



129
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

Facultad de Química

Modelación de Cuatro Dispositivos Solares

**(CALENTADOR DE AGUA,
CALENTADOR DE AIRE,
DESTILADOR Y ESTANQUE).**

**TESIS
QUE PARA OBTENER
EL TÍTULO DE
INGENIERO QUIMICO**

**PRESENTA
CYNTHIA H. ACEVEDO
FLORES**

1990.

FALTA DE INGEN



**EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA**





UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

Dedicatorias

Resumen -----	1
I Introducción -----	2
II Balance de Energia -----	12
2.1 Conducción -----	15
2.2 Convección -----	17
2.2.1 Convección Natural -----	19
2.2.2 Convección Forzada -----	21
2.3 Radiación -----	22
2.4 Generación -----	24
III Calentador de Agua -----	39
IV Calentador de Aire -----	68
V Destilador -----	90
VI Estanque -----	103
VII Conclusiones y Recomendaciones -----	129
7.1 Calentador de Agua -----	129
7.2 Calentador de Aire -----	132
7.3 Destilador -----	134
7.4 Estanque -----	136
Bibliografía -----	141

RESUMEN

En este trabajo se desarrollarán analíticamente las ecuaciones que describen el comportamiento de diferentes dispositivos cuya principal fuente de energía es la radiación solar. Los dispositivos que se van a analizar son: calentador de agua, calentador de aire, destilador y estanque.

El comportamiento de estos dispositivos se simula para distintos lugares de la República Mexicana y a lo largo de un año.

Para cada dispositivo se hace un balance de energía, incluyendo las ecuaciones analíticas de la radiación solar y de la temperatura ambiente.

Ya aplicado el balance se efectuarán los cálculos para obtener las gráficas que muestran el comportamiento térmico de los cuatro dispositivos solares.

Capítulo I

INTRODUCCION

Uno de los grandes problemas que enfrentamos en nuestros dias es la falta de energeticos, ya que nuestra principal fuente de energia, el petroleo, se agotará en solo algunos años. Existen datos que indican que las reservas probadas durarán hasta el año 2010, para enfrentar este problema se han estudiado e incluso explotado algunas otras fuentes de energia como son la nuclear y la solar, sin embargo, ésta última es la que ofrece ventajas tales como ser un recurso natural inagotable, de fácil captación casi en todo el mundo y no contaminante.

La energia solar puede ser utilizada de muchas maneras, como puede ser la conversión a trabajo mecánico, pero hay usos mucho más aplicables a nuestra vida diaria, como el calentamiento de agua para uso doméstico, el calentamiento de aire para calefacción o secado, la destilación de agua, etc. En general la explotación de la energia solar es en cierta medida fácil y de un costo relativo bajo.

El aprovechamiento de la energia solar data de

hace muchos años, pero hasta la década de los setentas es cuando se empezaron a hacer estudios e investigaciones más serias. En la actualidad algunos países de Europa y Norteamérica están ya muy adelantados en la investigación y explotación de la energía solar, sin embargo hay muchos otros países en donde es posible tener una mayor captación de energía solar.

La República Mexicana es, por su localización, una de las zonas en las que se puede hacer uso de la energía solar con muy buenos resultados por lo que es conveniente desarrollar una tecnología que nos ayude a aprovechar toda la que tenemos a nuestra disposición.

En ésta tesis se pretende simular el comportamiento de 4 diferentes dispositivos solares en 15 lugares de la República Mexicana. Los lugares fueron seleccionados por diferentes zonas de tal modo que si se desea colocar un dispositivo en algún lugar de la República, se pueda conocer en cierta forma cuál sería su comportamiento por medio de los resultados obtenidos en éste trabajo para la zona en

la que se quiere trabajar.

Para tal efecto se dividió la República Mexicana en 5 zonas que son:

Zona Norte I : Mexicali, Hermosillo y La Paz.

Zona Norte II : Saltillo, Chihuahua y Monterrey.

Zona Centro : León, San Luis Potosí, Distrito Federal y Guadalajara.

Zona Pacifico : Acapulco, Tuxtla Gutiérrez y Oaxaca.

Zona Golfo : Mérida y Veracruz.

Los 4 dispositivos solares que se simularán son: calentador de agua, calentador de aire, destilador y estanque.

En el capítulo II se hará un breve resumen de generalidades sobre la radiación solar y se presentará la ecuación general del balance de energía, haciendo también una explicación de lo que es cada término en el balance.

En el capítulo III se propondrá y resolverá la

ecuación del balance de energía, para conocer la ecuación analítica que nos permita estimar la temperatura de salida del agua en un calentador de agua a lo largo del año. A ésta ecuación se le aplicarán los datos de cada lugar seleccionado para llegar a obtener las gráficas que nos muestren el comportamiento del calentador en las diferentes zonas a lo largo del año.

El capítulo IV se refiere al calentador de aire. Al igual que en el capítulo III se va a obtener una ecuación con la que podamos conocer la temperatura de salida del aire en este caso. Se le dará el mismo tratamiento que a la del calentador de agua para obtener gráficas de temperatura de salida de aire contra el tiempo para una longitud de calentador fija y temperaturas de salida de aire contra longitud, tomando en éstas gráficas las temperaturas del día del año que presente las temperaturas medias.

En el capítulo V se simulará el destilador de agua. En éste caso como en los anteriores se obtendrá una ecuación que simule su comportamiento. Las gráficas que se van a obtener són de cantidad de

destilado contra tiempo.

Se trata el último dispositivo, que es el estanque solar, en el capítulo VI. También en éste capítulo se va a obtener la ecuación que describe el comportamiento del estanque y también se obtendrán las gráficas, en éste caso de temperatura en la parte inferior del estanque contra tiempo. Se indicarán además datos de extracción de energía del estanque para fines de aplicación.

En cada capítulo del III al VI se mostrarán los programas de computadora que se utilizarán para cada dispositivo.

En el capítulo VII se harán las recomendaciones para el uso de cada dispositivo según los resultados que se obtengan y se harán las conclusiones a las que se haya llegado se éste trabajo.

LISTA DE NOMENCLATURA

E	energía		
Q	calor		
W	trabajo		
g	generación		
m	masa		
g	constante gravitacional		
h	altura		
v	velocidad		
U	energía interna		
Cv	capacidad calorífica a volumen constante		
Cp	capacidad calorífica a presión constante		
T	temperatura		
V	volumen		
d	densidad		
A	área		
l	longitud		
K	conductividad térmica		
Kb	conductividad térmica de un material		

por unidad de espesor del mismo material

Nu número de Nusselt

Pr número de Prandtl

Re número de Reynolds

Gr número de Grashof

β_v coeficiente de expansión volumétrica

μ viscosidad dinámica

P presión

h_p altura entre placas

σ constante de Stefan-Boltzmann

ϵ emitancia

H radiación solar total

H_b radiación solar directa

H_d radiación solar difusa

H_o radiación solar extraterrestre

Isc constante solar

n número de día

θ latitud

d_i declinación

ω ángulo horario

β pendiente de una superficie sobre la

	tierra
Γ	ángulo acimut
θ_i	ángulo de incidencia
R_b	factor que corrige la radiación solar que incide sobre una superficie plana inclinada orientada hacia el sur
\bar{H}	radiación solar promedio que incide sobre una superficie en un intervalo de tiempo
H_c	radiación solar promedio que incide sobre una superficie en condiciones de cielo despejado en un intervalo de tiempo
n'	número de horas de asoleamiento promedio diario en un intervalo de tiempo
N'	máximo número de horas de asoleamiento promedio diario en un intervalo de tiempo
\bar{H}	radiación solar global diaria
\hat{H}	radiación solar global promedio diaria
r	frecuencia

θ wt
 t día analizado (de 1 a 365)
 w constante igual a 0.01721
 N número de observaciones
 ar y br constantes de la ecuación de la radiación (ec. 43 cap. II)
 H_x radiación solar global promedio mensual
 A_r amplitud
 $\bar{\theta}_r$ ángulo de fase
 T_a temperatura ambiente global diaria
 \bar{T}_a temperatura ambiente global promedio diaria
 art y brt constantes de la ecuación de la temperatura ambiente (ec. 44 cap. II)
 T_x temperatura ambiente global promedio mensual
 $\gamma(r \text{ ó } v)$ reflejancia
 $h(r, c \text{ ó } f)$ coeficiente de transferencia de calor por conducción, convección ó radiación
 y coordenada espacial

e espesor
de diámetro externo
di diámetro interno
ñ gasto másico
nt número de tubos
h(x) atenuación de la radiación en un
estanque
z profundidad
Sn reflejancia
e número de días, contando a partir del
21 de Junio, en que se expuso el
estanque por primera vez a la
radiación solar
y tiempo en días contando a partir del
21 de Junio.

Capítulo II

BALANCE DE ENERGIA

En este capítulo se va a describir como se transforma la energía solar en calor útil transportado por diferentes fluidos (agua, aire u otro).

Para poder conocer todos los elementos involucrados en la transformación de la energía solar antes se debe conocer que ocurre cuando cualquier tipo de energía se transforma, para esto se recurre a la 1ra. Ley de la Termodinámica que dice que la energía total de un sistema sometido a la acción de la gravedad, es igual al calor absorbido por el sistema de los alrededores menos el trabajo realizado por el sistema más una generación neta de energía, y se expresa así, (10):

$$dE = \delta Q - \delta W + \mathcal{E} \quad (1)$$

La energía total es igual a la energía interna (U) más la energía cinética ($mv^2/2$) más la energía potencial (mgh), por lo que:

$$dU + d(mgh) + d(mv^2/2) = \delta Q - \delta W + \mathcal{E} \quad (2)$$

En un sistema cerrado los cambios de energía

cinética y potencial son muy pequeños por lo que la ecuación anterior se reduce a:

$$dU = \delta Q - \delta W + \dot{e} \quad (3)$$

Tomando en cuenta que en ninguno de los 4 dispositivos que se van a simular existe un intercambio de trabajo, la ecuación 3 queda:

$$dU = \delta Q + \dot{e} \quad (4)$$

La energía interna está definida de la siguiente forma (10):

$$dU = mCv dT \quad (5)$$

donde m es la masa del material, Cv es la capacidad calorífica a volumen constante del material y dT es el cambio de temperatura.

Teniendo en cuenta que para sólidos y líquidos la capacidad calorífica a volumen constante es casi igual a la capacidad calorífica a presión constante (Cp), la ecuación 5 queda:

$$dU \approx mCp dT \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación 6 en la 4 y derivando respecto al tiempo tenemos que:

$$mCp \frac{dT}{dt} = \dot{Q} + \dot{e} \quad (7)$$

quedando definidos Q y \dot{E} por unidad de tiempo.

Para fines prácticos tenemos que:

$$m = dV \quad (8)$$

$$y \quad V = Al \quad (9)$$

donde: d es la densidad del material,

V es el volumen,

A es el área,

l es la longitud.

Sustituyendo 9 en 8 se obtiene:

$$m = dAl \quad (10)$$

sustituyendo la ecuación 10 en la 7 queda:

$$dCpAl \frac{dT}{dt} = Q + \dot{E} \quad (11)$$

de otra forma:

$$dCpl \frac{dT}{dt} = \frac{Q}{A} + \frac{\dot{E}}{A} = q + \dot{E}' \quad (12)$$

ésta ecuación será la que se use en el trabajo.

