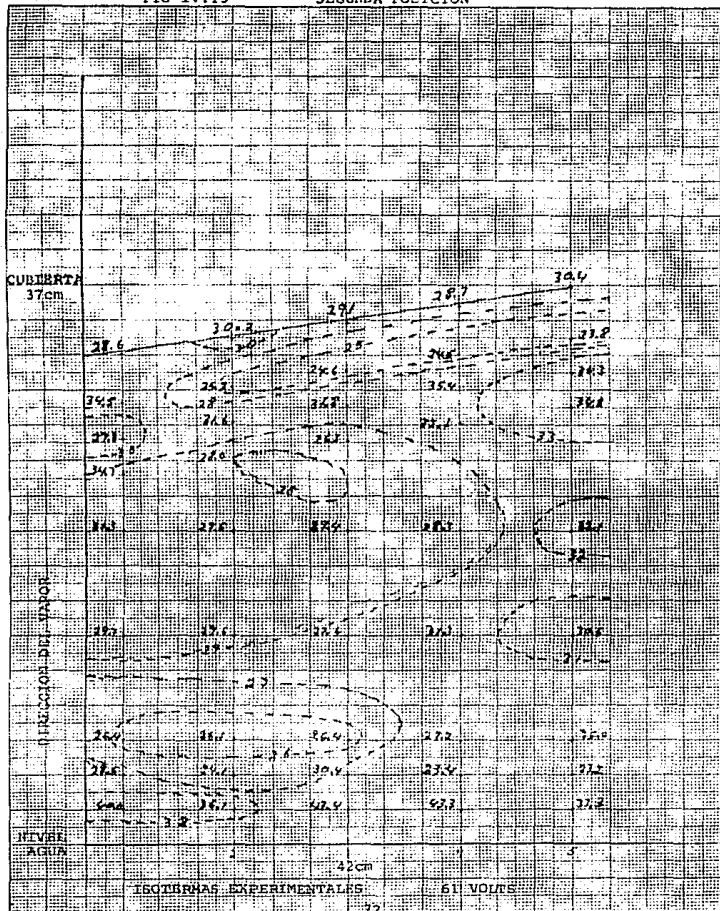


FIG IV.14

SEGUNDA POSICION

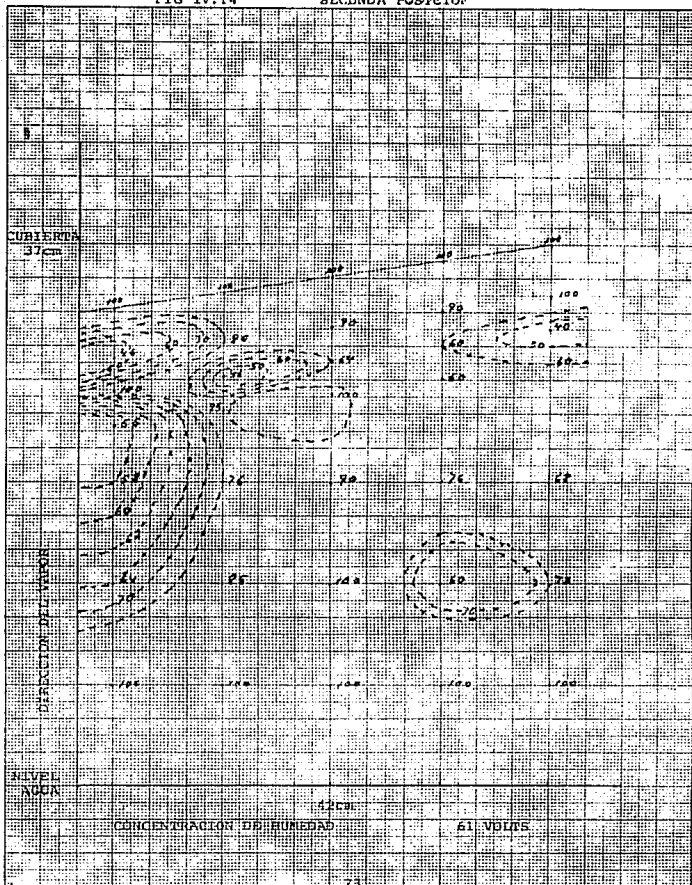


FIG IV.15

SEGUNDA POSICION

