

01190

4  
Zey

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**División de Estudios de Posgrado**

***DESTILADORES SOLARES SOMEROS***

**TESIS**

**Que para obtener el Grado de  
DOCTOR EN INGENIERÍA**

**presenta**

***Miguel Ángel Porta Gándara***

1998

**Director: Dr. José Luis Fernández Zayas**  
**Co-director: Dr. Jaime Cervantes de Gortari**

1998

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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 esta 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.

Título de la tesis:

DESTILADORES SOLARES SOMEROS

Grado y nombre del tutor o director de tesis:

DOCTOR JOSE LUIS FERNANDEZ ZAYAS

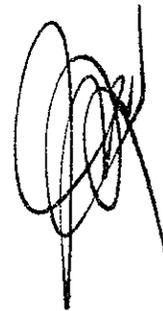
Institución de adscripción del tutor o director de tesis:

INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM

Resumen de la tesis: (Favor de escribir el resumen de su tesis a máquina, como máximo en 25 renglones a un espacio, sin salir de la extensión de este cuadro.)

SE REPORTA, POR PRIMERA VEZ, LA NATURALEZA DE LOS FLUJOS EN EL INTERIOR DE LOS DESTILADORES SOLARES SOMEROS, Y LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. ESTOS ESTUDIOS SE APOYAN EN LA CONGRUENCIA ENTRE LOS RESULTADOS DE MEDICIONES EN PROTOTIPOS, QUE OPERAN AL AMBIENTE Y EN LABORATORIO, Y REVELAN LA NATURALEZA DE LOS FLUJOS MEDIANTE TECNICAS DE VISUALIZACION AVANZADAS. LOS RESULTADOS COINCIDEN CON SIMULACIONES EN COMPUTADORA.

SE DESARROLLARON EXPERIMENTOS EN CONDICIONES CONTROLADAS DE LABORATORIO EN UN DESTILADOR EXPERIMENTAL, CON UNA RELACION DE ASPECTO DE ALREDEDOR DE 0.2, EN EL CUAL SE PUEDEN SELECCIONAR DIVERSAS TEMPERATURAS, TANTO EN LA SALMUERA COMO EN EL VIDRIO. SE ENCONTRO QUE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE LA SALMUERA Y EL VIDRIO DEPENDE FUERTEMENTE TANTO DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS ENTRE LA SALMUERA Y EL VIDRIO, COMO DE LA TEMPERATURA DE LA SALMUERA, CONDICION NUNCA ANTES REPORTADA EN LA LITERATURA. SE ELABORA ENTONCES UNA NOVEDOSA RELACION DE TRANSFERENCIA DE MASA, UTIL PARA EL DISEÑO DE ESTOS DISPOSITIVOS.



LOS DATOS ASENTADOS EN ESTE DOCUMENTO CONCUERDAN FIELMENTE CON LOS REALES Y QUEDO ENTERADO QUE, EN CASO DE CUALQUIER DISCREPANCIA, QUEDARÁ SUSPENDIDO EL TRÁMITE DEL EXAMEN

Fecha de solicitud: \_\_\_\_\_



Firma del alumno

Acompaño los siguientes documentos:

- Nombramiento del Jurado del examen de grado
- Aprobación del trabajo escrito por cada miembro del Jurado
- Copia de la última revisión de estudios
- Comprobante de pago de derechos por registro del grado

Biblioteca del Plantel

Biblioteca Central

Entrega ejemplares de tesis

Quiero agradecer a mis compañeros de trabajo que me ayudaron en diversas etapas de la investigación, en lo particular a Eduardo y Elizabeth, y de manera muy especial a Daniel Lluch y José Luis Fernández.

## ABSTRACT

The nature of fluid and heat and mass transfer mechanisms inside shallow solar stills, never reported before, is presented in this work. A very good correlation was found between solar stills under natural environmental conditions and those in the laboratory. A technique was developed using a laser beam, which permitted visualization of the fluid dynamics under several extreme temperature conditions. Computer simulations agreed closely with field work.

An experimental laboratory solar still with an aspect ratio of around 0.2, was constructed, in order to allow obtention for different brine and cover temperatures. The heat-transfer coefficient between the brine and the cover was calculated. It was discovered to be a function of the temperature difference between the brine and the cover and the brine temperature, a result not previously reported.

# ÍNDICE

<b>Nomenclatura</b> .....	iii
<b>Lista de figuras</b> .....	vi
<b>Resumen</b> .....	viii
<b>Abstract</b> .....	ix
<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>2. Análisis Bibliográfico</b> .....	4
<b>3. Planteamiento del Problema</b> .....	13
<b>4. Análisis Matemático</b> .....	16
4.1 Balance energético.....	16
4.2 Balance en el condensador.....	17
4.3 Balance en la salmuera.....	18
4.4 Balance en el fondo.....	18
4.5 Números adimensionales.....	19
<b>5. Metodología Experimental</b> .....	22
5.1 Destiladores de campo.....	22
5.2 Destilador de laboratorio.....	25
<b>6. Resultados Experimentales</b> .....	30
6.1 Influencia de la producción como función de la distancia $d$ en los destiladores de campo.....	30
6.2 Influencia de la producción como función de la distancia $d$ en el destilador de laboratorio.....	33
6.3 Visualización y caracterización del fluido dentro del destilador.....	34
6.4 Medición experimental del coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta.....	38
6.5 Medición experimental del coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente.....	42

<b>7. Resultados del Modelo Matemático</b> .....	<b>46</b>
<b>8. Discusión</b> .....	<b>53</b>
<b>9. Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>63</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>65</b>
<b>Anexo I. Incertidumbre de Resultados Experimentales</b> .....	<b>70</b>
A1.1 Radiación solar.....	70
A1.2 Producción de agua destilada.....	71
A1.3 Temperaturas.....	71
A1.4 Velocidad del viento.....	74
A1.5 Tiempos y distancias.....	74
A1.6 Estimación del error en $U_{wg}$ .....	75
A1.7 Error de paralaje en la visualización.....	76
A1.8 Referencias.....	77
<b>Anexo II. Programa de Cómputo <i>DESTILLATIO</i></b> .....	<b>78</b>
A2.1 Diagrama de flujo.....	78
A2.2 Programa de cómputo.....	85
A2.3 Resultados.....	116

## NOMENCLATURA

- $a_b$  Coeficiente de absorción para el fondo.
- $a_g$  Coeficiente de absorción para la cubierta.
- $a_w$  Coeficiente de absorción para la salmuera.
- $c_b$  Calor específico del fondo.
- $c_g$  Calor específico de la cubierta.
- $c_p$  Calor específico.
- $c_w$  Calor específico de la salmuera.
- $d$  Distancia de la salmuera a la cubierta.
- $E$  Energía total.
- $E_i$  Energía que entra al sistema.
- $E_0$  Energía que sale del sistema.
- $E_z$  Energía almacenada en el sistema.
- $G$  Radiación solar en el plano inclinado.
- $g$  Aceleración normal de la gravedad.
- $H$  Altura.
- $h_{wg}$  Coeficiente convectivo de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta.
- $k$  Conductividad térmica.
- $L$  Longitud.
- $M$  Producción de agua destilada en un día por unidad de superficie.
- $M_c$  Producción de agua destilada en un día por unidad de superficie de condensador.
- $M_e$  Producción de agua destilada en un día por unidad de superficie de evaporador.

$m_b$	Masa del fondo.
$m_g$	Masa de la cubierta.
$m_w$	Masa de la salmuera.
$P_g$	Presión parcial de vapor en la cubierta.
$P_w$	Presión parcial de vapor en la salmuera.
$t$	Tiempo.
$T_a$	Temperatura ambiente.
$T_b$	Temperatura del fondo.
$T_g$	Temperatura de la cubierta.
$T_w$	Temperatura de la salmuera.
$U_{ba}$	Coefficiente global de transferencia de calor entre el fondo y el ambiente.
$U_{ga}$	Coefficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente.
$U_{wb}$	Coefficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y el fondo.
$U_{wg}$	Coefficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta.
$v$	Velocidad del viento.
$v_d$	Velocidad de desplazamiento del vórtice.
$x$	Distancia característica.
$\alpha_b$	Absortancia del fondo.
$\alpha_g$	Absortancia de la cubierta.
$\alpha_w$	Absortancia de la salmuera.
$\beta$	Coefficiente térmico de expansión volumétrica.
$\Delta T'$	Diferencia de temperatura modificada.
$\eta$	Eficiencia del destilador.
$\eta_c$	Eficiencia del destilador por metro cuadrado de condensador.

$\eta_e$	Eficiencia del destilador por metro cuadrado de evaporador.
$\mu$	Viscosidad.
$\rho_b$	Reflectancia del fondo.
$\rho_g$	Reflectancia de la cubierta.
$\rho_w$	Reflectancia de la salmuera.
$\tau_g$	Transmitancia de la cubierta.
$\tau_w$	Transmitancia de la salmuera.
$\nu$	Viscosidad cinemática.
$Gr_e$	Número especial de Grashof.
$Nu$	Número de Nusselt.
$Pr$	Número de Prandtl.
$Ra_e$	Número especial de Rayleigh.

## LISTA DE FIGURAS

1.	Sección transversal de un destilador solar somero tipo McCracken.....	14
2.	Sección transversal del destilador de campo.....	23
3.	Destiladores solares someros en operación alineados NE-SO...	24
4.	Vista general <i>in situ</i> de los instrumentos de medición.....	25
5.	Sección transversal del destilador experimental de laboratorio...	26
6.	Destilador de laboratorio.....	27
7.	Diagrama a bloques del montaje experimental de laboratorio.....	28
8.	Vista general del montaje experimental en el interior del laboratorio.....	29
9.	Radiación solar a lo largo de tres días de experimentación.....	31
10.	Producción acumulada en intervalos de 15 minutos a lo largo de uno de los tres días de experimentación.....	31
11.	Producción total diaria como función de la distancia entre la salmuera y la cubierta $d$ , en el campo y producción acumulada nocturna.....	32
12.	Producción acumulada de dos horas respecto a la distancia entre la salmuera y la cubierta para diferentes diferencias de temperatura.....	33
13.	Producción acumulada para las distintas diferencias de temperatura como función de la distancia $d$ .....	34
14.	Naturaleza del fluido en el interior del destilador de laboratorio..	35
15.	Cuatro patrones de flujo bajo condiciones extremas de operación en el destilador experimental de laboratorio.....	36
16.	Velocidad del fluido para diferentes condiciones de operación...	37
17.	Imágenes consecutivas para la medición del desplazamiento del vórtice.....	39
18.	Temperaturas de la salmuera y la cubierta para el destilador de laboratorio.....	40
19a.	Gráfico para la estimación del coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y el vidrio.....	41

<b>19b.</b>	Gráfico del coeficiente $U_{wg}$ respecto a la diferencia de temperatura.....	41
<b>20.</b>	Radiación solar a lo largo del día para cuatro días de experimentación en campo.....	42
<b>21.</b>	Producción de agua destilada como función del tiempo.....	43
<b>22.</b>	Velocidad del viento a lo largo del día para cuatro días de experimentación en campo.....	43
<b>23.</b>	Diferencias de temperatura de la cubierta y del ambiente para el periodo de experimentación.....	44
<b>24.</b>	Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente.....	45
<b>25.</b>	Radiación solar a lo largo del día de experimentación.....	46
<b>26a.</b>	Velocidad del viento durante los días de experimentación.....	47
<b>26b.</b>	Temperatura ambiente durante los días de experimentación.....	48
<b>27.</b>	Temperatura de la salmuera medida experimentalmente ( $T_s$ ), calculada con los datos de la velocidad del viento ( $T_{s1}$ ) y con el viento suavizado ( $T_{s2}$ ).....	49
<b>28.</b>	Temperatura de la cubierta medida experimentalmente ( $T_g$ ), calculada con los datos de la velocidad del viento ( $T_{g1}$ ) y con el viento suavizado ( $T_{g2}$ ).....	50
<b>29.</b>	Producción de agua destilada medida experimentalmente y calculada con datos de la velocidad del viento y con el viento suavizado.....	51
<b>30.</b>	Correspondencia de la producción calculada y medida respecto a una recta de $45^\circ$ .....	52
<b>31.</b>	Concepción artística del fenómeno multicelular en el interior del destilador experimental de laboratorio.....	57
<b>32.</b>	Zonas de actividad en el interior del destilador experimental de laboratorio.....	58
<b>33.</b>	Producción en función de la diferencia de temperatura.....	59
<b>34.</b>	Número de Nusselt como función del número de Rayleigh especial.....	60
<b>35.</b>	Número de Nusselt como función de la velocidad del viento.....	61

## RESUMEN

Se reporta, por primera vez, la naturaleza de los flujos en el interior de los destiladores solares someros, y los mecanismos de transferencia de calor y masa. Estos estudios se apoyan en una congruencia entre los resultados de mediciones en prototipos, que operan al ambiente y en laboratorio, y revelan la naturaleza de los flujos mediante técnicas de visualización avanzadas. Los resultados coinciden con simulaciones en computadora.

A partir del análisis bibliográfico de trabajos relevantes sobre destilación solar, se advierten carencias y errores que se han arrastrado a lo largo de varios años. En este trabajo se reportan experimentos *in situ* sobre destilación solar, específicamente con seis destiladores solares someros de un metro cuadrado de área de evaporador, idénticos entre sí, excepto en la distancia de separación entre la salmuera y el vidrio  $d$ , con una relación de aspecto de alrededor de 0.2, con lo que se obtuvo la medición experimental del coeficiente global de transferencia de calor del vidrio al ambiente, siendo ésta una aportación original, encontrándose un valor relativamente alto de este coeficiente respecto al valor utilizado tradicionalmente por diversos autores. Se examinó en detalle la influencia de la producción de agua destilada como función de la distancia  $d$ .

Se desarrollaron experimentos en condiciones controladas de laboratorio en un destilador experimental, con una relación de aspecto de alrededor de 0.2, en el cual se pueden seleccionar diversas temperaturas, tanto en la salmuera como en el vidrio. Se encontró que el coeficiente de transferencia de calor entre la salmuera y el vidrio depende fuertemente tanto de la diferencia de temperaturas entre la salmuera y el vidrio, como de la temperatura de la salmuera, condición nunca antes reportada en la literatura. Se elabora entonces una novedosa relación de transferencia de masa, útil para el diseño de estos dispositivos.

Finalmente, se implantó un programa de cómputo que permite simular la operación de un destilador solar de este tipo. El modelo se alimenta con valores de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento. Los valores de las características de los materiales pueden ser modificados para evaluar diversos escenarios. El programa permite calcular la temperatura de la salmuera y del vidrio, así como la producción de agua destilada. La correlación entre los resultados teóricos obtenidos por este modelo y los reales es aceptable, con lo que se tiene una herramienta útil para el diseño y simulación de estos aparatos.

## ABSTRACT

The nature of fluid and heat and mass transfer mechanisms inside shallow solar stills, never reported before, is presented in this work. A very good correlation was found between solar stills under natural environmental conditions and those in the laboratory. A technique was developed using a laser beam which permitted visualization of the fluid dynamics under several extreme temperature conditions. Computer simulations agreed closely with field work.

A literature search was done in order to find the relevant works reported on solar distillation throughout many years. The present work describes several experiments which were performed *in situ*. Six one-square-meter solar stills were constructed; they were identical except for the distance from the brine to the condenser cover  $d$ , with an aspect ratio of around 0.2. These stills were used to obtain the experimental value of the overall heat transfer coefficient between the cover and the environment. A relatively high value of this coefficient was measured with respect to those values found elsewhere. The influence of  $d$  on distilled water production was found.

An experimental laboratory solar still with an aspect ratio of around 0.2, was constructed, in order to allow obtention for different brine and cover temperatures. The heat-transfer coefficient between the brine and the cover was calculated. It was discovered to be a function of the temperature difference between the brine and the cover and the brine temperature, a result not previously reported.

A lumped-parameter analysis of the solar still was achieved. From the energy balance of the system, a computer algorithm was implemented to calculate the brine and cover temperatures and distillate yield. Solar radiation, ambient temperature and wind speed were provided as data for the program. Other data, such as characteristic values of the different materials, may be obtained from tables found elsewhere in order to evaluate different scenarios. This program is a useful tool for the simulation and design of this type of solar still.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

La mayor parte del agua del planeta, más del 98 por ciento, está en el mar. Las demandas de agua dulce para agricultura y consumo humano aumentan constantemente, al tiempo que la contaminación del suelo y el aire reduce la proporción de agua potable. La disponibilidad de agua buena es cada día menor, además de que su distribución geográfica es inapropiada a la demanda.

La ingeniería intenta dilucidar los secretos del agua y su manejo. Los mecanismos e ingenios que se han desarrollado para ello, los muestra **Levi (1989)** de una manera apropiada. Se podría resumir que enseña a tener *una cultura del agua* en el amplio sentido de la frase.

San Francisco de Asís percibe desde un punto de vista poético y no por ello muy alejado de la ingeniería las características esenciales del agua: *-Laudato si mi Signore per sor aqua la quale e multo utile et humile et pretiosa et casta-*. El agua, así pues, en muchos sentidos lo es todo.

Este trabajo trata un aspecto particular del agua, *i.e.*, la destilación solar de agua de mar, probablemente una de las pocas alternativas viables para el futuro sustentable en la parte noroccidental de México y especialmente en la parte sur de la península de Baja California, región con gran potencial para la destilación solar por ser una de las de mayor insolación en el planeta y contar con grandes extensiones de costa, tanto del Golfo de California, como del Océano Pacífico.

El entorno de la justificación podría ampliarse; México cuenta con una gran cantidad de islas sin recursos acuíferos sustentables para su población, *v.gr.*, Isla Socorro, la de mayor extensión en el archipiélago de las Revillagigedo, en el Pacífico noroccidental mexicano, localizada a 500 km al sur de la península de Baja California. Esta isla permite a la nación incrementar a casi el doble su Zona Económica exclusiva en el Pacífico noroccidental, habitada por apenas unas 100 personas. Se requiere que se suministre agua por medio de los barcos de la Armada de México. No se percibe una tecnología *ad hoc* que la destilación solar para abastecer la isla.

Resulta entonces, que aquellos recursos empleados en desarrollar la tecnología *pertinente* para la destilación solar de agua de mar son recursos bien empleados.

Este trabajo pretende alcanzar dos grandes metas: contribuir al conocimiento científico del complejo fenómeno de la destilación solar; y por medio del entendimiento sobre el tema, producir agua destilada más barata con una tecnología más asequible, *i.e.*, aumentar la eficiencia de los destiladores solares.

En el capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica de más de 50 trabajos, seleccionados de unos 200 sobre destilación solar, o bien, de interés en el tema. Se destaca la falta de seriedad con la que diversos autores abordan el problema, lo que en ocasiones hace difícil discernir lo verdadero de lo falso. Se advierte que a lo largo de las últimas décadas, se han establecido algunas falacias.

El capítulo 3 se refiere al planteamiento del problema específico para los destiladores solares someros de una sola pendiente en la cubierta de vidrio, y se enuncian los principales objetivos del trabajo: medición de los coeficientes globales de transferencia de calor salmuera-vidrio y vidrio-ambiente, la caracterización del movimiento del fluido en el interior del destilador y la validación de un modelo matemático para el diseño de destiladores.

En el capítulo 4 se plantea un análisis matemático de parámetros concentrados con base en el balance de energía en cada uno de los elementos del destilador solar.

La metodología experimental se plantea en el capítulo 5, por medio de destiladores solares de campo y un destilador de laboratorio, en el que se pueden reproducir los resultados mediante el control de las principales variables físicas de interés.

En el capítulo 6 se muestran resultados de diversos experimentos en los últimos seis años, que incluyen la visualización del flujo en el interior del destilador solar, nunca antes reportado, y que aporta importantes elementos para el entendimiento del fenómeno.

Los resultados del modelo matemático propuesto se muestran en el capítulo 7; se comparan mediciones de campo con las temperaturas de vidrio y salmuera, así como la producción de agua destilada calculada por el modelo.

En el capítulo 8 se discuten los objetivos logrados, en el marco de lo publicado en la literatura, especialmente en lo referente a las discrepancias que se tienen con otros autores.

---

El capítulo 9 trata sobre las conclusiones relevantes de este trabajo y las recomendaciones para futuras investigaciones.

Finalmente, en el anexo I se hace un análisis de incertidumbre de los resultados experimentales y en el II se muestra detalladamente el diagrama de flujo y el programa de cómputo desarrollado para implantar el modelo matemático.

## CAPÍTULO 2

### ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

La destilación solar de agua es un procedimiento muy antiguo que la humanidad ha utilizado para satisfacer diferentes necesidades. **Maurel (1981)** y **Malik et al. (1982)** mencionan uno de los primeros tratados sobre destilación solar *De distillatione libri IX*, escrito por G.B. della Porta en 1589 en el cual describe un destilador solar con hemisferios de vidrio directamente expuestos al sol. **Telkes (1953)** menciona el trabajo de Lavoisier que utiliza concentradores solares para calentar alambiques en 1770, y describe los avances en cuanto a la fabricación y operación de destiladores solares convencionales de caseta y portátiles durante la segunda guerra mundial. Se analizan algunos elementos del destilador solar de manera aislada e independiente, se reportan diversos resultados experimentales, de los cuales destaca una gráfica de la eficiencia y la producción como función de la energía solar.

Posiblemente el trabajo más trascendente de las últimas décadas es el de **Dunkle (1961)**; es el primer reporte en el que se establecen las bases de un análisis completo de las ecuaciones de balance en los distintos elementos de un destilador solar mediante parámetros concentrados, tanto para un destilador convencional de caseta como para el que llama de difusión de efecto múltiple. Establece que para una temperatura promedio de 150°F (65.5°C) y una diferencia de temperatura entre las placas de 20°F (11.1°C), el número de Grashof es  $1.22 \times 10^6 d^3 \Delta T$ , donde  $d$  está en pies y  $\Delta T$  en °F, con lo que determina que el único mecanismo de transferencia es de conducción para placas con espaciamiento menor a 0.5 pulgadas. Su trabajo experimental se basa en cinco destiladores "difusivos" operados por varios meses, utilizando un calentador eléctrico en lugar de energía solar y concluye que la correspondencia entre las producciones experimentales y las calculadas no son buenas, pero su modelo lo encuentra como una herramienta adecuada para propósitos de diseño.

**Morse y Read (1968)** presentan tablas para evaluar diferentes flujos de calor en el proceso de destilación en destiladores de caseta; utilizan las ecuaciones de Dunkle y añaden un término de almacenamiento térmico para incluir el efecto de la tierra bajo el destilador. Las temperaturas de salmuera para calcular el calor de evaporación como función de la temperatura del vidrio son de 70 a 150°F (21.1 a 65.5°C).

Diversas variables se incluyen en su análisis, con lo que concluyen que el efecto del viento es poco importante en la producción de destilado, mientras que para la temperatura ambiente, un cambio de 80 a 100°F (26.6 a 37.7°C) causa un incremento de 11% en la producción, y que de 80 a 60°F (26.6 a 15.5°C) provoca una reducción del 14%.

**Cooper (1969)** reporta un trabajo puramente teórico en el que mediante el método de diferencias finitas resuelve las ecuaciones de balance de la cubierta y de la salmuera de un destilador solar de caseta. Se analiza el efecto de diferentes parámetros en la producción, de los cuales destacan la cantidad inicial de salmuera con y sin aislamiento térmico bajo la charola, de lo que concluye que sin aislante no se tiene un efecto significativo, pero para tirantes de 0.5 a 12 pulgadas el efecto de adicionar aislamiento térmico permite incrementar un 30% el destilado. Otra variable de interés es la velocidad del viento de la que observa que después de 5 millas/h el incremento en la producción es muy pequeño.

Diversos trabajos posteriores **Sodha et al. (1980,1981)**, **Tiwari et al. (1989)**, **Sharma y Mullick (1991)**, **Adhikari et al. (1991)**, **Yadav y Prasad (1991)**, **Tiwari y Lawrence (1991)**, **Ali (1993)**, **Singh y Tiwari (1993)**, **Sharma y Mullick (1993)**, **Shawaqfeh y Farid (1995a, b)**, **Mowla y Karimi (1995)**, han establecido las ecuaciones de balance de los destiladores solares de parámetros concentrados, basados todos ellos en el trabajo original de **Dunkle (1961)** con aportaciones marginales.

Uno de los trabajos más importantes es el de **Baum y Bairamov (1964)** acerca de un destilador experimental de laboratorio que permite aislar los diferentes parámetros que contribuyen a modificar la producción de agua destilada. El aparato opera bajo condiciones controladas, con lo que se puede obtener información de alta calidad, ya que el dispositivo se instrumenta para medición de temperaturas y humedades. Se desarrollan expresiones para calcular los coeficientes de transferencia de calor en un destilador solar de una sola pendiente y sección transversal de triángulo rectángulo. La temperatura de la salmuera varía de 23.4 a 97.1°C y la del condensador de 16.3 a 89°C, de tal manera que el número de Grashof para el evaporador varía entre  $3.27 \times 10^6$  y  $3 \times 10^7$ , mientras que para el condensador el intervalo es de  $3.78 \times 10^6$  a  $4.17 \times 10^7$ . Mediante un interferograma se muestra que las isoterms cercanas al evaporador y al condensador se concentran en una capa delgada, lo cual demuestra la presencia de una cierta capa límite cuyo grosor disminuye con el incremento de la temperatura del evaporador. Algunas conclusiones importantes de los autores son que solamente las capas periféricas de la mezcla agua-vapor participan en la transferencia de calor y masa en el interior del destilador solar y

el proceso de evaporación-condensación están interrelacionados, de tal suerte que uno intensifica al otro, por tanto, evaluarlos de manera separada conduce a errores.

Otros investigadores han recurrido a destiladores de laboratorio; **Kumar y Tiwari (1988)** utilizan un destilador somero de una sola pendiente de laboratorio alimentado con agua a temperatura constante de manera externa, con un baño de temperatura constante de 40 l a 70°C. Se inician las mediciones cuando la temperatura llega a 65°C y se varía la cantidad de masa inicial para 50, 30 y 10 Kg respectivamente. No hay control sobre la temperatura del vidrio ni del ambiente y éstas se miden cada hora. Sus conclusiones principales validadas experimentalmente, son que el coeficiente evaporativo de transferencia de calor depende fuertemente de la temperatura de la salmuera y que el cambio de masa de la salmuera no tiene un efecto significativo en la producción nocturna.

Sin embargo, se encuentran ciertas incongruencias en los resultados principales, que son la variación de los coeficientes de transferencia de calor de evaporación, conducción y radiación respecto al tiempo, no siendo claro ni la cantidad de agua y ni qué temperatura se usa en el destilador como carga inicial, ya que el texto no concuerda con las gráficas, donde aparentemente se utilizan 100 Kg de agua por arriba de 70°C, y dado que el baño controlado es sólo de 40 l no se entiende cómo se pueden cargar 100 ó 50 Kg de agua inicial a la vez. Por otra parte, los parámetros del sistema para apreciar los resultados numéricos no concuerdan con el experimento en laboratorio, especialmente en lo que respecta al coeficiente convectivo de transferencia de calor entre el vidrio y el ambiente con un valor de 24.7 W/m<sup>2</sup>°C, que se evalúa con un valor supuesto de velocidad de viento de 5 m/s y con los datos obtenidos por **Jurges (1924)** empleados por **McAdams (1954)** según lo refiere él mismo. Además, **Wattmuff (1977)** propone una corrección a este coeficiente basado en que los datos de Jurges originalmente fueron obtenidos por un flujo de aire paralelo a una placa vertical de cobre.

**Yadav (1990)** utiliza el mismo dispositivo experimental de **Kumar y Tiwari (1988)**; en este caso, se aclara que el destilador de laboratorio solamente tiene capacidad para 25 l de salmuera, el artículo intenta simular un destilador solar operado en laboratorio empleando masa y temperatura de salmuera constantes. Sus conclusiones son que encuentra una buena coincidencia entre los resultados teóricos y los experimentales del destilador solar bajo condiciones de laboratorio. Desafortunadamente, la única gráfica que presenta compara los valores teóricos con los experimentales y no permite verificar la validez de las conclusiones debido a los errores algebraicos al intentar calcular el flujo másico

de destilado por metro cuadrado. Por otra parte, sólo se presentan resultados numéricos de los coeficientes de transferencia de calor, los cuales no es claro de qué manera se obtienen, al no reportar mediciones sobre las temperaturas del vidrio y del ambiente. Otra incongruencia es que los coeficientes de transferencia de calor sean constantes, mientras que el destilado varía durante las cinco horas del experimento y no hay control sobre la temperatura del vidrio.

**Adhikari et al. (1990)** utilizan un montaje experimental a base de una charola calentada eléctricamente y una superficie condensadora de tipo caseta invertida sobre el evaporador. Se calcula el número de Grashof para diferentes temperaturas y se comparan las correlaciones para calcular el número de Nusselt como función de los números de Grashof y Prandtl. Se concluye que la relación de Dunkle para estimar el coeficiente evaporativo de transferencia de calor es válido para números de Grashof menores de  $2.5 \times 10^5$ . En este trabajo no hay control en la temperatura de la salmuera, y los experimentos se desarrollan a temperaturas muy por encima de las que Dunkle utilizó en sus trabajos. Otra posibilidad por la que no hay congruencia con los resultados de Dunkle es la diferente geometría y relación de aspecto utilizados.

Diversos investigadores han evaluado la importancia de la relación de aspecto de las cavidades para describir el movimiento del fluido y la distribución de temperaturas. Sin embargo, en estos estudios no se considera el cambio de fase para el fluido de trabajo tal y como sucede en un destilador solar.

**Okeke (1979)** en su tesis doctoral desarrolla un trabajo de visualización de convección natural en colectores solares planos de sección cuadrangular, con relaciones de aspecto (H/L) diversas; en particular, las de interés para este análisis bibliográfico son aquellas en el intervalo de  $0.1 < H/L < 0.2$  para el caso de destiladores solares someros. La técnica de visualización utilizada fue un arreglo de luces que proporcionan un haz de luz colimado, y mediante la introducción de humo en el interior del colector solar permite la visualización directa y el registro de las imágenes por medio de fotografías. En las imágenes se aprecian rollos múltiples que se incrementan para las diferencias de temperatura más elevadas, los rangos son  $10^\circ\text{F} < \Delta T < 40^\circ\text{F}$  ( $5.5^\circ\text{C} < \Delta T < 22.2^\circ\text{C}$ ) y  $1840 < \text{Ra} < 8600$ . Los rollos parecen razonablemente estables y para números de Rayleigh bajos revelan actividad tipo Bénard que tienden a desaparecer cuando la actividad convectiva se incrementa.

La convección natural en áticos, con relaciones H/L similares a las utilizadas en destiladores solares ha sido ampliamente estudiada por **Poulikakos y Bejan (1983 a, b y c)**. El problema es tratado analíticamente y mediante la solución numérica se concluye que habrá una celda de circulación en la cavidad

bajo condiciones de calentamiento en el fondo y enfriamiento en el techo, los números de Rayleigh en áticos pueden alcanzar valores de  $10^9$ . La evidencia experimental de este hecho se tomó para valores del número de  $Ra < 10^6$ , característicos de cavidades triangulares encontradas en destiladores solares de **Flack et al. (1979)**, una sola celda se aprecia cuando  $H/L$  tiende a cero.

**Palacio y Fernández (1993)** efectúan un análisis numérico en un destilador solar de caseta considerando la mitad de la sección transversal con  $H/L = 0.5$ . Los resultados muestran que el fluido se mueve en una sola celda con velocidades máximas de 0.04 m/s. Estos resultados concuerdan con la hipótesis de **Baum y Bairamov (1964)** en la que para un destilador solar con una relación de aspecto similar se tiene una sola celda de circulación.

Cabe mencionar que no se encontró en la literatura visualización para el interior de destiladores solares.

Un elemento de los destiladores solares que ha recibido gran atención para su estudio es el relativo a las diferentes condiciones en las que se puede tratar la salmuera.

Los cambios de las condiciones ópticas han sido estudiados por diversos autores; **Cooper (1972)** concluye que la formación de capas de sal sobre la salmuera afectan de manera significativa el desempeño de un destilador solar, **Sodha et al. (1980)** llegan a la misma conclusión. Adicionalmente, con las relaciones de Dunkle linealizadas, se concluye que al añadir un colorante negro a la salmuera el destilado puede incrementarse significativamente; en el trabajo, se utiliza una relación linealizada para el cálculo de las presiones parciales de vapor que no corresponde a los valores universalmente aceptados como pueden ser las tablas de **Keenan et al. (1969)**; ésta es sin duda una de las variables más importantes para los cálculos de los coeficientes de transferencia de calor, por tanto, para el desempeño del destilador solar.

**Rajvanshi (1981)** concluye que se puede aumentar un 29% el destilado mediante un colorante negro. **Sodha et al. (1981)** en un estudio sobre un destilador solar doble llegan a una conclusión similar: un aumento entre 10 y 15% en la producción con la presencia de un colorante negro. **Tamimi (1987)** en un destilador solar de sección transversal de triángulo rectángulo con una relación de  $H/L$  de 1.27, utiliza colorante negro en la salmuera y concluye que el desempeño del destilador aumenta de manera significativa; adicionalmente experimenta con espejos en el interior del destilador solar lo que incrementa considerablemente la producción.

**Lawrence et al. (1988)** y **Tiwari et al. (1989)** continúan la experimentación de colorantes y ensayan sus modelos para predecir la producción de destilado con colorantes en salmuera, concordando con el trabajo de **Sodha (1980)**.

**Lawrence et al. (1990)** describen un análisis transitorio para destiladores solares convencionales en el cual incorporan los efectos de un flujo de agua sobre el vidrio y la masa de agua en la charola. Los resultados numéricos se comparan con un día de experimentación y se concluye existe una buena concordancia entre los resultados teóricos y los experimentales, incrementando la eficiencia del destilador solar con la presencia de un flujo de agua sobre la cubierta. La expresión utilizada para el cálculo de las presiones parciales de vapor es la misma de **Sodha (1980)**.

**Tiwari y Lawrence (1991)** pretenden establecer una nueva relación de transferencia de calor y masa para destiladores solares al sustituir algebraicamente la expresión para el cálculo de la diferencia de temperaturas entre el evaporador y el condensador como función de las presiones de vapor descrita por **Malik (1982)** en la expresión del número de Rayleigh local. Se incorpora a la ecuación de **Holland et al. (1976)**, lo que permite calcular el coeficiente convectivo de transferencia de calor para un colector plano inclinado, con lo que según esto puede incorporarse el efecto de la inclinación de las cubiertas de vidrio y el espaciamiento entre el evaporador y el condensador. En realidad, lo descrito no es exacto, ya que **Malik et al. (1982)**, mencionan que **Sharpley y Boelter (1938)** son quienes introducen el concepto de un número de Grashof especial en el que se tiene transferencia de calor y masa de manera simultánea.

Otra variante en el evaporador consiste en la incorporación de algún material como tela de yute, que permita retener humedad y utilizarla en lugar de salmuera; **Telkes (1955)** es la primera en proponer este tipo de destilador, el cual además puede inclinarse para recibir mayor insolación. El problema consiste en mantener perfectamente humidificada la tela para aumentar su durabilidad. **Sodha et al. (1981)** retoman la idea y obtienen un destilado de  $2.51 \text{ l/m}^2\text{-día}$  correspondiente a una eficiencia del 34% comparada con la eficiencia máxima encontrada por ellos del 30% en un destilador típico.

**Nayak et al. (1980)** reportan la teoría periódica para un destilador solar de una sola pendiente con gran capacidad de carga de salmuera cuando éste es puesto sobre el suelo o bien montado en una base. Sus conclusiones son que la producción del destilador es independiente del aislamiento por debajo de él; esta teoría es válida solamente para grandes cantidades de salmuera debido a que las pérdidas evaporativas son mucho menores comparadas con la masa

de agua. Para pequeñas cantidades de agua, el destilado no puede estimarse con esta teoría. Si se mantiene un nivel constante, inclusive para pequeñas profundidades de agua, el modelo puede aplicarse para estimar el destilado. Se asume también que la presión de vapor tiene una dependencia lineal con la temperatura para el rango de temperaturas del vidrio y el agua. La expresión empleada para el cálculo de la presión de vapor, debe emplearse con mucha reserva, ya que especialmente para temperaturas superiores a 45°C el error es muy significativo. A temperaturas típicas de salmuera de 80°C el valor de la presión que se obtiene de tablas es de 0.4739 Bar, mientras que con la expresión empleada en este trabajo el valor que se obtiene para la misma temperatura es de 0.19508 Bar. Lo que resulta sorprendente es que se logren curvas prácticamente idénticas para el destilador montado en una base y colocado sobre el suelo. Otro error apreciable en este tipo de trabajos es el considerar a los coeficientes de transferencia de calor constantes.