En la ecuación anterior el término del lado izquierdo representa el cambio de la energía interna del sistema debido a los cambios de los términos del lado derecho, que son: el calor intercambiado por las fronteras del sistema por unidad de tiempo y por

unidad de área, y la generación de energía como calor. En conjunto los términos anteriores representan un balance de energía del que se discutirán más ampliamente los términos de calor y generación.

El calor intercambiado entre el sistema y los alrededores puede ocurrir por cualquiera de los mecanismos usuales, que son: conducción, convección y radiación.

2.1 CONDUCCION

La transferencia de calor por conducción es un fenómeno en el que la energía se propaga en un medio sólido, líquido ó gaseoso, por el contacto directo entre cuerpos a distintas temperaturas.

Este fenómeno queda descrito por la Ley de Fourier que establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura (12).

$$q = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (13)$$

La expresión anterior es cierta en el caso de que la conducción de calor ocurra en una dimensión.

Si K es independiente de la temperatura y de la

coordenada espacial se tiene:

$$q = - \frac{K}{x_1 - x_2} (T_1 - T_2) \quad (14)$$

El signo negativo es necesario ya que se sabe por intuición (ó enterándose por la 2da. Ley de la Termodinámica) que el calor fluye de una temperatura mayor a una temperatura menor.

Se define:

$$K_b = \frac{K}{x_2 - x_1} \quad (15)$$

Sustituyendo 15 en 14 y ya que $T_1 < T_2$:

$$q = K_b (T_2 - T_1) \quad (16)$$

donde: q es el flujo de calor por unidad de área, en W/m^2 .

K_b es la conductividad térmica del material por unidad de espesor del mismo material, en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

T_1 es la temperatura menor, en $^\circ C$.

T_2 es la temperatura mayor, en $^\circ C$.

La ecuación 13 define a la conductividad térmica que se considera como la capacidad del material para conducir el calor, sus unidades son W/mK (Watt por

metro-kelvino). esta conductividad térmica varía con la temperatura, pero para fines prácticos se toma como constante. Al hablar de conductividad térmica se debe mencionar que cuando una sustancia ó material tiene una conductividad térmica alta se le llama conductor, y cuando tiene una conductividad térmica baja se le llama aislante.

Con lo anterior queda descrito el intercambio de calor del sistema con los alrededores por medio de la conducción, a continuación se hablará del intercambio de calor por convección.

2.2 CONVECCION

La transferencia de calor por convección es un proceso en el que el movimiento de un fluido (ya sea líquido ó gas) ocurre simultaneo a un transporte de energía (calor).

Para describir éste transporte de energía existe una ecuación llamada Ley de Newton de enfriamiento, la cual define al coeficiente de transferencia de calor por convección:

$$q_c = hc (T_2 - T_1) \quad (17)$$

donde: hc es el coeficiente de transferencia de calor

por convección, en W/m^2K ,

T_2-T_1 es la diferencia de temperaturas que existe entre el medio que está cediendo calor y el fluido en el que se está disipando el calor, en K.

La transferencia de calor por convección puede ser por convección forzada ó por convección natural. Cuando un fluido se mueve por medio de un agente externo e intercambia calor con el sistema, hay convección forzada, mientras que cuando la circulación del fluido ocurre por medio de gradientes de densidad del fluido, cuando está en contacto con las fronteras del sistema a una mayor temperatura y está expuesto a un campo gravitacional, hay convección natural.

El cálculo del coeficiente de calor por convección es muy complejo ya que depende de muchos factores, como son las propiedades físicas del fluido y la geometría del ducto. Para su cálculo existen diferentes relaciones empíricas, algunas de las cuales serán descritas a continuación, por ser de interés para este trabajo.

2.2.1 CONVECCION NATURAL

a) Placas planas paralelas inclinadas con respecto a la horizontal y con aire contenido entre ellas (6).

$$Nu = \frac{hL}{K} = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{GrPr \cos \alpha} \right]^* \left[1 - \frac{1708 \sin(1.8\alpha)}{GrPr \cos \alpha} \right]^{1.6} + \left[\frac{(GrPr \cos \alpha)}{5830} - 1 \right]^{1.3} \quad (18)$$

donde: Nu es el número de Nusselt,

L es la longitud que hay entre placas, en m,

K es la conductividad térmica del aire, en W/m°C,

Gr es el número de Grashof,

Pr es el número de Prandtl.

$$Gr = \frac{L^3 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (19)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad (20)$$

donde: g es la constante gravitacional, y es igual a 9.81 m/s²,

Bv es el coeficiente de expansión

β volumétrica, en K^{-1} .

μ es la viscosidad dinámica del aire, en kg/ms .

ΔT es la diferencia de temperaturas entre placas, en K .

C_p es la capacidad calorífica del aire, en $kJ/kg^\circ C$.

d es la densidad del aire, en kg/m^3 .

Los términos que están indicados con un asterisco (*) en la ecuación 18 tienen un valor de cero cuando su operación da valores negativos.

b) Placa plana expuesta al viento.

En este caso el coeficiente de transferencia de calor se calcula (9) como:

$$h_c = 2.3 + 3V_v \quad (21)$$

que va a estar dado en $W/m^2^\circ C$ con V_v que es la velocidad del viento, en m/s . Los datos de V_v se obtuvieron de (2).

c) Superficie de agua de poco espesor rodeada de aire y encerrada entre dos placas.

$$h_c = 0.884 \left[T_2 - T_1 + \frac{P_2 - P_1}{268.9E3 - P_2} (T_2 + 273) \right]^{1/3} \quad (22)$$

donde: T2 es la temperatura de la superficie de agua, en K,

T1 es la temperatura de la placa superior, en K,

P2 es la presión de vapor a la temperatura del agua, en Pa,

P1 es la presión parcial del vapor del agua en el aire a la temperatura T1, en Pa,

el coeficiente de transferencia de calor está dado en W/m²°C.

2.2.2 CONVECCION FORZADA

a) Placas planas paralelas con aire corriendo entre ellas.

El coeficiente de transferencia de calor según (7) es:

$$h_c = Nu \frac{K}{2hp} \quad (23)$$

donde: $Nu = 0.0026Re$ (24)

Re es el número de Reynolds

$$Re = \frac{2h\rho dV}{\mu} \quad (25)$$

donde: h es la altura entre placas, en m.

ρ es la densidad del aire, en kg/m^3 ,

V es la velocidad del aire, en m/s.

A continuación se discutirá el 3er. mecanismo por el que intercambia calor el sistema con los alrededores.

2.3 RADIACION

En general la transferencia de calor por radiación puede describirse de la siguiente forma:

$$q_r = h_r(T_2 - T_1) \quad (26)$$

donde h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación. Este coeficiente depende de las características físicas del ducto y de las propiedades emisivas de los participantes. Para su cálculo se describirán a continuación dos casos que son de interés para éste trabajo.

a) Placas planas paralelas con aire contenido entre ellas, (5):

$$h_r = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1}{\epsilon_1} - 1} (T_2^3 + T_2 T_1 + T_2 T_1^2 + T_1^3) \quad (27)$$

donde: σ es la constante de Stefan-Boltzmann, en W/m^2K , y es igual a $5.6E-8$,

ϵ_1 y ϵ_2 son las emitancias de las placas,

T_2 es la temperatura mayor, en K,

T_1 es la temperatura menor, en K.

b) Placa plana rodeada de aire, (5):

$$h_r = \epsilon_2 \sigma (T_2^3 + T_2 T_1 + T_2 T_1^2 + T_1^3) \quad (28)$$

donde: ϵ_2 es la emitancia de la placa,

T_2 es la temperatura de la placa, en K,

T_1 es la temperatura del cielo, y está dada

(15) por:

$$T_1 = T_a - 12, \text{ en } ^\circ C \quad (29)$$

T_a es la temperatura del aire, en $^\circ C$.

Con lo anterior se termina de discutir lo referente a intercambio de calor, lo siguiente será hablar del término de generación de calor en el balance de energía.

2.4 GENERACION

En el caso de los dispositivos solares, la generación involucra a la radiación solar y algunas de las propiedades del material que se esté exponiendo a la radiación solar. Para hablar de como aprovechar la energía solar, antes tenemos que hablar de la naturaleza de esta, y de sus características cuando incide sobre la superficie de la tierra.

El sol es una estrella con una masa que es aproximadamente 334000 veces mayor que la tierra, tiene un diámetro de 1.39 millones de kilómetros y se encuentra a una distancia media de 150 millones de kilómetros de la tierra.

La estructura del sol es muy compleja, así se estima que en la región central (núcleo), su temperatura varía de 8 a 40 millones de grados Kelvin. Esta región está comprendida entre 0 y 0.23 R (R = radio solar), tiene una densidad entre 80 y 100 veces la del agua y es ahí donde se genera el 90% de la energía total. Después sigue una zona que tiene una densidad radial de 0.7 R, allí la temperatura

sufre una disminucion de hasta 130000 K y su densidad es aproximadamente de 0.07 kg/m^3 . La siguiente zona es llamada zona convectiva y está a una distancia radial de $0.7 R$ a $1.0 R$, a la siguiente zona se le conoce como fotosfera, ésta envuelve a la zona convectiva y tiene aproximadamente 300 km de espesor, aquí la temperatura y la densidad disminuyen aproximadamente hasta 5000 K y $1E-8 \text{ kg/m}^3$ respectivamente. En ésta capa es donde se origina casi toda la radiación solar que recibimos en la tierra. Después de la fotosfera está una atmósfera solar, a la que también se le llama capa de inversión que está constituida por gases más frios. A la siguiente capa se le llama cromósfera y aquí los gases están a una densidad menor que en la fotosfera y a una mayor temperatura, el espesor de ésta capa es de aproximadamente 10000 km. Después sigue la última capa que es de aproximadamente un millón de kilómetros de espesor, aquí los gases están a una densidad bajísima y a una mayor temperatura. A ésta última capa se le conoce como corona.

Para fines prácticos se puede considerar que el sol se comporta como un cuerpo negro, y está a una temperatura efectiva de 5762 K (12).

A la cantidad de energía por unidad de tiempo que recibe del sol una superficie de área unitaria perpendicular a la radiación en el espacio y a la distancia media del sol a la tierra se le conoce como constante solar. Ics, su valor estandar es de 1353 W/m².

La radiación solar que llega a la tierra sufre distintos cambios al pasar por la atmósfera, éstos cambios son de reflexión, de refracción y de dispersión, por lo que la radiación que llega a la superficie de la tierra debe dividirse en dos tipos, radiación directa y radiación difusa. La primera es la radiación que no sufre cambios y la segunda es la que si ha sufrido cambios de dirección a su paso por la atmósfera. La radiación total puede expresarse según (12) como:

$$H = H_b + H_d \quad (30)$$

donde H es la radiación total, H_b es la radiación directa y H_d es la difusa. Estos dos términos

anteriores son medidos por diversos aparatos, y así se calcula la radiación total.

La radiación difusa se calcula como (4):

$$H_d = H(1.00 - 1.13) \frac{H}{H_0} \quad (31)$$

donde H_0 es la radiación que recibe una superficie horizontal fuera de la atmósfera, y se le conoce como radiación extraterrestre (4) se calcula:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left(1 + 0.33 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \left[\cos \theta \cos \delta \sin^2 \omega + \frac{2\pi \omega}{360} \sin \theta \sin \delta \right] \quad (32)$$

donde: n es el número de día (1 es el 1ro. de Enero y 365 es el 31 de Diciembre),

θ es la latitud de lugar,

I_{sc} es la constante solar,

δ es la declinación (es el momento en que el sol está más alto en el firmamento con respecto al ecuador).