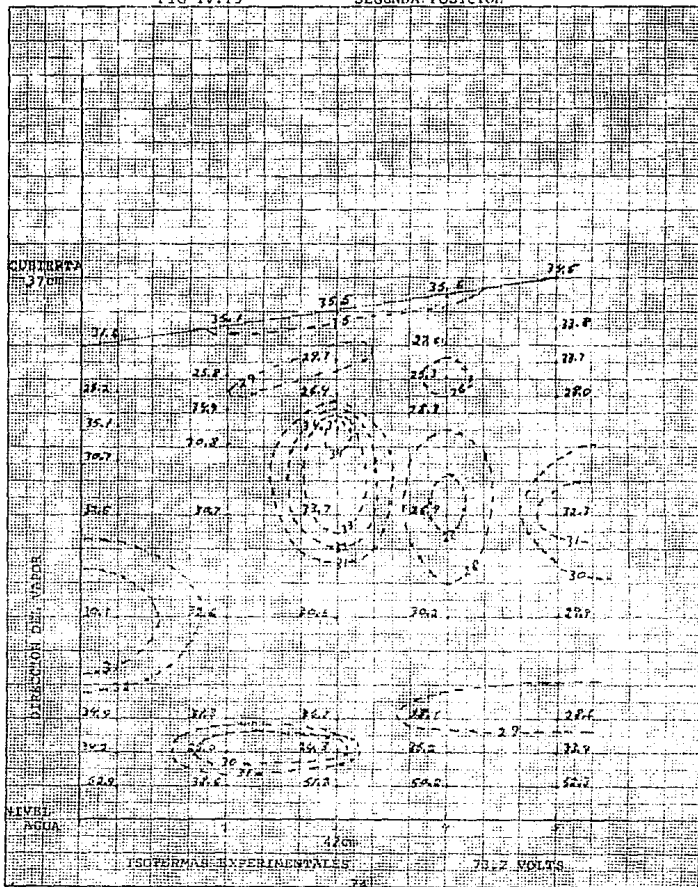


FIG IV.16

SEGUNDA POSICION

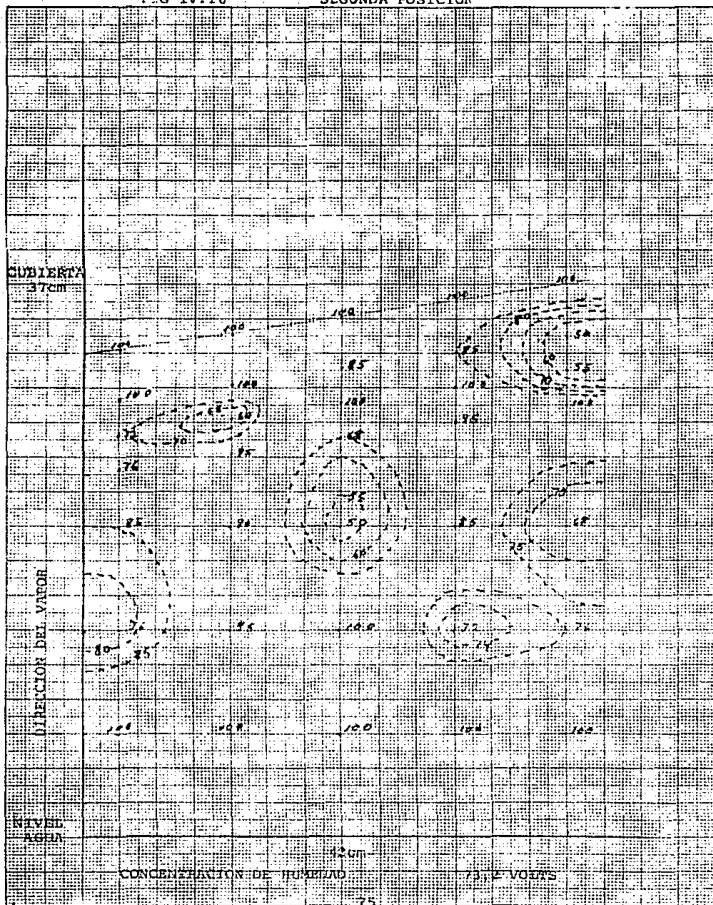


FIG IV.17

SEGUNDA POSICION