**Yadav y Prasad (1991)** emplean el trabajo de **Nayak et al. (1980)** y evalúan paramétricamente el desempeño de un destilador solar de una sola pendiente, particularmente sobre su eficiencia respecto a la cantidad de salmuera y su temperatura, así como para diferentes absortancias de la charola. Se concluye que la eficiencia disminuye cuando se aumenta la masa de agua de la salmuera. La eficiencia del destilador aumenta cuando la temperatura inicial del agua se aumenta, así como la absortancia de la charola.

**Garg y Mann (1976)** reportan una serie de resultados experimentales en donde comparan diferentes variables climáticas, así como parámetros tanto de diseño y de operación, para valorar el desempeño de destiladores solares de una sola pendiente y del tipo de caseta bajo climas áridos a una latitud de 26.3°N y 13.06° N en la India. Las conclusiones obtenidas señalan que la producción de un destilador solar aumenta al incrementar la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad de viento. La producción no se afecta por la presión de vapor del aire atmosférico y el aislamiento en la base permite incrementar 7 % el destilado de agua. Un ángulo menor en la pendiente del vidrio resulta en una mayor producción, se encuentra que 10° es el ángulo óptimo en la inclinación del vidrio. La productividad aumenta al utilizar menor tirante inicial de agua, al incrementar la absortividad del agua por medio de colorantes y usando precalentamiento en la salmuera. Este artículo sin embargo, no permite identificar las características que aisladamente pudieran tener mayor relevancia.

**Karim (1978)** refuta alguna de las conclusiones obtenidas por **Garg y Mann (1976)**, argumentando que los cambios obtenidos en la producción de destilado pueden deberse a efectos combinados tanto en cambios de altura entre la salmuera y el vidrio y los ángulos de inclinación, y concluyen que la

altura del destilador solar es un parámetro significativo de diseño en destiladores solares.

**Clark (1990)** escribe un artículo sobre el desempeño en régimen permanente de un destilador solar donde establece que debido a una serie de contradicciones que aparecen en trabajos publicados con anterioridad, desarrolla un experimento para ofrecer la evidencia para dilucidar dicha controversia y modificar el modelo originalmente propuesto por **Dunkle (1961)**. El aparato experimental que reporta es de una sola pendiente de  $15^\circ$  para el vidrio y una área para el evaporador de  $0.177 \text{ m}^2$  con una profundidad aproximada de  $0.025 \text{ m}$ . En lugar de medir la temperatura en la salmuera, se coloca un termopar debajo de la charola de agua para que la radiación directa no afecte la medición de temperatura, por esta misma razón la temperatura del vidrio no fue medida. Se utiliza un simulador solar con lámparas incandescentes y las mediciones se hicieron a una temperatura ambiente de  $22.5^\circ\text{C}$  en el laboratorio. Las eficiencias variaron del 42 al 60% mientras que las temperaturas de la salmuera fueron de  $55$  a  $91^\circ\text{C}$ , se encuentra que el modelo original de Dunkle sobrepredice la eficiencia del destilador y es más acertado a mayores temperaturas. Dicha conclusión sorprende debido a que en el trabajo de **Dunkle (1961)**, en su desarrollo experimental para 5 destiladores, la temperatura máxima que empleó fue de  $71^\circ\text{C}$  mientras que en este experimento la temperatura de la salmuera alcanzó  $91^\circ\text{C}$ , por lo que el modelo de Dunkle en realidad se desarrolló para temperaturas relativamente bajas. Las condiciones en las que se desarrolla este singular trabajo no parecen tener un buen sustento experimental, ya que el no medir las temperaturas de la salmuera y el vidrio, que son variables fundamentales para cualquier análisis en destiladores solares, se puede incurrir en errores importantes, de la misma manera que el seleccionar una área de evaporación y condensación tan pequeñas.

**Tiwari et al. (1994)** en un trabajo meramente teórico desarrolla un análisis térmico de un destilador solar para obtener la máxima producción a través de la pendiente óptima del vidrio, se concluye que para las condiciones climáticas de Delhi en el verano un ángulo de  $10^\circ$  produce el máximo destilado, mientras que para el invierno la inclinación debe ser tan grande como sea posible para obtener la máxima producción. Tal como **Karim (1978)** señala atinadamente, no se separan los efectos de cambiar la distancia entre salmuera y vidrio y el ángulo de inclinación del condensador, por lo que estas conclusiones deben de tomarse con reserva.

**Singh et al. (1995)** con un modelo similar al empleado por **Tiwari et al. (1994)** encuentran de manera teórica que para un destilador solar de caseta, la mejor

orientación para las condiciones de Delhi es la dirección este-oeste con una inclinación de 55° para el vidrio.

**Mowla y Karimi (1995)** simulan matemáticamente la operación de un destilador solar y lo validan experimentalmente. El artículo no aporta absolutamente nada nuevo y sin embargo sí tiene una gran cantidad de errores de los que destacan los cálculos que estiman una producción de 8 Kg/m<sup>2</sup>-día con lo que se obtendría una eficiencia cercana al 80% la cual no se alcanza ni con los destiladores someros desarrollados por **McCracken (1990a)**.

**Shawaqfeh y Farid (1995a)** proponen un modelo para evaluar la operación de un destilador solar con etanol como destilando. Se concluye que los modelos empleados sobrepredicen los flujos de calor a altas temperaturas y concentraciones, por lo que se requiere de más trabajo para verificar si la sobreproducción existe.

**Shawaqfeh y Farid (1995b)** mediante un destilador de 0.98 X 0.98 m calentado con una resistencia eléctrica de 525 W encuentran que el modelo de Dunkle sobrepredice en un 30% las tasas de evaporación, por lo que desarrollan un modelo que encuentra una mejor predicción. En este trabajo se pueden apreciar una gran cantidad de errores, destacando que con un día de mediciones y sin control en las temperaturas del destilador se llegue a tales conclusiones.

**Kwatra (1996)** en un trabajo puramente teórico de simulación de un destilador solar con el área de evaporador incrementada, encuentra que al cuadruplicar el área de evaporación se obtiene un 19.6% más de destilado y con una área de evaporación infinita se obtendría alrededor de un 30.2% más de producción.

Como puede apreciarse, aún existe una gran inconsistencia en muchos de los resultados reportados en la literatura, con conclusiones algunas veces contradictorias, tal vez debido a la falta de rigor científico con el que se desarrollan los diferentes experimentos. Un número apreciable de los trabajos revisados son repetitivos y no aportan novedades en el tema. Se aprecia en lo general metodología experimental inadecuada por lo que se hace necesario corregir algunas de estas anomalías para lograr un entendimiento de la destilación de agua de mar más cercano a la realidad.

## CAPÍTULO 3

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los destiladores solares someros con una relación de aspecto (H/L) de 0.2 son los más eficientes en la literatura (**McCracken, 1990a**), por tanto, tiene desde el punto de vista económico gran importancia conocer a profundidad la manera en que funcionan estos dispositivos, de tal suerte que pueda aumentarse la eficiencia y de esta manera bajar los costos de producción de agua destilada.

Para lograrlo, deben desarrollarse el entendimiento y la comprensión del proceso de la destilación solar. Si bien han sido reportados en la literatura gran cantidad de trabajos, como se desprende del análisis bibliográfico, existe también una carencia de metodologías adecuadas y rigor científico para tratar este tema tan importante y por ello poca credibilidad en los resultados, muchas veces contradictorios.

Algunos aspectos no abordados de manera correcta se refieren a la medición de temperaturas en todo el sistema. Parece trivial la manera en que debe instrumentarse un equipo de esta naturaleza; sin embargo, es precisamente en la medición y registro de esta variable donde se presentan las mayores incertidumbres. Los errores al medir temperaturas pueden sesgar los resultados y llegar a conclusiones incorrectas; la mayoría de los autores ni siquiera mencionan la metodología empleada.

Un problema generalizado en la literatura estriba en los intervalos de tiempo seleccionados para medir destilado, radiación solar y temperaturas. Un lapso de 60 minutos ha sido utilizado por una gran diversidad de autores. Un sistema como el destilador solar somero en condiciones de operación normales está sujeto a la variabilidad climática intrínseca de cada lugar; por tanto, los efectos dinámicos importantes no pueden ser apreciados en dicho intervalo.

Otra carencia en los trabajos revisados se refiere a los destiladores "experimentales de laboratorio", donde supuestamente debe haber un control sobre las variables de interés para obtener información confiable; casi todos los experimentos se realizan en lazo abierto sin ninguna retroalimentación, por lo que no es posible el control de ninguna de las variables de interés.

Otro factor que influye en los resultados se refiere al número de experimentos. Se dan casos en que con un solo experimento y sin ninguna réplica adicional se llega a conclusiones generales.

En el caso de modelos matemáticos ya desarrollados, a pesar del planteamiento de las ecuaciones desde el punto de vista del balance energético, el hecho de considerar constantes tanto la temperatura ambiente como el coeficiente de transferencia de calor entre la salmuera y el vidrio; en algunos casos entre el vidrio y el ambiente impide percibir adecuadamente la dinámica del sistema y sólo hacer estimaciones del comportamiento de un destilador solar.

En este trabajo se plantea el estudio de un destilador somero, denominado tipo McCracken (fig. 1), cuyos objetivos principales son:

- Medición de los coeficientes globales de transferencia de calor entre la salmuera y el vidrio, y entre el vidrio y el ambiente.
- Caracterización del movimiento del fluido en el interior de un destilador solar tipo McCracken.
- Validación de un modelo matemático de parámetros concentrados que permita la simulación de un destilador mediante variables reales de operación, como radiación solar, temperatura ambiente y velocidad de viento.

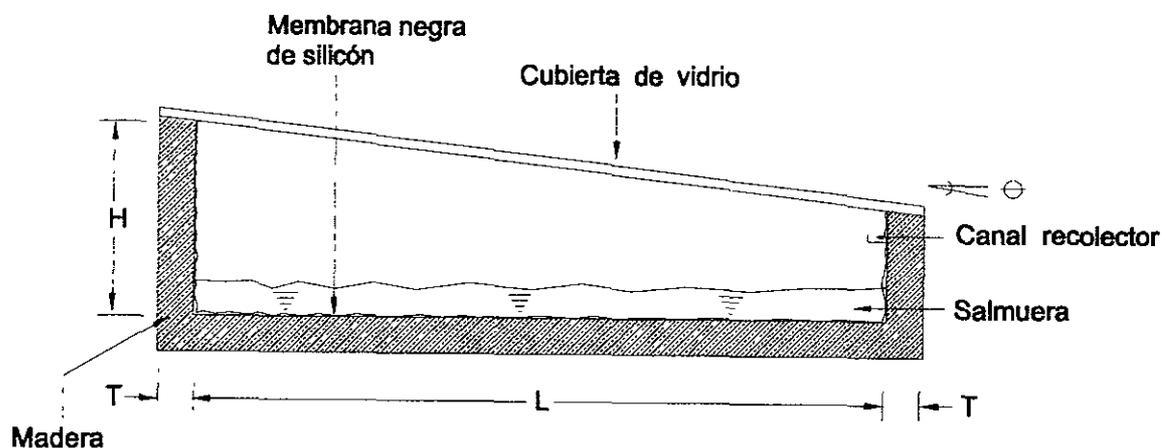


Fig. 1 Sección transversal de un destilador solar somero tipo McCracken.

El coeficiente global de transferencia de calor, particularmente entre salmuera-vidrio, es el de mayor importancia en el entendimiento de los mecanismos de transferencia de calor y masa en el interior del destilador; en este coeficiente se agrupan los mecanismos de convección, evaporación, condensación, radiación y difusión, por lo que su adecuada estimación es sumamente importante y debe de hacerse en condiciones controladas a través del planteamiento metodológico experimental adecuado.

Debido a que no existe ningún antecedente sobre visualización en destiladores solares, se hace indispensable observar el movimiento del fluido en el interior de un destilador solar somero, que permita conocer, registrar y medir las características del fluido, además de evaluar el papel de la distancia de separación entre salmuera y vidrio respecto a su variación en pequeños intervalos, y comparar con los resultados teóricos de la literatura para cavidades con geometrías y relaciones de aspecto similares.

Es de importancia desarrollar un modelo matemático calibrado para distintas condiciones ambientales que permita predecir el comportamiento de destiladores solares, que sirva como herramienta de diseño y planeación para plantas desaladoras de agua de mar.

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS MATEMÁTICO

Para entender el funcionamiento de los destiladores solares se plantea un análisis con base en un balance de energía en cada uno de los elementos del sistema: condensador (g), salmuera (w) y fondo (b), con base en un sistema de tres ecuaciones diferenciales de parámetros concentrados, cada elemento se representa con un valor de temperatura.

El uso de parámetros concentrados es una práctica establecida; los modelos matemáticos de este tipo son referidos ocasionalmente con el nombre de *modelos de Cooper para dar crédito de P.I. Cooper, quien probablemente fue el primero en dar a este enfoque amplia difusión (Cooper, 1969).*

#### 4.1 Balance energético

El balance energético en cada uno de los elementos se hace con fundamento en el principio básico de la ley de la conservación de la energía, que en su forma general expresa los cambios respecto al tiempo de la cantidad de energía almacenada en alguno de los elementos de un sistema, en función de las energías que entran y salen del mismo, considerando ausencia de trabajo mecánico, por lo que se puede escribir:

$$\frac{dE_z}{dt} = E_i - E_o \quad (1)$$

donde :  $E_z$  Energía almacenada en el sistema.

$E_i$  Energía que entra al sistema.

$E_o$  Energía que sale del sistema.

## 4.2 Balance en el condensador

La cantidad de calor acumulado por unidad de área horizontal en el condensador, está determinado por la energía solar disponible menos las pérdidas al ambiente y a la salmuera, determinadas por los coeficientes globales de transferencia de calor y sus diferencias de temperatura respectivamente, de tal forma que se puede escribir:

$$U_{wg}(T_w - T_g) + a_g G - U_{ga}(T_g - T_a) = m_g c_g \frac{dT_g}{dt} \quad (2)$$

donde:

- $U_{wg}$  Coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta.
- $U_{ga}$  Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente.
- $T_w$  Temperatura de la salmuera.
- $T_g$  Temperatura de la cubierta.
- $T_a$  Temperatura ambiente.
- $a_g$  Coeficiente de absorción para la cubierta.
- $G$  Radiación solar en el plano inclinado.
- $m_g$  Masa de la cubierta.
- $c_g$  Calor específico de la cubierta.

además:

$$a_g = \alpha_g(1 - \rho_g) \quad (3)$$

en la que:

- $\alpha_g$  Absortancia de la cubierta.
- $\rho_g$  Reflectancia de la cubierta.

### 4.3 Balance en la salmuera

La energía acumulada por unidad de área en la salmuera se determina mediante la diferencia entre la energía solar transmitida por el condensador y las pérdidas al vidrio y al fondo que se calculan con base en las diferencias de temperatura, y en los coeficientes globales de transferencia de calor respectivamente:

$$a_w G - U_{wg}(T_w - T_g) - U_{wb}(T_w - T_b) = m_w c_w \frac{dT_w}{dt} \quad (4)$$

donde:

- $U_{wb}$  Coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y el fondo.
- $T_b$  Temperatura del fondo.
- $a_w$  Coeficiente de absorción para la salmuera.
- $m_w$  Masa de la salmuera.
- $c_w$  Calor específico de la salmuera.

además:

$$a_w = \alpha_w \tau_g (1 - \rho_g)(1 - \rho_w) \quad (5)$$

en la que:

- $\alpha_w$  Absortancia de la salmuera.
- $\tau_g$  Transmitancia de la cubierta.
- $\rho_w$  Reflectancia de la salmuera.

### 4.4 Balance en el fondo

La energía acumulada por unidad de área en el fondo del destilador está dada por la fracción de la energía solar que alcanza el fondo, determinada por las propiedades ópticas tanto de la salmuera como del condensador, menos las pérdidas térmicas al medio ambiente y a la salmuera calculadas con las diferencias de temperatura y los coeficientes globales de transferencia de calor:

$$a_b G + U_{wb}(T_w - T_b) - U_{ba}(T_b - T_a) = m_b c_b \frac{dT_b}{dt} \quad (6)$$

donde:

- $U_{ba}$  Coeficiente global de transferencia de calor entre el fondo y el ambiente.  
 $a_b$  Coeficiente de absorción para el fondo.  
 $m_b$  Masa del fondo.  
 $c_b$  Calor específico del fondo.

además:

$$a_b = \alpha_b \tau_g \tau_w (1 - \rho_g)(1 - \rho_w)(1 - \rho_b) \quad (7)$$

en la que:

- $\alpha_b$  Absortancia del fondo.  
 $\tau_w$  Transmitancia de la salmuera.  
 $\rho_b$  Reflectancia del fondo.

En las ecuaciones anteriores se cumple que para un mismo elemento del sistema la suma de reflectancia, transmitancia y absortancia es igual a la unidad.

#### 4.5 Números adimensionales

En el caso de transferencia de masa entre dos fluidos de diferente peso molecular como la destilación de agua, se requiere un número especial de Grashof, tal y como **Sharpley y Boelter (1938)** lo han descrito según **Malik et al. (1982)**, lo que implica modificar la diferencia de temperaturas en el número de Grashof normal por una nueva diferencia aparentemente mayor debida a la diferencia de las presiones de vapor entre el evaporador y el condensador:

$$\Delta T' = (T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g)T_w}{2.8 - P_w} \quad (8)$$

donde:

- $\Delta T'$  Diferencia de temperatura modificada.
- $P_w$  Presión parcial de vapor de la salmuera.
- $P_g$  Presión parcial de vapor de la cubierta.

Por lo que el número especial de Grashof es:

$$Gr_e = \frac{x^3 g \beta}{\nu^2} \Delta T' \quad (9)$$

donde:

- $x$  Distancia característica.
- $g$  Aceleración normal de la gravedad.
- $\beta$  Coeficiente térmico de expansión volumétrico.
- $\nu$  Viscosidad cinemática.

y por tanto el número de Rayleigh especial es:

$$Ra_e = Gr_e Pr \quad (10)$$

donde:

- Pr Número de Prandtl,  $c_p \frac{\mu}{k}$

Para el cálculo del número de Nusselt experimental se utiliza la expresión:

$$Nu = h_{wg} \frac{x}{k} \quad (11)$$

donde  $h_{wg}$  se mide experimentalmente con el flujo másico del destilado por la entalpía de cambio de fase entre la diferencia de temperaturas de la salmuera y la cubierta, y es igual al coeficiente global de transferencia de calor  $U_{wg}$ .

Según **Malik et al. (1982)**, cuando existe transferencia de calor y masa simultáneamente, y el número de Lewis es igual a uno, como es el caso de la destilación solar, quiere decir que la transferencia de calor es análoga a la de la masa, y por tanto, se pueden establecer las correlaciones de transferencia de masa cambiando el número de Nusselt por el de Sherwood, y el número de Prandtl por el de Schmidt.

## CAPÍTULO 5

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para cumplir con los objetivos planteados, se diseñaron y construyeron dos tipos de destiladores solares: destiladores de campo y destilador de laboratorio.

#### 5.1 Destiladores de campo

El conjunto experimental de destiladores solares someros consiste en seis aparatos de  $1 \text{ m}^2$  de área, idénticos entre sí, excepto en la distancia media de altura entre la salmuera y la cubierta  $d$ , con la finalidad de establecer en detalle la relación de aspecto óptima para este tipo de aparatos someros y lograr los dispositivos más eficientes. Con base en la revisión bibliográfica, diversos autores como **Cooper (1969)**, han tenido interés por entender la influencia de la distancia entre la salmuera y el condensador en destiladores solares directos. Otros (**Yadav y Prasad 1991, Garg y Mann 1976**) han evaluado la separación entre la salmuera y el condensador de manera indirecta, pero a través de la modificación en la inclinación de la cubierta, así como para diferentes tirantes de salmuera lo cual modifica la distancia  $d$  combinada con estos otros efectos, que en el caso de cantidad inicial de salmuera es mucho más significativo en el cambio de la producción del destilador. Otro de los objetivos propuestos es la medición del coeficiente global de transferencia de calor entre el vidrio y el ambiente con base en la información *in situ* a partir de la correlación entre la producción y la velocidad de viento.

La sección transversal de los destiladores de campo en la fig. 2, muestra la construcción y geometría que el destilador de **McCracken y Porta (1990b)** *ex nunc* MP, con la diferencia de que el interior del destilador está construido en vidrio en los seis costados de la cavidad, lo que garantiza el fondo plano. La cavidad se encuentra recubierta con una pulgada de aislamiento térmico de poliestireno expandido en las cinco caras inferiores y una cubierta de vidrio condensadora con un ángulo de inclinación de  $4^\circ$ . La diferencia entre un aparato y otro es la distancia  $d$ . Para asegurar que el contenido de salmuera inicial sea el mismo; la altura media de cada aparato es distinta, desde  $55 \times 10^{-3} \text{ m}$  para el primero hasta  $118 \times 10^{-3} \text{ m}$  para el sexto, medido del fondo de la charola al vidrio. Los seis aparatos se cargan inicialmente con 7 l de agua destilada, lo cual elimina los efectos de la variación en la composición química de la salmuera a lo largo de todos los periodos de experimentación.

Los experimentos se desarrollaron con los seis destiladores bajo las mismas condiciones de operación ambientales entre el alba y el ocaso. Se midió el acumulado de la producción nocturna del destilador; el montaje experimental se muestra en la fig. 3.

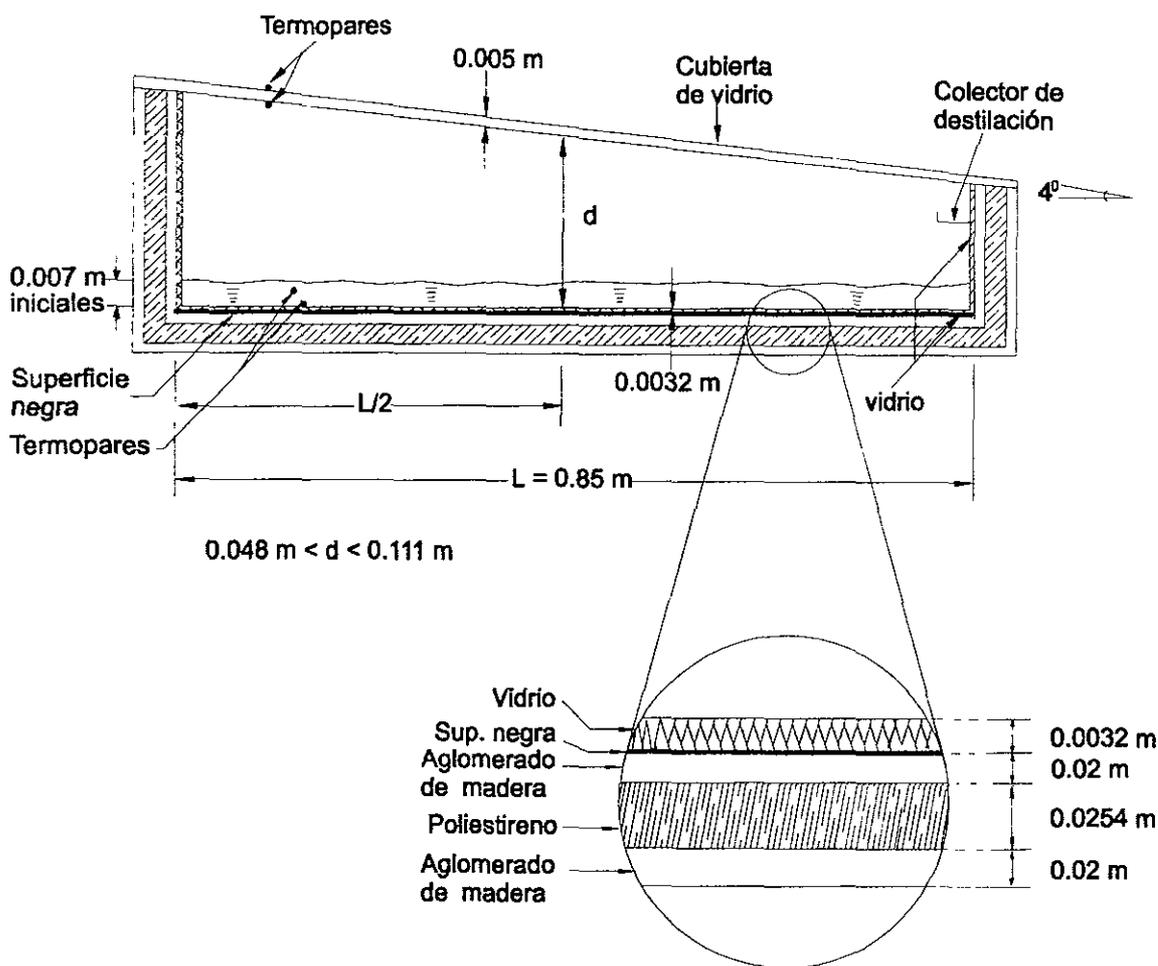


Fig. 2 Sección transversal del destilador de campo.

Para la medición de temperaturas se utilizaron termopares tipo J, cuya calibración se realizó con las técnicas aceptadas mediante el uso de agua de hielo en agitación como temperatura de referencia a  $0^\circ\text{C}$ , registrando las

diferencias entre los termopares para posteriormente poder hacer las correcciones debidas a los errores intrínsecos de cada termopar.

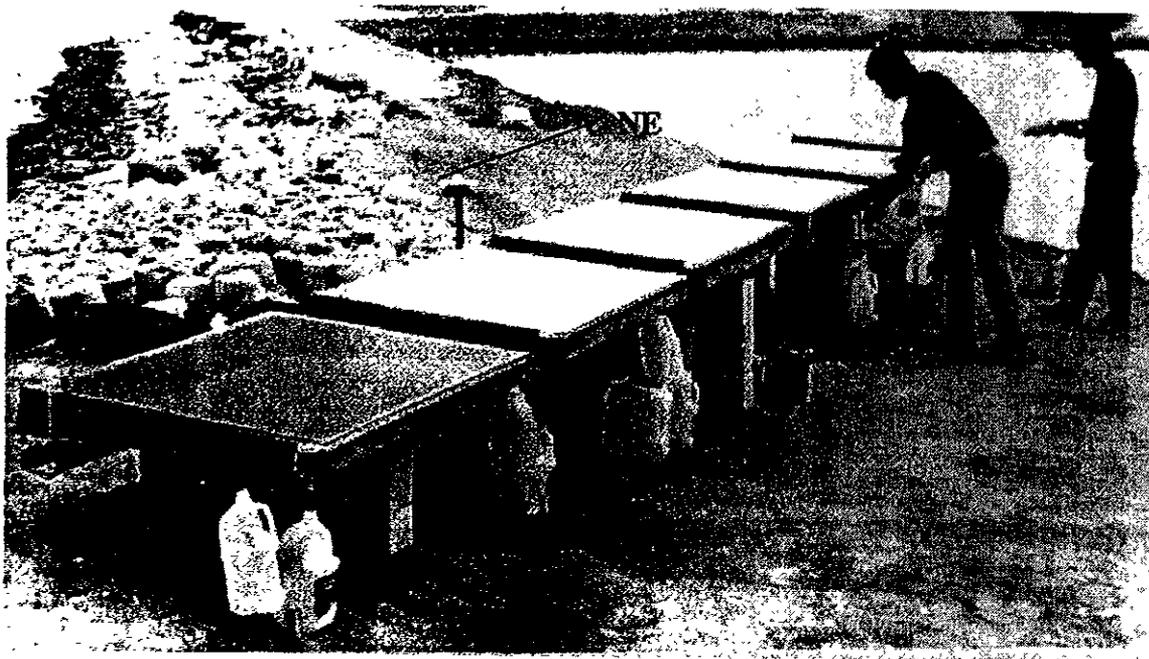


Fig. 3 Destiladores solares someros en operación alineados NE-SO.

Se colocaron en cada destilador tres termopares para registrar las temperaturas interior y exterior del condensador, así como la temperatura de la salmuera. La fijación de los termopares se hizo con una resina epóxica de color blanco con una conductividad similar a la del vidrio. Para evitar la influencia de la radiación solar directa sobre los termopares se colocó una banda de sombra. Un termopar se empleó para el registro de la temperatura ambiente a cobijo del viento y radiación solar.

La radiación solar se midió con un piranómetro Kahlsico, modelo 3209, con una constante de calibración de  $18 \mu\text{V/Wm}^2$ . La velocidad de viento se midió con un anemómetro de copas de registro continuo de desarrollo propio.

Mediante equipo computarizado se monitorearon las temperaturas con una frecuencia de un segundo, al igual que la radiación solar, para obtener un promedio representativo a un intervalo de 900 segundos; durante este tiempo se

acumuló el destilado y se midió con una probeta calibrada. Se obtuvo un dato representativo de la velocidad de viento al integrar el número de revoluciones en el intervalo de tiempo por la constante del anemómetro de 0.6 m/rev.

La fig. 4 muestra algunos instrumentos para las mediciones experimentales, como radiómetro, anemómetro y termómetros.

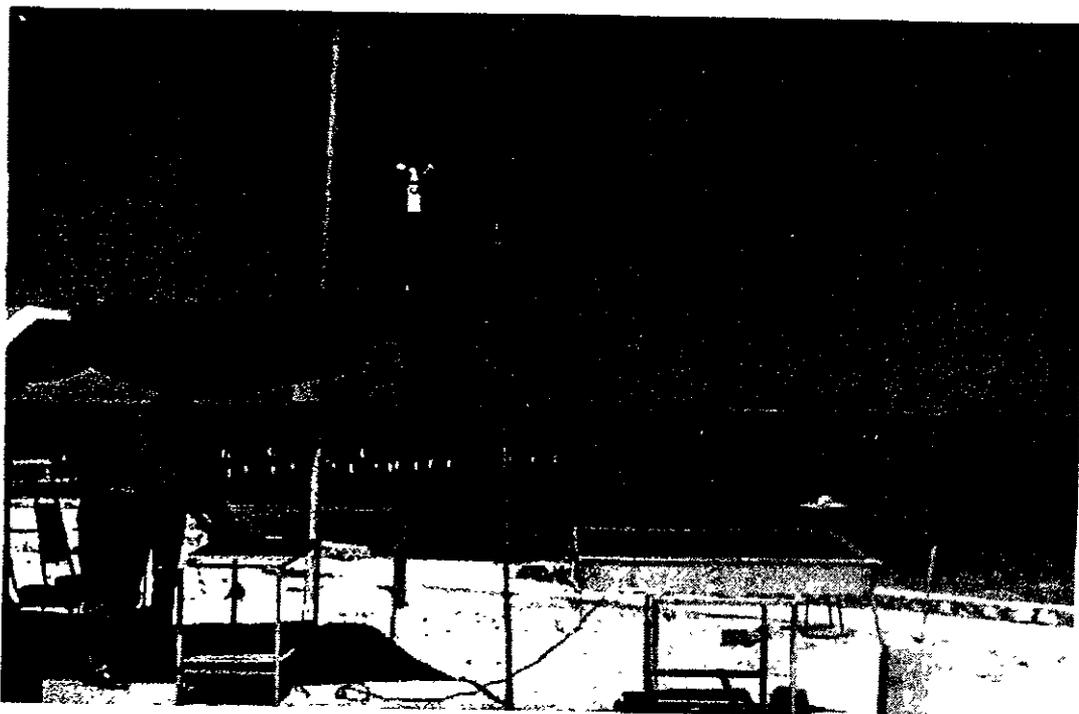


Fig. 4 Vista general *in situ* de los instrumentos de medición.

## 5.2 Destilador de laboratorio

Con la finalidad de estudiar los mecanismos de transferencia de calor y masa en los destiladores solares someros, se diseñó un destilador de laboratorio en el cual se puede establecer de manera controlada una diferencia de temperaturas entre el evaporador y el condensador tal y como sucede en la operación normal de un destilador solar; opera bajo condiciones de control de lazo cerrado para lograr repetibilidad entre los diferentes experimentos que se desarrollaron. Se diseñó de tal forma que permitiera variar la distancia entre el evaporador y el condensador de manera continua y cubrir el rango de sus diferencias de

temperatura más allá de lo que sucede en operación real, así como la visualización del movimiento del fluido en su interior.

Uno de los objetivos de mayor interés es el coeficiente de transferencia de calor entre la salmuera y el vidrio, el cual puede medirse mediante el destilador de laboratorio con gran precisión y exactitud, utilizando diferentes temperaturas de salmuera y para diversas diferencias de temperatura salmuera-vidrio a través del destilado acumulado en un cierto lapso.

La sección transversal del destilador experimental de laboratorio se muestra en la fig. 5, fabricado con las paredes laterales de vidrio para permitir la visualización de su interior. Se implantó un sistema motorizado para variar la distancia  $d$  entre 0.085 y 0.155 m. El control de la temperatura de la salmuera se efectuó mediante un sistema termostático computarizado que permite el calentamiento constante con una resistencia eléctrica de 2500 W a 220 VCA, de tal suerte que fuera posible seleccionar temperaturas de entre 20 y 80°C con una variación máxima de 0.5°C. La resistencia de calentamiento se colocó bajo una placa de acero de media pulgada de espesor conformada en charola para contener la salmuera y lograr una distribución uniforme de temperatura.

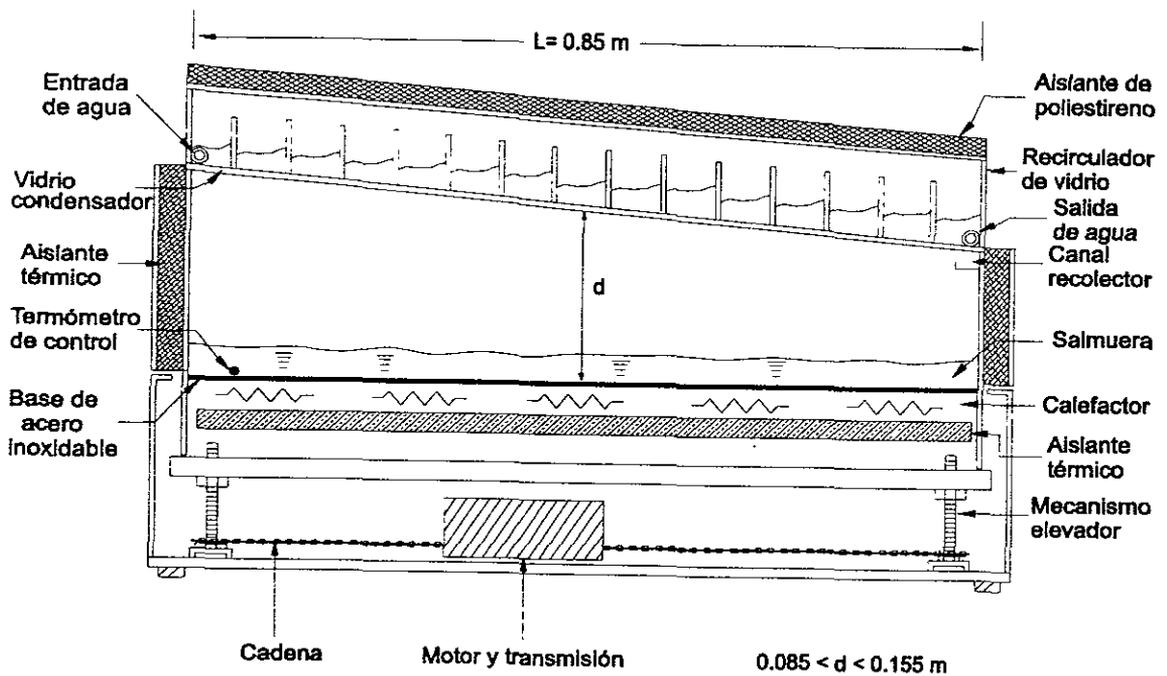


Fig. 5 Sección transversal del destilador experimental de laboratorio.

Para efectuar el control sobre la temperatura del condensador se utilizó agua a temperatura constante aplicada mediante una bomba con recirculación continua sobre el exterior del condensador. El rango de temperaturas del condensador fue de 20 a 80°C con una variación máxima de 1.5°C. Mediante un aislante de poliestireno colocado sobre la cubierta del recirculador mostrado en la fig. 6, se minimizó la influencia de la temperatura ambiente. Para evitar pérdidas de calor por las paredes laterales de vidrio del destilador se instaló una cubierta de aislante térmico removible de lana de fibra de vidrio.