ω es el ángulo horario, tiene valores de 0 al medio día, después del medio día se suman 15° para cada hora, y se restan 15° por cada

hora antes del medio día. Este ángulo está formado por la línea que une al lugar de interés sobre la tierra y el sol al amanecer con el plano perpendicular al ecuador.

El cálculo de la declinación está dado por (12):

$$d_i = 23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (33)$$

Con esto a radiación directa se calcula:

$$H_b = H - H_d \quad (34)$$

Para conocer la dirección con que llega la radiación directa es necesario conocer el ángulo que forman la dirección de la radiación y la normal al plano. A este ángulo se le llama ángulo de incidencia, θ_i , y se calcula:

$$\begin{aligned} \cos\theta_i &= \operatorname{sen}\delta \operatorname{sen}\theta \cos\Gamma + \operatorname{cos}\delta \operatorname{cos}\theta \operatorname{cos}\beta \operatorname{cos}\Gamma \\ &+ \operatorname{cos}\delta \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen}\beta \operatorname{cos}\Gamma \operatorname{cos}\theta \operatorname{cos}\delta \operatorname{sen}\beta \operatorname{sen}\Gamma \operatorname{sen}\theta \end{aligned} \quad (35)$$

donde: β es la pendiente de la superficie sobre la tierra,

Γ es el ángulo acimut (desviación de la normal hacia la superficie en el meridiano local).

La pendiente β se calcula (5):

$$\beta = \frac{360(n-81)}{364} \quad (36)$$

Cuando se trabaja en un plano horizontal $\beta = 0$ y $\theta_i = \theta_z$, la ecuación 35 queda:

$$\cos\theta_z = \text{sen}\delta \text{sen}\theta + \text{cos}\delta \text{cos}\theta \text{cos}\omega \quad (37)$$

Para una superficie inclinada hacia el sur, se observa que el ángulo de incidencia es igual al ángulo acimut para una superficie horizontal que se encuentra en algún lugar en donde la latitud sea $(\theta - \beta)$.

$$\cos\theta_i = \text{sen}\delta \text{sen}(\theta - \beta) + \text{cos}\delta \text{cos}(\theta - \beta) \text{cos}\omega \quad (38)$$

Para conocer la radiación directa sobre una superficie inclinada cuando solamente se conoce la componente en el plano horizontal, se puede definir el cociente de la radiación directa sobre un plano inclinado, a la radiación directa sobre un plano horizontal.

$$R_b = \frac{I_{bc}}{I_{bn}} = \frac{I_{bc} \cos\theta_i}{I_{bc} \cos\theta_z} = \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_z} \quad (39)$$

Para una superficie inclinada hacia el sur (12):

$$R_b = \frac{\text{sendisen}(\theta - \beta) + \text{cosdicos}(\theta - \beta)\text{cos}W}{\text{sendisen}\theta + \text{cosdicos}\theta\text{cos}W} \quad (40)$$

Este factor corrige la radiación solar que incide sobre una superficie plana inclinada orientada hacia el sur, ya que todos los datos de radiación solar se obtienen solo para superficies planas horizontales. Los valores promedio anuales de éste factor para cada lugar de interés para éste trabajo vienen enlistados en la tabla 1.

Los ángulos d_1 , β , W y θ fueron considerados como sigue:

d_1 que es la declinación, se calculó de la ecuación 33 tomando n como el día promedio mensual (12), durante todo el año,

β se tomó igual a la latitud θ de cada lugar,

W ó ángulo horario tiene valor de +30 por haberse tomado como referencia las 2 de la tarde,

θ es la latitud y para el cálculo se tomó la de cada ciudad analizada.

Tabla 1.- Valores de Rb promedio anual para cada lugar analizado.

Lugar	Rb
Mexicali	1.2491
La Paz	1.1268
Hermosillo	1.1878
Chihuahua	1.1806
León	1.0907
San Luis Potosí	1.1008
Distrito Federal	1.0763
Tuxtla Gutiérrez	1.0506
Oaxaca	1.0278
Acapulco	1.0558
Veracruz	1.0738
Mérida	1.0864

Para medir la radiación existen diversos aparatos que convierten la radiación en alguna otra forma de energía, y dan como resultado una lectura proporcional a la intensidad de la radiación solar. El instrumento más utilizado es el piranómetro, que registra la radiación solar total dentro de su campo hemisférico. También existen otros instrumentos, como son los piranógrafos mecánicos, que se basan en la dilatación diferencial de elementos bimetalicos expuestos a la radiación solar. El pirheliómetro sirve para medir la radiación directa normal que proviene del sol.

Para estimar la radiación mensual en un lugar existen diversas correlaciones que hacen uso de los datos que se tienen a la mano. La expresión de Angstrom (12) es una de las más sencillas:

$$\bar{H} = H_c \left(a + b \frac{n'}{N'} \right) \quad (41)$$

donde: \bar{H} es la radiación promedio sobre una superficie horizontal en un intervalo de tiempo.

H_c es la radiación promedio sobre una

superficie horizontal en condiciones de cielo despejado en el mismo intervalo de tiempo,

n' es el número de horas de asoleamiento diario promedio en el mismo intervalo de tiempo,

N' es el máximo número de horas de asoleamiento diario promedio en el mismo intervalo de tiempo,

a es igual a 0.35,

b es igual a 0.61.

Hay otra ecuación que calcula la radiación promedio diaria, y está dada (3) así:

$$\bar{H} = \hat{H} + \sum_{r=1}^{N/2} A_r \cos(r\theta - \phi_r) \quad (42)$$

La ecuación anterior nos da la radiación solar global diaria y está basada en los datos existentes de radiación solar mensual. En éste trabajo se va a usar ésta ecuación en su forma expandida, que es:

$$\bar{H} = \hat{H} + [a r \sin\theta + b r \cos\theta] \quad (43)$$

donde: \bar{H} es la radiación solar global diaria, en J/m^2 día,

\hat{H} es la radiación solar promedio diaria, en J/m^2 día, (esta radiación se obtuvo por medio de datos de radiación mensuales (1) durante un año y haciendo un promedio de éstos para cada ciudad),

r es la frecuencia ó número de veces que se repite la curva en el intervalo, que es de 365 días,

θ es igual a wt ; donde $w = 2\pi/365$, y t es el día analizado, (de 1 a 365),

N es el número de observaciones,

A_r es la amplitud, y es igual a $(a_r^2 + b_r^2)^{1/2}$,

$\hat{\alpha}_r$ es el ángulo de fase, y es igual a

$$\tan^{-1} (a_r/b_r),$$

$$a_r \text{ es } - \frac{2}{N} \sum_{x=1}^N H_x \sin(r\theta)$$

$$b_r \text{ es } - \frac{2}{N} \sum_{x=1}^N H_x \cos(r\theta)$$

H_x es la radiación solar global promedio mensual, en J/m^2 día.

Con los datos de radiación global promedio

mensual (1), se calculan las constantes \hat{H} , a_r y b_r de la ecuación 43 para cada lugar en el que se va a trabajar. en la tabla 2 se presentan los valores obtenidos para estas constantes en cada lugar de interés.

Se ha estimado que la temperatura ambiente tiene un comportamiento similar al de la radiación solar, por lo que la ecuación que representa este comportamiento también es similar, y es:

$$T_a = \bar{T}_a + [a_r t \text{ sen}\theta + b_r t \text{ cos}\theta] \quad (44)$$

donde: T_a es la temperatura ambiente global diaria, en °C,

\bar{T}_a es la temperatura ambiente global promedio diaria, en °C. (esta temperatura se obtuvo por medio de datos de temperatura mensuales (12 y 13) durante un año y haciendo un promedio de éstos para cada ciudad).

$$a_r \text{ es igual a } \frac{2}{N} \sum_{x=1}^N T_x \text{ sen}(r\theta)$$

$$b_r \text{ es igual a } \frac{2}{N} \sum_{x=1}^N T_x \text{ cos}(r\theta)$$

T_x es la temperatura ambiente global promedio mensual, en °C.

En la tabla 3 se encuentran los valores constantes de la ecuación 44 para los lugares de interés.

Tabla 2.- Valores de las constantes \hat{H} , a y b de la ecuación 43 para cada ciudad analizada.

Lugar	$\hat{H}(E-7)$	$a(E-7)$	$b(E-7)$
Mexicali	1.9700	0.0409	-0.5184
La Paz	2.0051	0.1057	-0.2980
Hermosillo	2.1120	0.1117	-0.6851
Chihuahua	2.0165	0.3158	-0.6378
Saltillo	1.6290	0.0584	-0.4369
Monterrey	1.3950	-0.0323	-0.4970
Guadalajara	1.9800	0.3937	-0.2719
León	1.9800	0.1600	-0.3346
San Luis Potosí	1.6300	0.0433	-0.4081
Distrito Federal	1.7280	0.2415	-0.1621
Tuxtla Gutiérrez	1.6790	0.0097	-0.2212
Oaxaca	1.8930	0.1290	-0.1475
Acapulco	1.8500	0.1397	-0.0621
Veracruz	1.6143	0.0616	-0.1958
Mérida	1.7030	0.1214	-0.2662

Tabla 3.- Valores de \bar{T}_a , art y brt de la ecuación 44 (3).

Lugar	\bar{T}_a	art	brt
Mexicali	23.00	-3.19	-8.76
La Paz	24.13	-2.88	-4.05
Hermosillo	25.02	-2.12	-7.52
Chihuahua	19.33	-1.01	-7.61
Saltillo	17.73	-0.54	-5.19
Monterrey	22.07	-1.36	-6.82
Guadalajara	18.93	0.55	-3.27
León	19.45	0.55	-2.57
San Luis Potosí	18.28	0.72	-3.61
Distrito Federal	16.29	0.78	-2.07
Tuxtla Gutiérrez	24.08	0.98	-2.21
Oaxaca	20.80	0.42	-1.73
Acapulco	27.83	-0.42	-1.23
Veracruz	25.36	-0.09	-2.97
Mérida	25.85	0.12	-2.38

Capítulo III

CALENTADOR DE AGUA

Los dispositivos solares más comunes son los calentadores de agua, que son colectores planos que captan la radiación solar, son de fácil instalación, ya que no utilizan ningún mecanismo para seguir el movimiento del sol y son generalmente de uso doméstico, además de ser una alternativa viable para el ahorro de energéticos.

Un calentador de agua está constituido por una caja metálica que contiene algún material aislante. Sobre este material hay una placa troquelada, generalmente de cobre; sobre el troquel de la placa se encuentran los tubos por donde circula el agua. Para terminar, a unos cuantos centímetros sobre los tubos hay una placa de vidrio (cubierta transparente). En la figura 1 se muestra un corte transversal de un calentador de agua.

En la figura 2 se muestra una vista frontal de un calentador de agua.