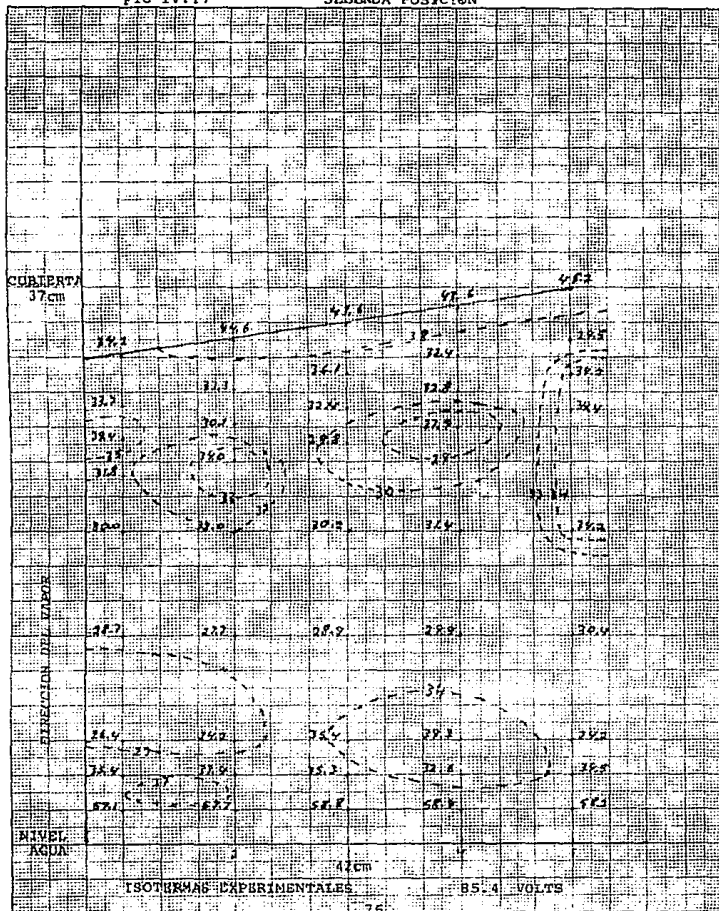


FIG. IV. 18

SEGUNDA POSICION

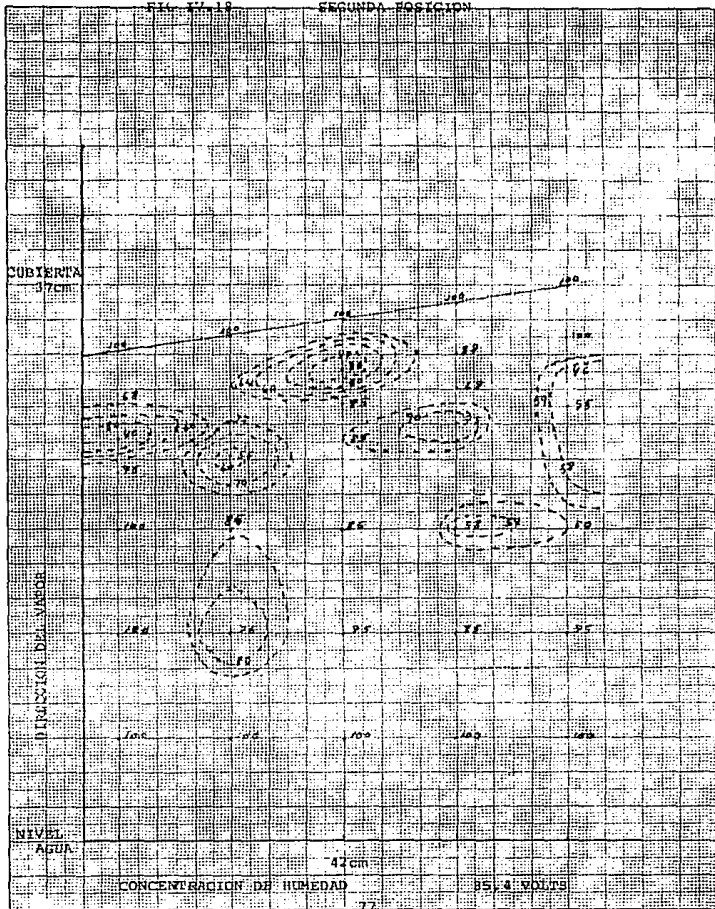


FIG IV.19

SEGUNDA POSICIÓN