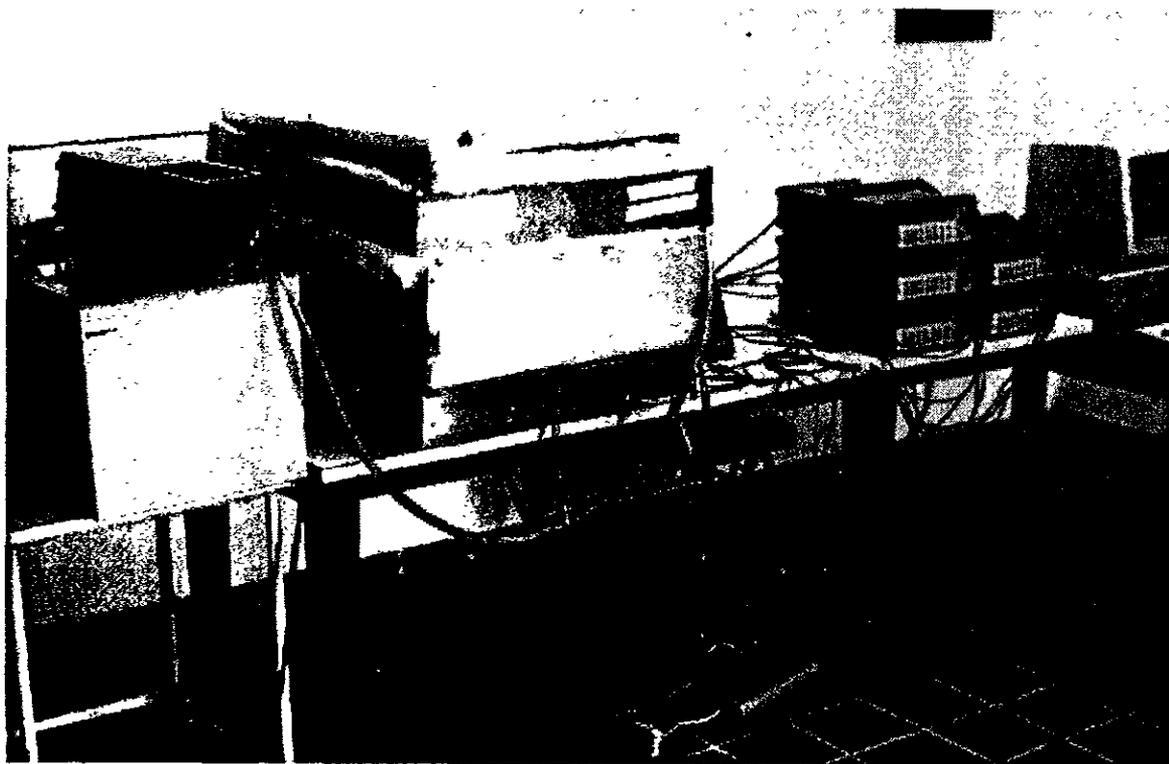


Fig. 6 Destilador de laboratorio.

En la fig. 7 se muestra el diagrama a bloques del montaje experimental de laboratorio con todos los elementos del sistema. Para poder visualizar al interior del destilador, se usó un generador de hoja de láser de He-Ne de 3.5 mW de potencia mediante un espejo oscilante controlado electrónicamente en amplitud y frecuencia.

Para registrar las imágenes del fluido en el interior del destilador se utilizaron dos cámaras de video, una del tipo CCD con una resolución de 192X165 pixeles conectada mediante una interface electrónica a una computadora personal que permite obtener imágenes fijas cada 320 ms, y la otra una cámara de video tipo

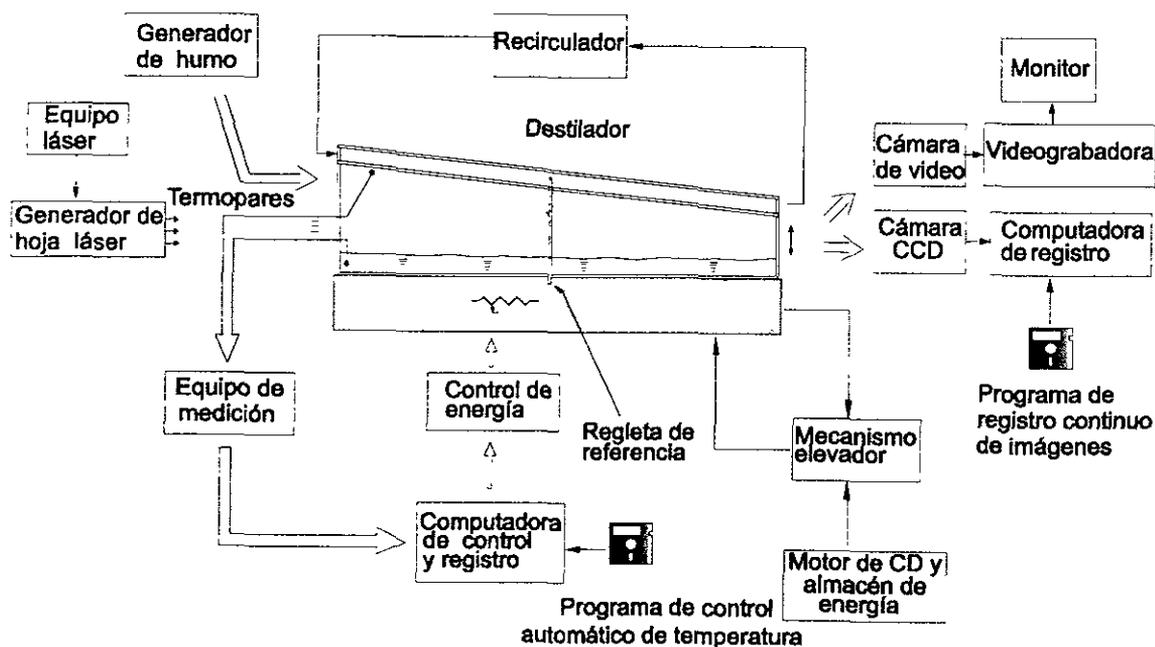


Fig. 7 Diagrama a bloques del montaje experimental de laboratorio.

NTSC de 1 lumen de sensibilidad conectada a un monitor y a una videogradora con lo cual se puede obtener un registro continuo. Se desarrolló un programa para guardar y desplegar las imágenes digitalizadas de manera continua con tiempos de exposición variable. El movimiento del fluido se visualizó con humo de tabaco producido por un generador de humo desarrollado *ad hoc*.

Para tomar una referencia de las diferentes distancias  $d$  se utilizó una regleta calibrada en centímetros con un apuntador.

Se emplearon termopares tipo J calibrados de manera análoga a los que se usaron en las mediciones experimentales de campo. El registro se efectuó mediante un sistema computarizado grabando la historia de temperaturas de la

salmuera y del condensador con una frecuencia de medición de un dato por segundo. El condensado se midió en diferentes lapsos de acuerdo a las necesidades de los distintos experimentos con una probeta calibrada. La fig. 8 muestra una vista general del montaje experimental de laboratorio.



Fig. 8 Vista general del montaje experimental en el interior del laboratorio.

*El laboratorio es un cuarto con temperatura ambiente y luminosidad variable para poder efectuar los diferentes experimentos de manera controlada.*

En el anexo I se efectúa un análisis de incertidumbre de los resultados experimentales y se muestran las características de los instrumentos empleados.

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS

A lo largo de 6 años de experimentación con los destiladores solares someros en La Paz, B.C.S., se ha generado una cantidad apreciable de información y se cuenta con más de 120 días de mediciones bajo diferentes condiciones ambientales en el campo, de inicio y de método. En el laboratorio también se ha generado una amplia base de información con alrededor de 50 días de experimentación bajo diversas condiciones controladas.

En este capítulo se muestran algunos de estos resultados, que permiten llegar a los objetivos anteriormente planteados en el capítulo 3. Evidentemente, a lo largo de este periodo se ha obtenido una gran experiencia y un aprendizaje profundo sobre los parámetros importantes que intervienen en la destilación solar, así como de la metodología y control que se tiene que llevar a lo largo de las diferentes campañas de experimentación, de tal suerte que la información y resultados presentados son de buena calidad y tienen gran repetibilidad.

#### **6.1 Influencia de la producción como función de la distancia $d$ , en los destiladores de campo**

Como el interés de este experimento es solamente evaluar el cambio de la producción de agua destilada con respecto a la variación de la distancia de la salmuera a la cubierta, no se muestran gráficas de temperaturas ni de velocidad de viento.

La radiación solar registrada en  $W/m^2$  para tres días seleccionados de experimentación, con los seis destiladores solares de campo, se muestra en la fig. 9. Como puede apreciarse, solamente en uno de esos días se tiene una cierta nubosidad.

La fig. 10 muestra la producción acumulada de agua destilada a lo largo de uno de los tres días de experimentación, utilizando intervalos de 15 minutos.

Al final de cada día se obtuvo la producción diurna total de las 07:00 a las 19:00 h. Se midió el acumulado de la producción nocturna de agua destilada de las 19:00 h a las 07:00 h. La fig. 11 muestra la producción acumulada de cada destilador para los tres diferentes días. Debe notarse que para la escala del eje

de producción de agua destilada, sólo aparece un intervalo entre 5 y 6.4 Kg por lo que el efecto se ve magnificado. Como puede apreciarse para el trabajo de campo, aparentemente existe una cierta influencia de  $d$  en la producción, ya que ésta no decrece monótonamente y pueden notarse repuntes a ciertas distancias.

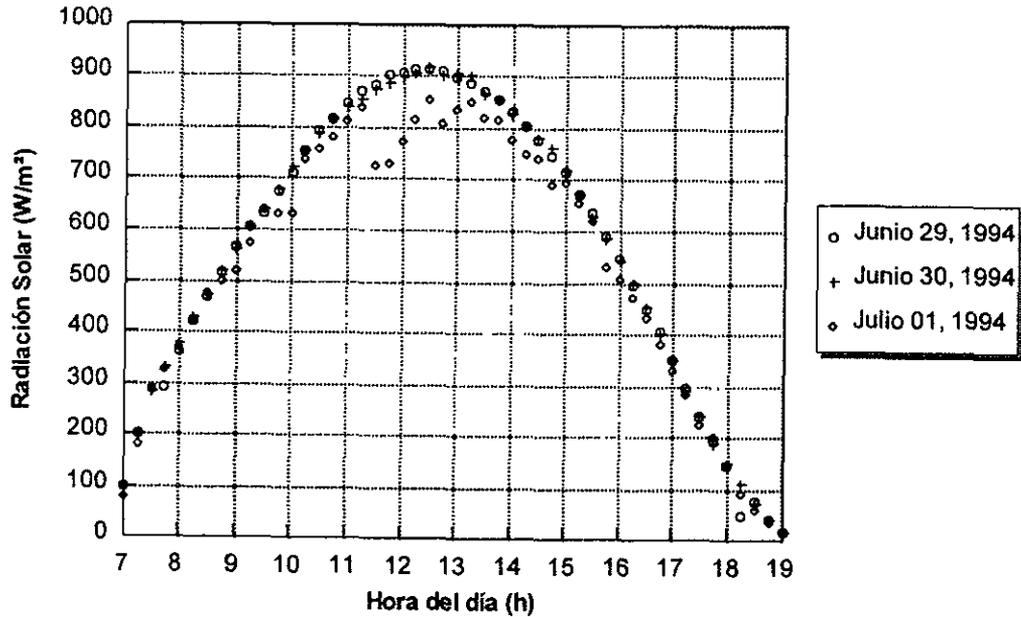


Fig. 9 Radiación solar a lo largo de tres días de experimentación.

29 de Junio de 1994

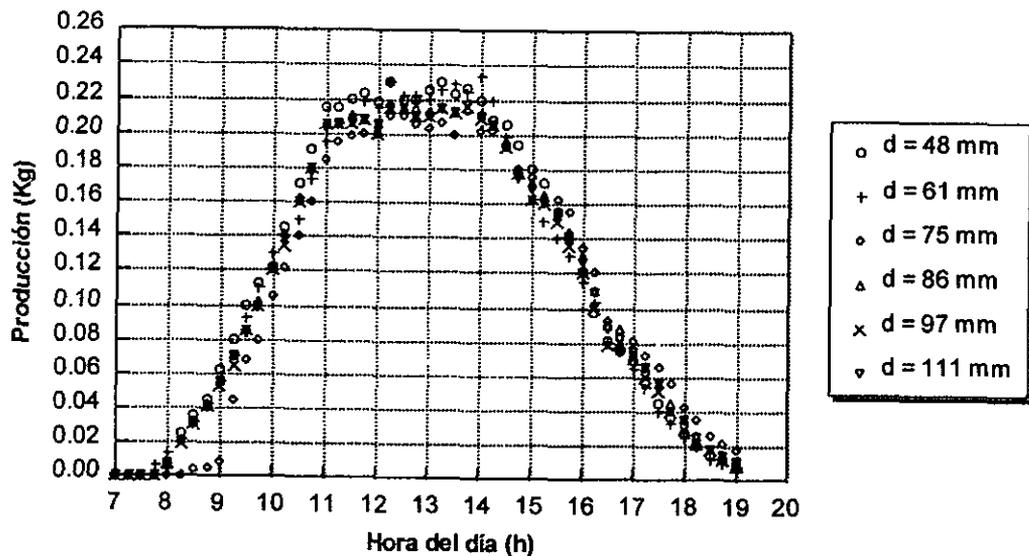
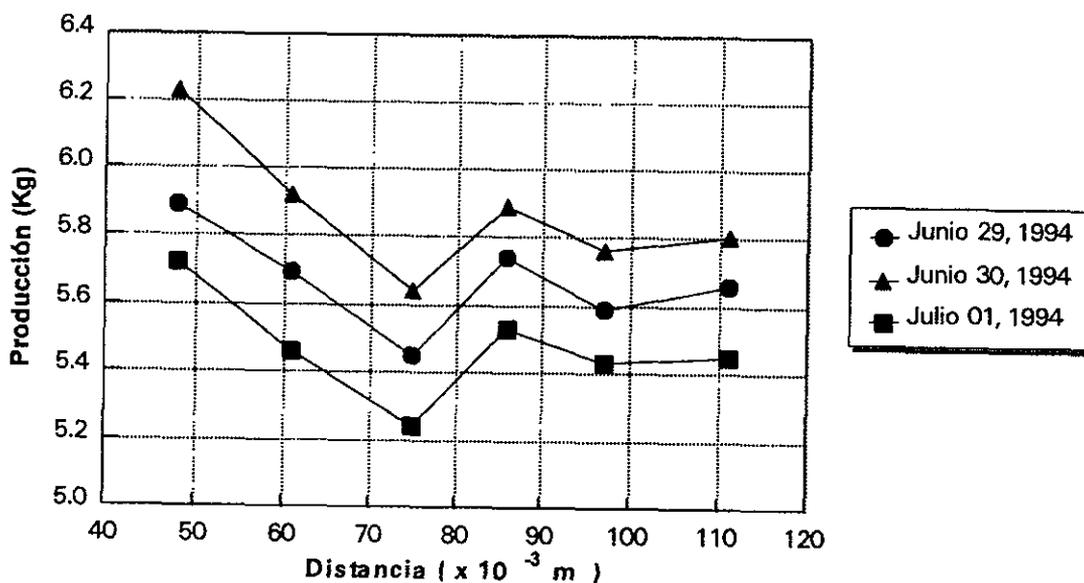


Fig. 10 Producción acumulada en intervalos de 15 minutos a lo largo de uno de los tres días de experimentación.



Destilador $d \times 10^{-3} \text{ m}$	29 de junio Kg	30 de junio Kg	1 de julio Kg
48	0.60	0.70	0.58
62	0.55	0.60	0.55
75	0.50	0.58	0.50
86	0.55	0.60	0.56
97	0.52	0.59	0.55
111	0.52	0.60	0.55

Fig. 11 Producción total diaria como función de la distancia entre la salmuera y la cubierta  $d$ , en el campo y producción acumulada nocturna.

### 6.2 Influencia de la producción como función de la distancia $d$ , en el destilador de laboratorio

Del trabajo anterior surgió la necesidad de identificar, bajo condiciones controladas la producción de destilado como función de  $d$ . Para este fin, se hicieron corridas experimentales isotermas con duración de dos horas cada una, para cuatro distintas diferencias de temperatura entre el vidrio y el agua a evaporar. La temperatura del vidrio se mantuvo controlada en 53°C.

Puede notarse que para la mayor diferencia de temperaturas se obtiene la mayor producción, sin embargo como puede apreciarse en la fig. 12, no se aprecia una tendencia clara de la producción a disminuir con  $d$ .

Se explora ahora con más detalle la probable evolución de la producción a lo largo del día. Para ello se atiende al hecho de que las diferencias de temperatura entre agua y cubierta varían a lo largo del tiempo como función de las variaciones de insolación y temperatura ambiental fundamentalmente. Así puede emplearse información de los experimentos isotérmicos del laboratorio y los otros dinámicos del campo. Con éstos, se determinan las temperaturas como función del tiempo, y con las isotérmicas la producción para cada diferencia de temperaturas.

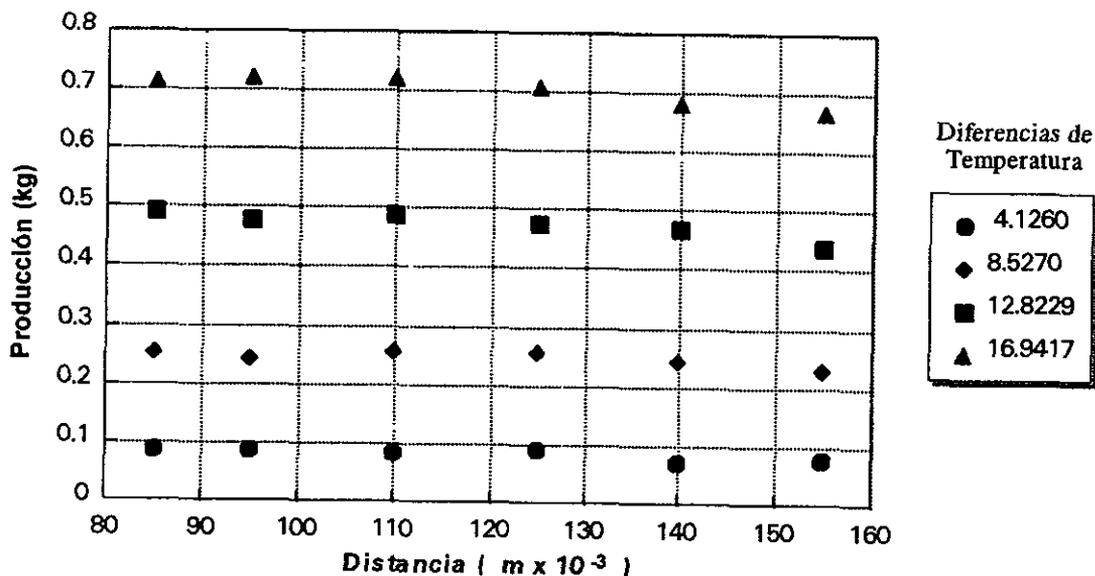


Fig. 12 Producción acumulada de dos horas respecto a la distancia entre la salmuera y la cubierta para diferentes diferencias de temperatura.

Se puede construir un escenario probable en el cual las temperaturas varíen a lo largo del día de modo tal que las diferencias entre agua y cubierta correspondan a los valores empleados para construir la fig. 12. Puede suponerse que la diferencia entre agua y cubierta, alrededor del mediodía, va de 17°C y que dure dos horas; así mismo, la diferencia de 13°C dure dos horas, una en la mañana y otra en la tarde. Lo mismo para las otras dos diferencias.

Así la producción de un día se obtendría de sumar las producciones medidas como aparecen en la fig. 12, para las cuatro diferencias de temperaturas para cada  $d$ . El resultado de hacer esta suma aparece en la fig. 13. Como se aprecia, existe una cierta tendencia al repunte de la producción para ciertas distancias tal como ocurrió en los destiladores de campo.

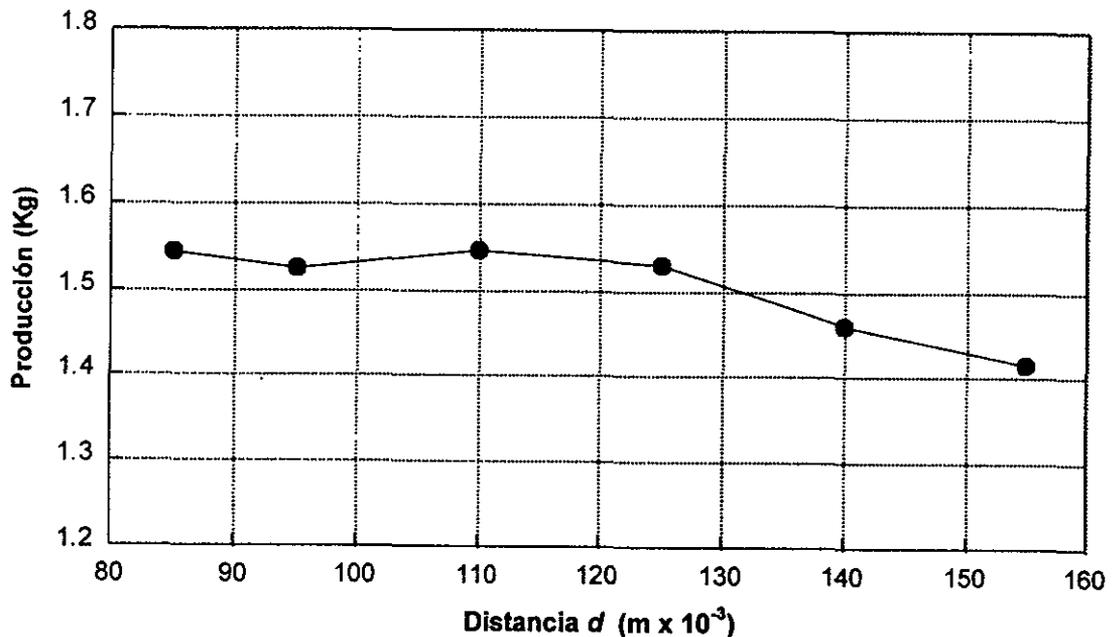


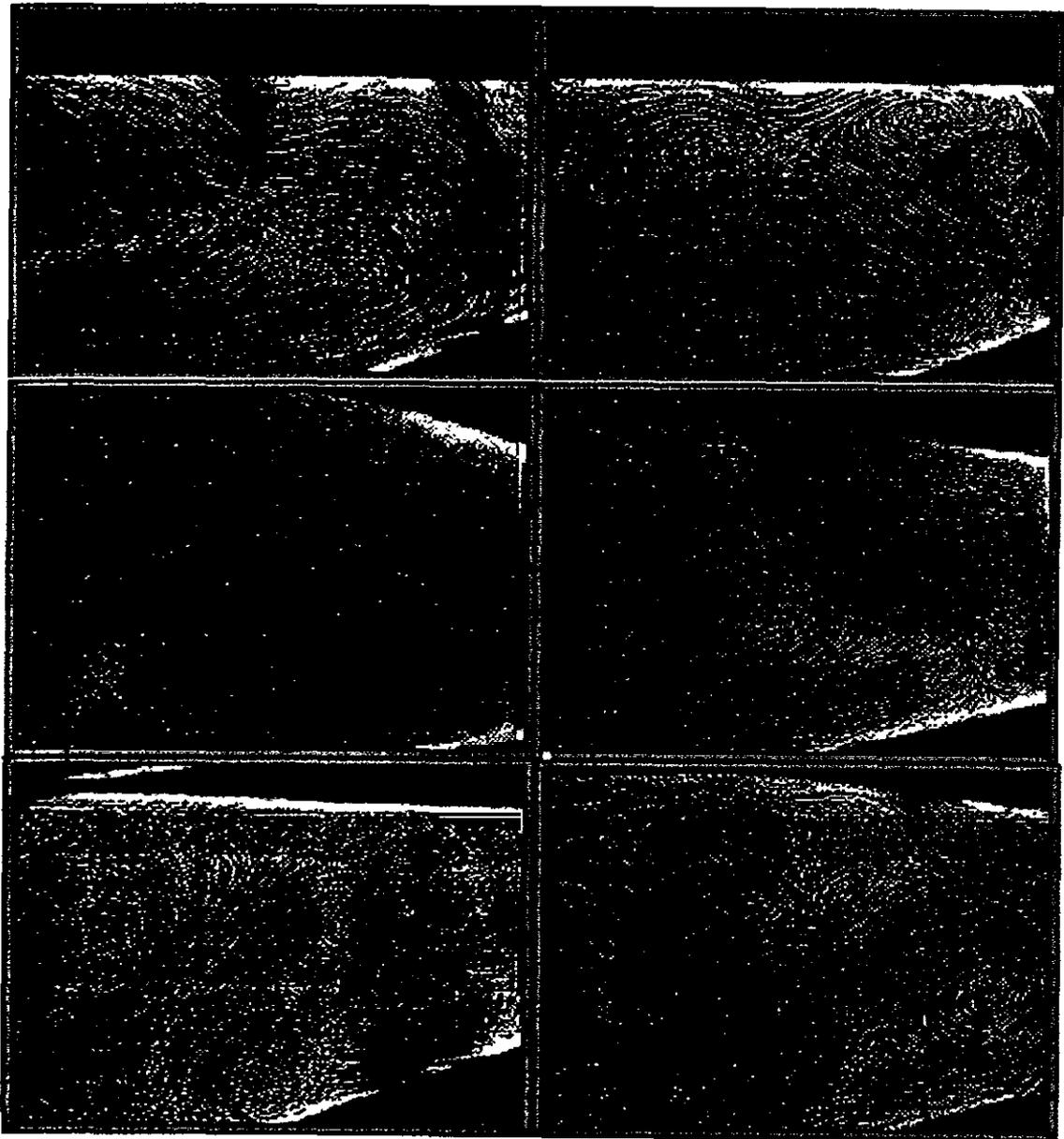
Fig. 13 Producción acumulada para las distintas diferencias de temperatura como función de la distancia  $d$ .

### 6.3 Visualización y caracterización del fluido dentro del destilador

Resulta imprescindible el visualizar en el interior del destilador para diferentes distancias y diferencias de temperatura para tener más elementos de juicio y por tanto tener un mejor entendimiento del fenómeno.

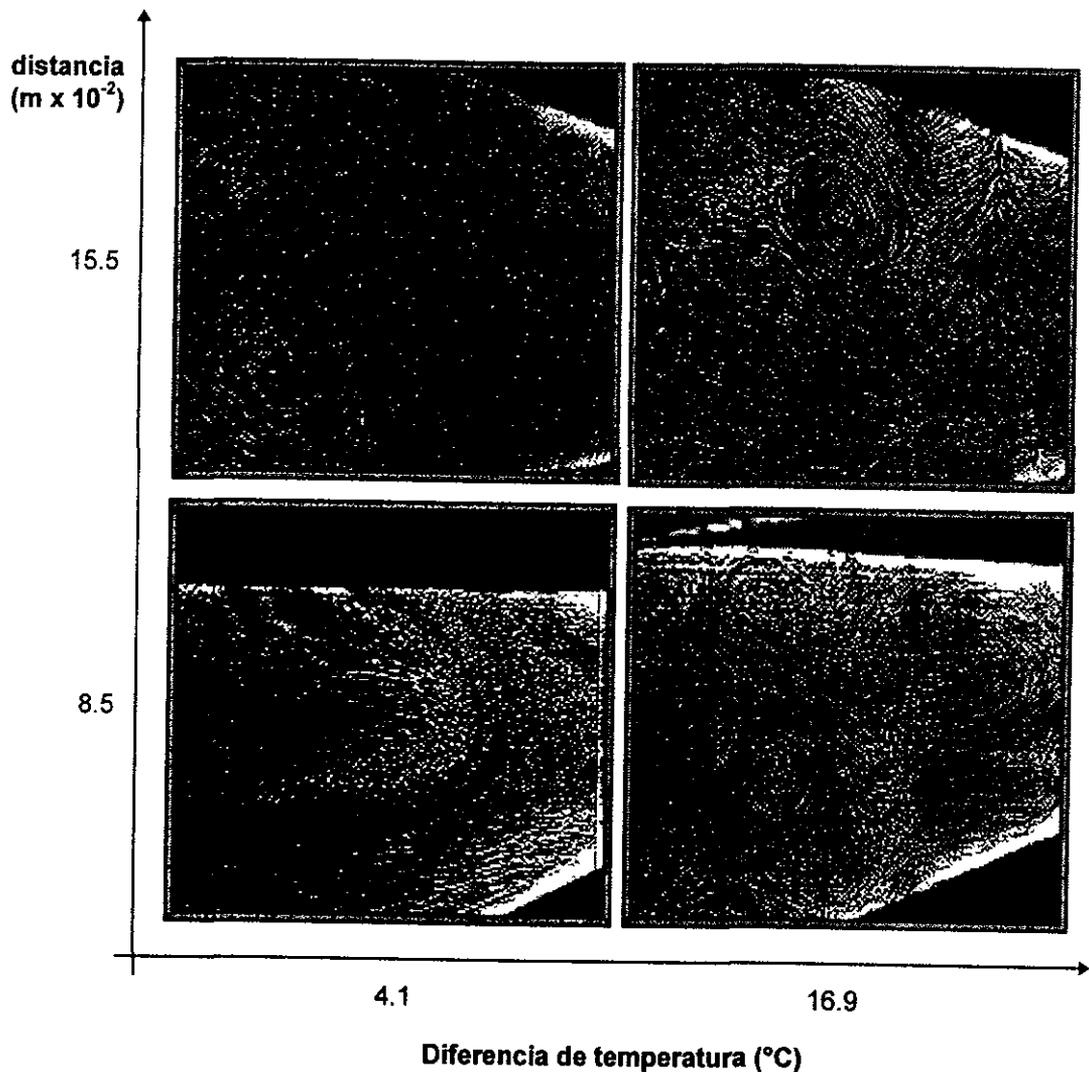
Se desarrollaron diversos experimentos para visualizar el movimiento del fluido en el interior del destilador solar de laboratorio para caracterizar el flujo.

En la fig. 14 se muestra la naturaleza del movimiento del fluido en el interior del destilador. Los seis diferentes patrones de flujo corresponden a distintas condiciones los cuales se escogieron de entre más de 500 imágenes para mostrar la diversidad de las formas. Como puede observarse se forman celdas de convección de eje horizontal tipo vórtice, los cuales transportan fundamentalmente en la parte periférica el fluido del evaporador al condensador.



**Fig. 14** Naturaleza del fluido en el interior del destilador de laboratorio.

Se diseñó un experimento para verificar cuál es el cambio en la actividad de los vórtices bajo las condiciones extremas y comparar las principales diferencias estructurales que se pueden establecer en las celdas del destilador de laboratorio. La fig. 15 muestra cuatro condiciones extremas: la menor y mayor distancia  $d$  ( $8.5$  y  $15.5 \times 10^{-2}$  m) con la menor y mayor diferencia de temperaturas ( $4.1$  y  $16.9^\circ\text{C}$ ). Estas cuatro imágenes digitales fueron escogidas de un conjunto de más de 200, y son las más representativas. En el anexo I se muestra cómo fueron capturadas estas imágenes.



**Fig. 15** Cuatro patrones de flujo bajo condiciones extremas de operación en el destilador experimental de laboratorio.

Para la diferencia de  $4.1^{\circ}\text{C}$  y la distancia  $d = 8.5 \times 10^{-2} \text{ m}$  la actividad de los vórtices no está bien desarrollada y el movimiento del fluido se aprecia como *plumas*; para la misma distancia pero a la máxima diferencia de temperaturas de  $16.9^{\circ}\text{C}$  la actividad de los vórtices es máxima, la rapidez del movimiento es la mayor observada durante el experimento. Para la distancia máxima de  $15.5 \times 10^{-2} \text{ m}$  y una diferencia de temperaturas de  $4.1^{\circ}\text{C}$  parece que esta geometría permite más la formación de vórtices pero muy inestables. Hacia la parte media superior de la imagen, se observa una pequeña franja vertical de color negro la cual es producida por la ausencia de humo que se depositó por debajo de la cubierta junto con el agua condensada. Para la misma distancia pero con una diferencia de temperaturas de  $16.9^{\circ}\text{C}$  se aprecia un vórtice muy grande y bastante estable, probablemente debido a la máxima relación de aspecto de la cavidad de destilación.

Con objeto de medir la velocidad del fluido en la sección extrema izquierda del destilador donde los vórtices son más estables, como función de la diferencia de temperaturas entre salmuera-cubierta y para distintas distancias  $d$ , se analizaron más de 20 imágenes en tiempo real, registradas en la videocámara analógica para diversas combinaciones de estas dos variables, los resultados se muestran en la fig. 16.

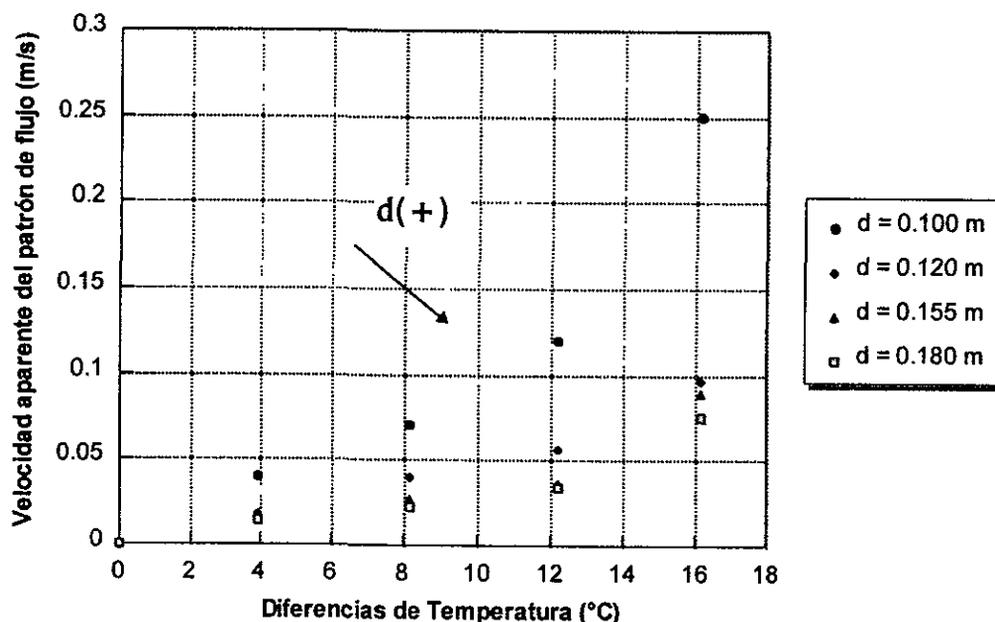


Fig. 16 Velocidad del fluido para diferentes condiciones de operación.

Los valores presentados en la fig. 16 son los promedios de las distintas mediciones. Como se ve, la velocidad del fluido es inversamente proporcional a la distancia, *i.e.*, para una menor distancia  $d$  se tienen las mayores velocidades. También es importante observar que la velocidad del fluido se incrementa mientras mayor es la diferencia de temperaturas. Además, la gráfica es cóncava hacia arriba.

Otro parámetro que pudo estimarse es la velocidad de desplazamiento de los vórtices con base en imágenes consecutivas, las cuales están espaciadas en lapsos iguales debido a que la información de cada imagen ocupa el mismo espacio en la memoria de la computadora.

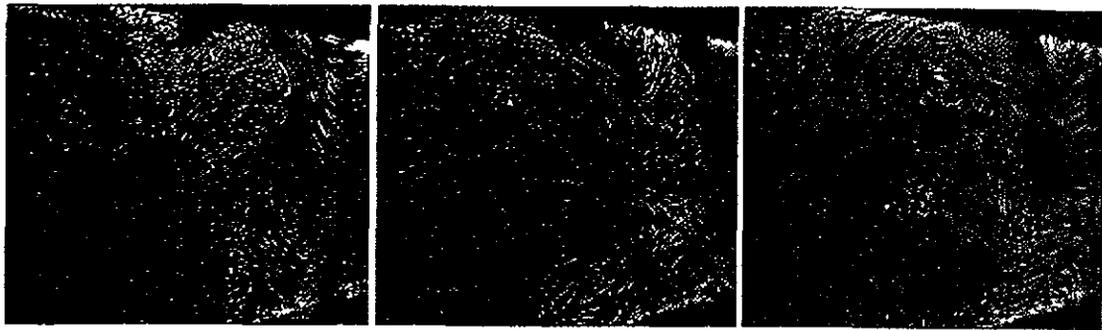
Se desarrolló un procedimiento computacional para medir la velocidad de desplazamiento de los vórtices (**Porta et al. 1996**) con base en las imágenes digitales.

En la fig. 17 se muestran tres imágenes en las cuales se mide la velocidad de desplazamiento. En los experimentos se advirtió que estas velocidades también dependen fuertemente de la diferencia de temperaturas entre la salmuera y la cubierta, así que de alguna manera esto determina el *nivel* de actividad en el interior del sistema. Se han medido velocidades relativamente bajas de  $2 \times 10^{-2}$  m/s para diferencias de temperatura de  $4^{\circ}\text{C}$ , hasta velocidades de alrededor de  $9 \times 10^{-2}$  m/s para diferencias de temperatura de  $17^{\circ}\text{C}$ . Estas mediciones son las primeras de su tipo en esta aplicación y nunca se habían reportado.