Para conocer el comportamiento térmico de un calentador de agua se necesitan conocer las

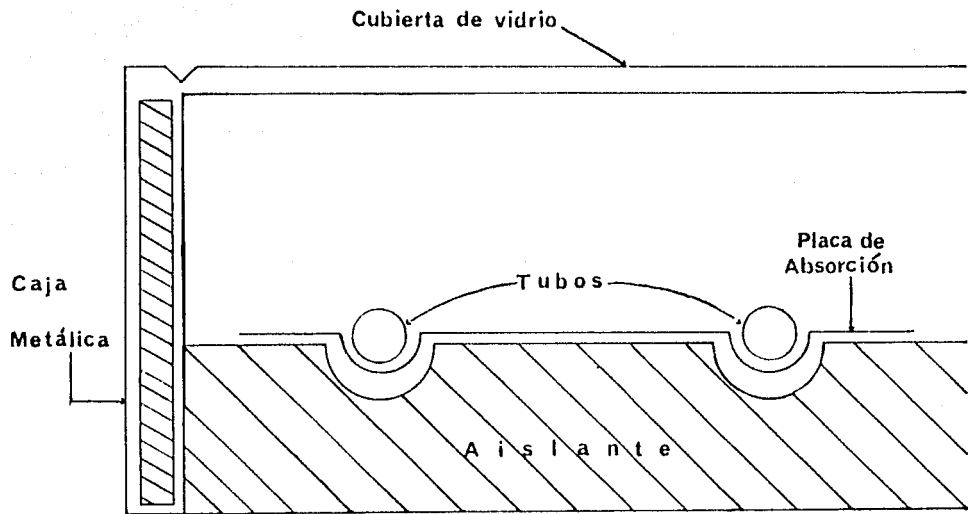


Fig.1 Corte transversal de un Calentador de Agua

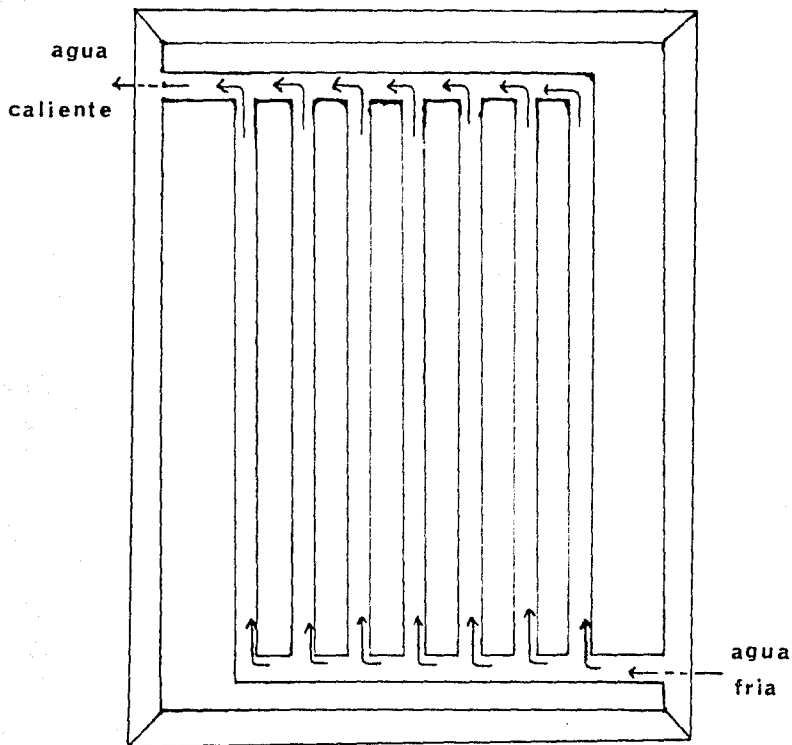


Fig. 2 Vista frontal de un Calentador
de Agua

diferentes formas en que intercambia calor con el medio ambiente, así como la cantidad de calor que recibe en forma de radiación solar. La ecuación 12 del capítulo II nos describe este comportamiento en forma general, sin embargo, se deben incluir los términos de conducción, convección y radiación de calor, dependiendo del punto que se quiera analizar del calentador.

Si se hace un análisis de la placa de vidrio, figura 3, se tiene que ésta recibe en forma de radiación solar, también lo recibe por medio de la radiación que emana de la placa metálica y por último recibe calor por medio de convección natural proveniente también de la placa metálica. Las pérdidas de calor las tiene por medio de la radiación solar que refleja el vidrio, la radiación que emana del vidrio al cielo y la conducción de calor que hay del vidrio al aire. Con esto se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\bar{H}R_{byr} + \bar{Q}_{rpv} + \bar{Q}_{cpv} - \bar{Q}_{rvc} - \bar{Q}_{cva} - \bar{H}R_{byryv} = (dC_p a) v \frac{\partial T_v}{\partial t} \quad (1)$$

donde: $\bar{H}R_{byr}$ es el calor ganado por radiación solar

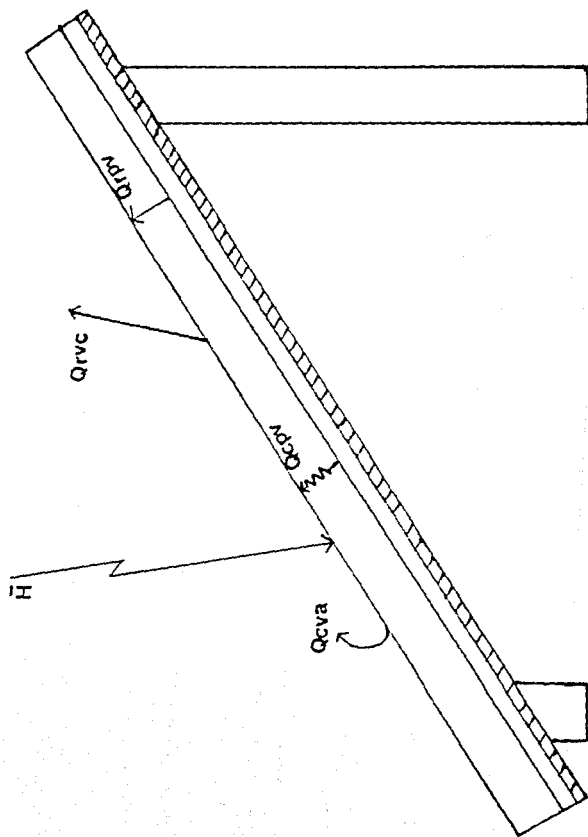


Fig. 3 Análisis sobre la placa de vidrio

que llega a la placa de vidrio con los cambios que sufre a su paso por la atmosfera.

Q_{rpv} es el calor ganado por radiación de la placa metálica al vidrio.

Q_{cpv} es el calor ganado por convección natural placa-vidrio.

Q_{rvc} es el calor perdido por radiación vidrio-cielo.

Q_{cva} es el calor perdido por conducción vidrio-aire.

$\overline{HRb\gamma\gamma}$ es el calor perdido por radiación solar que refleja de la placa de vidrio.

Los términos que involucran las ganancias y las pérdidas por radiación solar pueden reuñirse así: $\overline{HRb\gamma\gamma}(1-\gamma\gamma)$.

Tomando las definiciones de calor que se presentan en el capítulo II, la ecuación 1 queda:

$$\overline{HRb}(\gamma\gamma(1-\gamma\gamma)) + h_{rpv}(T_p - T_v) - h_{cpv}(T_p - T_v) - h_{rvc}(T_v - T_c) - h_{cva}(T_v - T_a) = (dC_{pe})v \frac{dT_v}{dt} \quad (2)$$

Considerando las ecuaciones 29, 42 y 43 del

capítulo II y reacomodando términos tenemos:

$$\begin{aligned}
 (dC_{pe})v \frac{aTv}{at} &= T_p(hr_{pv}+hc_{pv}) - T_v(hr_{pv}+hc_{pv}+hr_{vc}+hc_{va}) \\
 &+ 12hr_{vc} + (hr_{vc}+hc_{va})[\bar{T}_a + a r t \sin\theta + b r t \cos\theta] \\
 &+ R_{byr}(1-\gamma_v)[\hat{H} + a t \sin\theta + b r \cos\theta] \quad (3)
 \end{aligned}$$

Reordenando términos :

$$\begin{aligned}
 (dC_{pe})v \frac{aTv}{at} + T_v(hr_{pv}+hc_{pv}+hr_{vc}+hc_{va}) \\
 &= T_p(hr_{pv}+hc_{pv}) + 12hr_{vc} \\
 &+ \hat{H}R_{byr}(1-\gamma_v) + \bar{T}_a(hr_{vc}+hc_{va}) \\
 &+ [R_{byr}(1-\gamma_v)ar + (hr_{vc}+hc_{va})ar t] \sin\theta \\
 &+ [R_{byr}(1-\gamma_v)br + (hr_{vc}+hc_{va})br t] \cos\theta \quad (4)
 \end{aligned}$$

Dividiendo la ecuación 4 por $(dC_{pe})v$, la ecuación queda:

$$\frac{aTv}{at} + aTv = b + cT_p + f \sin\theta + g \cos\theta \quad (5)$$

como: $\theta = \omega t$ (6)

$$\frac{aTv}{at} + aTv = b + cT_p + f \sin(\omega t) + g \cos(\omega t) \quad (7)$$

La solución para la ecuación 7 es como sigue:

$$\frac{dT_v}{dt} + aTv = 0 \quad (8)$$

$$T_v = C t e^{-at} \quad (9)$$

sea: $T_v = \alpha_1 + \beta \text{sen}(wt) + \Gamma \cos(wt) \quad (10)$

$$T_v' = \beta w \cos(wt) - \Gamma w \text{sen}(wt) \quad (11)$$

sustituyendo 10 y 11 en 7:

$$\begin{aligned} & \beta w \cos(wt) - \Gamma w \text{sen}(wt) + \alpha_1 a + a \beta \text{sen}(wt) + a \Gamma \cos(wt) \\ & = b + c T_p + f \text{sen}(wt) + g \cos(wt) \end{aligned} \quad (12)$$

así: $\alpha_1 = \frac{b + c T_p}{a} \quad (13)$

$$\beta w + a \Gamma = g \quad (14)$$

$$\beta = \frac{g - a \Gamma}{w} \quad (15)$$

$$- \Gamma w + a \beta = f \quad (16)$$

$$- \Gamma w + \frac{a g - a^2 \Gamma}{w} = f \quad (17)$$

$$- \Gamma w^2 + a g - a^2 \Gamma = f w \quad (18)$$

$$\Gamma = \frac{a g - f w}{a^2 + w^2} \quad (19)$$

$$\beta = \frac{g - a \left[\frac{a g - f w}{a^2 + w^2} \right]}{w} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{af + gw}{a^2 + w^2} \quad (21)$$

Sustituyendo 18, 19 y 21 en 10:

$$T_{vc} = \frac{b+cT_p + af+gw}{a} \frac{\sin(wt)}{a^2+w^2} + \frac{ag+fw}{a^2+w^2} \cos(wt) \quad (22)$$

entonces:

$$T_{vc} = Cte e^{-at} + \alpha_1 + \beta \sin(wt) + \Gamma \cos(wt) \quad (23)$$

Si $T_v = 17$, $t = 0$

$$17 = Cte + \alpha_1 + \Gamma \quad (24)$$

sustituyendo Cte en 23:

$$T_v = [17 - \alpha_1 - \Gamma] e^{-at} + \alpha_1 + \beta \sin(wt) + \Gamma \cos(wt) \quad (25)$$

Con la ecuación anterior se conocerá la variación de la temperatura de la cubierta de vidrio con respecto al tiempo, manteniendo constante la temperatura de la placa, T_p .

El valor de los coeficientes de transferencia de calor se estimaron de acuerdo a las ecuaciones mostradas en el capítulo II correspondientes a cada

tipo de transferencia: evaluando algunos de ellos primero con valores supuestos para T_v y T_p , y después aplicándolos a la ecuación 25; con los nuevos valores de T_v para diferentes T_p , se volvieron a calcular los coeficientes, sacando un promedio de ellos, teniendo que:

$$h_{rpv} = 1.9371E5 \text{ J/m}^2\text{diaK}$$

$$h_{cpv} = 2.4313E5 \text{ J/m}^2\text{diaK}$$

$$h_{rvc} = 4.472E5 \text{ J/m}^2\text{diaK}$$

y h_{cva} está dada por la ecuación 21 del capítulo II.