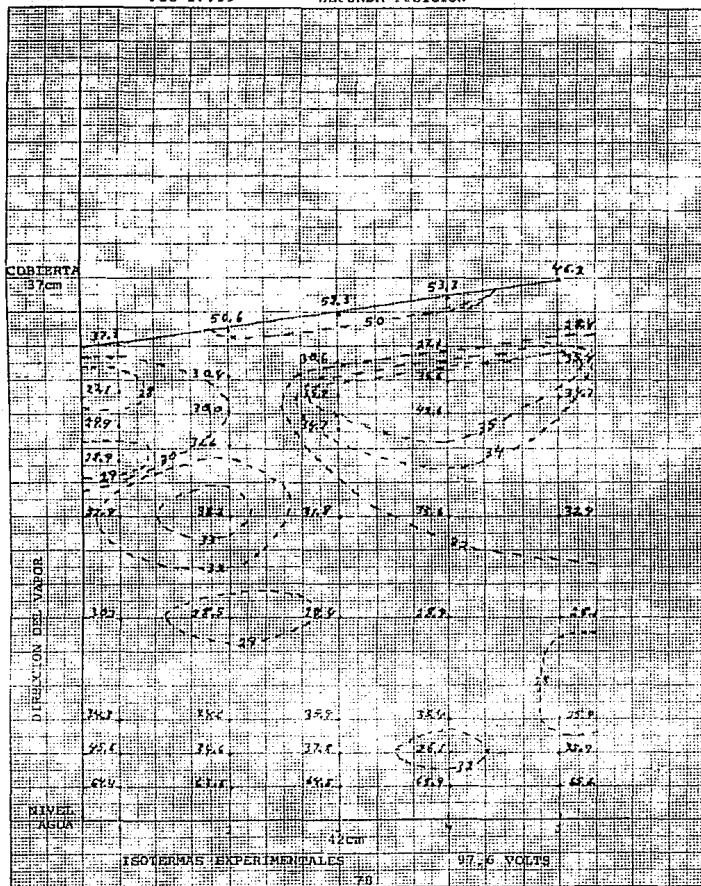


FIG IV. 20

SEGUNDA POSICION

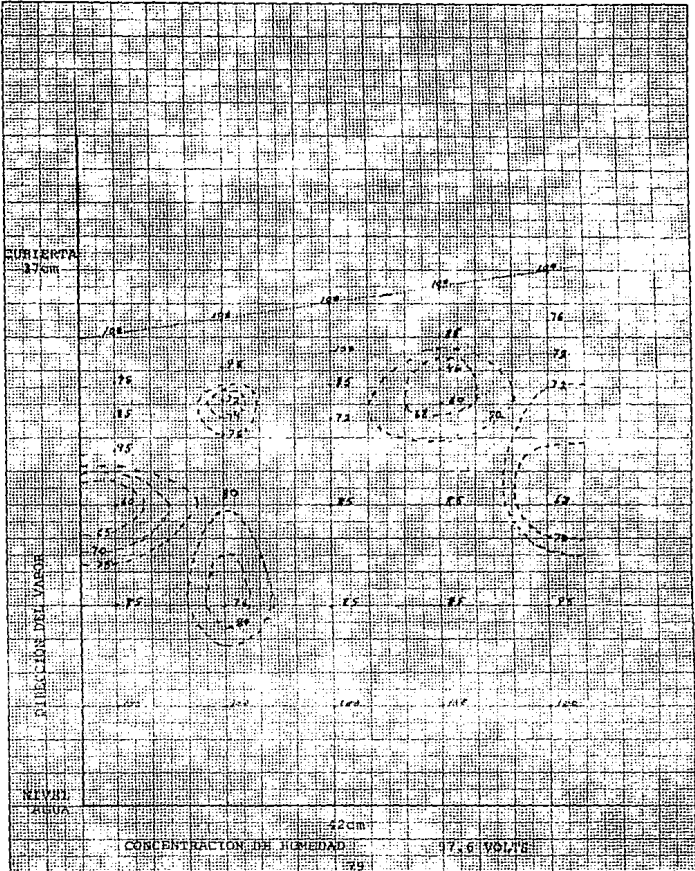
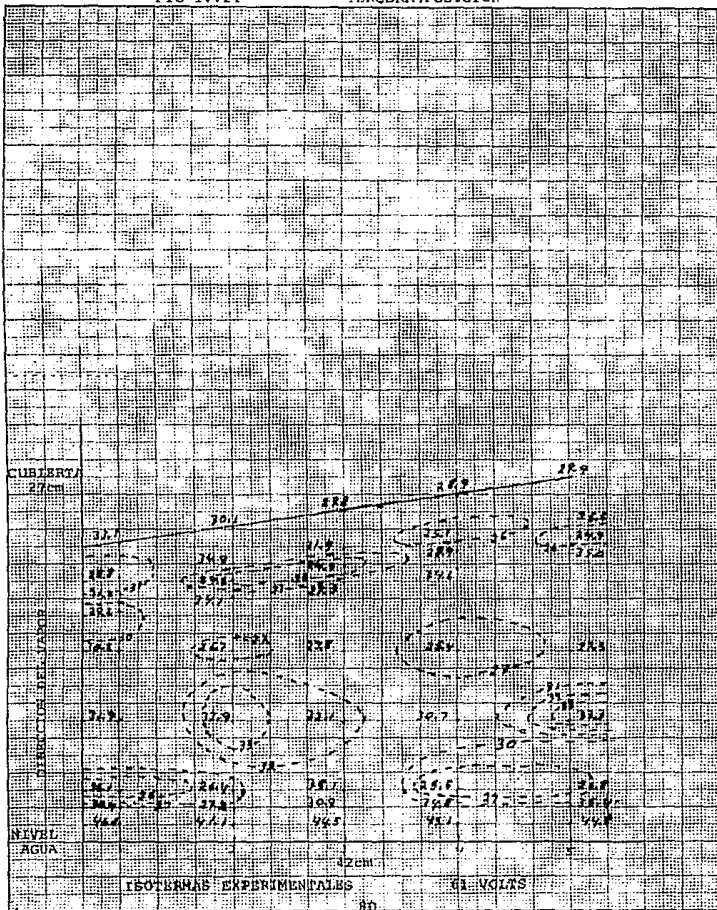