#### **6.4 Medición experimental del coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta**

Para medir de manera experimental el coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta  $U_{wg}$ , se diseñó un experimento con el destilador de laboratorio, para 17 combinaciones de diferencias de temperatura entre salmuera-cubierta, y diferentes temperaturas de salmuera.

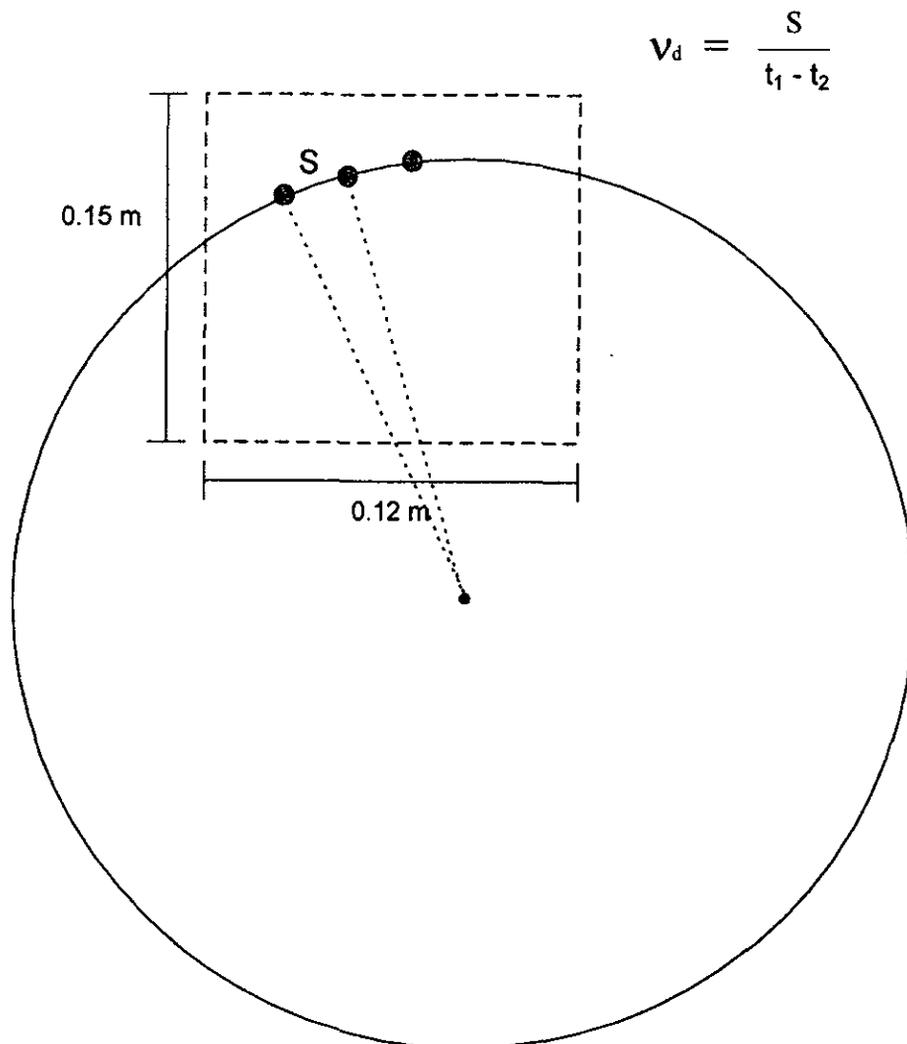
La fig. 18 muestra un caso de la calidad del control que se estableció para mantener las temperaturas constantes durante los periodos de experimentación que se dieron a lo largo de dos horas. Como puede observarse, existe una desviación alrededor del nivel seleccionado de temperatura de la salmuera de  $70^{\circ}\text{C}$ , el promedio es de  $69.92^{\circ}\text{C}$  con una desviación estándar de  $0.53^{\circ}\text{C}$ , mientras que para la temperatura del vidrio, la temperatura seleccionada estuvo en  $57^{\circ}\text{C}$  con un promedio de  $57.15^{\circ}\text{C}$  y una desviación estándar de  $0.48^{\circ}\text{C}$ , lo cual es bastante aceptable, dada la complejidad de los fenómenos reales.



$t_1$

$t_2$

$t_3$



**Fig 17.** Imágenes consecutivas para la medición del desplazamiento del vórtice.

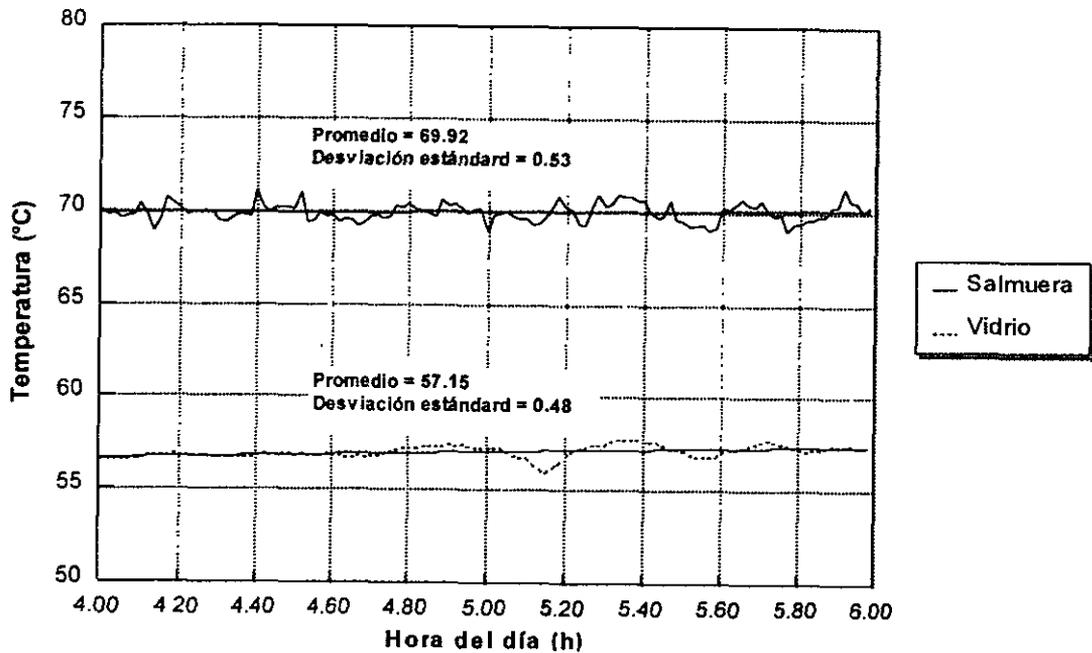


Fig. 18 Temperaturas de la salmuera y la cubierta para el destilador de laboratorio.

A través de la medición de la producción de agua destilada en el intervalo de dos horas y la entalpía de evaporación a la temperatura de la salmuera ( $T_w$ ), se puede estimar el flujo de calor. La fig. 19a muestra el resultado de este experimento. Se ajustaron rectas para cada temperatura de salmuera, con lo cual para conocer el coeficiente  $U_{wg}$  basta dividir el flujo de calor entre la diferencia de temperaturas, tal como se muestra en la fig. 19b. Como puede observarse, este coeficiente depende tanto de la diferencia de temperaturas como de la temperatura de la salmuera.

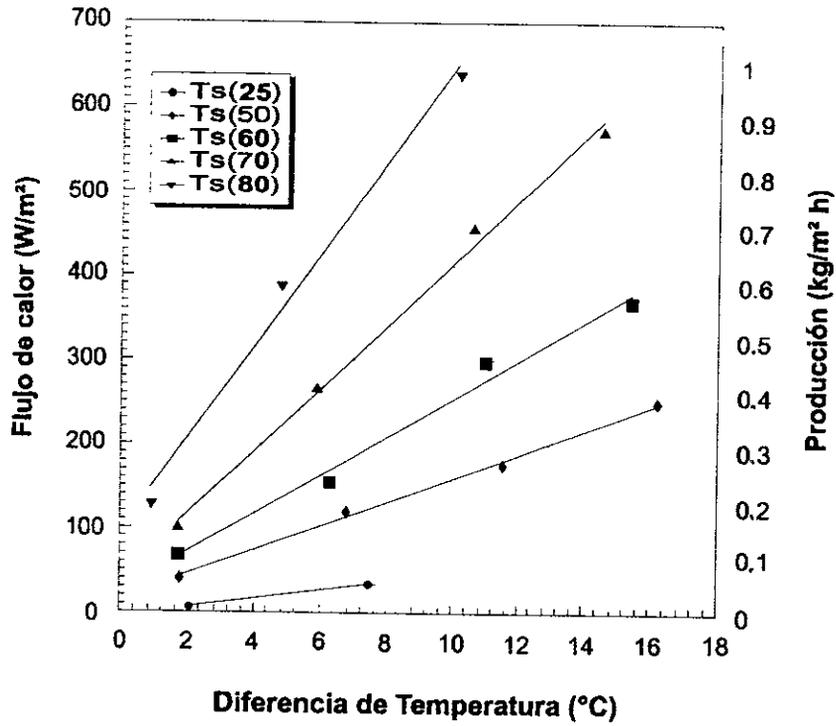


Fig. 19a Gráfico para la estimación del coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y el vidrio.

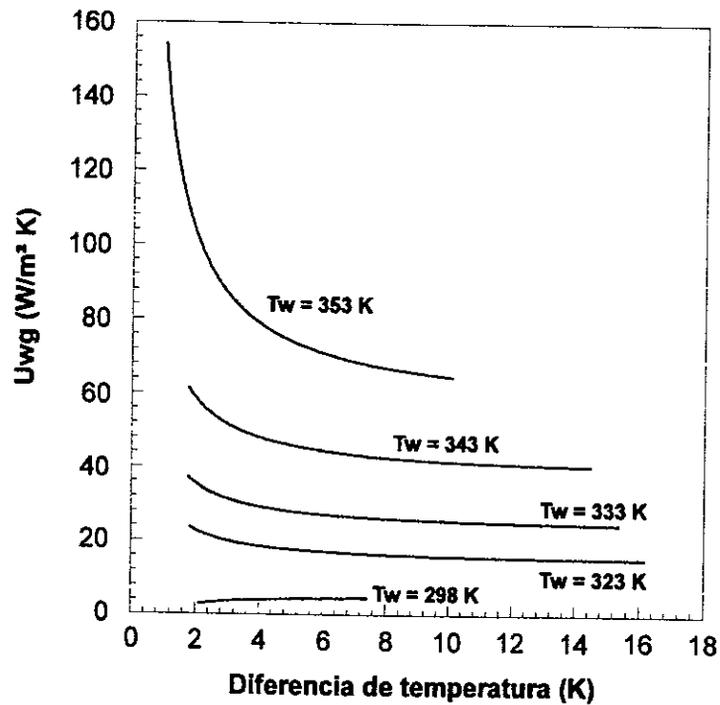


Fig. 19b Gráfico del coeficiente  $U_{wg}$  respecto a la diferencia de temperatura.

### 6.5 Medición experimental del coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente

Para evaluar el coeficiente global de transferencia de calor entre el vidrio y el ambiente  $U_{ga}$ , se desarrollaron una gran diversidad de experimentos. En los resultados se muestra una selección de 4 días. La fig. 20 muestra cuatro días de radiación solar en los cuales se puede observar prácticamente ausencia de nubosidad, lo cual resulta ideal para la evaluación experimental de este coeficiente.

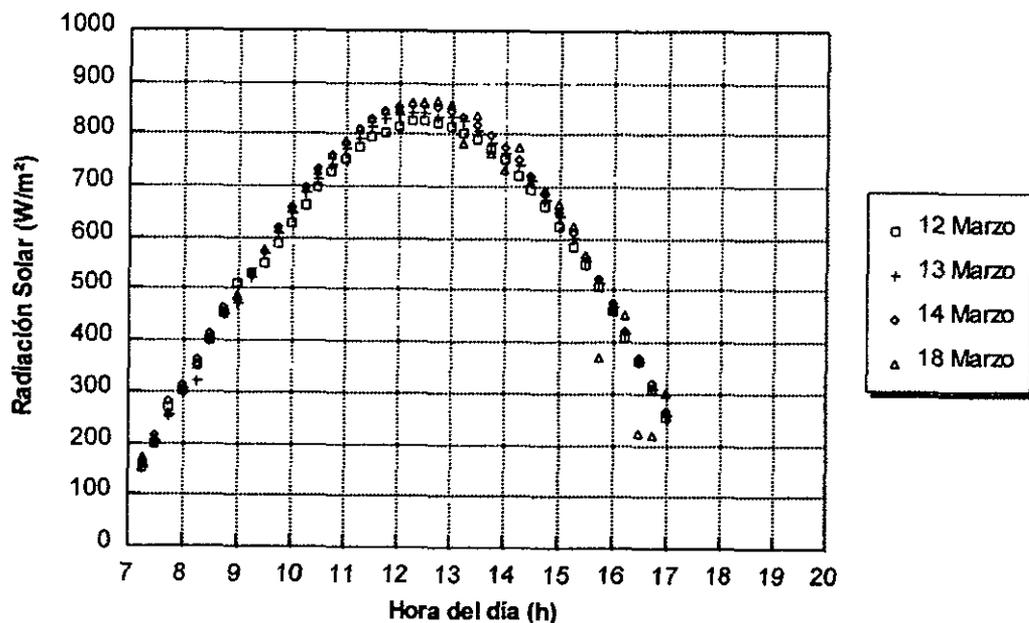


Fig. 20 Radiación solar a lo largo del día para cuatro días de experimentación en campo.

La producción de agua destilada se midió en intervalos de 0.25 h para los diferentes días, la fig. 21 muestra los resultados.

En los días seleccionados, se tienen velocidades de viento hasta de 6.3 m/s, como puede apreciarse en la fig. 22, lo que permite evaluar este coeficiente en un rango muy amplio de operación para condiciones típicas de playa, en donde normalmente se tiene un viento con sentido dominante de mar a tierra durante el día.

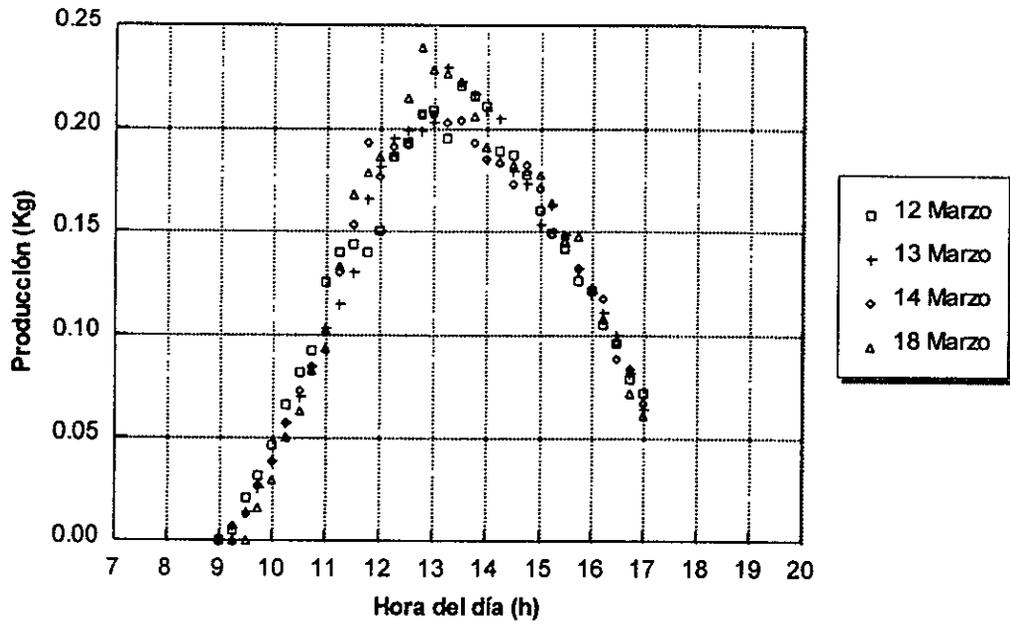


Fig. 21 Producción de agua destilada como función del tiempo.

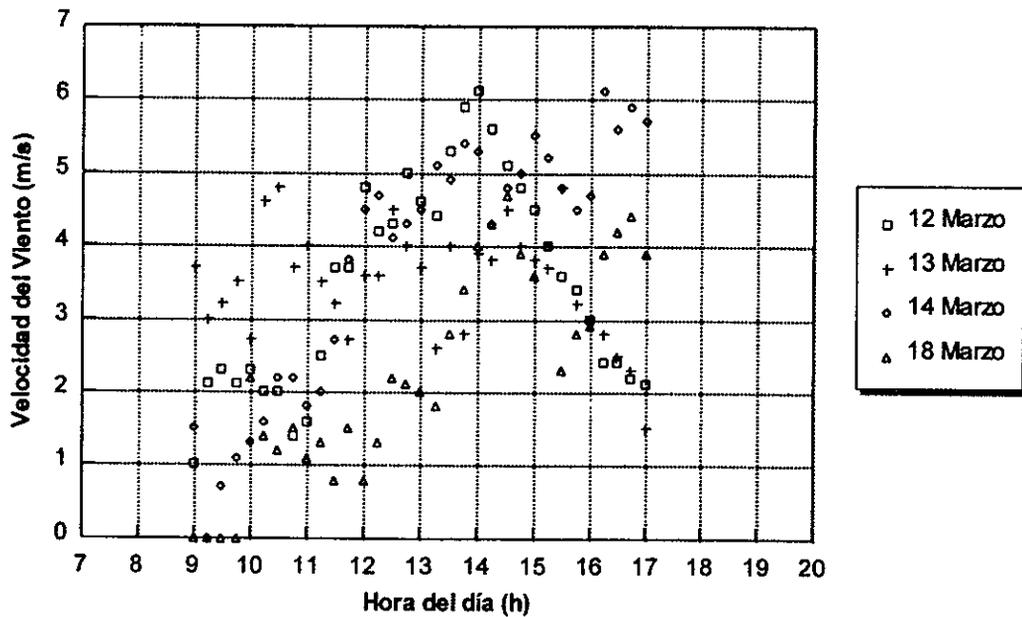


Fig. 22 Velocidad del viento a lo largo del día para cuatro días de experimentación en campo.

La fig. 23 muestra las diferencias de temperatura de la cubierta y del ambiente para los cuatro días de experimentación.

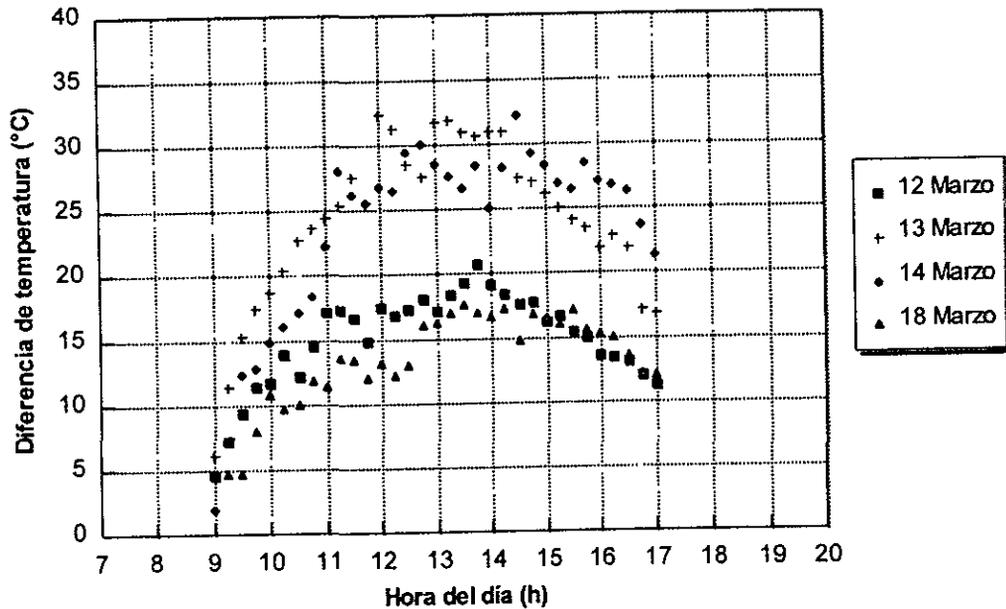


Fig. 23 Diferencias de temperatura de la cubierta y del ambiente para el periodo de experimentación.

Al medir el flujo másico del agua destilada producida en intervalos de 0.25 h y al multiplicar por la entalpía de evaporación a la temperatura de la cubierta ( $T_g$ ) se estima el flujo de calor. Con éste se determina el coeficiente  $U_{ga}$ , al dividir entre la diferencia de temperaturas de la cubierta al ambiente. Ya que se tienen mediciones de viento para cada intervalo, entonces se puede establecer el valor del coeficiente como función de la velocidad media de viento. La fig. 24 muestra este resultado.

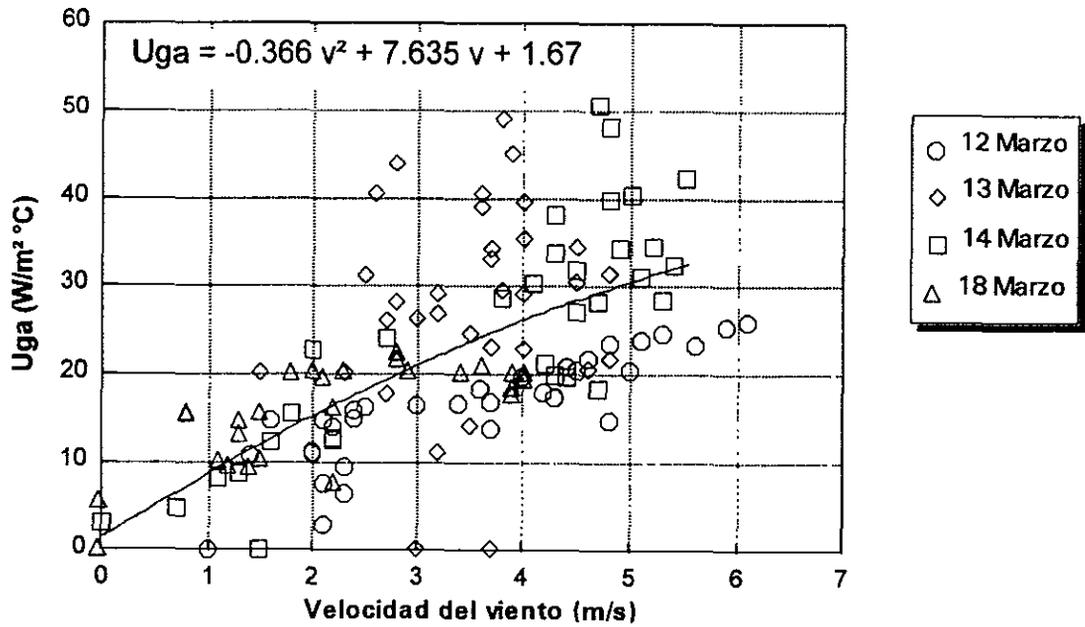


Fig. 24 Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente.

## CAPÍTULO 7

## RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO

Se procedió a resolver numéricamente las ecuaciones de calor de parámetros concentrados para conocer las temperaturas de la cubierta, la salmuera y el fondo del destilador, mediante el método de Runge-Kutta. Se desarrolló un modelo matemático para así comparar los resultados calculados con los experimentales, lo cual permite tener una útil herramienta de diseño en destiladores solares. El modelo en detalle se muestra en el anexo II de este trabajo. Se utilizan los valores de los coeficientes  $U_{wg}$  y  $U_{ga}$  que se han medido de manera experimental. El algoritmo permite calcular una radiación solar para un día seleccionado, o bien, pueden usarse datos medidos experimentalmente para hacer la simulación.

Los datos necesarios para el programa de cómputo son: radiación solar, temperatura ambiente y velocidad de viento, para el 7 de junio y el 27 de febrero, y con ellos se determinan las temperaturas del destilador y la producción de agua destilada.

La figura 25 muestra la radiación solar de los días seleccionados. Como puede observarse, en el 7 de junio existe cierta nubosidad antes de las 10:00 h.

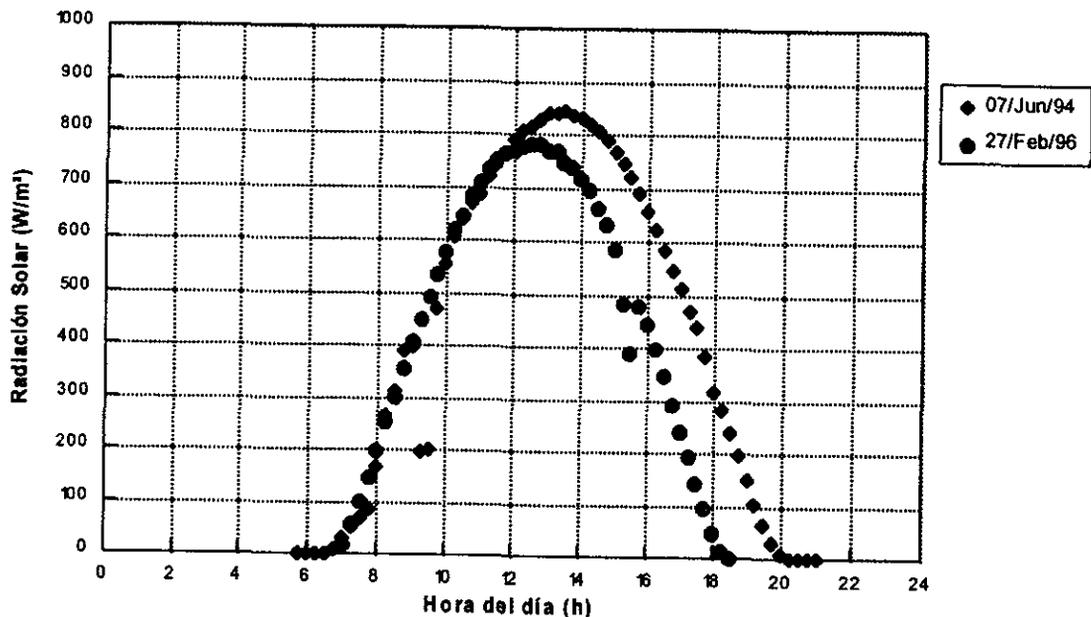


Fig 25 Radiación solar durante los días de experimentación.

En la figura 26a se muestra la velocidad del viento y en la figura 26b la temperatura ambiente a lo largo del periodo de experimentación.

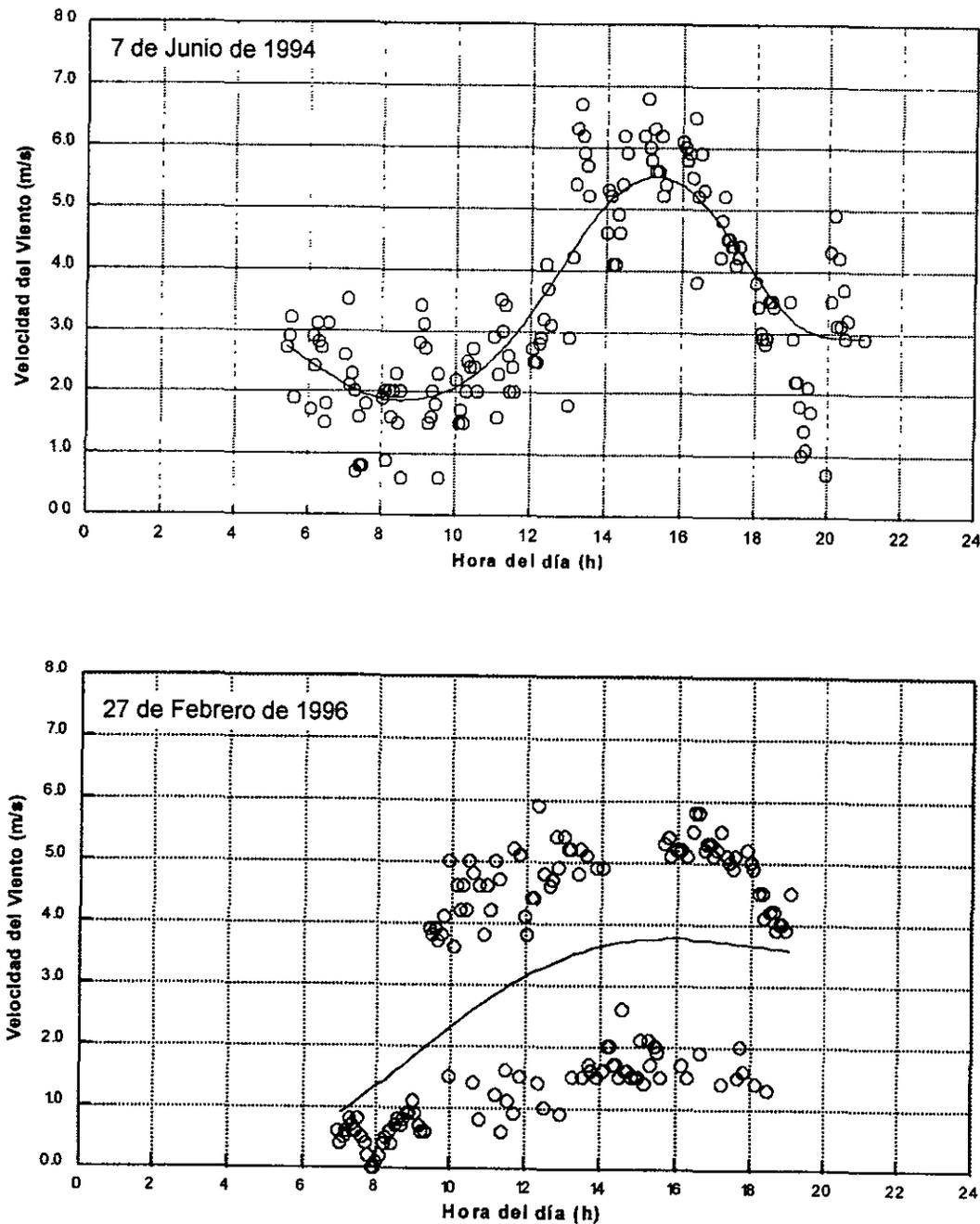


Fig 26a Velocidad del viento durante los días de experimentación.

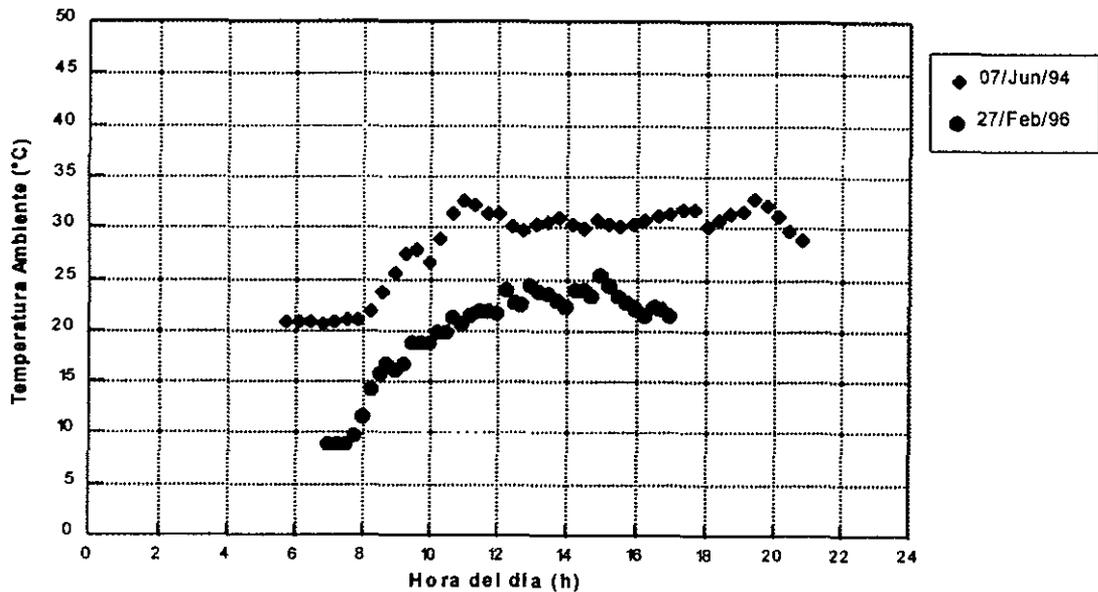


Fig 26b Temperatura ambiente durante los días de experimentación.

A los datos de velocidad de viento se les ajustó un polinomio de 6° orden, para ver la influencia de *suavizar* esta variable y así modificar el coeficiente  $Uga$ . Los resultados de las temperaturas de la salmuera y el vidrio se muestran en las figuras 27 y 28 respectivamente. Se comparan así, los datos medidos en campo con los obtenidos mediante el modelo matemático.

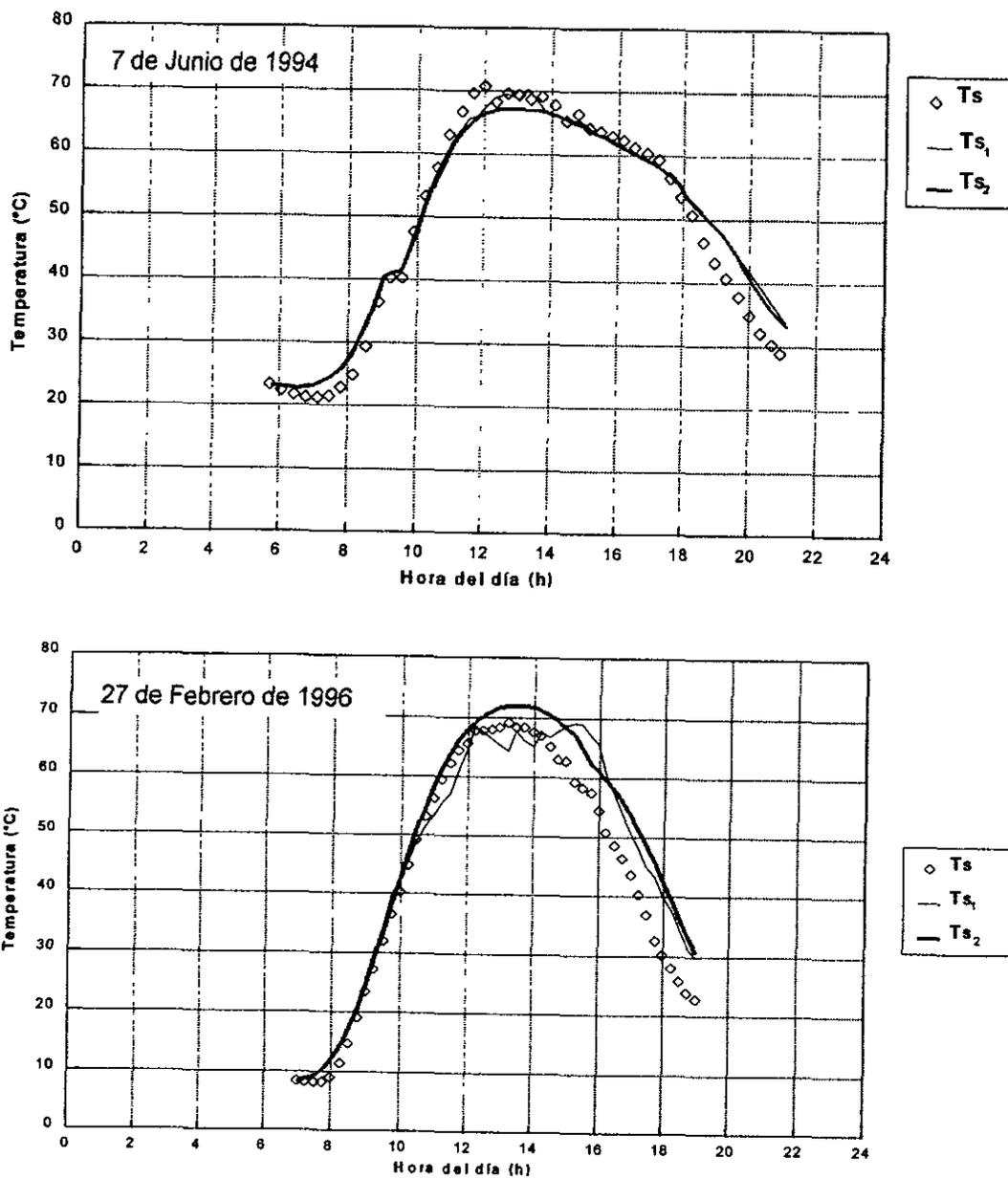


Fig 27 Temperatura de la salmuera medida experimentalmente ( $T_s$ ), calculada con los datos de la velocidad del viento ( $T_{s1}$ ) y con el viento suavizado ( $T_{s2}$ ).