Los valores constantes son:

$$\gamma_r = 0.94$$

$$\gamma_v = 0.9$$

$$d_v = 2600 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{pv} = 753.6 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$e_v = 3E-3 \text{ m}$$

Los demás se encuentran en las tablas del capítulo II; las temperaturas del vidrio resultantes, para el D. F. se encuentran en la tabla 1.

Haciendo ahora un análisis en un punto sobre la placa metálica, fig. 4, se observa que sólo hay

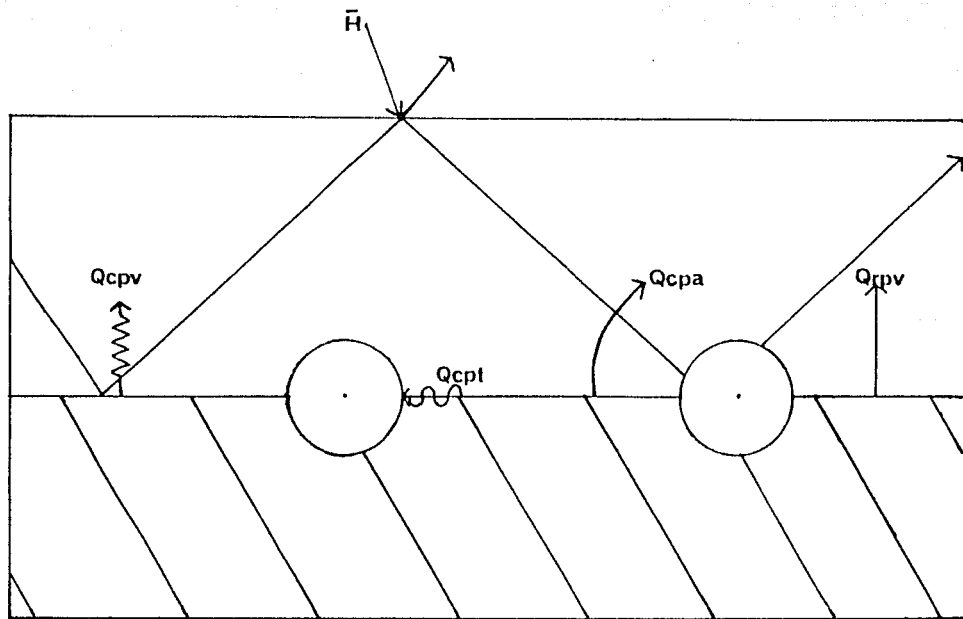


Fig. 4 Balance en un punto sobre la placa

ganancias de calor por medio de la radiación solar, tomando en cuenta que esta sufre cambios al pasar por la placa de vidrio antes. Las pérdidas de calor que sufre la placa de vidrio son: por radiación solar que refleja la placa metálica, por radiación de la placa metálica a la placa de vidrio, por convección de la placa metálica a la placa de vidrio, por conducción de la placa metálica a los tubos por donde corre el agua y por conducción de la placa metálica al aire.

La ecuación del balance de energía queda:

$$HRb_{yr}(\gamma\alpha)l_1 - Q_{rpv} - Q_{cpv} - Q_{cpt} - Q_{cpa} = (dC_p)_p \frac{dT_p}{dt} \quad (26)$$

donde: Q_{rpv} es el calor por radiación placa-vidrio,

Q_{cpv} es el calor por convección placa-vidrio,

Q_{cpt} es el calor por conducción placa-tubo,

Q_{cpa} es el calor por conducción placa aire,

$(\gamma\alpha)l_1$ es el término que se aplica por el efecto de invernadero que existe entre dos placas planas paralelas. Su valor es de $1.01\gamma\alpha$, donde $\alpha = 0.9$ (5).

Sustituyendo los valores de los calores

Tabla 1.- Temperaturas del vidrio durante el año
para el D. F.

t. dias	Tv, °C
17	29.16
47	29.15
75	29.146
105	29.17
135	29.46
162	30.47
198	31.49
228	31.81
258	31.21
288	30.10
318	29.26
344	29.16

descritos en las ecuaciones 16, 18 y 27 del capítulo II:

$$\begin{aligned}
 & 1.01\overline{HR}b\gamma r\gamma\alpha - h\gamma p\gamma(T_p - T_v) \\
 & - h\gamma p\gamma(T_p - T_v) + k_{pep} \frac{a^2 T_p}{ay^2} - K_b(T_p - T_a) \\
 & = (dC_{pe})_p \frac{dT_p}{dt} \quad (27)
 \end{aligned}$$

Suponiendo que T_p no varía con el tiempo, sino solo con y , que es la coordenada espacial, tenemos:

$$\begin{aligned}
 & 1.01\overline{HR}b\gamma r\gamma\alpha - h\gamma p\gamma(T_p - T_v) - h\gamma p\gamma(T_p - T_v) \\
 & + k_{pep} \frac{a^2 T_p}{ay^2} - K_b(T_p - T_a) = 0 \quad (28)
 \end{aligned}$$

reordenando términos tenemos que:

$$\begin{aligned}
 & \frac{d^2 T_p}{dy^2} - \frac{h\gamma p\gamma + h\gamma p\gamma + K_b}{k_{pep}} T_p \\
 & = - \frac{1.01\overline{HR}b\gamma r\gamma\alpha + T_v(h\gamma p\gamma + h\gamma p\gamma) + K_b T_a}{k_{pep}} \quad (29)
 \end{aligned}$$

esta ecuación se convierte en:

$$\frac{d^2 T_p}{dy^2} - a^2 T_p = - a^2 \quad (30)$$

Tomando en cuenta la figura 5, y si

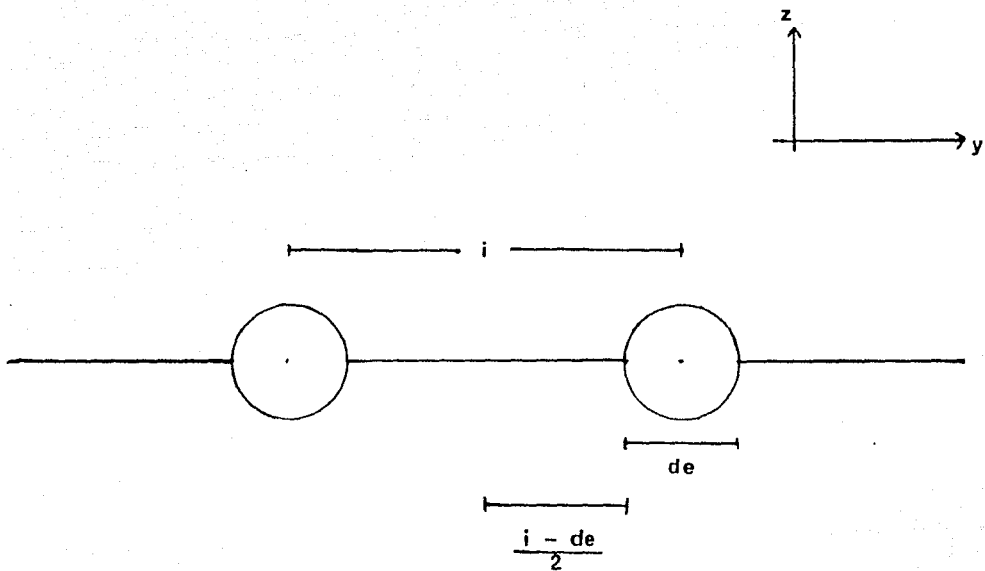


Fig. 5 Coordenada espacial y distancias entre tubos

$$\frac{dT_p}{dy} = 0, \quad y = 0$$

y

$$T_p = T_w, \quad y = \frac{a-d_2}{2} = m$$

entonces la solución de la ecuación homogénea

$$\frac{d^2 T_p}{dy^2} - a_1^2 T_p = 0 \quad (31)$$

es:

$$T_p = K_1 e^{a_1 y} + K_2 e^{-a_1 y} \quad (32)$$

y la solución de la ecuación no homogénea es:

$$T_{pc} = \frac{a_2}{a_1^2} \quad (33)$$

entonces:

$$T_p = K_1 e^{a_1 y} + K_2 e^{-a_1 y} + \frac{a_2}{a_1^2} \quad (34)$$

$$\frac{dT_p}{dy} = K_1 a_1 e^{a_1 y} - K_2 a_1 e^{-a_1 y} \quad (35)$$

$$K_1 a_1 - K_2 a_1 = 0, \quad K_1 = K_2 \quad (36)$$

$$T_w = K_1 e^{a_1 m} + K_2 e^{-a_1 m} + \frac{a_2}{a_1^2} \quad (37)$$

$$T_w = K_1 \left(e^{a_1 m} + e^{-a_1 m} \right) + \frac{a_2}{a_1^2} \quad (38)$$

$$K_1 = K_2 = \frac{T_w - \frac{a_2}{a_1^2}}{e^{a_1 m} + e^{-a_1 m}} \quad (39)$$

$$T_p = \left(T_w - \frac{a_2}{a_1^2} \right) \left[\frac{e^{a_1 y} + e^{-a_1 y}}{e^{a_1 m} + e^{-a_1 m}} \right] + \frac{a_2}{a_1^2} \quad (40)$$

$$T_p = \left(T_w - \frac{a_2}{a_1^2} \right) \left[\frac{\cosh(a_1 y)}{\cosh(a_1 m)} \right] + \frac{a_2}{a_1^2} \quad (41)$$

$$T_p = T_w \left[\frac{\cosh(a_1 y)}{\cosh(a_1 m)} \right] + \frac{a_2}{a_1^2} \left[1 - \frac{\cosh(a_1 y)}{\cosh(a_1 m)} \right] \quad (42)$$

La ecuación 41 nos da la temperatura de la placa metálica al variar la componente y a una T_w dada.