FIG IV.21

TERCERA POSICION



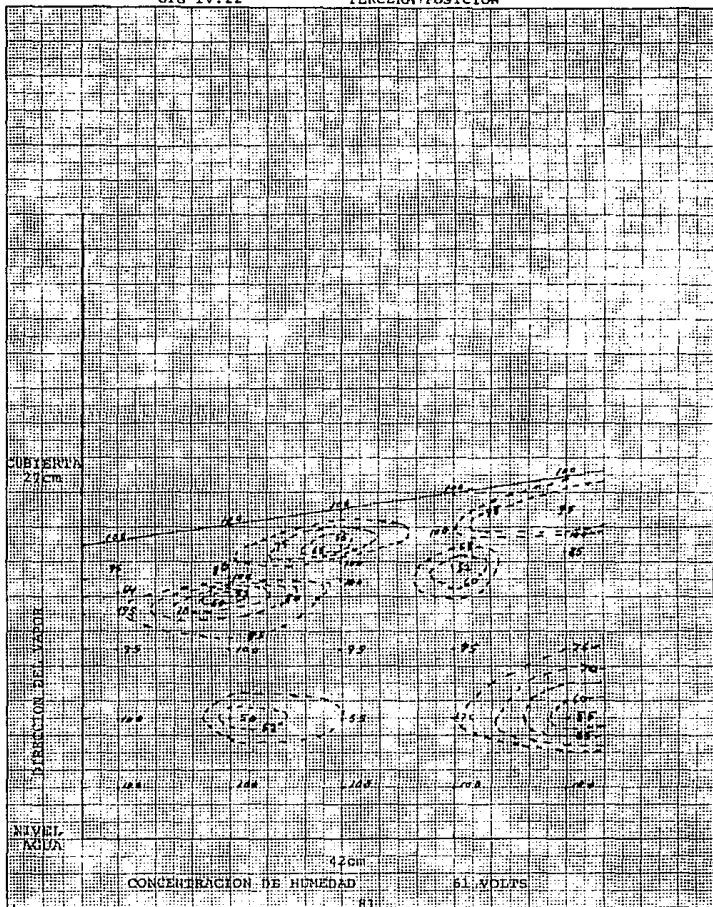


FIG IV. 23

TERCERA POSICION

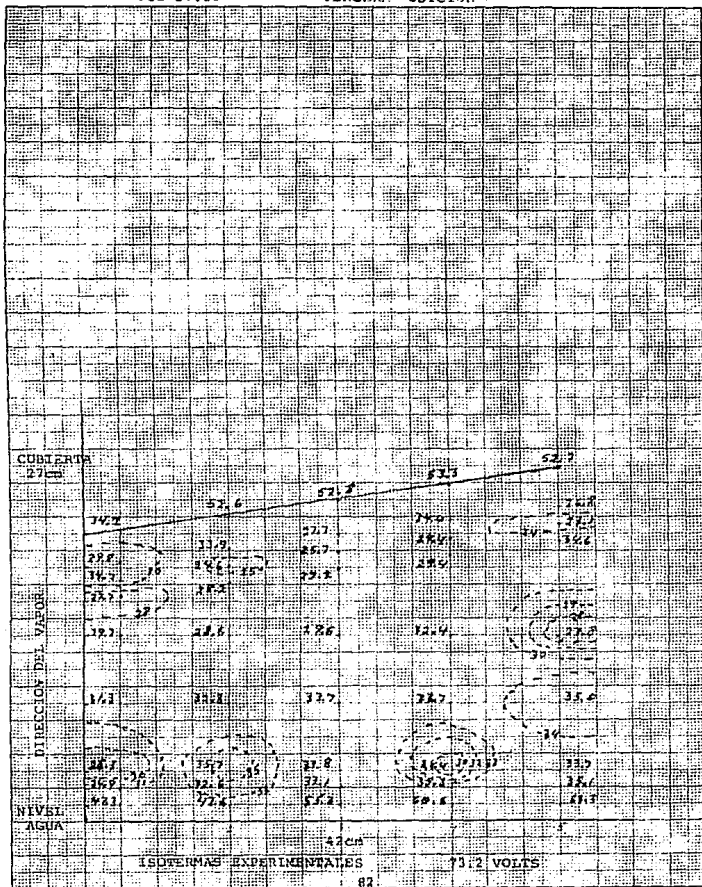


FIG IV.24

TERCERA POSICION

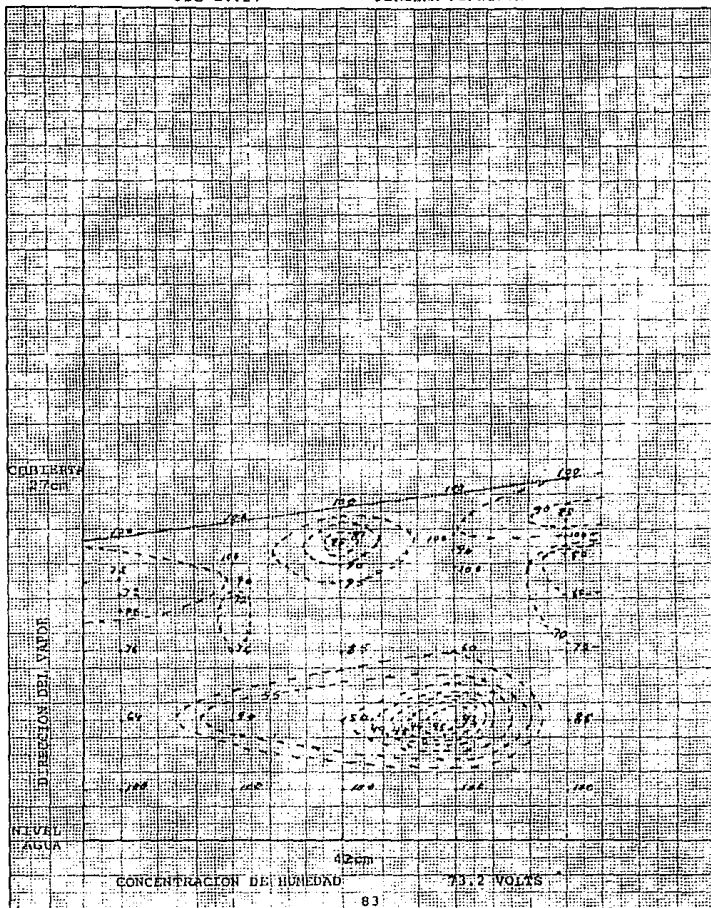