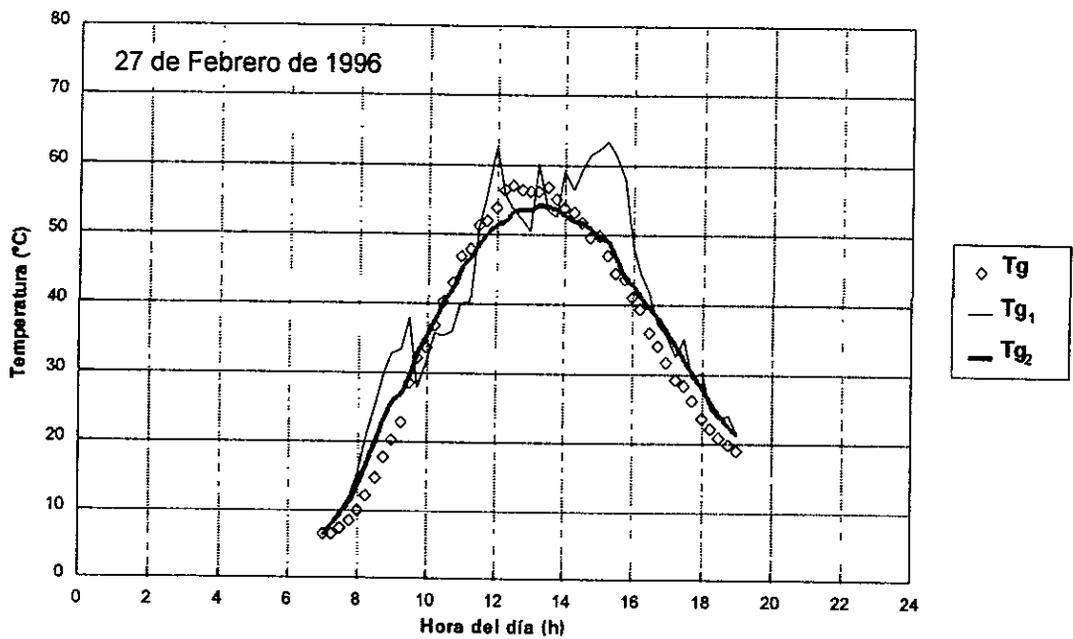
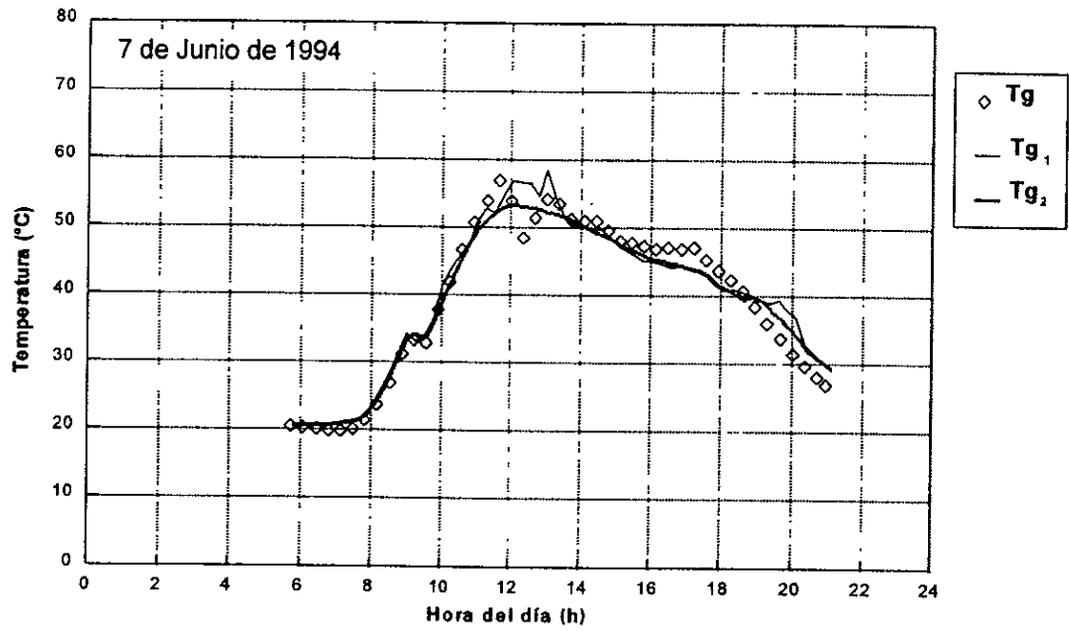
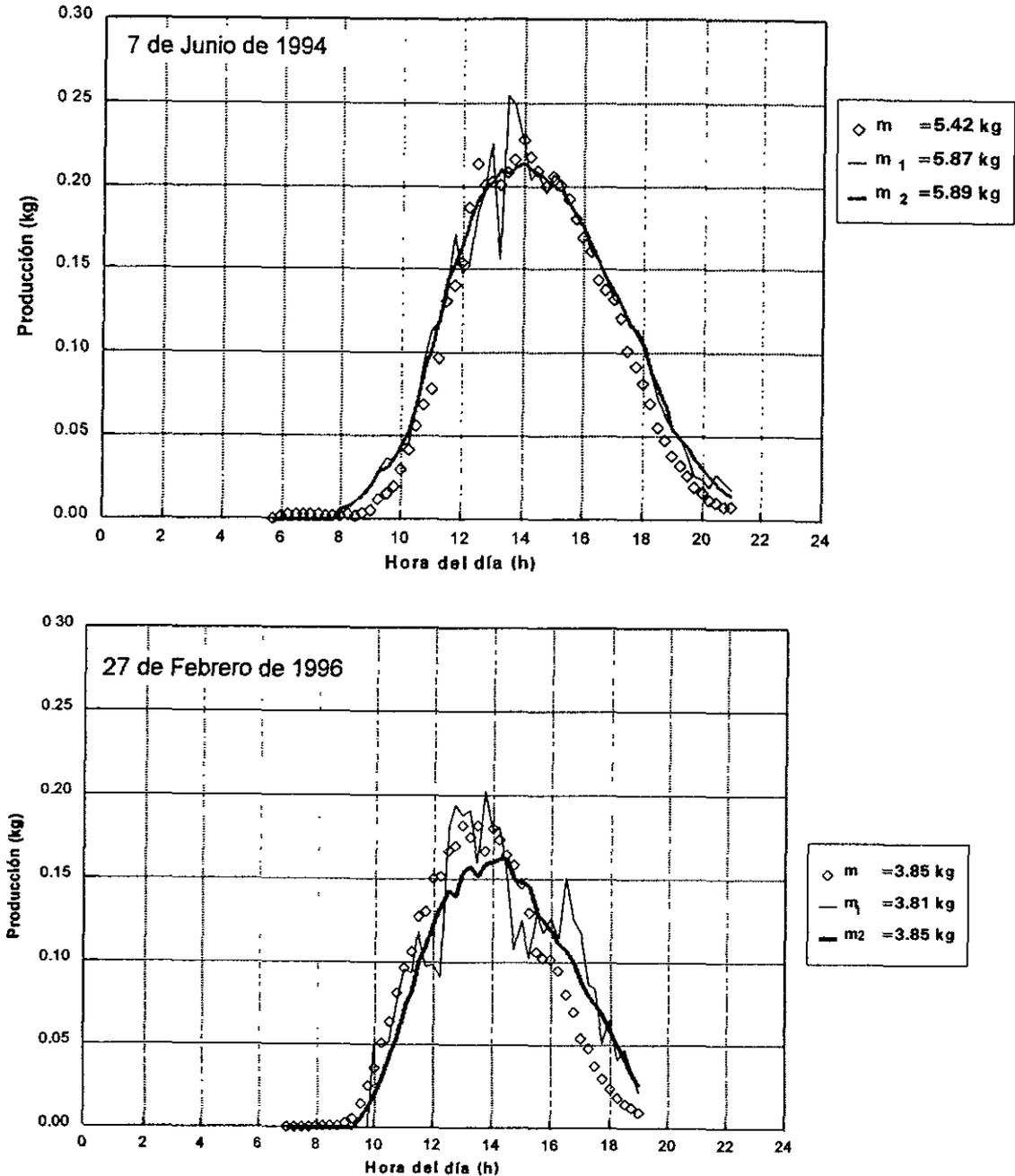


Fig 28 Temperatura de la cubierta medida experimentalmente ( $T_g$ ), calculada con los datos de la velocidad del viento ( $T_{g1}$ ) y con el viento suavizado ( $T_{g2}$ ).

La figura 29 muestra la producción medida en intervalos de 0.25 h a lo largo de los días, comparándose con las producciones calculadas mediante los datos antes citados. Se comparan resultados para ambos casos de la velocidad del viento. También se muestran las producciones acumuladas para los tres casos anteriormente mencionados a lo largo del periodo de experimentación.



**Fig 29** Producción de agua destilada medida experimentalmente y calculada con datos de la velocidad del viento y con el viento "suavizado".

En la figura 30 se grafica la producción calculada como ordenada y la producción medida como abscisa y se comparan con una recta a 45° lo que representa una alta correspondencia entre lo modelado y lo medido experimentalmente. Como puede apreciarse existe un sesgo menor para el caso en que la producción modelada se calcula con el viento "suavizado", sin embargo, los datos de producción acumulada son prácticamente los mismos para ambos casos.

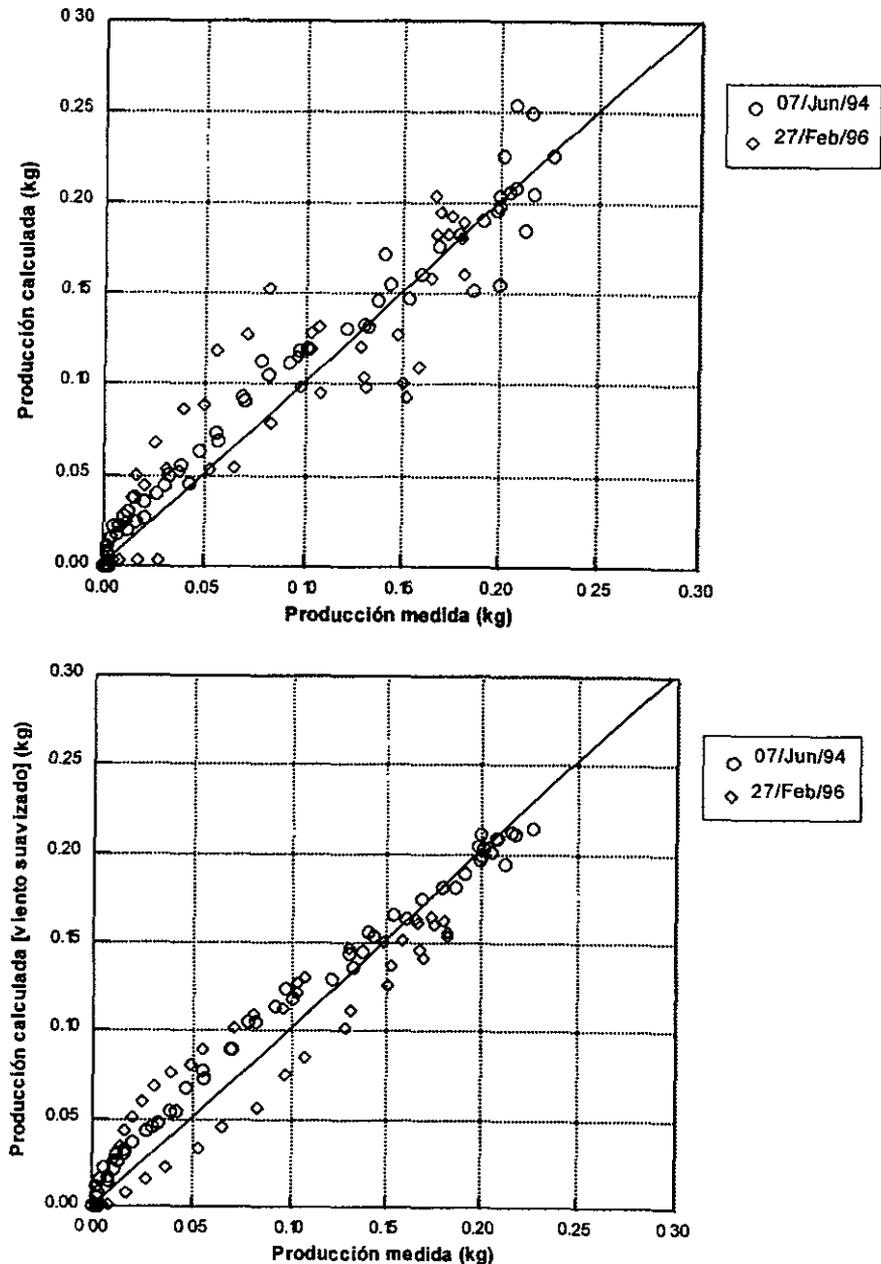


Fig 30 Correspondencia de la producción calculada y medida respecto a una recta de 45°.

## CAPÍTULO 8

### DISCUSIÓN

Uno de los principales objetivos de este trabajo ha sido contribuir al entendimiento de los mecanismos de transporte de calor y masa en los destiladores solares MP con relación de aspecto de 0.2. Se ha explorado la influencia de la distancia  $d$  en la producción de agua destilada, sin embargo, del análisis desarrollado por Dunkle (1961) se desprende que la producción es fundamentalmente independiente de la distancia entre la salmuera y el vidrio, debido a que la distancia característica  $x$  del número de Grashof elevada al cubo se cancela con el exponente 1/3. Resulta evidente la dificultad de comparar aisladamente el efecto de la distancia  $d$  debido a que al incrementar ésta, sea en un destilador de una sola cubierta como en este caso se ha explorado, o bien en los destiladores denominados de caseta, necesariamente existe un cambio en la relación de aspecto.

Para poder comparar destiladores solares diferentes entre sí, tomando en cuenta la producción de agua destilada diaria por unidad de superficie y la energía total recibida en el destilador, se tiene que la eficiencia es:

$$\eta = \frac{M}{E} h_{fg} \quad (12)$$

donde:

$\eta$	Eficiencia
$M$	Producción de agua destilada [kg/m <sup>2</sup> día]
$E$	Energía recibida en el destilador [KJ/ m <sup>2</sup> día]
$h_{fg}$	Entalpía de evaporación [KJ/kg]

Se tiene que, mientras la relación de aspecto aumenta, el área de evaporación disminuye respecto a la de condensación y en los destiladores de dos aguas, el área de condensación es aún mayor. Tal como ha sido mostrado por

**Kwatra (1996)**, existe un incremento en la eficiencia al cambiar la relación de áreas entre el evaporador y el condensador, por lo que resulta importante el definir dos eficiencias. Una de ellas en términos de producción diaria por unidad de superficie de evaporación y otra por superficie de condensación, *i.e.*, para la superficie del evaporador se tiene que:

$$\eta_e = \frac{M_e}{E} h_{fg}$$

(13)

donde:

- $\eta_e$  Eficiencia considerando la superficie de evaporación [kg/MJ]
- $M_e$  Producción de agua por unidad de superficie de evaporador [kg/m<sup>2</sup> día]
- $E$  Energía recibida en el destilador [KJ/ m<sup>2</sup> día]
- $h_{fg}$  Entalpía de evaporación [KJ/kg]

Para la superficie del condensador se tiene que:

$$\eta_c = \frac{M_c}{E} h_{fg}$$

(14)

donde:

- $\eta_c$  Eficiencia considerando la superficie del condensador [kg/MJ]
- $M_c$  Producción de agua por unidad de superficie de condensador [kg/m<sup>2</sup> día]
- $E$  Energía recibida en el destilador [KJ/ m<sup>2</sup> día]
- $h_{fg}$  Entalpía de evaporación [KJ/kg]

Esto permite establecer una comparación que dé un mejor entendimiento del cambio de producción como función del cambio de relación de aspecto.

De los destiladores solares que se tiene conocimiento, existe el reportado por **Salgado (1996)**, denominado de gran sección, el cual tiene una sección transversal triangular de 5 m de base y 2.5 m de altura, su longitud es de 10 m por lo cual tiene dos superficies condensadoras de  $35.3 \text{ m}^2$ , y con las secciones transversales de  $12.5 \text{ m}^2$ , las cuales también funcionan como superficies condensadoras, se tiene una superficie total de condensación de  $83.1 \text{ m}^2$ . La superficie del evaporador, tomando las medidas internas es de aproximadamente  $42 \text{ m}^2$ . Para este destilador se tiene que  $H/L = 0.5$ .

De acuerdo a los datos reportados, con la energía de  $27.2 \text{ MJ/m}^2\text{día}$  recibida en el destilador solar se obtuvo una producción total de 138 kg, considerando tanto la producción diurna como nocturna, por lo tanto se pueden comparar estos resultados con el destilador MP, objeto de este trabajo, seleccionando un día cualquiera, *v.gr.*, junio 29 de 1994, para una energía de  $25.1 \text{ MJ/m}^2\text{día}$  se obtuvo una producción diurna de  $6.3 \text{ kg/m}^2$ , y una producción nocturna de  $0.6 \text{ kg/m}^2$ , de lo cual:

Para el destilador de gran sección,  $\eta_e = 0.25$  y  $\eta_c = 0.1525$  y para el destilador MP  $\eta_e = \eta_c = 0.6875$ , de lo que claramente se desprende que existe una diferencia apreciable en la producción como función de la relación de aspecto y del cambio en la distancia característica, la cual es de 2.5 m para Salgado y 0.048 m para el MP. Otro aspecto importante a considerar es el hecho de la diferencia en el número de Grashof para ambos destiladores. Para una misma diferencia de temperaturas entre la salmuera y el vidrio, se tiene que:

Gran sección

MP

$$Gr_S = K \cdot (2.5)^3$$

$$Gr_M = K \cdot (0.048)^3$$

con lo cual se obtiene que:

$$Gr_S = 1.42 \times 10^5 Gr_M$$

Evidentemente, existen diferencias fundamentales en estos dos destiladores, que son difíciles de valorar. Desde un punto de vista práctico resulta difícil que el destilador solar de gran sección tenga un buen aislamiento térmico y por lo tanto es de esperarse que tenga fugas de calor, mientras que el destilador somero, por su tamaño y los materiales de construcción puede considerarse que tiene muchas menos pérdidas de calor, lo cual explicaría en una buena medida que la distancia característica y la relación de aspecto no son los únicos factores que afectan la eficiencia.

**Palacio y Fernández (1993)**, reportan una comparación entre un destilador solar de caseta con charola de ferrocemento, con sección triangular de 0.46 m de altura por 1.60 m de base. Este destilador operando en condiciones idénticas al de **McCracken y Porta (1990b)**, resulta en una producción de  $3.5 \text{ kg/m}^2$  para el destilador de caseta, considerando la superficie del evaporador que es de  $64 \text{ m}^2$ . Si se considera la producción de agua entre la superficie del colector de  $73.8 \text{ m}^2$ , la producción se reduce a  $3.02 \text{ kg/m}^2$ . Para el destilador somero la producción es de  $6 \text{ kg/m}^2$ , como puede apreciarse, el destilador somero produce un 70% más considerando la superficie del evaporador y un 100% más para la superficie del condensador.

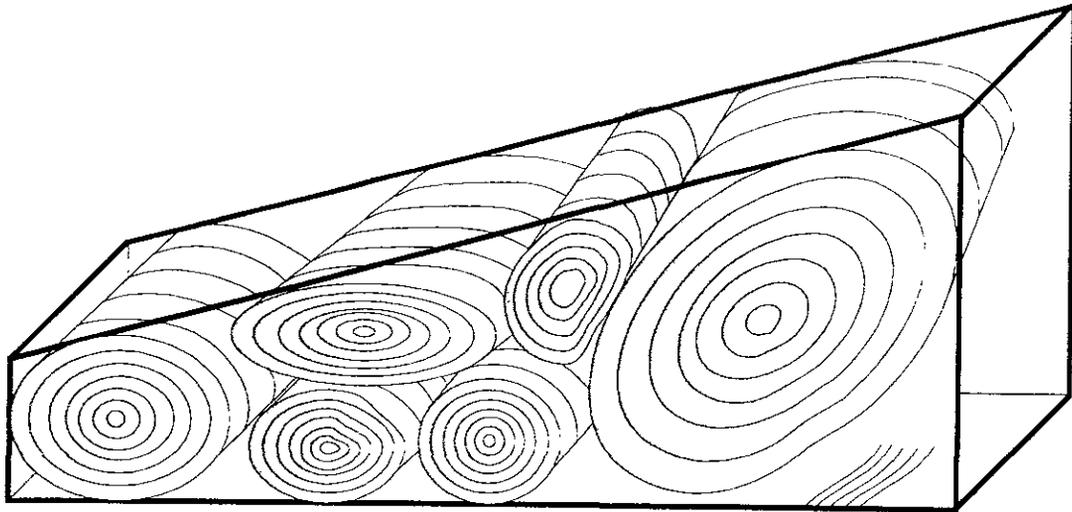
En este caso, el número de Grashof para el destilador de caseta es alrededor de 900 veces mayor que el de **McCracken y Porta (1990b)**, suponiendo la misma diferencia de temperaturas.

Para explorar más a detalle la influencia que tiene el cambio de relación de aspecto en el desempeño de los destiladores solares, es fundamental acudir a los resultados teóricos de visualización computarizada y a los resultados de visualización directa experimental, tal y como se ha reportado en el capítulo 6.

**Salmun (1995)**, desarrolla un análisis teórico del fenómeno de convección natural en geometrías de sección triangular con relaciones de aspecto de 0.1 a 1. La base de la cavidad se encuentra a temperatura superior que la cubierta, tal como sucede en un destilador solar, encontrando que para la relación de aspecto de 1, se desarrolla una sola celda de convección en el interior de la cavidad, y el número de celdas aumenta cuando la relación de aspecto disminuye.

**Palacio y Fernández (1993)**, muestran que para una relación de aspecto de 0.57 en el interior de una cavidad triangular, en condiciones de operación similares a las de un destilador solar, se forma una sola celda.

La figura 31 muestra una concepción artística del fenómeno multicelular que se aprecia en el destilador solar de laboratorio, lo cual es congruente con los resultados obtenidos por **Salmun (1995)**.



**Fig 31** Concepción artística del fenómeno multicelular en el interior del destilador experimental de laboratorio.

**Velarde (1980)**, muestra que en un fenómeno de convección en una cavidad de sección rectangular, se forman celdas en forma de rollos, similares entre sí, en el caso del destilador solar, tal como se aprecia en la figura 31, un ángulo de  $4^\circ$  de inclinación en el colector es suficiente para crear una inestabilidad entre las distintas celdas.

Con relaciones de aspecto pequeñas, se tiene una gran cantidad de vórtices, cada uno transporta vapor de agua de la superficie del evaporador y la deposita en el condensador. Después de largos periodos de observación del fenómeno en el interior del destilador, se puede concluir que sólo la periferia del vórtice participa en la transferencia de masa, debido a que las partes centrales de los vórtices nunca tocan ni al evaporador ni al condensador, lo cual es congruente con lo reportado por **Baum y Bairamov (1964)**.

Como se ha mostrado en el capítulo 6, figura 16, se nota un incremento en la velocidad del fluido cuando la distancia de separación  $d$  disminuye, por lo que para distancias características mayores como el caso del destilador de gran sección reportado por **Salgado (1996)**, o el de ferrocemento reportado por **Palacio y Fernández (1993)**, la velocidad del único vórtice es menor. Por ello se puede pensar que la diferencia de producciones entre un destilador como el MP y el de gran sección o el de ferrocemento, se debe a que muchos vórtices pequeños con velocidades mayores, transfieren mayor masa que un solo vórtice con una menor velocidad.

La sección transversal del destilador de laboratorio se muestra en la figura 32. Aunque el fenómeno fundamentalmente es caótico, pueden establecerse tres secciones. La sección de la izquierda está ocupada principalmente por un vórtice muy estable que rota en el sentido contrario a las manecillas del reloj.

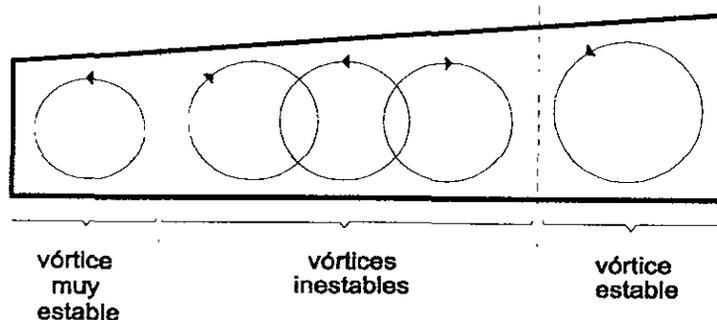


Fig 32 Zonas de actividad en el interior del destilador experimental de laboratorio

La sección central que ocupa alrededor de la mitad del área de la sección transversal, contiene principalmente tres vórtices que chocan y se combinan entre sí. La sección de la derecha es ocupada por un vórtice muy similar al de la sección izquierda.

Resulta interesante la comparación del destilador objeto de este trabajo con otros similares reportados en la literatura.

**Shawaqfeh y Farid (1995)**, *ex nunc* SF, reportan con base en el modelo de Dunkle y con mediciones experimentales propias y de otros autores, la producción acumulada por unidad de tiempo y superficie, para un destilador solar de  $1 \text{ m}^2$  de área de evaporador y con una relación de aspecto de 0.48. Señalan además que el análisis desarrollado por Dunkle tiene serios inconvenientes dado que se efectuó a temperaturas de salmuera relativamente bajas ( $50^\circ\text{C}$ ) y que la ecuación para obtener el coeficiente convectivo de transferencia de calor se desarrolló para convección libre de aire sin evaporación. La figura 33 muestra la producción de destilado como función de la diferencia de temperaturas comparando los valores obtenidos experimentalmente y los del destilador de laboratorio reportados en este trabajo con los obtenidos por SF.

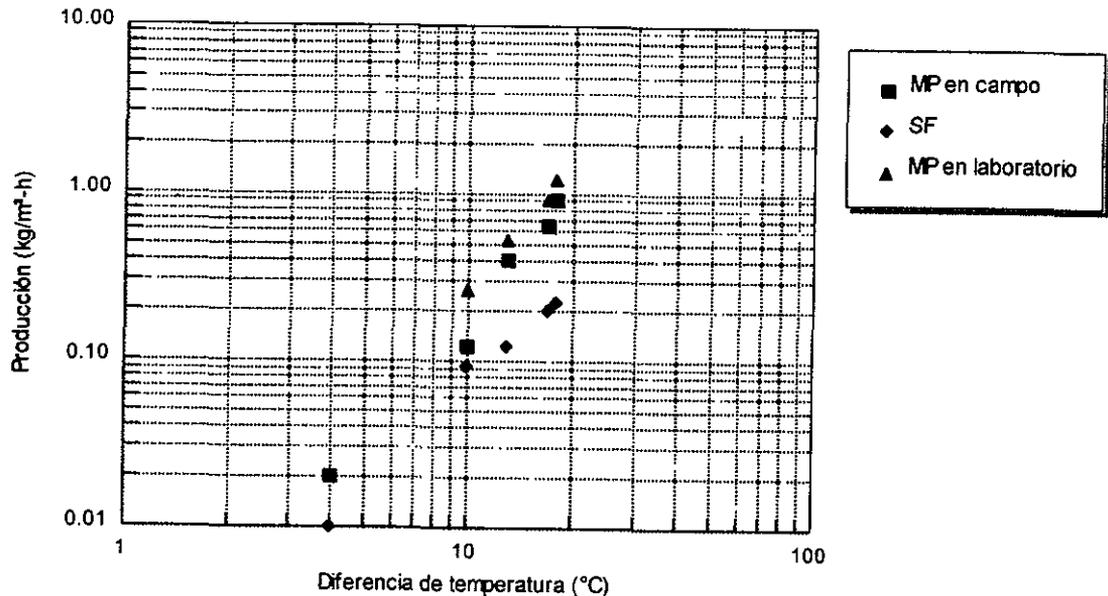


Fig 33 Producción en función de la diferencia de temperatura.

Como puede apreciarse en la figura 33, existe una gran diferencia en las producciones reportadas por SF y las obtenidas en condiciones controladas en el destilador de laboratorio reportadas en el capítulo 6, figura 19, y las de campo reportadas en el capítulo 7, figura 29. Puede observarse que para una diferencia de temperaturas de 18°C la producción reportada por SF es cuatro veces menor que la obtenida en este trabajo, lo que implica un destilador muy ineficiente. Como ha sido mostrado,  $U_{wg}$  se obtuvo en condiciones controladas de laboratorio sin separar los diferentes mecanismos de transferencia de calor; tal y como atinadamente señalan **Baum y Bairamov (1964)**, los procesos de evaporación y condensación están interrelacionados, y uno intensifica al otro, por lo que evaluarlos de manera separada conduce a errores. La figura 34 muestra la comparación del número de Nusselt en función del número de Rayleigh especial, que se obtiene utilizando el número especial de Grashof usando los valores experimentales obtenidos del capítulo 6, figura 19.

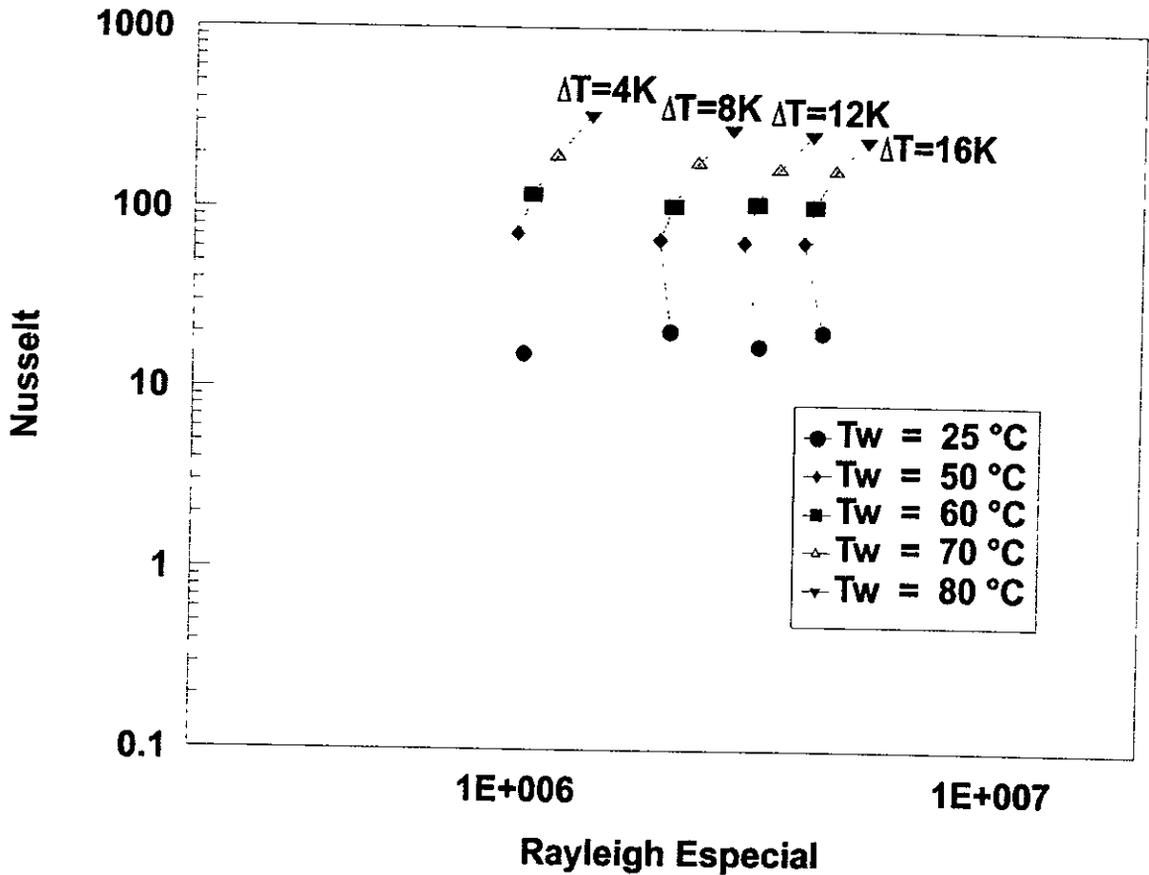


Fig 34 Número de Nusselt como función del número de Rayleigh especial.

Tal como puede verse de la gráfica reportada en el capítulo 6, figura 19a, el número de Nusselt es función de la diferencia de temperaturas entre la salmuera y el vidrio y de la temperatura de la salmuera. La gran mayoría de los autores analizan la producción solamente como función de la diferencia de temperaturas.

Un aspecto importante es el comparar el coeficiente de transferencia de calor del vidrio al ambiente  $U_{ga}$ , mostrado en este trabajo de acuerdo a lo reportado por diversos autores.

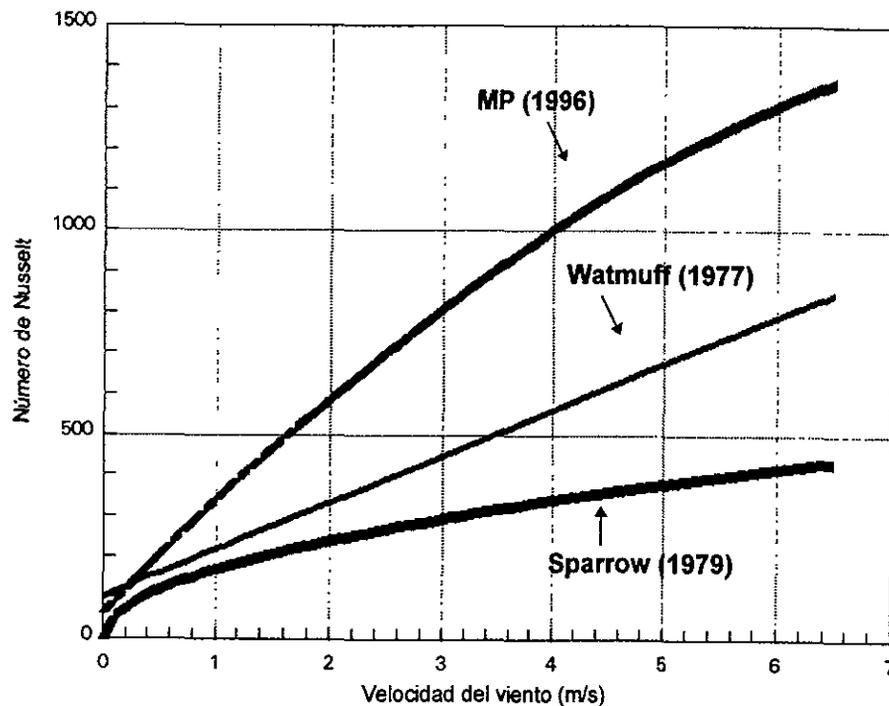


Fig 35 Número de Nusselt como función de la velocidad del viento

**Sparrow et al. (1979)**, según **Duffie y Beckman (1991)**, desarrollaron estudios en túneles de viento sobre placas rectangulares a diferentes orientaciones y encontró la correlación para un número de Reynolds de  $2 \times 10^4$  a  $9 \times 10^4$ .

**Watmuff et al. (1977)**, encuentran la expresión  $h = 2.8 + 3v$  para una placa de  $0.5 \text{ m}^2$  de superficie. La figura 35 muestra el número de Nusselt en función de la velocidad del viento para estos dos autores comparándolos con el resultado del destilador MP reportado en este trabajo en el capítulo 6, figura 24. Cabe señalar que el coeficiente  $U_{ga}$  se obtuvo en condiciones reales de operación en el que el viento no es continuo y aunque tiene una dirección dominante, no siempre es constante.

Como puede observarse, la expresión encontrada en este trabajo sobreestima el coeficiente de transferencia de calor del vidrio al ambiente respecto al de los otros autores. Sin embargo, tal como se muestra en el capítulo 7, existe una muy buena aproximación entre los valores obtenidos experimentalmente y los modelados en donde se han utilizado los valores de  $U_{wg}$  y  $U_{ga}$ , por lo que pueden ser considerados valores más confiables.

Las diferencias encontradas en el capítulo 7, figura 30, en la que se compara la producción calculada utilizando el modelo matemático desarrollado para el destilador MP y la producción medida, pueden deberse a que las propiedades de los materiales utilizados en los cálculos no necesariamente son exactas y están tomadas para materiales genéricos. En este trabajo se muestra el resultado sin alterar los valores de las propiedades.