De acuerdo con la Ley de Fourier la ganancia de calor de un tubo proveniente de las aletas (por unidad de longitud del tubo) (5) es:

$$Q_{ca'} = - K_{pep} \frac{dT_p}{dy} \Big|_{y = \frac{a-d_e}{2} = m} \quad (43)$$

Derivando la ecuación 42 respecto a y:

$$\frac{dT_p}{dy} = T_w a_1 \frac{\sinh(a_1 y) - a_2 a_1 \frac{\sinh(a_1 y)}{\cosh(a_1 m)}}{a_1^2 \cosh(a_1 m)} \quad (44)$$

$$\left. \frac{dT_p}{dy} \right|_{y=m} = T_w a_1 \tanh(a_1 m) - \frac{a_2}{a_1} \tanh(a_1 m) \quad (45)$$

$$Q_{ca}' = -2K_{pep} \left[T_w a_1 \tanh(a_1 m) - \frac{a_2}{a_1} \tanh(a_1 m) \right] \quad (46)$$

$$Q_{ca}' = 2K_{pep} \tanh(a_1 m) \left(\frac{a_2}{a_1} - T_w a_1 \right) \quad (47)$$

El calor ganado por el tubo directamente, por unidad de longitud es:

$$Q_{rd}' = \frac{\pi d_e}{2} [1.01 \overline{hR} b y r y v a - h_{rpw}(T_w - T_v) - h_{cpv}(T_w - T_v) - K_b(T_w - T_a)] \quad (48)$$

$$Q_{rd}' = \frac{\pi d_e}{2} [1.01 \overline{hR} b y r y v a - (h_{rp} + h_{cpv} + K_b) T_w + (h_{rp} + h_{cpv}) T_v + K_b T_a] \quad (49)$$

Ya que:

$$h_{rp} + h_{cpv} + K_b = a_1^2 K_{pep}$$

$$y \quad 1.01 \overline{hR} b y r y v a + (h_{rp} + h_{cpv}) T_v + K_b T_a = a_2 2 K_{pep}$$

entonces:

$$Q_{rd}' = \frac{\pi d_e}{2} [a_2 2 K_{pep} - a_1^2 K_{pep} T_w] = \frac{\pi d_e}{2} K_{pep} (a_2 - a_1^2 T_w) \quad (50)$$

$$Q_{rd}' = \frac{\pi d_e}{2} a_1 k_{pep} \left(\frac{a_2}{a_1} - a_1 T_w \right) \quad (51)$$

El calor útil por unidad de longitud de tubo es:

$$Q_u' = Q_{ca}' + Q_{rd}' \quad (52)$$

por lo que:

$$Q_u' = 2k_{pep} \left(\tanh(a_1 m) + \frac{\pi d_e}{4} a_1 \right) \left(\frac{a_2}{a_1} - a_1 T_w \right) \quad (53)$$

También el calor útil por unidad de longitud de tubo se transfiere al fluido y puede expresarse como:

$$Q_u' = \pi d_i h_p (t_w - T_f) \quad (54)$$

eliminando T_w se obtiene:

$$Q_u' = \frac{2k_{pep} \left[\tanh(a_1 m) + \frac{\pi d_e a_1}{4} \right] (a_1 - a_1 T_f)}{1 + \frac{2a_1 k_{pep}}{\pi d_i h_p} \left[\tanh(a_1 m) + \frac{\pi d_e a_1}{4} \right]} \quad (55)$$

Haciendo un balance diferencial del fluido que circula para el interior del tubo:

$$\frac{(\dot{m})}{nt} C_p T_f \Big|_z - \frac{(\dot{m})}{nt} C_p T_f \Big|_{z+\Delta z} + z Q_u' = 0 \quad (56)$$

$$\frac{dT_f}{dz} - \frac{2Kpepnt \left[\tanh(aim) + \frac{ndea1}{4} \right] (a1 - a1T_f)}{1 + \left(\frac{2a1lpep}{ndihp} \right) \left[\tanh(aim) + \frac{ndea1}{4} \right]} = 0 \quad (57)$$

donde: \dot{m} es el gasto másico total,

nt es el número de tubos.

Simplificando:

$$\frac{dT_f}{dz} - a3 \left(\frac{a2}{a1} - a1T_f \right) = 0 \quad (58)$$

$$\frac{dT_f}{dz} + \frac{a3a1}{\dot{m}Cp} T_f = \frac{a3a2}{a1\dot{m}Cp} \quad (59)$$

Solución:

$$T_f = Cte e^{-\frac{a3a1}{\dot{m}Cp} z} + \frac{a2}{a1^2} \quad (60)$$

si $T_f = T_1, z = 0$

$$T_1 = Cte + \frac{a2}{a1^2} \quad Cte = T_1 - \frac{a2}{a1^2} \quad (61)$$

$$T_f = \left(T_1 - \frac{a2}{a1^2} \right) e^{-\frac{a3a1}{\dot{m}Cp} z} + \frac{a2}{a1^2} \quad (62)$$

Si $T_f = T_0, z = 1$

$$T_0 = \left(T_1 - \frac{a_2}{a_1^2} \right) e^{-\frac{a_3 a_1}{m C_p} l} + \frac{a_2}{a_1^2} \quad (63)$$

donde: T_1 es la temperatura de entrada del agua.

l es la longitud de los tubos.

La temperatura de pared del tubo es:

$$T_w = \frac{2k_{pepa} \left[\tanh(a_1 m) + \frac{\pi d_{ea} l}{4} \left(\frac{a_2}{a_1} \right) \right] + \pi d_{ihp} T_f}{\pi d_{ihp} + \left(k_{pepa} l \left[\tanh(a_1 m) + \frac{\pi d_{ea} l}{4} \right] \right)} \quad (64)$$

Con la ecuación 63 se calcula la temperatura de salida del agua si se varía la longitud del tubo (l). Si se fija l esta ecuación nos da la temperatura de salida del agua cuando ha pasado por los tubos una sola vez, para obtener la T_0 global se debe recircular el agua por el calentador varias veces. Este número de veces está dado por la siguiente ecuación:

$$N_v = \frac{E_s}{t_r} \quad (65)$$

donde: E_s es el día solar, en segundos,

t_r es el tiempo de residencia del agua en el colector, en segundos.

$$Es = \frac{2}{15} \cos^{-1} (-\tan\theta \tan S_1) \quad (66)$$

$$t_r = \frac{m}{\dot{m}} \quad (67)$$

donde m es la masa de un almacen estandar, (200 l).

La ecuación 66 da el resultado en horas, por lo que es necesario convertirlo a segundos para usarlo en la ecuación 65.

Ya conociendo el número de veces de recirculación del agua, se va a la ecuación 63 y se itera con la T_i tantas veces como N_v sean. Cuando ya se conoce T_0 para una N_v la T_0 se convierte en T_f y se calcula la T_w de la ecuación 64. Conociendo ya la T_w se va a la ecuación 42 para obtener la T_p .

Así se obtendrán los valores para las temperaturas de salida del agua, de la pared del tubo y de la placa (T_0 , T_w y T_p respectivamente) conociendo así el comportamiento térmico del calentador de agua en distintos lugares de la República Mexicana.

A continuación se muestran los valores constantes que se usarán para los cálculos.

$$T_v = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$k_b = 2 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

$$k_p = 3.2549\text{E}7 \text{ J/mdia}^\circ\text{C}$$

$$e_p = 0.305\text{E}-3 \text{ m}$$

$$a = 0.15 \text{ m}$$

$$d_e = 12.7\text{E}-3 \text{ m}$$

$$y = 0.001 \text{ m}$$

$$d_i = 11.43\text{E}-3 \text{ m}$$

$$l = 2 \text{ m}$$

$$\dot{m} = 3456 \text{ kg/dia} = 0.04 \text{ kg/s}$$

$$n_t = 7$$

$$h_p = 2.6\text{E}7 \text{ J/m}^2\text{dia}^\circ\text{C}$$

$$C_p = 4186.8 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

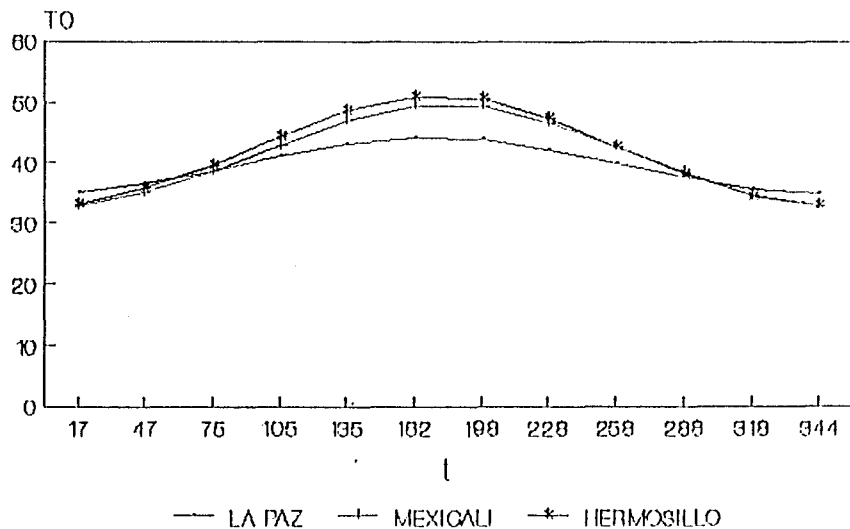
$$m = 200 \text{ kg}$$

Los valores para H y T_a se calcularon para cada día promedio mensual y para cada lugar.

Los resultados obtenidos se agruparon en las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 de las siguientes páginas, donde se muestra el comportamiento térmico de un calentador de agua en los diferentes lugares que se están analizando.

GRAFICA DE T0 VS t

ZONA NORTE 1

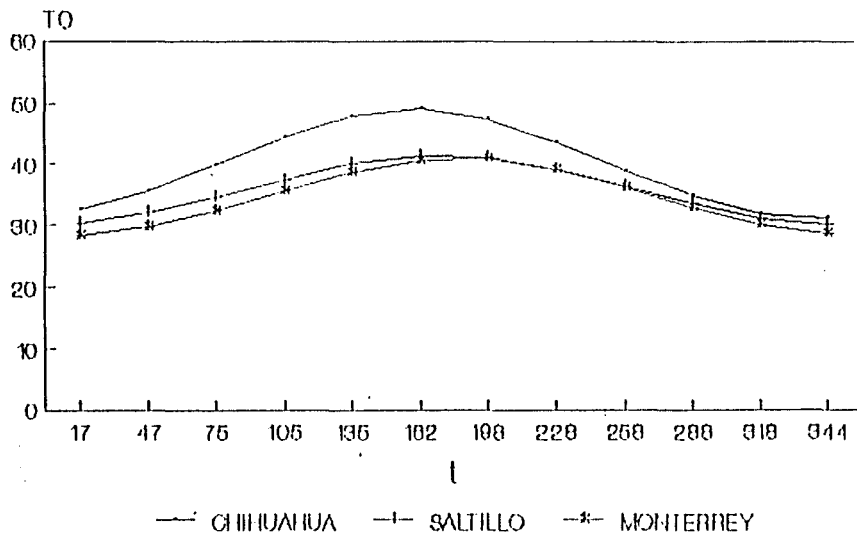


T0: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA (°C)
t: TIEMPO (DÍAS)

Fig. 6. Calentador de Agua.

GRAFICA DE TO VS t

ZONA NORTE 2

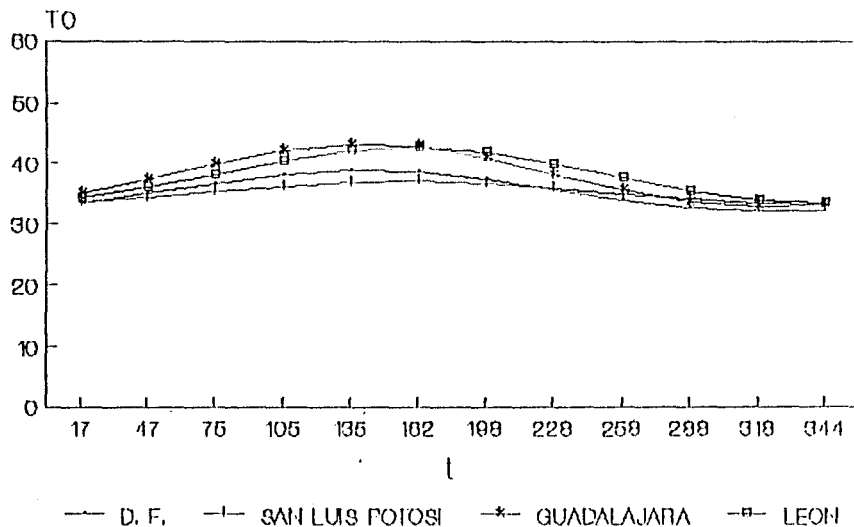


TO: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA (°C)
t: TIEMPO (DIA9)

Fig. 7. Calentador de Agua.