FIG IV.25

TERCERA POSICION

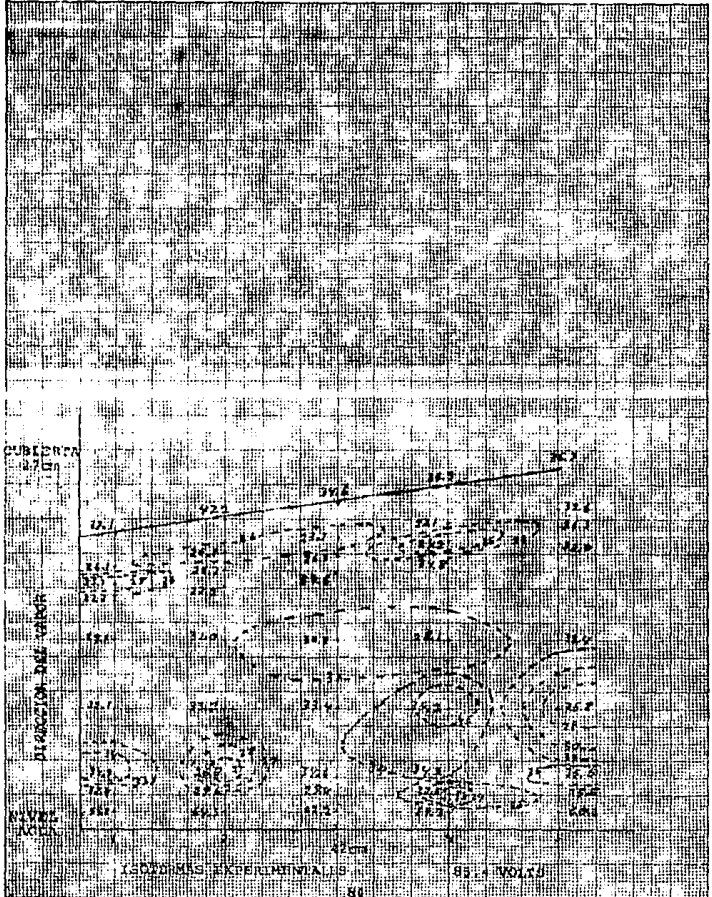
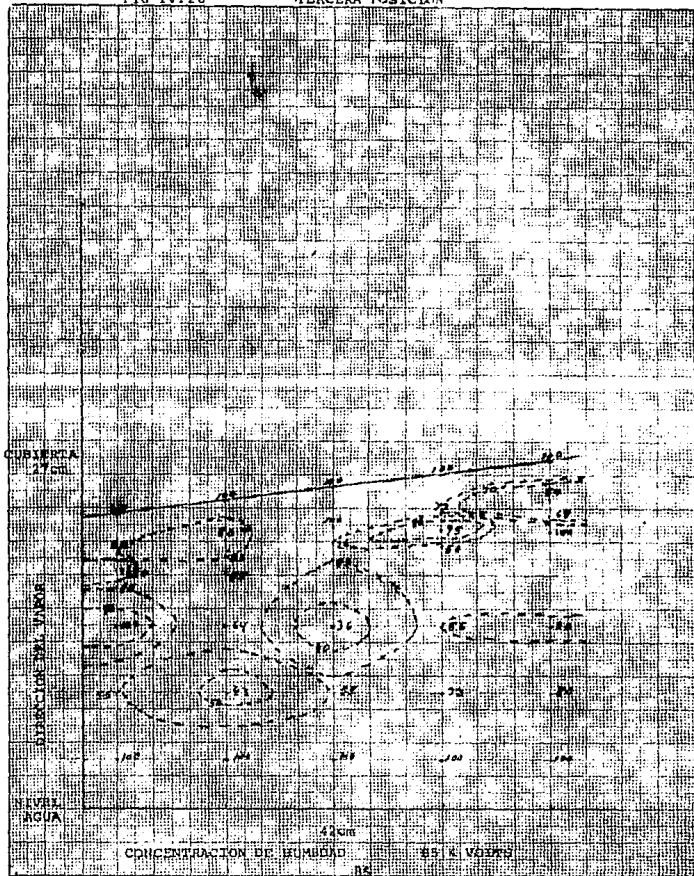


FIG IV.26

TERCERA POSICION



IV.4 COMPARACION DE RESULTADOS.