## CAPÍTULO 9

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El destilador somero desarrollado por McCracken, se modificó al incorporar aislamiento térmico de poliestireno en la base y paredes laterales. Esto disminuyó las pérdidas de calor al ambiente y aumentó la temperatura de la salmuera, que permitió tener una diferencia de temperaturas entre la salmuera y el vidrio mayores, que implica un aumento en la producción y por lo tanto en la eficiencia  $\eta$ .

El aislamiento térmico del destilador modifica su inercia térmica. Esto permite tener producciones nocturnas de alrededor del 12% del destilado que se obtiene durante el periodo de insolación.

Se encontró la menor distancia  $d$  que es posible tener desde el punto de vista constructivo, con lo que se obtuvieron las producciones máximas reportadas. Como se ha podido constatar, con la menor relación de aspecto se obtiene la mayor producción, debido a las relativamente mayores velocidades alcanzadas por el fluido, al mayor número de celdas convectivas que se forman en el interior de la cavidad y a las diferencias de temperatura entre salmuera y vidrio más extremas.

La visualización del fenómeno, nunca antes reportada, permite un conocimiento más cabal del mismo. La caracterización del movimiento del fluido, mediante el uso de técnicas modernas de captura y proceso de información, permitió verificar la conclusión de **Baum y Bairamov (1964)**, en el sentido de que sólo la periferia de los vórtices transfieren calor y masa.

Mediante el destilador de laboratorio en condiciones controladas, se obtuvo un gráfico que permite conocer el valor del coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y el vidrio  $U_{wg}$ . Se encontró que este coeficiente es función tanto de la diferencia de temperaturas entre la salmuera y el vidrio como del valor de la temperatura de la salmuera, consideración nunca antes utilizada en los trabajos publicados. Esto permitió evaluar el flujo de calor total del destilador a partir de la producción de agua destilada, sin separar los diferentes mecanismos de transferencia de calor y masa que coexisten en el fenómeno de la destilación.

Los destiladores MP pueden ser considerados como aparatos de *altas temperaturas*, por lo que los modelos reportados no funcionan apropiadamente para estos destiladores, debido a los rangos de temperatura para los que fueron desarrollados.

Como se ha mostrado, la producción de agua destilada *no aumenta de manera lineal* con la diferencia de temperaturas entre la salmuera y el vidrio, debido al cambio en la estructura de las celdas convectivas.

El coeficiente global de transferencia de calor entre el vidrio y el ambiente  $U_{ga}$ , se encontró en condiciones reales de operación y funciona adecuadamente en el modelo matemático, sin embargo, se recomienda el estudio de este coeficiente en condiciones controladas, donde pueda ser valorado para diferentes velocidades de viento, continuas y discontinuas para diversas direcciones. Este coeficiente tiene una gran significancia en el comportamiento del destilador, consideración no tomada en cuenta en los trabajos reportados, al utilizar este coeficiente como una constante, evaluándose con la velocidad promedio del viento.

El modelo matemático desarrollado funciona adecuadamente para los destiladores MP; el programa de cómputo permite modificar las características de los materiales empleados en la construcción del destilador, y estimar la producción bajo diferentes parámetros ambientales, por lo que es una buena herramienta de diseño.

Se recomienda realizar estudios para aumentar la eficiencia  $\eta$ , utilizando la técnica implantada de visualización para modificar el evaporador y el condensador a fin de obtener patrones de flujo diferentes que permitan una mayor transferencia de masa en el destilador.

Se recomiendan estudios de interferometría holográfica que permitan, bajo diferentes condiciones de operación, conocer la distribución de temperaturas en el interior del destilador.

Los destiladores MP pueden ser utilizados para construir plantas de mediano tamaño de destilación, la más grande reportada por **Porta y Fernández (1995)**, de 1500 litros por día. Sin embargo, el escalamiento de este tipo de tecnología no es lo más adecuado para producciones mayores por la complejidad del manejo de la salmuera y del destilado. Se recomiendan estudios de ingeniería industrial para el diseño de plantas de destilación de mayores capacidades de producción.

---

**REFERENCIAS**

- Adhikari R.S., Kumar A., Sodha M.S. (1991). "Thermal performance of a multi-effect diffusion solar still". *Int. J. of Energy Research*, Vol. 15, pp. 769-779.
- Adhikari R.S., Kumar A., Kumar A. (1990). "Estimation of mass-transfer rates in solar stills". *Int. J. of Energy Research*, Vol. 14, pp.737-744.
- Ali H.M. (1993). "Effect of forced convection inside the solar still on heat and mass transfer coefficients". *Energy Convers. and Mgmt.*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-79.
- Baum V.A. and Bairamov R. (1964). "Heat and mass transfer processes in solar stills of hotbox type". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 8, No. 3, pp. 78-82.
- Bejan A., Poulikakos D. (1982). "Natural convection in an attic-shaped space filled with porous material". *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 104, pp.241-247.
- Clark J.A. (1990). "The steady-state performance of a solar still". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 44, No. 1, pp. 43-49.
- Cooper P.I. (1969). "Digital simulation of transient solar still processes". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 12, pp. 313-331.
- Cooper P.I. (1972). "Some factors affecting the absorption of solar radiation in solar stills". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 13, pp. 373-381.
- Cooper P.I. (1969). "The absorption of radiation in solar stills". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 12, pp. 333-346.
- Duffie J.A., Beckman W. (1991). "Solar Engineering of Thermal Processes". 2nd. edn, pp. 173-174. John Wiley & Sons, INC, USA.
- Dunkle R.V. (1961). "Solar water distillation: The roof type still and a multiple effect diffusion still". *Int. Devel. in Heat Transfer*, Part V, pp. 895-902.
- Flack Jr.R.D., Witt C.L. (1979). "Velocity measurements in two natural convection air flows using a laser velocimeter". *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 101, pp. 256-260.
-

- Garg H.P. and Mann H.S. (1976). "Effect of climatic, operational and design parameters on the year round performance of single-sloped and double-sloped solar still under Indian arid zone conditions". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 18, pp. 159-164.
- Holland K.G.T., Unny T.E., Raithby G.D. and Konicek. (1976). *Trans. Am. Heat Transfer*, Vol. 98, pp. 189.
- Jurges W., *Gesundh. Ing.*, (1924). 19 (1),1.
- Karim M. (1978). "Comments on the performance of solar stills". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 20, pp. 361.
- Keenan J.H., Keyes F.G., Hill P.G. and Moore. (1969). *J.G. Steam Tables*. J. Willey & Sons.
- Kumar A. and Tiwari G.N. (1988). "Effect of temperature dependent internal heat transfers on the performance of a solar still". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 6, pp. 51-66.
- Kwatra H. (1996). "Performance of a solar still: predicted effect of enhanced evaporation area on yield and evaporation temperature". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 56, No. 3, pp. 261-266.
- Lawrence S.A., Gupta S.P. and Tiwari G.N. (1990). "Effect of heat capacity on the performance of solar still with water flow over the glass cover". *Energy Convers. and Mgmt.*, Vol. 30, No. 3, pp. 277-285.
- Lawrence S.A., Gupta S.P. and Tiwari G.N. (1988). "Experimental validation of thermal analysis of solar still with dye". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 6, pp. 291-305.
- Levi E. (1989). "El agua según la ciencia". 1a. de. Ediciones Castel Mexicana, S.A. México.
- Malik M.A.S., Tiwari G.N., Kumar A., and Sodha M.S. (1982). "Solar Distillation". 1st. edn, pp. 1-10. Pergamon Press, Oxford.
- Maurel A. (1981). "La desalinizacion del agua de mar". *Mundo científico*. No. 3, Vol. 1, pp. 296-305.
- McAdams W.H. (1954). "Heat Transmission". pp. 249, 3rd. edn., Florida.
-

- McCracken H. (1990a). "Distillate production of a simple direct solar still". *SunWorld*, Vol. 14, No. 3, pp. 83-87.
- McCracken H. and Porta G.M.A. (1990b). "Solar still performance: La Paz and Alturas". XIV Reunión Anual de la Asociación Nacional de Energía Solar. La Paz, B.C.S., México.
- Morse R.N. and Read W.R.W. (1968). "A rational basis for the engineering development of a solar still". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 12, pp. 5-17.
- Mowla D. and Karimi G. (1995). "Mathematical modelling of solar stills in Iran". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 55, No. 5, pp. 389-393.
- Nayak J.K., Tiwari G.N. and Sodha M.S. (1980). "Periodic theory of solar still". *Int. J. of Energy Research*, Vol. 4, pp. 41-57.
- Okeke B.O. (1979). "Visualization of natural convection in flat-plate solar collectors". pp. 61-84. Ph.D. Thesis. Mississippi State University, Mississippi.
- Palacio A. and Fernandez J.L. (1993). "Numerical analysis of greenhouse-type solar stills with high inclination". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 50, No. 6, pp 469-476.
- Porta G.M.A. and Fernández J.L. (1995). "Mexican experience in solar still design and operation". III *International Congress Energy, Environment and Technological Innovation*. Universidad Central de Venezuela and Università di Roma "La Sapienza", Caracas, Venezuela.
- Porta G.M.A., Rubio E., Villegas E., Gutiérrez J. (1996). "Sistema para evaluación de imágenes para estudios de destilación experimental". Informe técnico. CIBNOR, S.C. La Paz, B.C.S.
- Poulikakos D., Bejan A. (1983a). "Numerical study of transient high Rayleigh number convection in an attic-shaped porous layer". *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 105, pp. 476-484.
- Poulikakos D., Bejan A. (1983b). "Natural convection experiments in a triangular enclosure". *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 105, pp. 652-655.
- Poulikakos D., Bejan A. (1983c). "The fluid dynamics of an attic space". *J. of Fluid Mech.*, Vol. 131, pp 251-269.
-

- Rajvanshi A.K. (1981). "Effect of various dyes on solar distillation". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 27, pp. 51-65.
- Salgado R., (1996). Comunicación personal.
- Salmun H. (1995). "Convection patterns in a triangular domain". *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 351-362.
- Sharma V.B., Mullick S.C. (1993). "Calculation of hourly output of a solar still". *J. of Solar Energy Engineering*, Vol. 115, pp. 231-236.
- Sharma V.B., Mullick S.C. (1991). "Estimation of heat-transfer coefficients, the upward heat flow, and evaporation in a solar still". *J. of Solar Energy Engineering*, Vol. 113, pp. 36-41.
- Sharpley B.F. and Boelter L.M.K. (1938). "Evaporation of water into quiet air from a one-foot diameter surface". *Industrial and Engineering Chem.*, Vol. 30, No. 10, pp. 1125-1131.
- Shawaqfeh A.T., Farid M. M. (1995). "Distillation of ethanol in a solar still: Studies on heat and mass transfer". *J. of Solar Energy Engineering*, Vol. 117, pp. 236-241.
- Singh A.K., Tiwari G.N. (1993). "Design parameters of an active regenerative solar still: An experimental study". *Int. J. of Energy Research*, Vol. 17, pp. 365-375.
- Sodha M.S., Singh U., Kumar A. and Tiwari, G.N. (1980). "Transient analysis of solar still". *Energy Convers. and Mgmt.*, Vol. 20, pp. 191-195.
- Sodha M.S., Kumar A., Srivastava A. and Tiwari G.N. (1980). "Thermal performance of "still on roof" system". *Energy Convers. and Mgmt.*, Vol. 20, pp. 181-190.
- Sodha M.S., Kumar A., Singh U. and Tiwari, G.N. (1981). "Further studies on double solar still". *Int. J. of Energy Research*, Vol. 5, pp. 341-352.
- Sodha M.S., Tiwari G.N. and Nayak, J.K. (1981). "Shallow solar pond water heater: An analytical study". *Energy Convers. and Mgmt.*, Vol. 21, pp. 137-139.

Sodha M.S., Kumar A., Tiwari G.N. and Tyagi R.C. (1981). "Simple multiple wick solar still: Analysis and performance". *Energy Convers. and Mgmt.*, Vol. 21, pp. 127-131.

Tamimi A. (1987). "Performance of a solar still with reflectors and black dye". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 5, pp. 229-235.

Telkes M. (1955). "Solar Stills". *Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy*, pp. 73. Phoenix, AZ.

Telkes M. (1953). "Fresh water from sea water by solar distillation". *Industrial and Engineering Chem.*, Vol. 45, No. 5, pp. 1108-1114.

Tiwari G.N. and Lawrence S.A. (1991). "New heat and mass transfer relations for a solar still". *Energy Convers. and Mgmt.*, Vol. 31, No. 2, pp 201-203.

Tiwari G.N., Gupta S.P. and Lawrence S.A. (1989). "Transient analysis of solar still in the presence of dye". *Energy Convers. and Mgmt.*, Vol. 29, No. 1, pp. 59-62.

Tiwari N.G., Thomas J.M. and Khan E. (1994). "Optimization of glass cover inclination for maximum yield in a solar still". *Heat Recovery Systems & Chp.*, Vol. 14, No. 4, pp. 447-455.

Velarde M. and Normand C. (1980). "Convection". *Scientific american*, Vol. 243, No. 1, pp. 92-108.

Watmuff J.H., Charters W.W.S., Proctor D. (1977). "Solar and wind induced external coefficients solar collectors". *International Heliotechnique No.2*, pp. 56.

Yadav Y.P., Prasad Y.N. (1991). "Parametric investigations on a basin type solar still". *Energy Convers. and Mgmt.*, Vol. 31, No. 1, pp. 7-16.

Yadav Y.P. (1990). "Indoor simulation of a basin-type solar still". *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 8, pp. 31-40.

## ANEXO I

### INCERTIDUMBRE DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las distintas variables que han sido medidas experimentalmente son: radiación solar, producción de agua destilada, temperaturas, velocidad del viento, tiempo y distancias.

#### A1.1 Radiación solar

La radiación solar se registró con un piranómetro Kahlsico 3209 con las siguientes características:

Rango espectral	0.3 a 3 $\mu\text{m}$
Sensitividad	18 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Impedancia	30 $\Omega$
Linealidad	$\pm 1\%$ de 80 a 1340 $\text{W}/\text{m}^2$
Constante de tiempo	4 s
Coefficiente de temperatura	$\pm 0.03\%/^{\circ}\text{C}$

Existen básicamente dos fuentes de error: el debido al coeficiente de temperatura del piranómetro y el que se produce al digitalizar el valor medido.

Considerando el rango de fluctuación de la temperatura ambiente a la que está sujeta el sensor que es entre 20 y 50 $^{\circ}\text{C}$ , el error esperado debido al coeficiente de temperatura es de  $\pm 9 \text{ W}/\text{m}^2$  para una lectura de 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ .

El registro se efectuó con una frecuencia de 1 lectura por segundo utilizando una estación meteorológica computarizada con un convertidor analógico a digital de 8 bits con un error de  $\pm 1$  bit, que representa  $\pm 3.9 \text{ W}/\text{m}^2$  para una lectura de 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Por lo tanto, el error máximo esperado es de 1.29%  $\text{W}/\text{m}^2$ .

### A1.2 Producción de agua destilada

La producción de agua destilada se acumuló en intervalos de 0.25 h en un recipiente de 2 l de capacidad y posteriormente el volumen se midió con distintas probetas marca VWR: de 10 ml con una resolución de 0.2 ml y un error llímite de 0.1 ml, de 50 ml con una resolución de 1 ml y un error llímite de 0.4 ml, y de 250 ml con una resolución de 2 ml y un error llímite de 0.4 ml. El error máximo esperado para una producción de 250 ml es del 0.16%.

### A1.3 Temperaturas

Las temperaturas reportadas se midieron utilizando en todos los casos termopares tipo J, calibre 30 con aislamiento de teflón, con las siguientes características:

Intervalo de temperaturas	0 a 750°C
Límites de error	1.1°C correspondiente a 0.4%

Las temperaturas se registraron con un termómetro de 12 canales para termopares Digi-Sense 92800-10 con las siguientes especificaciones:

Rango de operación	0 a 50°C
Humedad	10 a 90%HR sin condensación
Precisión	±0.1% por lectura
Resolución	0.1°C
Escala	°C/°F/K/R
Tiempo de lectura	4 s - 99 min 59 s

Los termopares se calibraron de acuerdo a la norma **ANSI/ASTM E 563-76 (1976)**, conectados al instrumento 92800-10, mediante la referencia de hielo descrita en la norma, con aceite de uso automotriz SAE-40 en lugar de mercurio.

El instrumento de registro 92800-10, cuenta con un procedimiento de autocalibración para medir y compensar las diferencias de voltaje entre cada uno de los termopares sometidas a la temperatura de referencia dada por el hielo.

Para la medición de temperaturas en condiciones controladas en laboratorio, utilizadas para el cálculo de  $U_{wg}$ , se tomaron 120 muestras de la temperatura

en la salmuera y el vidrio a lo largo de 2 h para cada caso reportado en el capítulo 6 figura 19. La tabla 1 muestra los valores medidos para uno de estos casos. De acuerdo con **Moffat (1988)** y **Keenan (1990)**, un intervalo de confianza del 95% es aceptado por la comunidad de ingeniería lo que corresponde a una relación de 20:1.

El intervalo de confianza puede expresarse como:

$$IC_{XX\%} = \bar{X} \pm \frac{Z\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

donde:

$IC_{XX\%}$	Intervalo de confianza con probabilidad XX%
$\bar{X}$	Promedio de la muestra
$Z$	Factor de probabilidad del nivel de confianza deseado
$\sigma$	Desviación estándar
$n$	Número de muestras

Por lo que para un nivel de confianza del 95%,  $Z = 1.96$  por lo tanto para los valores de la tabla 1 se tiene que:

Para la temperatura de la salmuera,  $\bar{X} = 69.92^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 0.53^\circ\text{C}$  por lo que:

$$IC_{95\%} = 69.92 \pm 0.0948 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para la temperatura del vidrio:  $\bar{X} = 57.15^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 0.48^\circ\text{C}$  por lo que:

$$IC_{95\%} = 57.15 \pm 0.085 \text{ }^\circ\text{C}$$

**Tabla 1 Valores para las temperaturas de salmuera y vidrio**

Tiempo	Salmuera	Vidrio	Tiempo	Salmuera	Vidrio
4.00	70.10	56.60	4.12	69.70	56.80
4.02	69.80	56.60	4.13	68.90	56.80
4.03	69.90	56.60	4.15	69.60	56.80
4.05	69.60	56.60	4.17	70.70	56.80
4.07	69.70	56.60	4.18	70.40	56.90
4.08	69.80	56.70	4.20	70.20	56.80
4.10	70.40	56.70	4.22	69.80	56.80

Tiempo	Salmuera	Vidno	Tiempo	Salmuera	Vidrio
4.23	70.00	56.80	5.15	69.70	55.90
4.25	69.90	56.80	5.17	70.30	56.20
4.27	70.00	56.80	5.18	70.80	56.40
4.28	69.90	56.70	5.20	70.20	56.80
4.30	69.50	56.70	5.22	70.10	57.00
4.32	69.40	56.70	5.23	69.30	57.20
4.33	69.60	56.70	5.25	69.30	57.20
4.35	69.80	56.70	5.27	70.30	57.40
4.37	69.80	56.70	5.28	70.90	57.40
4.38	69.70	56.70	5.30	70.30	57.40
4.40	71.10	56.80	5.32	70.40	57.60
4.42	70.20	56.90	5.35	70.80	57.70
4.43	69.90	56.80	5.37	70.80	57.70
4.45	70.20	56.80	5.38	70.60	57.70
4.47	70.20	56.90	5.40	70.60	57.60
4.48	70.20	56.90	5.42	70.00	57.60
4.50	70.10	56.80	5.43	69.70	57.60
4.52	71.00	56.90	5.45	69.80	57.40
4.53	69.40	56.80	5.47	70.60	57.20
4.55	69.50	56.80	5.48	69.60	57.20
4.57	69.90	56.80	5.50	69.50	57.10
4.58	69.70	56.90	5.52	69.20	56.90
4.60	69.80	56.80	5.53	69.30	56.80
4.62	69.40	56.80	5.55	69.30	56.80
4.63	69.60	56.70	5.57	69.00	56.80
4.65	69.50	56.70	5.58	69.20	56.80
4.67	69.20	56.80	5.60	70.20	57.10
4.68	69.40	56.70	5.62	70.20	57.20
4.70	69.70	56.80	5.63	70.40	57.20
4.72	69.80	56.80	5.65	70.70	57.30
4.73	69.60	56.90	5.67	70.40	57.30
4.75	69.70	57.00	5.68	70.30	57.50
4.77	70.30	57.10	5.70	70.60	57.60
4.78	70.20	57.20	5.72	70.10	57.70
4.80	70.40	57.20	5.73	69.80	57.60
4.82	70.10	57.20	5.75	69.90	57.50
4.83	70.00	57.30	5.77	69.00	57.40
4.85	69.90	57.30	5.78	69.40	57.30
4.87	69.70	57.30	5.80	69.40	57.20
4.88	70.60	57.30	5.82	69.60	57.10
4.90	70.30	57.40	5.83	69.60	57.20
4.92	70.40	57.30	5.85	69.80	57.20
4.93	70.20	57.40	5.87	69.80	57.30
4.95	69.90	57.30	5.88	70.30	57.40
4.97	70.10	57.20	5.90	70.30	57.40
4.98	70.10	57.20	5.92	71.30	57.40
5.00	68.90	57.20	5.93	70.60	57.40
5.02	69.80	57.20	5.95	70.50	57.30
5.03	69.90	57.20	5.97	70.00	57.30
5.05	70.00	57.00	5.98	70.30	57.30
5.07	69.70	56.80	6.00	70.30	57.30
5.08	69.60	56.70			
5.10	69.60	56.70			
5.12	69.30	56.40			
5.13	69.40	56.10			

### A1.4 Velocidad del viento

El sensor utilizado es un anemómetro NRG-40 con las siguientes características:

Número de copas	3 con sección cónica de 51 mm de diámetro
Diámetro del rotor	190 mm
Umbral de respuesta	0.75 m/s
Rango de temperatura	-55°C a 60°C
Rango de humedad	0 a 100%HR
Respuesta en frecuencia	60 Hz a 46.5 m/s

El anemómetro se implantó mediante un integrador programado para obtener la velocidad promedio en el intervalo deseado de 60 a 300 s.

El error más importante ocurre cuando la velocidad del viento es mínima. De los 132 valores medidos, 22 de ellos están en el intervalo de 0 a 1.5 m/s, que representa el 16% de los valores medidos. El intervalo de confianza del 95%, para este intervalo de velocidades de viento, con una  $\bar{X} = 0.92$  m/s,  $\sigma = 0.55$  m/s y  $Z = 1.95$ , es:  $IC_{95\%} = 0.92 \pm 0.22$  m/s.

### A1.5 Tiempos y distancias

Para calcular la velocidad del fluido en los vórtices dentro del destilador de laboratorio, se midieron tiempos y distancias mediante un cronómetro marca HEUER con una resolución de 0.01 s y una regla graduada en mm con resolución de 1 mm.

Con una cámara de video de formato NTSC de 1 lumen de sensibilidad marca PANASONIC PV-IQ203, y una escala graduada sobre la pared lateral del destilador, se registró el movimiento de los vórtices, midiendo posteriormente el tiempo en el que una marca distintiva en el vórtice pasaba por dos puntos separados una distancia fija de 7 cm, con lo cual se evaluó la velocidad del fluido.

Para cada punto de la gráfica del capítulo 6, figura 16, se tomaron más de 20 mediciones. Mediante el criterio estadístico de eliminar aquellos valores que estuvieran alejados del promedio en  $\pm\sigma$ , se volvió a calcular su promedio y este juego de datos es el que constituye la figura 16. La tabla 2 muestra uno de los casos que representa una diferencia de temperaturas de 16°C y  $d = 0.12$  m.

El intervalo de confianza para las mediciones de tiempo se calcula para  $\bar{t} = 0.727$  s,  $\sigma = 0.0679$  s y  $Z = 1.96$  para un nivel de confianza del 95%, se tiene que de la ecuación 1:

$$IC_{95\%} = 0.727 \pm 0.02975 \text{ s}$$

Por lo que la velocidad para ese punto es de  $7 \text{ cm} / 0.727 \text{ s} = 0.096 \text{ m/s}$

**Tabla 2 Valores de los tiempos para diferencias de temperatura de salmuera y vidrio de  $16^\circ\text{C}$  y  $d = 0.12 \text{ m}$**

Muestra número (n)	Tiempo de recorrido en 7 cm (s)	Muestra número (n)	Tiempo de recorrido en 7 cm (s)
1	0.66	11	0.71
2	0.83	12	0.84
3	0.81	13	0.79
4	0.70	14	0.61
5	0.79	15	0.81
6	0.69	16	0.63
7	0.74	17	0.78
8	0.66	18	0.65
9	0.66	19	0.71
10	0.74	20	0.78

### A1.6 Estimación del error en $U_{wg}$

Para calcular  $U_{wg}$  se midió el acumulado de agua destilada en intervalos de 0.25 h durante 2 h. Las mediciones acumuladas para estos intervalos se muestran en la tabla 3 para el caso del mayor flujo de calor calculado.

**Tabla 3 Valores acumulados de agua destilada.**

Intervalo de 0.25 h	1	2	3	4	5	6	7	8
Producción $\text{kg} \times 10^{-3}$	240	244	250	248	244	250	252	256

De la tabla 1 se tiene que:  $\bar{X} = 248 \text{ kg} \times 10^{-3}$ ,  $\sigma = 4.79 \text{ kg} \times 10^{-3}$  y para un nivel de confianza del 95%,  $Z = 1.95$ , por lo que para un intervalo de confianza del 95%:

$$IC_{95\%} = 248 \pm 3.3 \text{ kg} \times 10^{-3}$$

$U_{wg}$  se obtiene al multiplicar el agua destilada producida en 0.25h por la entalpía de evaporación  $h_{fg} = 2329$  kJ/kg a la temperatura del vidrio de 70°C, dividido entre la diferencia de temperaturas de la salmuera y el vidrio que para este caso es de 10°C. De lo cual se obtiene que:

$$U_{wg_{95\%}} = 64.1 \pm 0.85 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

De lo cual se aprecia que el error máximo esperado es de  $\pm 1.33\%$ .

### A1.7 Error de paralaje en la visualización

Debido a la falta de sensibilidad de la cámara CCD con la que fueron obtenidas las imágenes presentadas en el capítulo 6, figura 14 y 15, no fue posible colocar la cámara en posición ortogonal al campo de visualización, lo cual provocó un error de paralaje. La figura 1 muestra la sección del destilador de visualización de los vórtices de 0.12 m y la cámara CCD colocada a 45°. Por lo que se tiene que la distancia aparente es:  $X = 0.12 \cos(45^\circ) = 0.08$  m, este error de paralaje provoca una deformación que es necesario considerar.

En el caso de las imágenes capturadas para el cálculo de las velocidades del fluido y del desplazamiento de los vórtices no existe error de paralaje debido a que la sensibilidad de la cámara analógica permitió su colocación ortogonal a la sección del destilador.

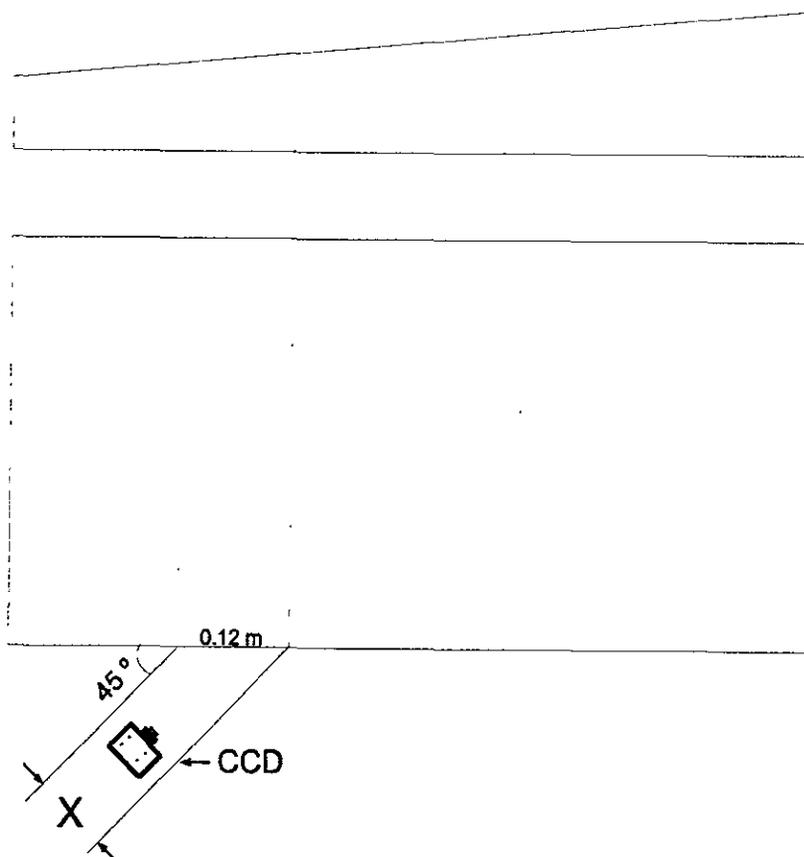


Fig 1 Sección de visualización en el destilador de laboratorio con la cámara CCD.

### A1.8 Referencias

Anónimo ANSI/ASTM E 563-76. (1976). *Standard recommended practice for preparation and use of freezing point reference baths*. American National Standard. pp 788-793.

Moffat R. (1988). *Describing the uncertainties in experimental results*. Experimental thermal and fluid science. Vol. 1, pp 3-17.

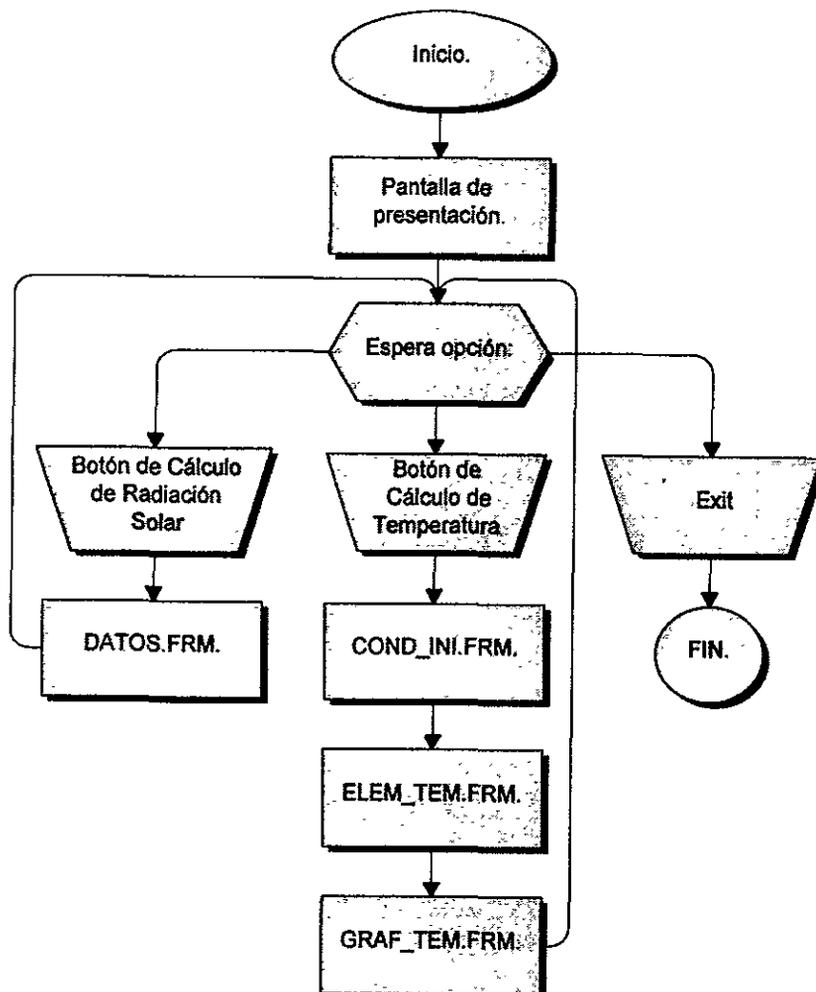
Keenan J. (1990). *Statistical techniques for data analysis*. Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan.