GRAFICA DE TO VS t

ZONA CENTRO

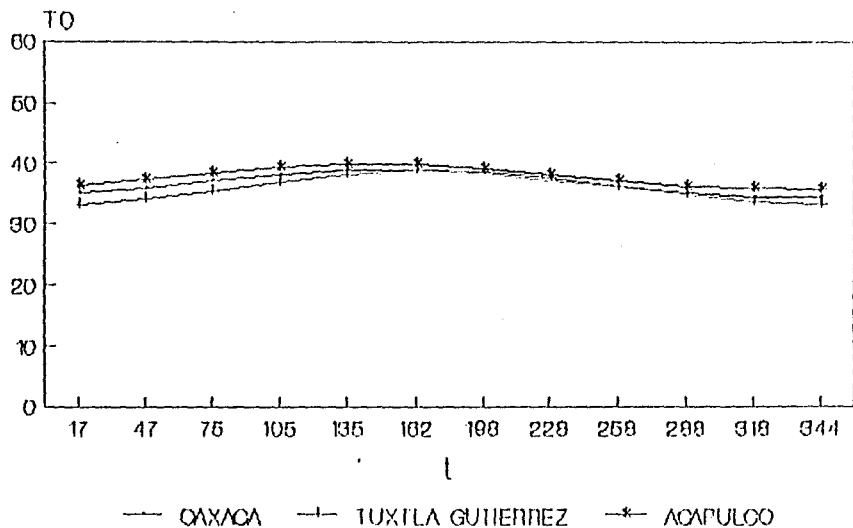


TO: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA (°C)
 t: TIEMPO (DIAS)

Fig. 8. Calentador de Agua.

GRAFICA DE TO VS t

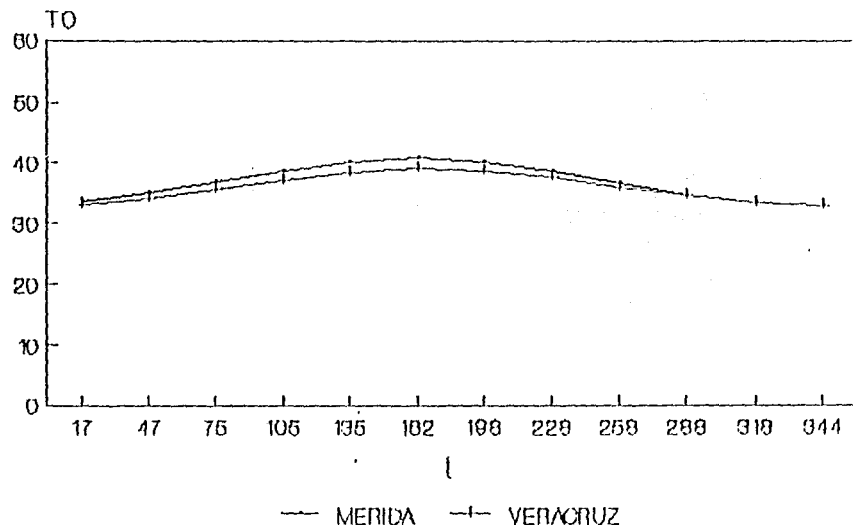
ZONA PACIFICO



TO: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA (°C)
 t: TIEMPO (DÍAS)

Fig. 9. Calentador de Agua.

GRAFICA DE T₀ VS t ZONA GOLFO



T₀: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA (°C)
t: TIEMPO (DÍAS)

Fig. 10. Calentador de Agua.


```

10 REM PROGRAMA PARA CALCULO DE LA TEMP. DE FLACA
20 REM NUMERO DE VUELTAS DE CIRCULACION
30 CLS: DIM DIA(12), H(12), TA(12), DE(12), TO(12), TW(12), TP(12), NV1(12), NV2(12), A2(1
40), X(20), NV(12), D(12), HI(12)
40 FOR I=1 TO 12: PRINT "DIA( "; I; ": INPUT ")="; DIA(I); PRINT "Declinacion de": I; : INP
UT " "; D(I); DE(I) = D(I) * 3.1416 / 180; NEXT I
50 INPUT "Ciudad="; CIUS; INPUT "Latitud =" ; L; LA = L * 3.1416 / 180
55 PRINT "LA RADIACION <H(I)> SE INTRODUCE COMO H(I) * 1E-7"; FOR I=1 TO 12: PRINT "
H( "; I; ": INPUT ")="; HI(I); H(I) = HI(I) * 1E+07; PRINT "Ta( "; I; ": INPUT ")="; TA(I); NEXT I
60 REM INTRODUCCION DE CONSTANTES
70 HRP=1239111; HRV=501506; HCPV=168208.3; KPEP=6377.45; FB=172800; DIE=.1
5; DII=.01143; M=.06865; L=2; FL=3456; HF=2.6E+07; CP=4186.8; W=.01721; TAO=.769014; TVI=
30; NT=7; Y=.001; L=2
80 REM CALCULO DE A3 Y A1
90 A12=(HRP+HCPV+KB)/KPEP; A1=SOR(A12); TH=((EXP(A1*M)-EXP(-A1*M))/2)/((EXP(A1*M)+
EXP(-A1*M))/2); A3=(2*KPEP*NT*(TH+3.1416*DIE*A1/4))/(1+(2*A1*KPEP/(3.1416*DII*HP)
))*(TH*(3.1416*DIE*A1/4))
100 INPUT "RB="; RB; PRINT CIUS
110 FOR I=1 TO 12: TI=20
120 PRINT "DIA="; DIA(I); X=TAN(LA)*TAN(DE(I))*-1; CI=(ATN(X/SQR(-X*X+1))*-1)+(3.141
6/2); NV1(I)=(2/15)*CI*(180/3.1416); PRINT "NV1( "; I; ")="; NV1(I)
130 NV2(I)=NV1(I)*3600/5000; PRINT "NV2( "; I; ")="; NV2(I); NV(I)=INT(NV2(I))+1; PRINT
"NV="; NV(I)
150 A2(I)=(RB*TAO*H(I)+TVI*(HRP+HCPV)+KB*TA(I))/KPEP
160 FOR K=1 TO NV(I)
170 TO(K)=(TI-(A2(I)/A1^2))*EXP(-A2*A1*L/(FL*CP))+ (A2(I)/A1^2); PRINT "T0( "; K; ")="
; TO(K)
180 TI=TO(K); NEXT K; V=NV(I)
190 T1=TO(V)-TO(V-1); N=NV2(I)-(V-1); T2=T1*N; TO=TO(V-1)+T2; PRINT "T0="; TO; TF=TO
200 TW(I)=(2*KPEP*(TH+3.1416*A1*DIE/4)*(A2(I)/A1)+3.1416*DII*HP*TF)/(3.1416*DII*
HP+(2*KPEP*A1*(TH+(3.1416*DIE*A1/4))))); PRINT "TW="; TW(I)
210 CHY=((EXP(A1*Y)+EXP(-A1*Y))/2); CHM=((EXP(A1*M)+EXP(-A1*M))/2); TP(I)=TW(I)*C
HY/CHM+(A2(I)/A1^2)*(1-(CHY/CHM)); PRINT "Tp="; TP(I)
220 NEXT I
230 GOTO 50

```

Capítulo IV

CALENTADOR DE AIRE

La energía solar ha ayudado al ahorro de energéticos sustituyendolos en parte, principalmente en las zonas alejadas de las ciudades.

En la República Mexicana existen muchos lugares en donde es muy difícil transportar, por ejemplo gasolina, por lo que la energía solar puede llegar a ser una de sus principales fuentes de energéticos.

En estos lugares la energía solar puede utilizarse tanto en el uso doméstico como en el de la pequeña industria. Por ejemplo pueden utilizarse calentadores de aire que sirvan en sistemas de aire acondicionado y de secado de granos.

En este capítulo se va a modelar un calentador de aire para secado, el cual debe ser instalado en donde haya una gran extensión de tierra, ya que su longitud puede llegar a ser mayor de 100 m.

El calentador de aire que se va a analizar trabaja de la siguiente forma: se hace pasar aire por medio de un ventilador ó soplador a través de un ducto de plástico cuya base es una lámina de cobre,

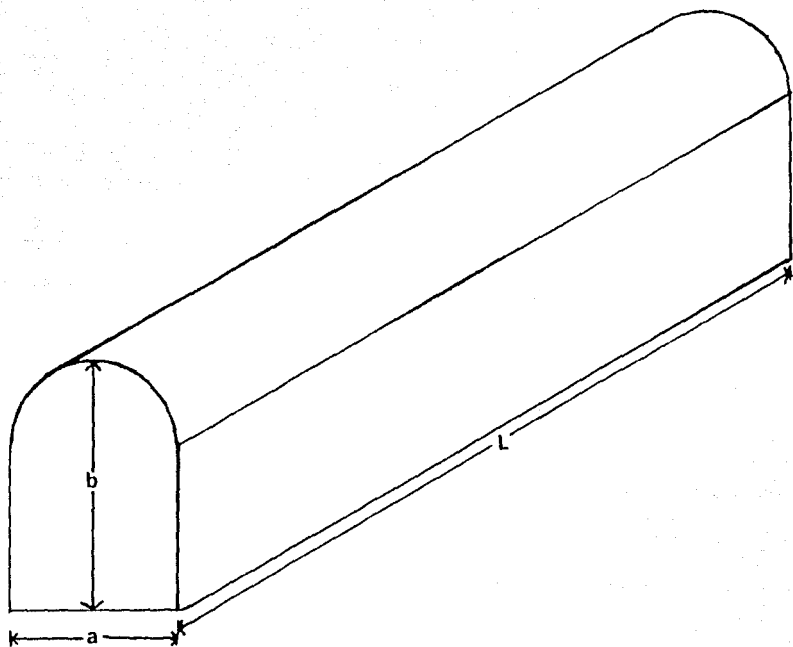


Fig. 1 Esquema de un Calentador de Aire

este ducto tiene alrededor de 2 m de ancho y una longitud que varía de 40 a 100 m. Al ir atravesando el ducto el aire se va calentando por medio del calor que la placa le cede. En la figura 1 se muestra un esquema del calentador de aire.

La simulación del calentador de aire se logra realizando un análisis térmico que nos permita conocer el comportamiento del calentador en un periodo de tiempo.