Haciendo una comparación de los resultados numéricos contra los experimentales tenemos lo siguiente:

a) El método numérico explica la existencia de convección en el destilador para cada uno de los valores del coeficiente global de transferencia de calor.

b) Las isothermas obtenidas con la solución numérica muestra que el vapor asciende siguiendo las isothermas de mayor temperatura dando evidencia de las corrientes de convección.

c) El modelo matemático al ser resuelto muestra que el efecto de convección predomina sobre la difusión.

EXPERIMENTALMENTE

a) Las isothermas experimentales muestran que la temperatura disminuye en la dirección de ascenso del vapor.

b) Las isothermas experimentales muestran la existencia de la convección en la cavidad del destilador.

c) De los datos de la concentración de humedad obtenidos experimentalmente tenemos que la convección tiene mayor influencia cuando la altura de la cubierta es grande; cuando la altura se reduce la difusión tiene más influencia en el funcionamiento del destilador.

De un análisis completo podemos decir que el modelo matemático es capaz de predecir que la convección es el fenómeno importante; y se reafirma con el experimento.

Queda para un trabajo posterior el análisis numérico del destilador variando la altura de la cubierta, pues en este trabajo la altura se varió experimentalmente obteniendo los resultados ya mencionados. Debe también compararse el análisis teórico con los datos experimentales de este trabajo y verificar si el modelo teórico es capaz de explicar el comportamiento del destilador.

CAPITULO V CONCLUSIONES

V.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis de los resultados que se presentan en el trabajo tenemos las siguientes conclusiones.

- 1.- De la revisión bibliográfica tenemos que hay muy poco trabajo en destilación, por lo que consideramos que puede servir como consulta en el desarrollo de trabajos posteriores.
- 2.- El modelo matemático de Ortega Zamudio da la posibilidad de crear programas de computadora que sirvan para la aplicación del método numérico empleado para el desarrollo de trabajos posteriores.
- 3.- El prototipo de destilador solar se puede utilizar para el desarrollo de investigaciones tomando una red de termopares más fina.
- 4.- El flujo del fluido (vapor de agua) y la transferencia de calor en un destilador se puede aproximar estudiando el flujo en una cavidad con un fluido homogéneo.
- 5.- El modelo teórico indica que en un destilador cuya altura entre el espejo de agua y la cubierta condensadora es mayor de 0.30m, el transporte de calor y masa es mayormente por convección.
- 6.- Los resultados numéricos concuerdan con los experimentales para la altura considerada en la simulación numérica y la correspondiente experimental, por lo que podemos decir que el prototipo experimental es adecuado.
- 7.- La solución numérica del problema predice que en el destilador existe la convección, lo cual también se observó experimentalmente. Esta solución también muestra que la convección pura puede ser el mecanismo importante en el funcionamiento de destiladores cuya altura de la superficie condensadora es mayor de 0.30m.
- 8.- A pesar de que el experimento se realizó con una red de 45 termopares, los resultados pueden explicar lo observado en el modelo teórico.
- 9.- De las gráficas de concentración de humedad tenemos que a mayor altura de la cubierta, la concentración de vapor de agua se acumula en la parte alta y centro de la cavidad, esto es debido a la convección del vapor que se lleva a cabo en el destilador. Por otro

lado, si la cubierta está más cerca de la superficie de agua la concentración de humedad se distribuye en toda la cavidad del destilador, en este caso la convección es menor predominando la difusión del vapor en el aire dentro de la cavidad.

10.- Los resultados experimentales muestran que un destilador solar funciona mejor cuando la distancia entre la cubierta y la superficie de agua es pequeña (0.30m), debido a que la difusión se efectúa con mayor rapidez que la convección.

11.- En el experimento se encontró que la cantidad de agua destilada que se obtuvo para cada una de las posiciones no varía mucho en promedio, por lo que la convección en la destilación solar se puede aprovechar para destiladores con una altura mayor de 0.30m.