## ANEXO II

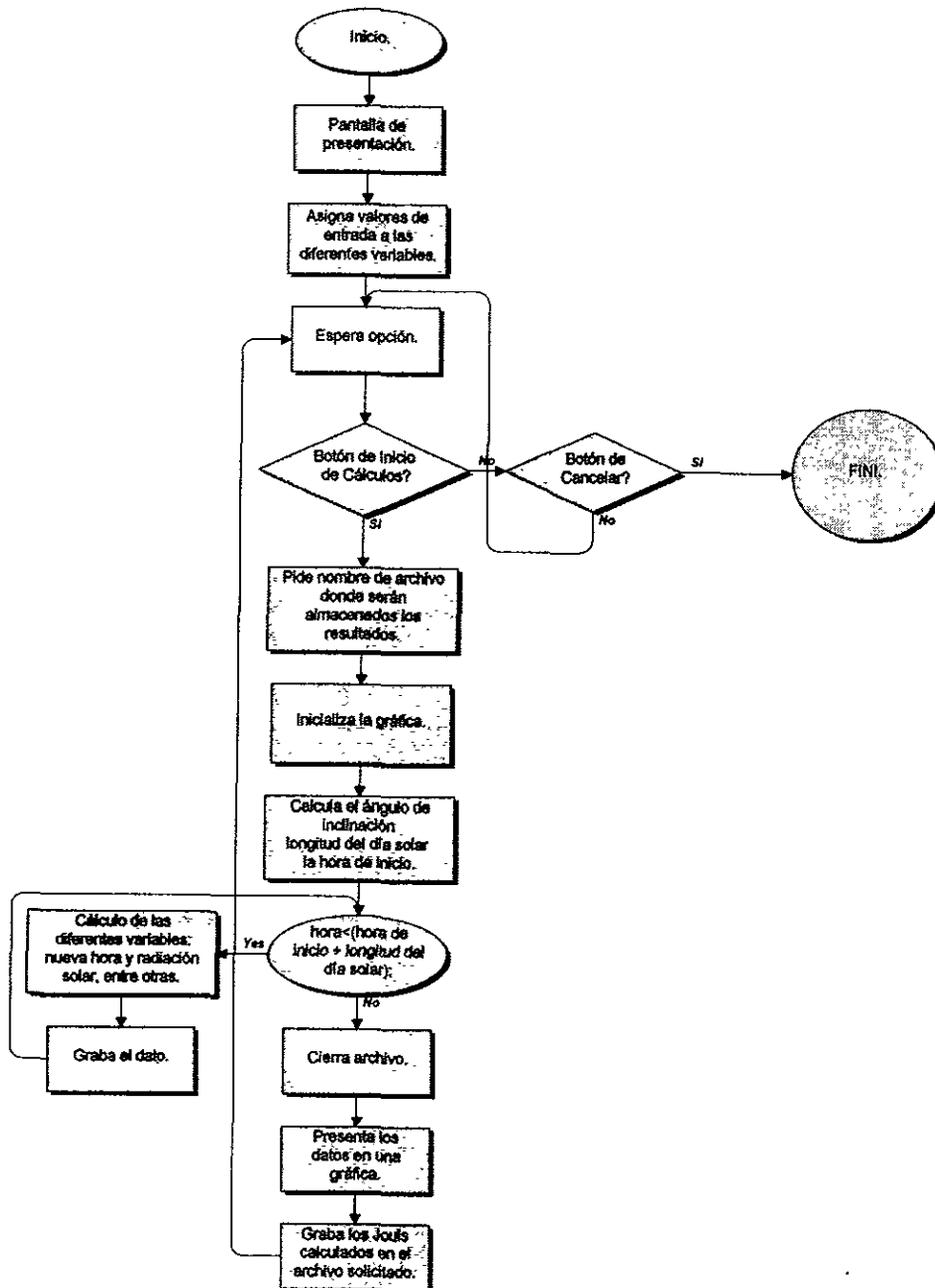
### PROGRAMA DE CÓMPUTO *DESTILLATIO*

#### A.2.1 Diagrama de Flujo

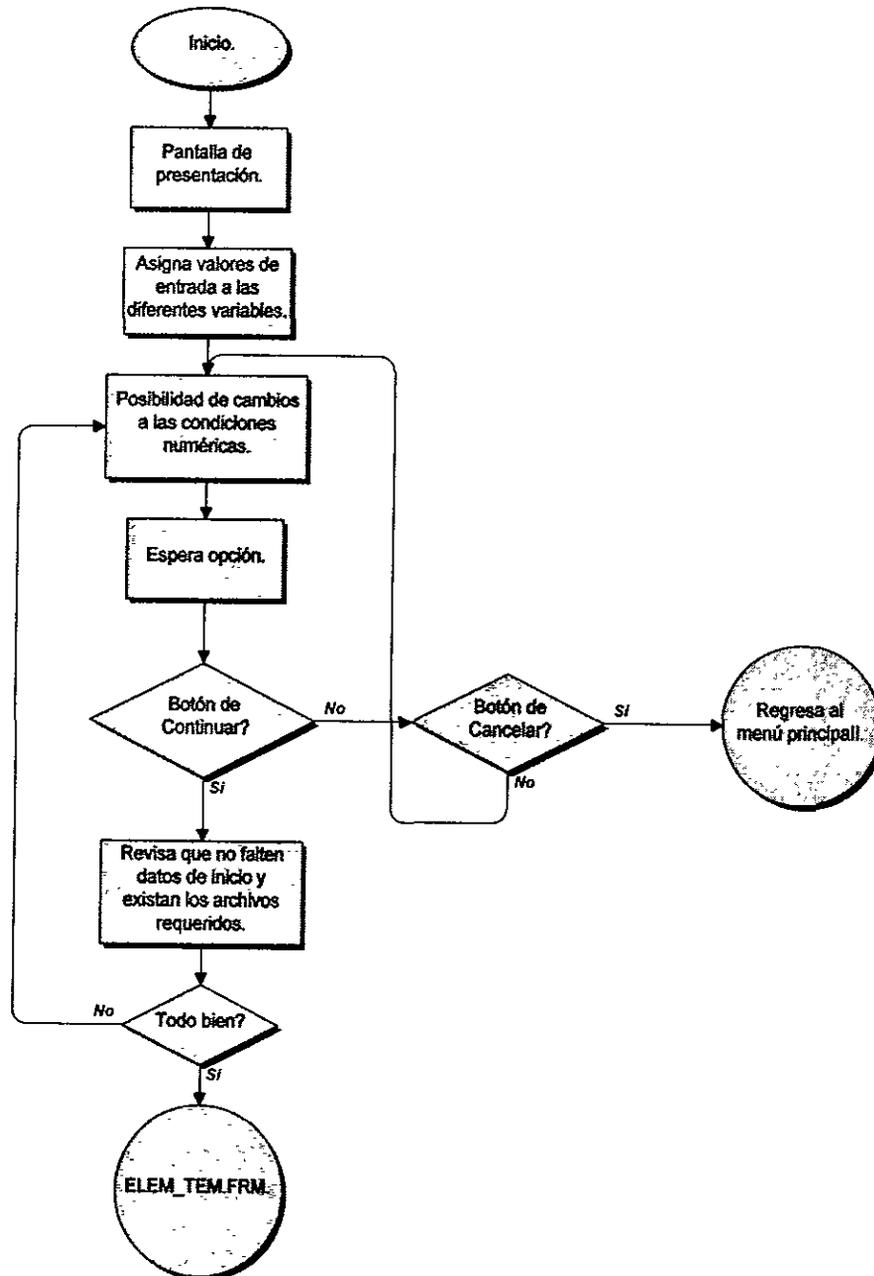
#### Menú Principal



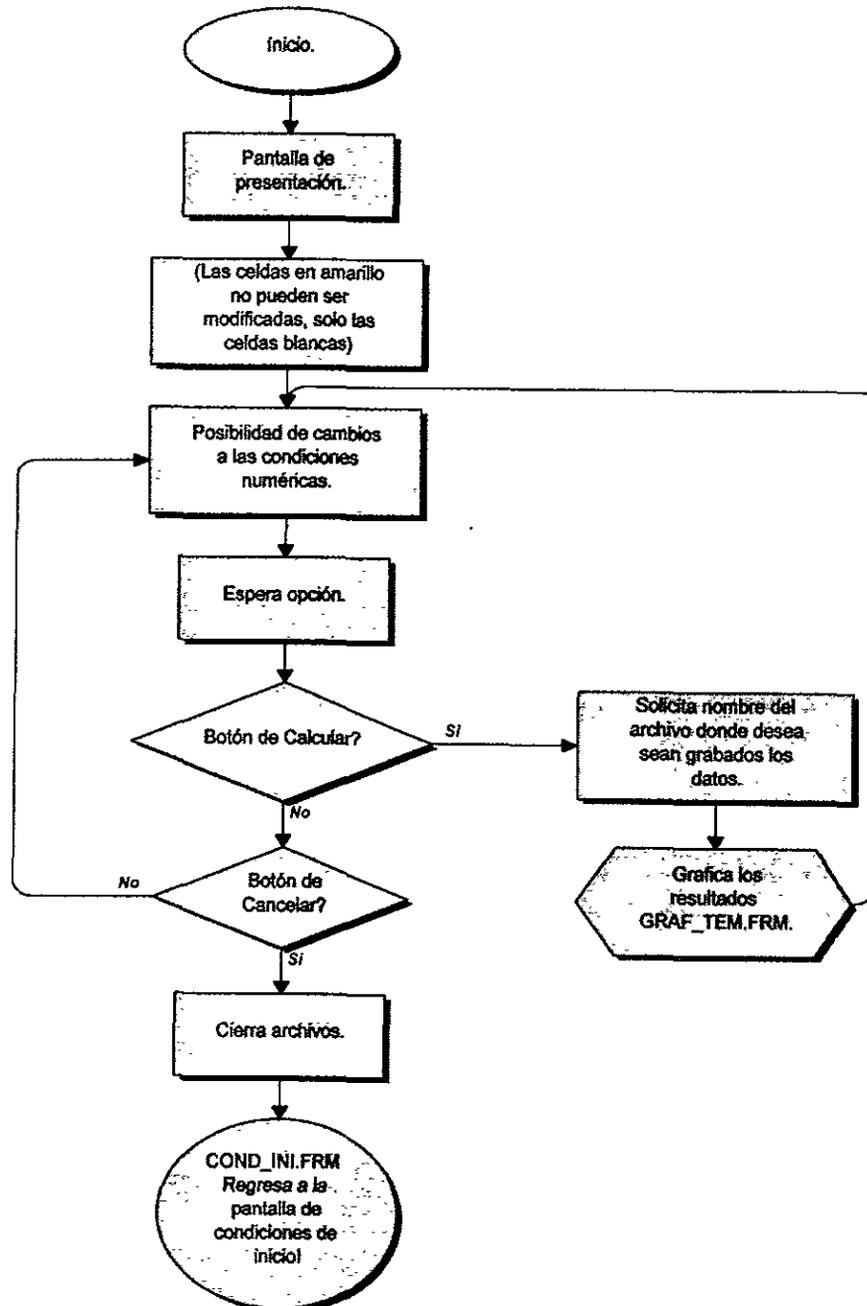
**DATOS.FRM**  
Cálculo de la Radiación Solar



### COND\_INI.FRM Datos de inicio para el cálculo de las temperaturas

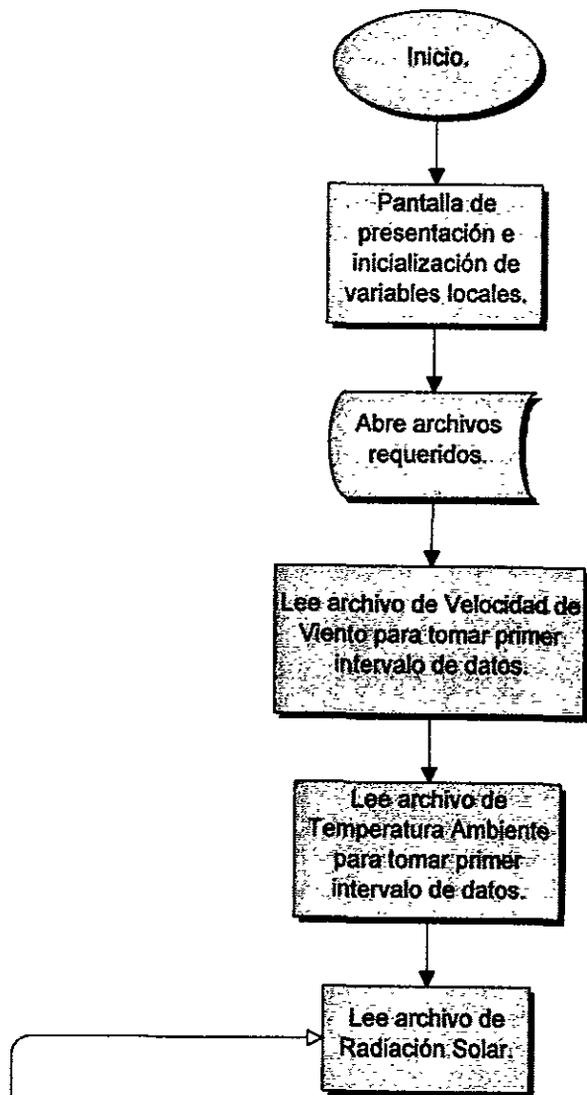


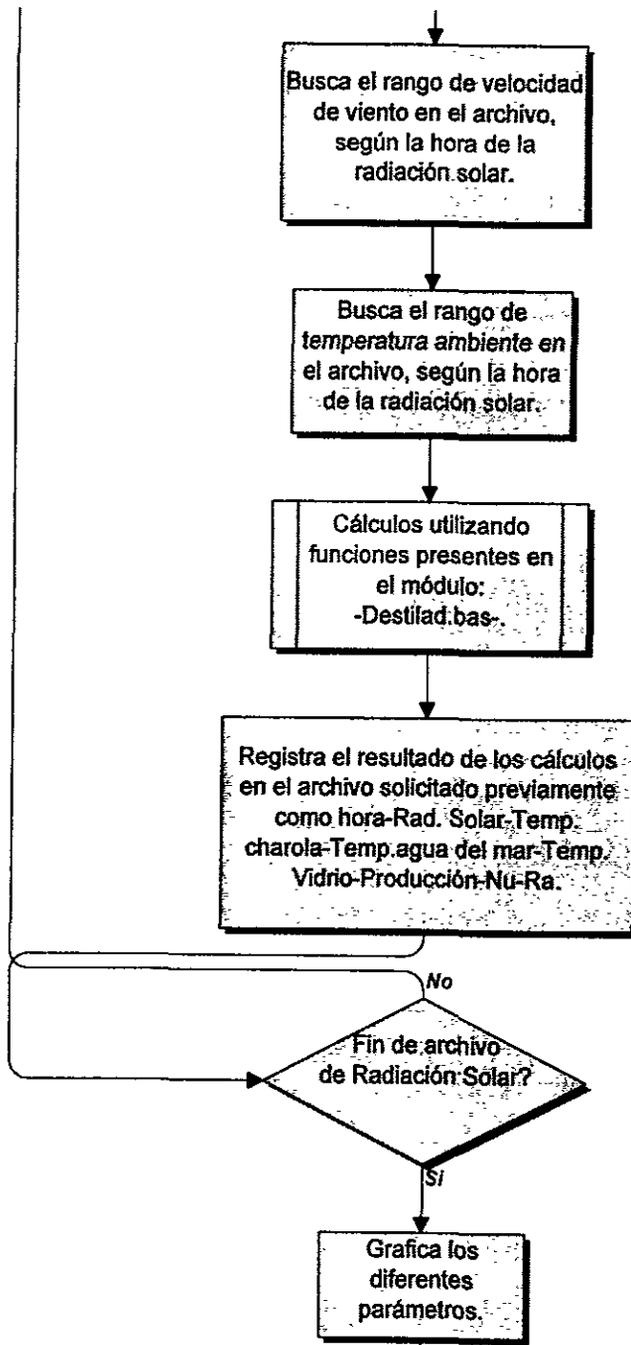
### ELEM\_TEM.FRM Datos para el cálculo de las temperaturas

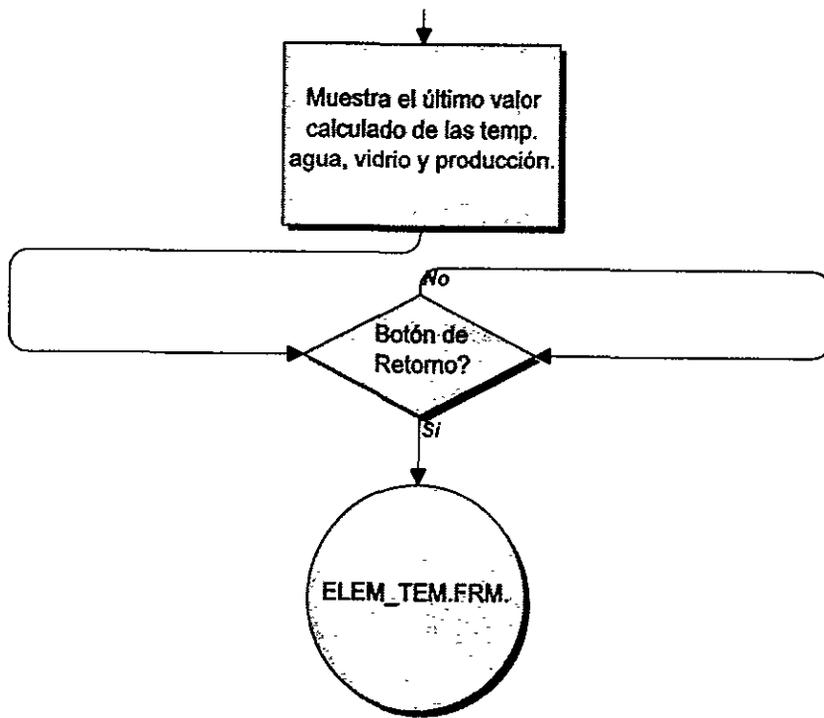


## GRAF\_TEM.FRM

### Cálculo y graficación de resultados







## A.2.2 Programa de Cómputo

### COND\_INI.FRM

Option Explicit

Sub Command3D1\_Click ()

On Error GoTo Error\_datos

If vg\_bt.Text = "" Or text1.Text = "" Or text2.Text = "" Or text3.Text = "" Or text4.Text = "" Or text5.Text = "" Or text6.Text = "" Or text7.Text = "" Or text9.Text = "" Then

Mensajes.Caption = "Warning! Incomplete Data"

Else

HR\_INI = "00:00"

nom\_arch1 = Trim(text2.Text) 'Rad. solar

nom\_arch2 = Trim(text3.Text) 'Vel. viento

nom\_arch3 = Trim(text1.Text) 'Temp. ambiente

On Error GoTo Error\_archivos

msg = "Error!!! I couldn't open SOLAR RADIATION file"

Open nom\_arch1 For Input As #1

msg = "Error!!! I couldn't open WIND SPEED file"

Open nom\_arch2 For Input As #2

msg = "Error!!! I couldn't open ENVIRONMENT TEMPERATURE file"

Open nom\_arch3 For Input As #3

Uba = text4.Text

Tb = text5.Text

Tw = text6.Text

Tg = text7.Text

Te\_ini = text8.Text

d = text9.Text

Mg = vg\_bt.Text

Mg = Mg \* 2700 / 2515 'm= densidad \* volúmen (original=2700)

Elem\_tem.Show

End If

Salir:

Exit Sub

Error\_archivos:

Close #1

Close #2

Close #3

MsgBox msg, 48, "Message"

Resume Salir

Error\_datos:

msg = "Error!!! Wrong Initial Data"

MsgBox msg, 48, "Message"

Resume Salir

End Sub

```
Sub Command3D2_Click ()
  cond_ini.Hide
End Sub
```

```
Sub Form_Load ()
  text1.Text = "07JUN.TAM"
  text2.Text = "07JUN.RSO"
  text3.Text = "07JUN.WSP"
  vg_bt.Text = .005
  text4.Text = 2 '1
  text5.Text = 23.2 '42.6 '45
  text6.Text = 23.2 '42 6
  text7.Text = 20.6 '33.5
  text8.Text = 20.8 '25
  text9.Text = .085
End Sub
```

```
Sub Text1_Change ()
  Mensajes.Caption = ""
End Sub
```

```
Sub Text1_Db1Click ()
  Mensajes.Caption = ""
  CMDialog1.FileName = ""
  CMDialog1.DialogTitle = "Environment Temperature Files"
  CMDialog1.Filter = "Env. Temp. Data (*.tam)*.tam"
  CMDialog1.Action = 1
  text1.Text = CMDialog1.FileName
End Sub
```

```
Sub Text2_Change ()
  Mensajes.Caption = ""
End Sub
```

```
Sub Text2_Db1Click ()
  Mensajes.Caption = ""
  CMDialog1.DialogTitle = "Solar Radiation Files"
  CMDialog1.Filter = "Solar Rad. (*.rso)*.rso"
  CMDialog1.Action = 1
  text2.Text = CMDialog1.FileName
End Sub
```

```
Sub Text3_Change ()
  Mensajes.Caption = ""
End Sub
```

```
Sub Text3_Db1Click ()
  Mensajes.Caption = ""
  CMDialog1.FileName = ""
  CMDialog1.DialogTitle = "Wind Speed Files"
  CMDialog1.Filter = "Wind Data (*.wsp)*.wsp"
  CMDialog1.Action = 1
  text3.Text = CMDialog1.FileName
End Sub
```

```
Sub Text4_Change ()
  Mensajes.Caption = ""
End Sub
```

```
Sub Text5_Change ()
  Mensajes.Caption = ""
End Sub
```

```
Sub Text6_Change ()  
  Mensajes.Caption = ""  
End Sub
```

```
Sub Text7_Change ()  
  Mensajes.Caption = ""  
End Sub
```

```
Sub Vg_txt_Change ()  
  Mensajes.Caption = ""  
End Sub
```

## DATOS.FRM

## Option Explicit

## Sub asigna\_valores ()

```

deltat_t.Text = Format$(deltat, "#,##0.00")
gamma_t.Text = Format$(gamma, "#,##0.00")
n1_t.Text = Format$(n1, "#,##0.00")
n2_t.Text = Format$(n2, "#,##0.00")
Nmin_t.Text = Format$(Nmin, "#,##0.00")

```

```

alfa_t.Text = Format$(alfa, "#,##0.00")
beta_t.Text = Format$(beta, "#,##0.00")
Gm_t.Text = Format$(Gm, "#,##0.00")
Gbm_t.Text = Format$(Gbm, "#,##0.00")

```

```

K_t.Text = Format$(K, "#,##0.00")
fi_t.Text = Format$(latitud, "#,##0.00")
d_t.Text = Format$(d, "#,##0.00")

```

```

nd_txt.Text = "07/11/" & Year(Now) - 1900
Call calc_fecha
lab_dias.Caption = Format$(lab_dias.Caption, "#,##0.00")
End Sub

```

*'Inicio de datos*

## Sub calc\_fecha ()

```

msg = Year(nd_txt) - 1900
msg = "01/01/" & msg
lab_dias.Caption = DateDiff("d", msg, nd_txt) + 1
End Sub

```

## Sub Calc\_Rad\_Click ()

```

deltat = Val(deltat_t.Text)
gamma = Val(gamma_t.Text)
n1 = Val(n1_t.Text)
n2 = Val(n2_t.Text)

```

```

Nmin = Val(Nmin_t.Text)
alfa = Val(alfa_t.Text)
beta = Val(beta_t.Text)
Gm = Val(Gm_t.Text)
Gbm = Val(Gbm_t.Text)
nd = Val(lab_dias.Caption)
K = Val(K_t.Text)

```

```

latitud = Val(fi_t.Text)
d = Val(d_t)

```

```

CMDialog1.DialogTitle = "Radiation Solar Save Data"
CMDialog1.Filter = "Solar Rad. (*.rso)|*.rso"
CMDialog1.Action = 1
nombre_archivo = CMDialog1.FileName

```

```

Call Calcula_RS
End Sub

```

```
' PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA RADIACION INCIDENTE INSTANTANEA
' Y DE LA TEMPERATURA DEL TANQUE EN DONDE SE ALMACENA EL AGUA DE
' SALIDA DEL CAPTADOR SOLAR
```

```
Sub Calcula_RS ()
```

```
Dim tiempo_solar As Double
Dim rad_tot_inst As Double
Dim declinacion As Double
Dim long_dia_solar As Double
Dim hr_ini As Double, hora As Double
Dim ang_horario As Double
Dim ang_dir_nor As Double
Dim ang_dir_ver As Double
Dim ang_ref As Double
Dim ang_ref_60 As Double
Dim reflectancia As Double
Dim reflectancia_difusa As Double
Dim transmit_a As Double
Dim transmit_r As Double
Dim transmitancia As Double
Dim absorcion As Double
Dim rad_total As Double
Dim rad_directa As Double
Dim rad_difusa As Double
Dim fact_proy As Double
Dim calor_util As Double
Dim int_hora As Integer
Dim fracc_hora As Double
```

```
On Error GoTo Error_archivo
Open nombre_archivo For Output As #1
```

```
proc_inf.Show
```

```
On Error GoTo Error_Grafica
```

```
graf_RS.Visible = False
```

```
graf_RS.DataReset = 9
graf_RS.GraphType = 6
```

```
graf_RS.NumSets = 1
graf_RS.ThisPoint = 1
graf_RS.NumPoints = 25
graf_RS.ColorData = 4
graf_RS.TickEvery = 4
graf_RS.LabelEvery = 4
graf_RS.Visible = True
```

```
paso = 1
Do Until paso > 25
  If graf_RS.ThisPoint < graf_RS.NumPoints Then
    graf_RS.ThisPoint = paso
    graf_RS.LabelText = paso - 1
  Else
    Exit Do
  End If
  paso = paso + 1
Loop
```

```
JOULS = 0
declinacion = delta(nd)
```

```

long_dia_solar = n(declinacion, latitud)
hr_ini = 12 - long_dia_solar / 2

hora = hr_ini
graf_RS ThisPoint = hr_ini
Do
  If hora >= (hr_ini + long_dia_solar) Then
    Exit Do
  Else
    tiempo_solar = t(hora)
    ang_horario = omega(tiempo_solar)
    ang_dir_nor = teta(declinacion, latitud, beta, gamma, ang_horario)

    ang_dir_ver = teta_zeta(latitud, declinacion, ang_horario)
    ang_ref = teta2(n1, n2, ang_dir_nor)
    ang_ref_60 = teta2(n1, n2, 60)
    reflectancia = ro(ang_dir_nor, ang_ref)
    reflectancia_difusa = ro(60, ang_ref_60)
    transmit_a = taua(ang_ref)
    transmit_r = taur(reflectancia)
    transmitancia = tau(transmit_a, transmit_r)
    If transmitancia < 0 Then
      transmitancia = 0
    End If

    absorcion = tau_alfa(transmitancia, alfa, reflectancia_difusa)
    rad_total = G(Gm, tiempo_solar, long_dia_solar)
    rad_directa = Gb(Gbm, tiempo_solar, long_dia_solar)
    rad_difusa = Gd(rad_total, rad_directa)

    fact_proy = Rb(ang_dir_nor, ang_dir_ver)
    If fact_proy < 0 Then
      fact_proy = 0
    End If

    rad_tot_inst = GT(rad_directa, rad_difusa, fact_proy)
    calor_util = rad_tot_inst * absorcion
    If calor_util < 0 Then
      calor_util = 0
    End If

    If rad_tot_inst < 0 Then
      rad_tot_inst = 0
    End If

    msg = Format$(hora, "00.00") + " " + Format$(rad_tot_inst, "##.##0.00")
    Print #1, msg "Watts"

    ' Grafica el dato

    graf_RS.ThisPoint = hora
    graf_RS.GraphData = rad_tot_inst / 1000
    JOULS = JOULS + rad_tot_inst
  End If
  hora = hora + (deltat / 3600)
Loop

JOULS = (JOULS * 900) / 1000000
msg = "MJ=" + Format$(JOULS, "##.##0.000") + Chr$(13)
Print #1, msg
Close #1

```

```
graf_RS.GraphType = 6
graf_RS.DrawMode = 2

msg = Format$(JOULS, "##.### ##0.00")
jouls_txt.Caption = msg + " MJouls"
```

Salir:

```
proc_inf.Hide
Unload proc_inf
Exit Sub
```

Error\_Grafica:

```
msg = "Error in Graphic"
Close #1
GoTo error_msg
```

Error\_archivo:

```
msg = "Error to open file"
```

error\_msg:

```
MsgBox msg, 48, "Message"
Resume Salir
End Sub
```

Sub Form\_Load ()

```
graf_RS.Visible = False
Call asigna_valores
End Sub
```

Sub Graf\_RS\_Click ()

```
graf_RS.GraphType = 6 tipo
graf_RS.DrawMode = 2
End Sub
```

Sub nd\_txt\_Change ()

```
On Error Resume Next
Call calc_fecha
End Sub
```

Sub salida\_Click ()

```
graf_RS.Visible = False
jouls_txt.Caption = " "
menu_ppal.Show
End Sub
```

**DESTILAD.FRM****Option Explicit****Sub b\_fin\_Click ()**End  
End Sub**Sub Comm\_Rad1\_Click ()***' Datos iniciales Ciudad de La Paz mes de Julio*latitud = 24.15  
delat = 900  
gamma = 0 ' Orientado al Sur  
n1 = 1  
n2 = 1.5  
d = .3  
Nmin = 1  
alfa = .93  
beta = 30  
Gm = 755  
Gbm = 546  
nd = 193 'Dias transcurridos en el a1o  
K = .32Elem\_Rad.Show  
End Sub**Sub Command3D1\_Click ()**cond\_ini.Show  
End Sub**Sub salida\_Click ()**End  
End Sub**Sub salir\_Click ()**End  
End Sub

**ELEM\_TEM.FRM**

Option Explicit

```
Sub Ag_txt_Change ()  
    On Error Resume Next  
End Sub
```

```
Sub Aw_txt_Change ()  
    On Error Resume Next  
End Sub
```

```
Sub CALC_TEMP_Click ()  
    On Error GoTo Salir  
    CMDialog1.CancelError = True  
    CMDialog1.DialogTitle = "Temperature Save Data"  
    CMDialog1.Filter = "Temperature (*.tmp)|*.tmp"  
    CMDialog1.Action = 1  
    nombre_archivo = CMDialog1.FileName
```

```
On Error GoTo Error_1
```

```
Ab = Ab_txt  
Aw = Aw_txt  
Ag = Ag_txt
```

```
Tb = Tb_txt  
Tw = Tw_txt  
Tg = Tg_txt
```

```
Mb = Mb_txt  
Mw = Mw_txt
```

```
Cb = Cb_txt  
Cw = Cw_txt  
Cg = Cg_txt
```

```
Uwb = Uwb_txt
```

```
On Error GoTo Salir
```

```
graf_temp.Left = 230  
graf_temp.Top = 1335
```

```
graf_temp.Show  
HR_INI_txt.Caption = HR_INI
```

Salir:

```
Exit Sub
```

Error\_1:

```
msg = "Error!!! Wrong in data"  
GoTo Error_msg
```

Error\_msg:

```
MsgBox msg, 48, "Message"  
Resume Salir  
End Sub
```

```
Sub Command3D1_Click ()
Close #1
Close #2
Close #3
Close #8

elem_tem.Hide
Unload elem_tem
End Sub

Sub Form_Load ()
Dim V As Double

Uwg = Calc_Uwg()

V = 1
Uga = (.174585 * V * V) + (2.20049 * V) + 6 29474

Uga_txt = Format$(Uga, "###0.0000")
Mg_txt.Caption = Format$(Mg, "###0.0000")

HR_INI_txt.Caption = HR_INI
Uba_txt = Format$(Uba, "###0.0000")
Uwg_txt = Format$(Uwg, "###0.0000")
Tb_txt.Caption = Format$(Tb, "###0.0000")
Tw_txt.Caption = Format$(Tw, "###0.0000")
Tg_txt.Caption = Format$(Tg, "###0.0000")
Te_txt.Caption = Format$(Te_ini, "###0.0000")

Ab_txt.Text = .48 ' .51 ' .58
Aw_txt.Text = .27
Ag_txt.Text = .05
Mb_txt.Text = 8.1 ' 21
Mw_txt.Text = 8
Cb_txt.Text = 820
Cw_txt.Text = 4190
Cg_txt.Text = 820
Uwb_txt.Text = 30 ' 10 - 5
End Sub
```

**GRAF\_TEM.FRM****Option Explicit****Sub Command3D1\_Click ()**

Close #1  
Close #2  
Close #3

Close #8  
Close #4  
Close #5  
Close #6  
Close #7

graf\_temp.Hide  
Unload graf\_temp  
End Sub

**Sub Form\_Load ()**

Dim Vv As Double, SW\_INI As Double  
Dim V1 As Double, H1 As Double, V2 As Double, H2 As Double  
Dim AUX As String  
Dim Hvel As Double  
Dim DH As Double, DV As Double, XXX As Double

Dim SW\_Ta As Double, Te As Double  
Dim T1 As Double, HT1 As Double, T2 As Double, HT2 As Double

Dim G As Double, Mw\_ini As Double  
Dim SW As Integer, i As Integer  
Dim paso As Integer

Dim WordLen As Double  
Dim HORA As String  
Dim busca, Pos1, Pos2  
Dim Pos2b As Integer, ITERAC As Integer  
Dim Char, Filename, TextData  
Dim valor As Double

Dim hfg As Double  
Dim Mcalc As Double  
Dim Uaux\_1 As Double  
Dim Yo As Double  
Dim m0 As Double, m1 As Double, m2 As Double, m3 As Double  
Dim fi As Double, MC As Double, T As Double

Dim Pw As Double, Pg As Double 'Presión  
Dim TwK As Double, TgK As Double, Too As Double 'Temp Kelvin  
Dim Nu As Double, Ra As Double, Pr As Double  
Dim DTesp As Double, Bprom As Double  
Dim Row As Double, Rog As Double, Ro\_oo As Double  
Dim Bw As Double, Bg As Double, U As Double, Gr As Double

Close #1  
Close #2  
Close #3

```

On Error GoTo Error_archivo
Open nom_arch1 For Input As #1
Open nom_arch2 For Input As #2
Open nom_arch3 For Input As #3
Open nombre_archivo For Output As #8

SW_GR1 = 0
SW_GRAL = 0
GoSub Inicia_Graficas
proc_inf.Show

Mw_ini = Mw
Vv = 1
SW = 3
SW_INI = 1
SW-Ta = 1

' PRIMER INTERVALO DE DATOS DE VEL. DE VIENTO
GoSub Lee_Vv
V1 = Vv
H1 = Hvel
GoSub Lee_Vv
V2 = Vv
H2 = Hvel

' PRIMER INTERVALO DE DATOS DE TEMPERATURA AMBIENTE
GoSub Lee_Tamb
T1 = Te
HT1 = Hvel
GoSub Lee_Tamb
T2 = Te
HT2 = Hvel

' *****
TextData = ""
Do While Not EOF(1)
  On Error GoTo Error_datos1
  Char = Input(1, #1)          ' Get one character.

  If Char <> Chr(10) Then      ' If not linefeed.
    TextData = TextData + Char
  Else                          ' If linefeed,
    TextData = TextData + Chr(13)
    Pos1 = InStr(1, TextData, " ") ' Find first space.
    Pos2b = Pos1 - 1
    WordLen = Pos1 - 1          ' Calculate 1st word length.
    HORA = Mid(TextData, 1, WordLen) ' Return 1st word.

    Pos2 = InStr(Pos1 + 1, TextData, Chr(13)) ' Find end of line.
    WordLen = (Pos2 - Pos1) - 1 ' Calculate 2nd word length.
    G = Mid(TextData, Pos1 + 1, WordLen) ' Return 2nd word. RADIATION

  If HORA = "MJ=" Then
    Exit Do
  End If

  valor = Val(HORA)

' Indica posición en la gráfica

graf_B.ThisSet = 1
graf_B.ThisPoint = valor

```

```

graf_B.ThisSet = 2
graf_B.ThisPoint = valor

graf_G.ThisPoint = valor
graf_M.ThisPoint = valor

If SW = 3 Then
  HR_INI = HORA

  msg = ""
  Mcalc = 0
  m0 = Val(HORA)
  msg = Format$(m0, "00.00") + " " + Format$(G, "###.00") + " " + Format$(Tb, "###.00") + " " +
    Format$(Tw, "###.00") + " " + Format$(Tg, "###.00") + " " + Format$(Mcalc, "###.0000")
  Print #8, msg

  SW = 0
End If

```

' DETERMINA EL VALOR DE \*VEL. DE VIENTO\* DENTRO DEL RANGO DE HORAS CORRESPONDIENTE

```

valor = Val(HORA)
If SW_INI = 1 Or SW_INI = 7 Then
  If SW_INI = 1 Then
    If valor >= H1 Then
      SW_INI = 0
      GoTo Intervalo
    End If
  End If
  Vv = 1
  GoTo Verifica_Te
End If

```

Intervalo:

```

valor = Val(HORA)
If SW_INI <> 7 Then ' No ha llegado al final del archivo de VV
  If H1 <= valor And valor <= H2 Then ' Dentro del rango
    Uaux_1 = valor - H1
    DH = H2 - H1
    DV = Abs(Abs(V2) - Abs(V1))

    Vv = (Uaux_1 * DV) / DH ' Aproximación real de la Vv con respecto al intervalo de tiempo

    If V2 < V1 Then
      Vv = V1 - Vv
    Else
      Vv = V1 + Vv
    End If
  Else
    H1 = H2
    V1 = V2
    GoSub Lee_Vv
    V2 = Vv
    H2 = Hvel
    If SW_INI = 7 Then ' Fin de archivo
      Vv = 1
    Else
      GoTo Intervalo ' Verifica que est  dentro del intervalo
    End If
  End If
End If

```

End If

' DETERMINA EL VALOR DE \*TEMP. AMB. (Te)\* DENTRO DEL RANGO DE HORAS CORRESPONDIENTE

Verifica\_Te:

```

valor = Val(HORA)
If SW_Ta = 1 Or SW_Ta = 7 Then
  If SW_Ta = 1 Then
    If valor >= HT1 Then
      GoTo Interv_Te
    End If
  Else
    Te = Te_ini
  End If
  GoTo Calc_G
End If

```

Interv\_Te:

```

valor = Val(HORA)
If SW_Ta <> 7 Then ' No ha llegado al final del archivo de VV
  If HT1 <= valor And valor <= HT2 Then ' Dentro del rango
    Uaux_1 = valor - HT1
    DH = HT2 - HT1
    DV = Abs(Abs(T2) - Abs(T1))

    Te = (Uaux_1 * DV) / DH ' Aproximación real de la Vv con respecto al intervalo de tiempo

    If T2 < T1 Then
      Te = T1 - Te
    Else
      Te = T1 + Te
    End If
  Else
    HT1 = HT2
    T1 = T2
    GoSub Lee_Tamb
    T2 = Te
    HT2 = Hvel
  If SW_Ta = 7 Then ' Fin de archivo
    If HT1 <= valor And valor <= HT2 Then ' Dentro del rango
      Uaux_1 = valor - HT1
      DH = HT2 - HT1
      DV = Abs(Abs(T2) - Abs(T1))

      Te = (Uaux_1 * DV) / DH ' Aproximación real de la Vv con respecto al intervalo de tiempo

      If T2 < T1 Then
        Te = T1 - Te
      Else
        Te = T1 + Te
      End If
    Else
      Te = Te_ini
    End If
  Else
    GoTo Interv_Te ' Verifica que esté dentro del intervalo
  End If
End If
End If

```

'REALIZA LOS CALCULOS

*Calc\_G:*

Uwg = Calc\_Uwg()

If SW\_GRAL = 1 Then

SW = 4

GoTo salir

End If

valor = Val(HORA)

Uga = (-.366476 \* Vv \* Vv) + (7.63549 \* Vv) + 1.66965

TwK = Tw + 273

TgK = Tg + 273

'CALCULO DE LA PRODUCCION DE LA SALMUERA

If Q <= 0 Then

Mcalc = 0

Else

XXX = (Tg + Tw) / 2

hfg = 2503 - (.00514 \* XXX \* XXX) - (2.1 \* XXX)

Mcalc = Q \* 900 / hfg 'En gr.