RECOMENDACION: Cada vez que sea utilizado el prototipo experimental se aconseja checar que la resistencia no se halla fundido o roto por el uso continuo que se le dió, checar que tanto la cubierta como el cuerpo del destilador no tengan fugas porque las mediciones no seran confiables.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- SOLAR DISTILATION.
P.I Cooper.
Pergamon Press N.Y. -1983.
- 2.- MECANICA DE LOS FLUIDOS.
Victor L. Streeter.
McGraw Hill -1975
- 3.- COMPUTER SIMULATION OF THE PERFORMANCE OF A SOLAR DESALINATION PLANT.
Ali M. El-Nashar.
Solar Energy Vol.44 No.4 -1990,
- 4.- MULTI-STAGE, INDIRECTLY HEATED SOLAR STILL.
J.L.Fernández and Norberto Chargoy.
Solar Energy Vol.44 No.4 -1990
- 5.- DIRECT USE OF SOLAR ENERGY FOR WATER DESLINATION.
S.M.A.Moustafa and G.H.Brusewitz.
Solar Energy Vol.22 -1979.
- 6.- TRANSFERENCIA DE CALOR.
J.P. Holman.
C.E.C.S.A. -1986.
- 7.- NATURAL CONVECTION IN ENCLOSURES FILLED WITH A VAPOUR AND A NON-CONDENSING GAS
J.J. Close and J. Sheridan
Int.J.Heat Mass Transfer Vol.32 No.5 -1989.
- 8.- HEAT AND MOISTURE TRANSFER BY NATURAL CONVECTION IN A RECTANGULAR CAVITY.
H.K. Wee, R.B. Keey and M.J. Cunningham.
Int.j. Heat and Mass Transfer Vol.32 No.9 -1989.
- 9.- NUMERICAL ANALYSIS OF GREEN HOUSE-TYPE SOLAR STILLWITH HIGH INCLINATION.
A. Palacio y J.L Fernandez.
Solar Energy Vol. 50 No. 5 -1993.
- 10.- DISTRIBUCION DEL FLUJO EN UN DESTILADOR SOLAR.
A.Palacio, A.Castrejon y J.LFernandez.
Comunicado del instituto de ingeniería U.N.A.M -1992.
- 11.- TRANSPORT PHENOMENA.
R.B. Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot.

- John Wiley and Sons N.Y. -1960.
- 12.- ANALISIS DE UN DESTILADOR SOLAR EN LA PAZ, BCS
J.L. Fernandez and Norberto Chargoy
Solar Energy Vol.44 No.4 -1990
 - 13.- TRANSFERENCIA DE MASA FUNDAMENTOS Y APLICACIONES.
A.L. Hines y R.N. Maddox.
Prentice Hall -1987.
 - 14.- MODELO Y SIMULACION DE UN DESTILADOR SOLAR CON TEXTIL.
Israel Ortega Zamudio.
Proyecto Terminal en Ingeniería Física. U.A.M.-Azcapotzalco.
 - 15.- METODOS NUMERICOS APLICADOS CON SOFTWARE.
Shoichiro Nakamura
Prentice Hall -1992.
 - 16.- APPLIED NUMERICAL METHODS
Carnahan - Brice.
J. Wiley and Sons N.Y. -1969
 - 17.- NUMERICAL CALCULATION OF HEAT AND MASS TRANSFER IN SOLAR
STILLS.
Jurgen Rheinlander.
Solar Energy Vol.28 No.2 -1982.
 - 18.- NUMERICAL METHODS IN LAMINAR AND TURBULENT FLOW.
C. Taylor, B.A Schrefler.
Pineridge press Grate Britain -1981.
 - 19.- STD. METHOD FOR MEASUREMENT OF MOIST AIR PROPERTIES, ASHRAE
STD, ANSI/ASHRAE. 41.6 -1982.
 - 20.- EFECT OF DRIED AND FORCED AIR BUBBLING ON THE PARTIAL PRESURE
OF WATER VAPOUR AND THE PERFORMANCE OF SOLAR STILL.
G.C.Pandey
Solar Energy Agosto de 1983.
 - 21.- THE STADY-STATE PERFORMANCE OF A SOLAR STILL.
JimA. Clark.
Solar Energy Vol.44 No.1 1990.
 - 22.- THE PHOENICS REFERENCE MANUAL.
D.B.Spalding, H.Qin, y J.Ludwing.
CHAM TR/200, Software Version 1.5 Gran Bretaña - 1989.
 - 23.- A SOHEM FOR LARGE SCALE DESALINATION OF SEA WATER BY SOLAR

ENERGY.

Anil.K.Rajvanghi.

Solar Energy Vol.24 -1980.

- 24.- PERFORMANCE OF A SELF-REGULATING SOLAR MULTISTAGE FLASH
DESALINATION SYSTEM.

S.M.A.Moustafa, D.I.Jarrar and H.I.El Mansy

Solar energy Vol.35 No.4 -1985.

- 25.- POTENTIAL SOLAR AIR-WATER DISTILATE YIELDS IN AFRICA.

Ahmad Y.Ranjha, Richard C.Peraalta and Timothy M.Skergan.

Solar energy Vol.36 No.5 -1986.

- 26.- ENERGIA SOLAR, FUNDAMENTOS Y APLICACIONES FOTOTERMICAS.

J.A. Manrique.

Harla -1984.

- 27.- CALCULO VECTORIAL.

Marsden y tromba.

Fondo Educativo Interamericano -1981.

- 28.- TRANSFERENCIA DE MASA FUNDAMENTOS Y APLICACIONES.

A.L. Hines y R.N. Maddox.

Prentice Hall -1987.