Mcalc = Mcalc / 1000 'Kg

Mw = Mw - Mcalc

End If

Mcalc = Mcalc \* 1000 'PRODUCCION EN ml

' CALCULO DE NUSSELT Y RAYLEIGH

K = .03003

On Error GoTo Error\_RaNu

Nu = Mcalc \* hfg

U = 900 \* (TwK - TgK)

Nu = (Nu / U) \* (d / K) 'Nusselt

Too = (TwK + TgK) / 2

Pw = 25.317 - (5144 / TwK)

Pw = Exp(Pw)

Pg = 25.317 - (5144 / TgK)

Pg = Exp(Pg)

Row = (.0000128 \* TwK \* TwK) - (.011908 \* TwK) + 3.5978

Rog = (.0000128 \* TgK \* TgK) - (.011908 \* TgK) + 3.5978

Ro\_oo = (.0000128 \* Too \* Too) - (.011908 \* Too) + 3.5978

Bw = (Row - Ro\_oo) / (Row \* (Too - TwK))

Bg = (Rog - Ro\_oo) / (Rog \* (Too - TgK))

Bprom = (Bw + Bg) / 2

Pr = (.0000006 \* Too \* Too) - (.00061 \* Too) + .837

DTesp = (Pw - Pg) \* TwK

DTesp = DTesp / (268900 - Pw)

DTesp = (TwK - TgK) + DTesp

U = (.000012 \* Too \* Too) + (.0938 \* Too) - 13.54

U = U / 1000000

```
Gr = 9.81 * d ^ 3 * DTesp * Bprom
Gr = Gr / (U * U)
```

```
Ra = Gr * Pr
```

```
*****
' CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LA CHAROLA
```

```
On Error GoTo Error_datos1
```

```
' METODO DE RUNGE-KUTTA
```

```
ITERAC = 10
```

```
i = 1
```

```
T = Tb
```

```
MC = Mb * Cb
```

```
Do Until i > ITERAC
```

```
  Yo = T
```

```
  m0 = (Ab * G) + (Uwb * (Tw - Yo)) - (Uba * (Yo - Te))
```

```
  m0 = m0 / MC
```

```
  Yo = T + (m0 * 90 / 2)
```

```
  m1 = (Ab * G) + (Uwb * (Tw - Yo)) - (Uba * (Yo - Te))
```

```
  m1 = m1 / MC
```

```
  Yo = T + (m1 * 90 / 2)
```

```
  m2 = (Ab * G) + (Uwb * (Tw - Yo)) - (Uba * (Yo - Te))
```

```
  m2 = m2 / MC
```

```
  Yo = T + (m2 * 90)
```

```
  m3 = (Ab * G) + (Uwb * (Tw - Yo)) - (Uba * (Yo - Te))
```

```
  m3 = m3 / MC
```

```
  fi = (m0 + (2 * m1) + (2 * m2) + m3) / 6
```

```
  T = T + (fi * 90)
```

```
  i = i + 1
```

```
Loop
```

```
Tb = T
```

```
' CALCULO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DEL MAR
```

```
On Error GoTo Error_datos2
```

```
i = 1
```

```
T = Tw
```

```
MC = Mw * Cw
```

```
Do Until i > ITERAC
```

```
  Yo = T
```

```
  m0 = (Aw * G) - (Uwg * (Yo - Tg)) - (Uwb * (Yo - Tb))
```

```
  m0 = m0 / MC
```

```
  Yo = T + (m0 * 90 / 2)
```

```
  m1 = (Aw * G) - (Uwg * (Yo - Tg)) - (Uwb * (Yo - Tb))
```

```
  m1 = m1 / MC
```

```
  Yo = T + (m1 * 90 / 2)
```

```
  m2 = (Aw * G) - (Uwg * (Yo - Tg)) - (Uwb * (Yo - Tb))
```

```
  m2 = m2 / MC
```

```
  Yo = T + (m2 * 90)
```

```
  m3 = (Aw * G) - (Uwg * (Yo - Tg)) - (Uwb * (Yo - Tb))
```

```
  m3 = m3 / MC
```

```

    fi = (m0 + (2 * m1) + (2 * m2) + m3) / 6
    T = T + (fi * 90)
    i = i + 1
Loop
Tw = T

graf_B.ThisSet = 1
graf_B.GraphData = Tw 'GRAFICA EL DATO

' CALCULO DE LA TEMPERATURA DEL VIDRIO

On Error GoTo Error_Datos3

i = 1
T = Tg
MC = Mg * Cg
Do Until i > ITERAC
    Yo = T
    m0 = (Ag * G) + (Uwg * (Tw - Yo)) - (Uga * (Yo - Te))
    m0 = m0 / MC

    Yo = T + (m0 * 90 / 2)
    m1 = (Ag * G) + (Uwg * (Tw - Yo)) - (Uga * (Yo - Te))
    m1 = m1 / MC

    Yo = T + (m1 * 90 / 2)
    m2 = (Ag * G) + (Uwg * (Tw - Yo)) - (Uga * (Yo - Te))
    m2 = m2 / MC

    Yo = T + (m2 * 90)
    m3 = (Ag * G) + (Uwg * (Tw - Yo)) - (Uga * (Yo - Te))
    m3 = m3 / MC

    fi = (m0 + (2 * m1) + (2 * m2) + m3) / 6
    T = T + (fi * 90)
    i = i + 1
Loop
Tg = T

graf_B.ThisSet = 2
graf_B.GraphData = Tg 'GRAFICA EL DATO

' *****

graf_G.GraphData = G
graf_M.GraphData = Mcalc

On Error GoTo Error_graba

msg = ""
m0 = Val(HORA)
msg = Format$(m0, "00.00") + " " + Format$(G, "#####.00") + " " + Format$(Tb, "#####.00") + " " +
    Format$(Tw, "#####.00") + " " + Format$(Tg, "#####.00") + " " + Format$(Mcalc, "#####.00") + " " +
    Format$(Nu, "#####.00") + " " + Format$(Ra, "#####.00")
Print #8, msg

TextData = "" ' Clear line.
End If
Loop ' Loop if not end of file.

```

salir:

```
If SW = 4 Then
  Close #1
  Close #2
  Close #3
  Close #8
  graf_temp.Hide
  Unload graf_temp
Else
  label6.Caption = Format$(Tw, "##,###.00")
  label7.Caption = Format$(Tg, "##,###.00")

  graf_G.GraphType = 6
  graf_G.DrawMode = 2

  graf_B.GraphType = 6
  graf_B.DrawMode = 2

  graf_M.GraphType = 6
  graf_M.DrawMode = 2

  graf_NuRa.GraphType = 6
  graf_NuRa.DrawMode = 2

  graf_mG.GraphType = 6
  graf_mG.DrawMode = 2

  graf_TIR.GraphType = 6
  graf_TIR.DrawMode = 2
End If
proc_inf.Hide
Unload proc_inf
Close #3
Close #8
Exit Sub
```

Error\_inicia:

```
msg = "Error in Graphics Initialization"
GoTo Error_msg
```

Error\_RaNu:

```
msg = "Error in Nusselt-Rayleigh Calculus"
GoTo Error_msg
```

Error\_archivo:

```
msg = "Error to open file"
GoTo Error_msg
```

Error\_graba:

```
msg = "Error!!! Saving Data"
GoTo Error_msg
```

Error\_datos1:

```
msg = "Error!!! I can't make *BOTTOM* Temperature calculus. Some Initial Data could be Wrong."
GoTo Error_msg
```

Error\_datos2:

```
msg = "Error!!! I can't make *BRINE* Temperature calculus. Some Initial Data could be Wrong."
GoTo Error_msg
```

Error\_Datos3:

```
msg = "Error!!! I can't make *GLASS* Temperature calculus. Some Initial Data could be Wrong."
GoTo Error_msg
```

Error\_Vv:

```
msg = "Error to read Wind Speed File"
GoTo Error_msg
```

Error\_Ta:

```
msg = "Error to read Environment Temperature File"
GoTo Error_msg
```

Error\_msg:

```
MsgBox msg, 48, "Message"
SW = 4
Resume salir
```

Lee\_Vv:

```
On Error GoTo Error_Vv
TextData = ""
Do While Not EOF(2)
  Char = Input(1, #2)          ' Get one character.

  If Char <> Chr(10) Then      ' If not linefeed.
    TextData = TextData + Char
  Else                        ' If linefeed,
    TextData = TextData + Chr(13)
    Pos1 = InStr(1, TextData, " ") ' Find first space.
    Pos2b = Pos1 - 1

    WordLen = Pos1 - 1          ' Calculate 1st word length.
    AUX = Mid(TextData, 1, WordLen) ' Return 1st word.

    Pos2 = InStr(Pos1 + 1, TextData, Chr(13)) ' Find end of line.
    WordLen = (Pos2 - Pos1) - 1 ' Calculate 2nd word length.
    Vv = Mid(TextData, Pos1 + 1, WordLen) ' Return 2nd word. VELOCIDAD DE VIENTO

    Hvel = Val(AUX) ' Para archivo con Hora decimal
    Return
  End If
Loop
SW_INI = 7
Return
```

Lee\_Tamb:

```
On Error GoTo Error_Ta
TextData = ""
Do While Not EOF(3)
  Char = Input(1, #3)          ' Get one character.
  If Char <> Chr(10) Then      ' If not linefeed.
    TextData = TextData + Char
  Else                        ' If linefeed,
    TextData = TextData + Chr(13)
    Pos1 = InStr(1, TextData, " ") ' Find first space.
    Pos2b = Pos1 - 1

    WordLen = Pos1 - 1          ' Calculate 1st word length.
    AUX = Mid(TextData, 1, WordLen) ' Return 1st word.
    Pos2 = InStr(Pos1 + 1, TextData, Chr(13)) ' Find end of line.
    WordLen = (Pos2 - Pos1) - 1 ' Calculate 2nd word length.
    Te = Mid(TextData, Pos1 + 1, WordLen) ' Return 2nd word. TEMPERATURA AMBIENTE

    Hvel = Val(AUX) ' Para archivo con Hora decimal
```

```
Return
End If
Loop
SW_Ta = 7
Return
```

Inicia\_Graficas:

```
On Error GoTo Error_Inicia
graf_G.DataReset = 9
graf_G.AutoInc = 0
graf_G.GraphType = 6
graf_G.NumSets = 1
graf_G.ThisPoint = 1
graf_G.NumPoints = 25
graf_G.TickEvery = 2
graf_G.LabelEvery = 2
graf_G.IndexStyle = 1
graf_G.ColorData = 14
graf_G.Visible = True

paso = 1
graf_G.ThisSet = 1
Do Until paso > 25
  If graf_G.ThisPoint < graf_G.NumPoints Then
    graf_G.ThisPoint = paso
    graf_G.LabelText = paso - 1
  Else
    Exit Do
  End If
  paso = paso + 1
Loop

graf_B.DataReset = 9
graf_B.AutoInc = 0
graf_B.GraphType = 6
graf_B.NumSets = 2
graf_B.ThisPoint = 1
graf_B.NumPoints = 25
graf_B.TickEvery = 2
graf_B.LabelEvery = 2
graf_B.IndexStyle = 1

graf_B.ThisSet = 1
graf_B.LegendText = "Brine Temperature"
graf_B.ThisSet = 2
graf_B.LegendText = "Glass Temperature"
graf_B.Visible = True
paso = 1
graf_B.ThisSet = 1
Do Until paso > 25
  If graf_B.ThisPoint < graf_B.NumPoints Then
    graf_B.ThisPoint = paso
    graf_B.LabelText = paso - 1
  Else
    Exit Do
  End If
  paso = paso + 1
Loop
graf_M.DataReset = 9
graf_M.AutoInc = 0
graf_M.GraphType = 6
graf_M.NumSets = 1
graf_M.ThisPoint = 1
```

```
graf_M.NumPoints = 25
graf_M.TickEvery = 2
graf_M.LabelEvery = 2
graf_M.IndexStyle = 1
graf_M.ColorData = 13
graf_M.Visible = True

paso = 1
graf_M.ThisSet = 1
Do Until paso > 25
  If graf_M.ThisPoint < graf_M.NumPoints Then
    graf_M.ThisPoint = paso
    graf_M.LabelText = paso - 1
  Else
    Exit Do
  End If
  paso = paso + 1
Loop

graf_mG.DataReset = 9
graf_mG.AutoInc = 0
graf_mG.GraphType = 6
graf_mG.NumSets = 1
graf_mG.ThisPoint = 1
graf_mG.NumPoints = 25
graf_mG.TickEvery = 2
graf_mG.LabelEvery = 2
graf_mG.IndexStyle = 1
graf_mG.ColorData = 12

paso = 1
graf_mG.ThisSet = 1
Do Until paso > 25
  If graf_mG.ThisPoint < graf_mG.NumPoints Then
    graf_mG.ThisPoint = paso
    graf_mG.LabelText = paso - 1
  Else
    Exit Do
  End If
  paso = paso + 1
Loop

graf_TIR.DataReset = 9
graf_TIR.AutoInc = 0
graf_TIR.GraphType = 6
graf_TIR.NumSets = 1
graf_TIR.ThisPoint = 1
graf_TIR.NumPoints = 25
graf_TIR.TickEvery = 2
graf_TIR.LabelEvery = 2
graf_TIR.IndexStyle = 1
graf_TIR.ColorData = 7

paso = 1
graf_TIR.ThisSet = 1
Do Until paso > 25
  If graf_TIR.ThisPoint < graf_TIR.NumPoints Then
    graf_TIR.ThisPoint = paso
    graf_TIR.LabelText = paso - 1
  Else
    Exit Do
  End If
  paso = paso + 1
```

```
Loop
Return
End Sub

Sub Graf_b_Click ()
If SW_GR1 = 0 Then
    graf_B.Width = 11415
    graf_B.Top = 0
    graf_B.Height = 6015
    graf_B.Left = 360

    graf_G.Visible = False
    graf_M.Visible = False
    graf_NuRa.Visible = False
    graf_mG.Visible = False
    graf_TIR.Visible = False

    SW_GR1 = 1
    mensaje.Caption = "Click in Graphic to decrease size"
Else
    graf_B.Width = 3615
    graf_B.Top = 0
    graf_B.Height = 3015
    graf_B.Left = 4200

    graf_G.Visible = True
    graf_M.Visible = True
    graf_NuRa.Visible = True
    graf_mG.Visible = True
    graf_TIR.Visible = True

    SW_GR1 = 0
    mensaje.Caption = "Click in Graphic that you want to increase its size"
End If
End Sub

Sub Graf_G_Click ()
If SW_GR1 = 0 Then
    graf_G.Width = 11415
    graf_G.Top = 0
    graf_G.Height = 6015
    graf_G.Left = 360

    graf_B.Visible = False
    graf_M.Visible = False
    graf_NuRa.Visible = False
    graf_mG.Visible = False
    graf_TIR.Visible = False

    SW_GR1 = 1
    mensaje.Caption = "Click in Graphic to decrease size"
Else
    graf_G.Width = 3615
    graf_G.Top = 0
    graf_G.Height = 3015
    graf_G.Left = 360

    graf_B.Visible = True
    graf_M.Visible = True
    graf_NuRa.Visible = True
    graf_mG.Visible = True
    graf_TIR.Visible = True
```

```
SW_GR1 = 0
mensaje.Caption = "Click in Graphic that you want to increase its size"
End If
End Sub
```

```
Sub Graf_M_Click ()
If SW_GR1 = 0 Then
graf_M.Width = 11415
graf_M.Top = 0
graf_M.Height = 6015
graf_M.Left = 360

graf_B.Visible = False
graf_G.Visible = False
graf_NuRa.Visible = False
graf_mG.Visible = False
graf_TIR.Visible = False

SW_GR1 = 1
mensaje.Caption = "Click in Graphic to decrease size"
Else
graf_M.Width = 3615
graf_M.Top = 0
graf_M.Height = 3015
graf_M.Left = 8040

graf_B.Visible = True
graf_G.Visible = True
graf_NuRa.Visible = True
graf_mG.Visible = True
graf_TIR.Visible = True

SW_GR1 = 0
mensaje.Caption = "Click in Graphic that you want to increase its size"
End If
End Sub
```

```
Sub Graf_mG_Click ()
If SW_GR1 = 0 Then
graf_mG.Width = 11415
graf_mG.Top = 0
graf_mG.Height = 6015
graf_mG.Left = 360

graf_B.Visible = False
graf_G.Visible = False
graf_M.Visible = False
graf_NuRa.Visible = False
graf_TIR.Visible = False

SW_GR1 = 1
mensaje.Caption = "Click in Graphic to decrease size"
Else
graf_mG.Width = 3615
graf_mG.Top = 3000
graf_mG.Height = 3015
graf_mG.Left = 4200

graf_B.Visible = True
graf_G.Visible = True
graf_M.Visible = True
graf_NuRa.Visible = True
```

```
graf_TIR.Visible = True

SW_GR1 = 0
mensaje.Caption = "Click in Graphic that you want to increase its size"
End If
End Sub

Sub Graf_NuRa_Click ()
If SW_GR1 = 0 Then
graf_NuRa.Width = 11415
graf_NuRa.Top = 0
graf_NuRa.Height = 6015
graf_NuRa.Left = 360

graf_B.Visible = False
graf_G.Visible = False
graf_M.Visible = False
graf_mG.Visible = False
graf_TIR.Visible = False

SW_GR1 = 1
mensaje.Caption = "Click in Graphic to decrease size"
Else
graf_NuRa.Width = 3615
graf_NuRa.Top = 3000
graf_NuRa.Height = 3015
graf_NuRa.Left = 360

graf_B.Visible = True
graf_G.Visible = True
graf_M.Visible = True
graf_mG.Visible = True
graf_TIR.Visible = True

SW_GR1 = 0
mensaje.Caption = "Click in Graphic that you want to increase its size"
End If

End Sub

Sub Graf_TIR_Click ()
If SW_GR1 = 0 Then
graf_TIR.Width = 11415
graf_TIR.Top = 0
graf_TIR.Height = 6015
graf_TIR.Left = 360

graf_B.Visible = False
graf_G.Visible = False
graf_M.Visible = False
graf_NuRa.Visible = False
graf_mG.Visible = False

SW_GR1 = 1
mensaje.Caption = "Click in Graphic to decrease size"
Else
graf_TIR.Width = 3615
graf_TIR.Top = 3000
graf_TIR.Height = 3015
graf_TIR.Left = 8040
graf_B.Visible = True
graf_G.Visible = True
graf_M.Visible = True
```

```
graf_NuRa.Visible = True
graf_mG.Visible = True
SW_GR1 = 0
mensaje.Caption = "Click in Graphic that you want to increase its size"
End If
End Sub
```

**DESTILAD.BAS****Option Explicit**

Global Const pi = 3.141592657

*' RADIACION SOLAR**' Datos iniciales Ciudad de La Paz mes de Julio*

Global msg As String  
Global latitud As Double  
Global defat As Double  
Global gamma As Double  
Global n1 As Double  
Global n2 As Double  
Global d As Double  
Global Nmin As Double  
Global alfa As Double  
Global beta As Double  
Global Gm As Double  
Global Gbm As Double  
Global nd As Integer  
Global K As Double  
Global nombre\_archivo As String  
Global paso As Double  
Global JOULS As Double  
Global SW\_GRAL As Integer

*' TEMPERATURAS*

Global Ab As Double  
Global Aw As Double  
Global Ag As Double  
Global Mb As Double  
Global Mw As Double  
Global Mg As Double

Global Cb As Double  
Global Cw As Double  
Global Cg As Double

Global Uba As Double  
Global Uwb As Double  
Global Uga As Double  
Global Uwg As Double  
Global Te\_ini As Double 'Environment temp.  
Global Tb As Double  
Global Tbs As Double  
Global Tbc As Double  
Global Tw As Double  
Global Tws As Double  
Global Twc As Double  
Global Tg As Double  
Global Tgs As Double  
Global Tgc As Double  
Global Q As Double 'Calor  
Global nom\_arch1 As String  
Global nom\_arch2 As String  
Global nom\_arch3 As String  
Global HR\_INI As String  
Global SW\_GR1 As Integer

'Arco Coseno a>0

**Function Acos (A As Double) As Double**

Dim aux As Double

aux = Atn(-A / Sqr(-A \* A + 1)) + 1.5708

Acos = (aux \* 180 / pi)

End Function

'Arco Sen a>0

**Function aSin (A As Double) As Double**

aSin = Atn(A / Sqr(1 - (A \* A))) \* 180 / pi

End Function

**Function Calc\_Uwg ()**

Dim TMP As Double

Dim DT As Double, DU As Double, DX As Double

Dim Uaux\_1 As Double, Uaux\_2 As Double

Dim T1 As Double, T2 As Double

On Error GoTo Error\_Uwg

' *CALCULO DE Uwg utilizando ecuaciones de CALOR vs DT.*

TMP = Tw

DT = Tw - Tg

If TMP < 25 Or (TMP = 25 And DT < 1) Then

Uwg = 0

Else

If TMP >= 25 And TMP <= 50 Then

Uaux\_1 = -5.24272 + 5.29481 \* DT '(25°C)

T1 = 25

Uaux\_2 = 17.0663 + 14.2622 \* DT '(50°C)

T2 = 50

Else

If TMP >= 50 And TMP <= 60 Then

Uaux\_1 = 17.0663 + 14.2622 \* DT '(50°C)

T1 = 50

Uaux\_2 = 24.9137 + 22.9621 \* DT '(60°C)

T2 = 60

Else

If TMP >= 60 And TMP <= 70 Then

Uaux\_1 = 24.9137 + 22.9621 \* DT '(60°C)

T1 = 60

Uaux\_2 = 42.2959 + 37.3881 \* DT '(70°C)

T2 = 70

Else

If TMP >= 70 And TMP <= 80 Then

Uaux\_1 = 42.2959 + 37.3881 \* DT '(70°C)

T1 = 70

Uaux\_2 = 94.123 + 55.1987 \* DT '(80°C)

T2 = 80

Else

Uaux\_1 = 94.123 + 55.1987 \* DT '(80°C)

Uaux\_2 = 94.123 + 55.1987 \* DT '(80°C)

T1 = 80

T2 = 80

End If

End If

End If

End If

DT = T2 - T1

DU = Uaux\_2 - Uaux\_1

```

DX = TMP - T1
Uwg = (DX * DU) / DT
Q = Uaux_1 + Uwg ' Calor
End If

```

```

If Q <= 0 Then
  Calc_Uwg = 0
  Q = 0
Else
  DT = Tw - Tg
  Calc_Uwg = Q / DT ' (Uwg = Calor/DT)
End If

```

Salir2:

```
Exit Function
```

Error\_Uwg:

```

msg = "Error in Uwg calculus"
SW_GRAL = 1
MsgBox msg, 48, "Message"
Resume Salir2

```

```
End Function
```

*'delta=declinación en función del día del año (nd=día del año)*

**Function delta (nd As Integer) As Double**

```

Dim aux As Double
aux = 360 * ((284 + nd) / 365) * (pi / 180)
delta = 23.45 * Sin(aux)
End Function

```

*'Radiación total*

*'Gm=Rad. total máxima, t=tiempo solar, N=día del año*

**Function G (Gm As Double, t As Double, n As Double) As Double**

```

Dim var_aux As Double
var_aux = Cos((180 * t / n) * (pi / 180))
If var_aux > 0 Then
  G = Gm * (var_aux ^ 1.2)
Else
  G = 0
End If
End Function

```

*'Radiación directa*

*'t=tiempo solar, N=día del año, GbM=Rad. sol. directa máxima*

**Function Gb (Gbm As Double, t As Double, n As Double) As Double**

```

Dim var_aux As Double
var_aux = Cos((180 * t / n) * (pi / 180))

If var_aux > 0 Then
  Gb = Gbm * (var_aux ^ 1.5)
Else
  Gb = 0
End If
End Function

```

```

'Radiación difusa
'G=Radiación total , Gb=Radiación directa
'
Function Gd (G As Double, Gb As Double) As Double
  Gd = G - Gb
End Function

'Radiación sobre un plano NO horizontal
'
Function GT (Gb As Double, Gd As Double, Rb As Double) As Double
  GT = Gb * Rb + Gd
End Function

'Longitud del día solar (delta=declinacion, fi=latitud)
'
Function n (delta As Double, fi As Double) As Double
  Dim aux_delta As Double
  Dim aux_fi As Double

  aux_delta = delta * (pi / 180)
  aux_fi = fi * (pi / 180)

  n = (2 / 15) * Acos(-Tan(aux_delta) * Tan(aux_fi))
End Function

'Angulo horario
't=tiempo solar
'
Function omega (t As Double) As Double
  omega = 15 * t
End Function

'Factor de proyección sobre plano NO horizontal
'
Function Rb (teta As Double, teta_zeta As Double) As Double
  Dim aux_teta As Double
  Dim aux_teta_zeta As Double

  aux_teta = teta * (pi / 180)
  aux_teta_zeta = teta_zeta * (pi / 180)
  Rb = Cos(aux_teta) / Cos(aux_teta_zeta)
End Function

'Reflectancia instantánea
'
Function ro (teta1 As Double, teta2 As Double) As Double
  Dim aux_teta1 As Double
  Dim aux_teta2 As Double

  aux_teta1 = teta1 * (pi / 180)
  aux_teta2 = teta2 * (pi / 180)
  ro = 1 / 2 * ((Sin(aux_teta2 - aux_teta1)) ^ 2 / (Sin(aux_teta2 + aux_teta1)) ^ 2) +
    ((Tan(aux_teta2 - aux_teta1)) ^ 2 / (Tan(aux_teta2 + aux_teta1)) ^ 2)
End Function

Sub salida_Click ()
  menu_ppal Show
End Sub

```

*'Tiempo solar (t) hora=hora del día (0 a 23.9)*

**Function t (hora As Double) As Double**

t = 12 - hora

End Function

*'Transmitancia total*

**Function tau (taua As Double, taur As Double)**

tau = taua \* taur

End Function

*'Energía absorbida*

**Function tau\_alfa (tau As Double, alfa As Double, rode As Double) As Double**

tau\_alfa = (tau \* alfa) / (1 - (1 - alfa) \* rode)

End Function

*'Transmitancia absorbida*

*'ro=Reflectancia, Nmin=No. de cubiertas*

*'K =Coef. de extinci n, d=Espesor del vidrio*

*'teta2=Angulo de refracci n*

**Function taua (teta2 As Double) As Double**

Dim aux\_teta2 As Double

aux\_teta2 = teta2 \* (pi / 180)

taua = Exp(-K \* d / Cos(aux\_teta2))

End Function

*'Transmitancia limitada por la reflexión*

*'Nmin=No. de cubiertas*

**Function taur (ref As Double) As Double**

taur = (1 - ref) / (1 + (2 \* Nmin - 1) \* ref)

End Function

*'teta=Angulo solar directo y la normal al plano*

**Function teta (delta As Double, fi As Double, beta As Double, gamma As Double, omega As Double) As Double**

Dim aux\_delta As Double

Dim aux\_fi As Double

Dim aux\_beta As Double

Dim aux\_gamma As Double

Dim aux\_omega As Double

aux\_delta = delta \* (pi / 180)

aux\_fi = fi \* (pi / 180)

aux\_beta = beta \* (pi / 180)

aux\_gamma = gamma \* (pi / 180)

aux\_omega = omega \* (pi / 180)

teta = Acos(Sin(aux\_delta) \* Sin(aux\_fi) \* Cos(aux\_beta) - Sin(aux\_delta) \* Cos(aux\_fi) \* Sin(aux\_beta) \*  
Cos(aux\_gamma) + Cos(aux\_delta) \* Cos(aux\_fi) \* Cos(aux\_beta) \* Cos(aux\_omega) + Cos(aux\_delta) \*  
Sin(aux\_fi) \* Sin(aux\_beta) \* Cos(aux\_gamma) \* Cos(aux\_omega) + Cos(aux\_delta) \* Sin(aux\_beta) \*  
Sin(aux\_gamma) \* Sin(aux\_omega))

End Function

*'Angulo entre la radiación directa y la vertical del lugar)*

**Function teta\_zeta (fi As Double, delta As Double, omega As Double) As Double**

Dim aux\_fi As Double

Dim aux\_delta As Double

Dim aux\_omega As Double

aux\_fi = fi \* (pi / 180)

aux\_delta = delta \* (pi / 180)

aux\_omega = omega \* (pi / 180)

teta\_zeta = Acos(Sin(aux\_fi) \* Sin(aux\_delta) + Cos(aux\_delta) \* Cos(aux\_fi) \* Cos(aux\_omega))

End Function

*'Angulo de refracción de un haz al paso por un vidrio*

**Function teta2 (n1 As Double, n2 As Double, teta1 As Double) As Double**

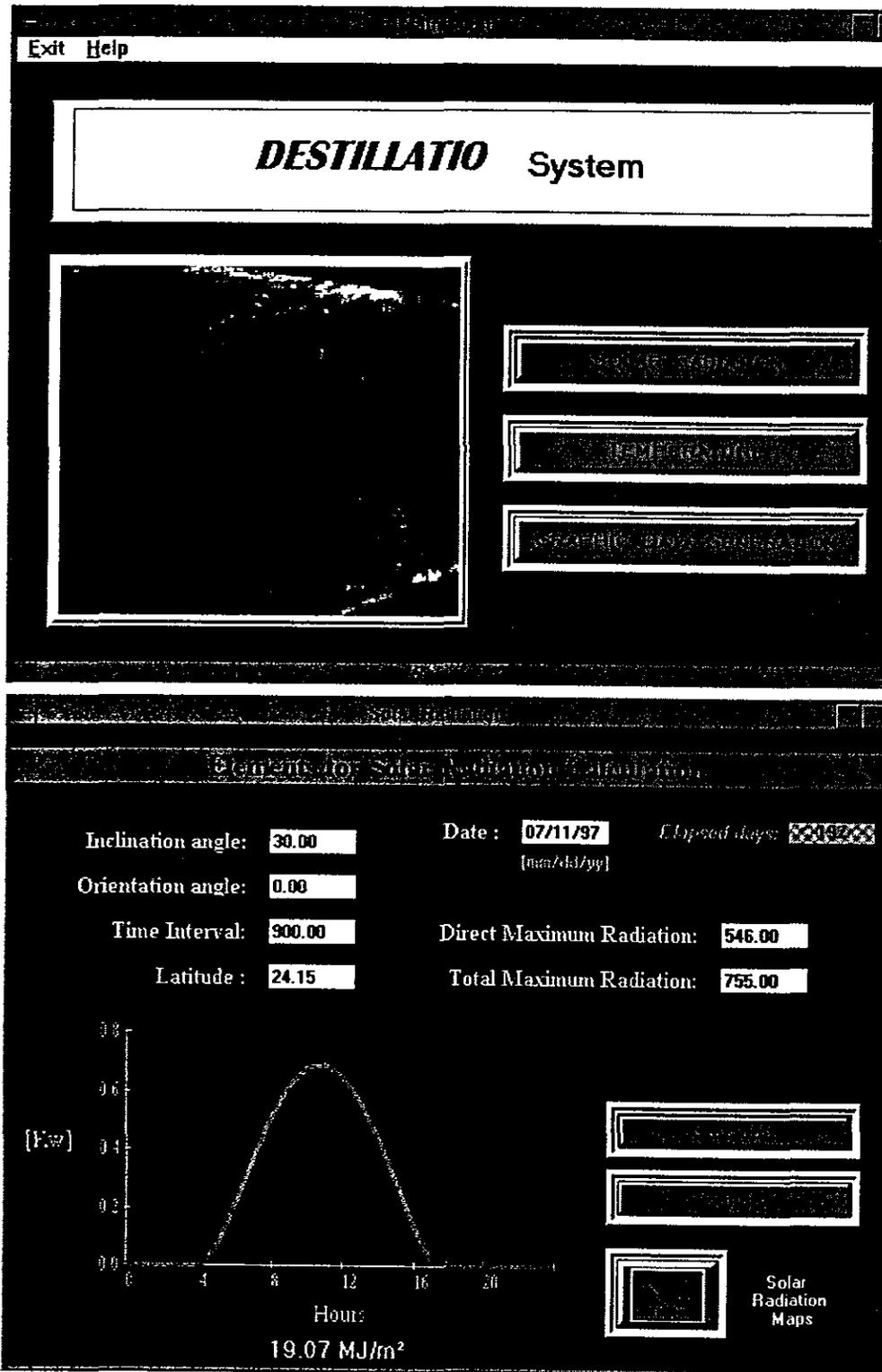
Dim aux\_teta1 As Double

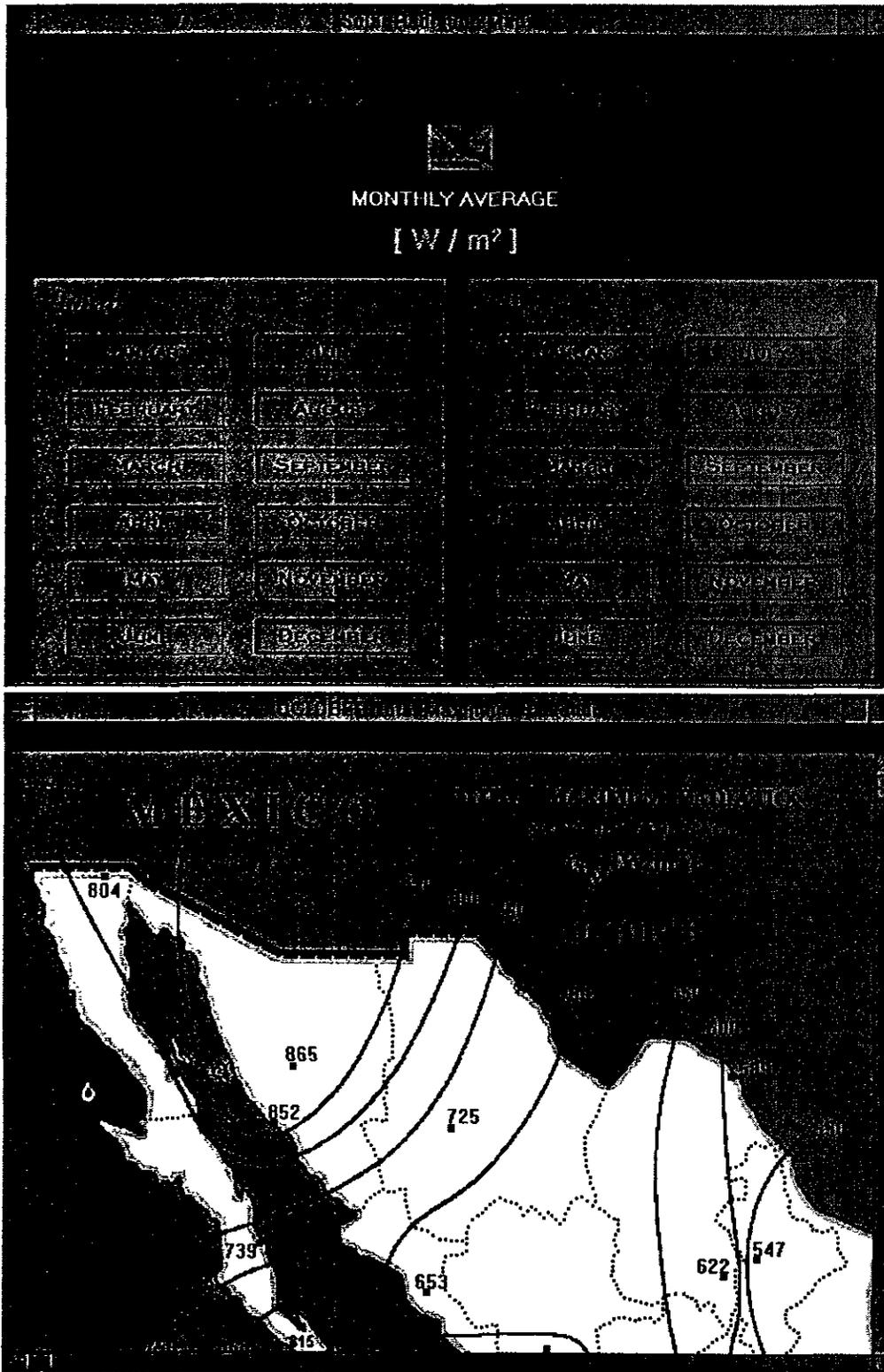
aux\_teta1 = teta1 \* (pi / 180)

teta2 = aSin(n1 / n2 \* Sin(aux\_teta1))

End Function

**A.2.3 Resultados**





★ Double Click in Cell - Show Files

### Temperature Initial Conditions:

Solar Radiation File (W/m<sup>2</sup>)..... ★ C:\VB\07JUN96S.RSO

Wind Speed File..... ★ C:\VB\07JUN96S.WSP

Environment Temperature File..... ★ C:\VB\07JUN96S.TAM

Heat Transfer Coefficient (Bottom-Environment)..... 2 W/m<sup>2</sup>K

Glass' Width..... .005 m

Bottom Temperature (°C)..... 23.2 °C

Brine Temperature (°C)..... 23.2 °C

Glass Temperature (°C)..... 20.6 °C

Environment Temperature (°C)..... 20.8 °C

Solar Still Height..... .085 m

### Elements for Simulation

*MASS PARAMETERS*

Bottom Absorptivity..... .48

Brine Absorptivity..... .27

Glass Absorptivity..... .05

Bottom Mass..... 8.1 kg

Brine Mass..... 8 kg

Glass Mass..... 13.5000 kg

Bottom Specific Heat..... 820 J/kg K

Brine Specific Heat..... 4190 J/kg K

Glass Specific Heat..... 820 J/kg K

*HEAT TRANSFER COEFFICIENT*

Bottom Temperature..... 23.2000 °C

Brine Temperature..... 23.2000 °C

Glass Temperature..... 20.6000 °C

Environment Temperature..... 20.8000 °C

Bottom-Environment... 2.0000 W/m<sup>2</sup>K

Brine-Glass... 0.0000 W/m<sup>2</sup>K

Glass-Environment... 0.0000 W/m<sup>2</sup>K

Brine-Bottom... 30 W/m<sup>2</sup>K