Para empezar se hace un balance de energía sobre la placa de cobre, (fig. 2) teniendo que ésta tiene ganancias de calor por medio de la radiación solar y sufre pérdidas de calor debidas a la conducción de la placa metálica al aire y a la radiación de la placa metálica al plástico. La ecuación diferencial es:

$$-Q_{cpa} - Q_{rpp1} + 1.01\bar{H}(1-\gamma_r)(1-\gamma_{p1})\gamma_p = (dC_{pe})_p \frac{dT_p}{dt} \quad (1)$$

donde: Q_{cpa} es el calor perdido por conducción placa-aire,

Q_{rpp1} es el calor perdido por radiación placa-plástico,

$1.01\bar{H}(1-\gamma_r)(1-\gamma_{p1})\gamma_p$ es el calor ganado por

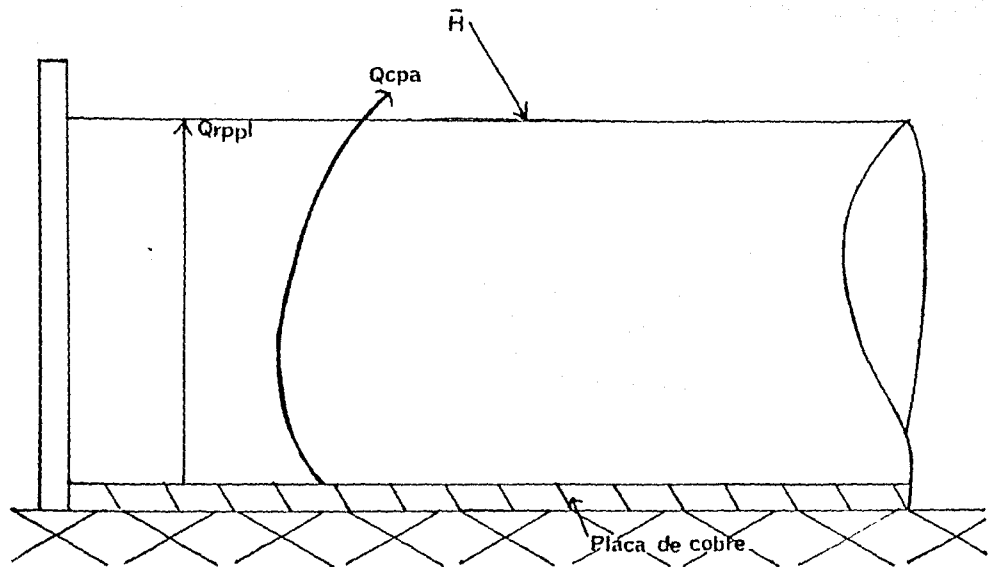


Fig. 2 Balance sobre la placa de cobre

radiación solar tomando en cuenta el fenómeno de invernadero que ocurre dentro del calentador y el efecto de transmitancia del plástico y de la placa.

Sustituyendo los valores de θ_{cpa} y θ_{rpl} de las ecuaciones 16 y 26 del capítulo II, respectivamente, tenemos:

$$- K_b(T_p - T_a) - h_r(T_p - T_{pl}) + 1.01H(1-\gamma_r)(1-\gamma_{pl})\gamma_p = (dC_{pe})_p \frac{dT_p}{dt} \quad (2)$$

donde: h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación y se calcula con la ecuación 27 del capítulo II.

Reordenando términos y tomando en cuenta que H y T_a están definidos por las ecuaciones 43 y 44 del capítulo II se obtiene:

$$\frac{dT_p}{dt} + T_p \left[\frac{K_b + h_r}{(dC_{pe})_p} \right] = \frac{1.01\hat{H}(1-\gamma_r)(1-\gamma_{pl})\gamma_p + K_b\bar{T}_a + h_r T_{pl}}{(dC_{pe})_p} + \frac{[a_1 1.01(1-\gamma_r)(1-\gamma_{pl})\gamma_p + K_b a_1]}{(dC_{pe})_p} \text{sen}(wt) + \frac{[b_1 1.01(1-\gamma_r)(1-\gamma_{pl})\gamma_p + K_b b_1]}{(dC_{pe})_p} \text{sen}(wt) \quad (3)$$

Para fines prácticos la ecuación 3 se convierte en:

$$\frac{dT_p}{dt} + T_p K_1 = K_2 + K_3 \sin(\omega t) + K_4 \cos(\omega t) \quad (4)$$

La solución para la ecuación anterior es como sigue:

Solución de la ecuación homogénea:

$$\frac{dT_p}{dt} + K_1 T_p = 0 \quad (5)$$

$$T_p = C t e^{-K_1 t} \quad (6)$$

Solución complementaria:

$$\text{Si } T_p = \beta + \Gamma \sin(\omega t) + \Omega \cos(\omega t) \quad (7)$$

$$T_p' = \omega \Gamma \cos(\omega t) - \omega \Omega \sin(\omega t) \quad (8)$$

Sustituyendo 7 y 8 en 4:

$$\begin{aligned} \omega \Gamma \cos(\omega t) - \omega \Omega \sin(\omega t) + \beta K_1 + \Gamma K_1 \sin(\omega t) + \Omega K_1 \cos(\omega t) \\ = K_2 + K_3 \sin(\omega t) + K_4 \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (9)$$

resolviendo:

$$\beta = \frac{K_2}{K_1} \quad (10)$$

$$\Gamma = \frac{K_4 \omega + K_3 K_1}{\omega^2 + K_1^2} \quad (11)$$

$$\Omega = \frac{K1K4 - K3w}{w^2 + K1^2} \quad (12)$$

Uniendo las dos soluciones tenemos que:

$$T_p = Cte e^{-K1t} + \frac{K2}{K1} + \left[\frac{K4w + K3K1}{w^2 + K1^2} \right] \text{sen}(wt) + \left[\frac{K1K4 - K3w}{w^2 + K1^2} \right] \text{cos}(wt) \quad (13)$$

ó lo que es lo mismo:

$$T_p = Cte e^{-K1t} + B + A \text{sen}(wt) + \Omega \text{cos}(wt) \quad (14)$$

Para evaluar la Cte se fija la siguiente condición inicial:

$$t = 0, T_p = 15$$

asi:

$$15 = Cte + \frac{K2}{K1} + \Omega \quad (15)$$

por lo que:

$$Cte = 15 - \frac{K2}{K1} - \Omega \quad (16)$$

sustituyendo 16 en 14:

$$T_p = (15 - \beta - \Omega)e^{-\Omega z} + \beta + \Omega \sin(\omega t) + \Omega \cos(\omega t) \quad (17)$$

que es la ecuación analítica que describe el comportamiento térmico de la placa de cobre.

Haciendo un balance de energía a lo largo del calentador, tenemos:

$$hf(T_p - \bar{T}_o) = \dot{m}C_p \frac{d\bar{T}_o}{dz} \quad (18)$$

siendo hf el coeficiente de transferencia de calor por convección, que está definido por la ecuación 23 del capítulo II, y T_o la temperatura del aire que circula por el calentador.

Reordenando términos tenemos:

$$\frac{d\bar{T}_o}{dz} + \frac{hf}{\dot{m}C_p} \bar{T}_o = \frac{hf}{\dot{m}C_p} T_p \quad (19)$$

simplificando:

$$\frac{d\bar{T}_o}{dz} + K5\bar{T}_o = K6T_p \quad (20)$$

resolviendo la ecuación anterior:

$$\bar{T}_o = Cte e^{-K5z} + \frac{K6}{K5} T_p \quad (21)$$

Tomando como condición de frontera que a

$$z = 0, T_0 = 20$$

la ecuación 21 queda:

$$\bar{T}_0 = \left[20 - \frac{k_6}{K_5} T_p \right] e^{-K_5 z} + \frac{k_6}{K_5} T_p \quad (22)$$

Como las constantes K_5 y k_6 son iguales:

$$\bar{T}_0 = (20 - T_p) e^{-K_5 z} + T_p \quad (23)$$

Esta ecuación nos da la temperatura de salida del aire a distintas longitudes de calentador, tomando en cuenta la temperatura de la placa metálica.

Para obtener los resultados de la ecuación 23 T_p se calcula con la ecuación 17 y se sustituye en la 23.

Los valores constantes que se usaron en éste capítulo son:

$$k_b = 1.728E5 \text{ J/m}^2\text{dia}^\circ\text{C}$$

$$h_{refl} = 1.23911E5 \text{ J/m}^2\text{dia}K$$

$$h_f = 2.616E5 \text{ J/m}^2\text{dia}^\circ\text{C}$$

$$C_p(\text{aire}) = 1004.7 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$a = 2 \text{ m}$$

$$b = 0.2 \text{ m}$$

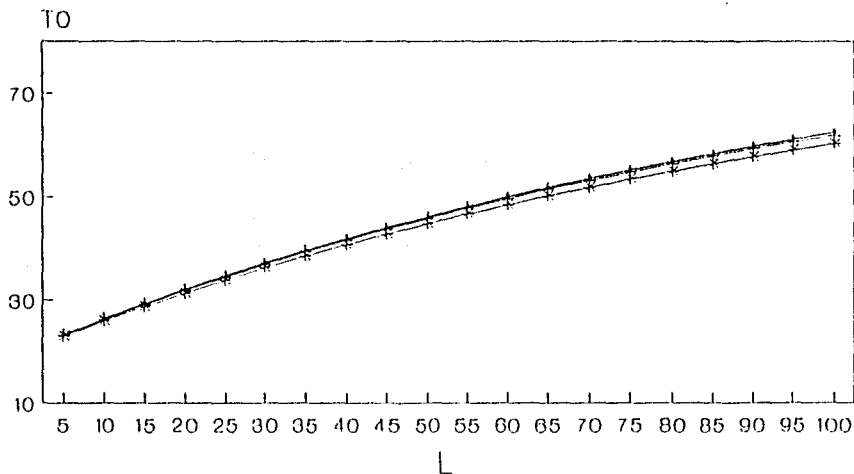
$\rho = 4603.3 \text{ kg/m}^3$
 $C_p = 4186.8 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
 $e_p = 0.305\text{E}-3 \text{ m}$
 $V = 7.7\text{E}4 \text{ m}^3/\text{dia}$
 $V = 3.08\text{E}4 \text{ m}^3/\text{dia}$
 $m_p = 2.718\text{E}4 \text{ kg}/\text{dia}$
 $T_p1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\gamma_r = 0.04$
 $\gamma_{p1} = 0.15$
 $\gamma_p = 0.9$

Los valores constantes para la ecuación de radiación y para la de temperatura ambiente están dados en las tablas 2 y 3 del capítulo II.

Las figuras de la 3 a la 7 muestran el comportamiento térmico del calentador de aire a distintas longitudes para el día del año que muestra la temperatura media.

GRAFICA DE TO VS L

ZONA NORTE 1



— MEXICALI
Tm: día 17

—+— LA PAZ
Tm: día 268

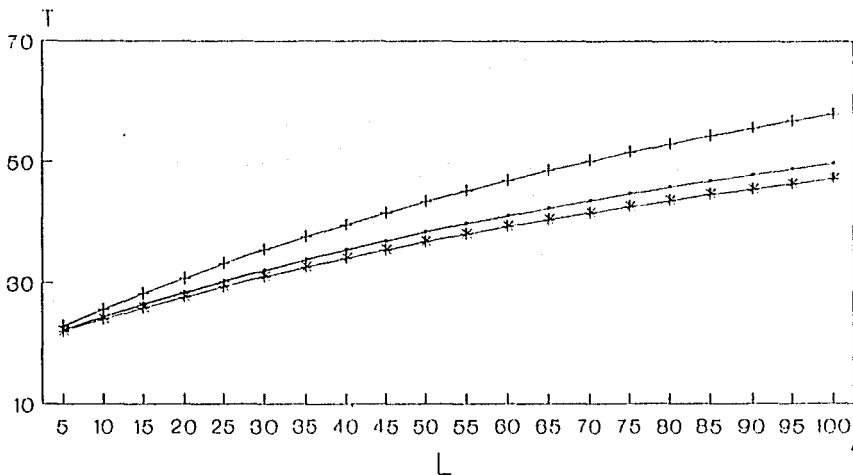
—*— HERMOSILLO
Tm: día 76

TO: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE, (°C)
L: LONGITUD DEL CALENTADOR, (m)

Fig 3. Calentador de Aire.

GRAFICA DE TO VS L

ZONA NORTE 2



--- SALTILLO
Tm: día 76

-+- CHIHUAHUA
Tm: día 268

- MONTERREY
Tm: día 288

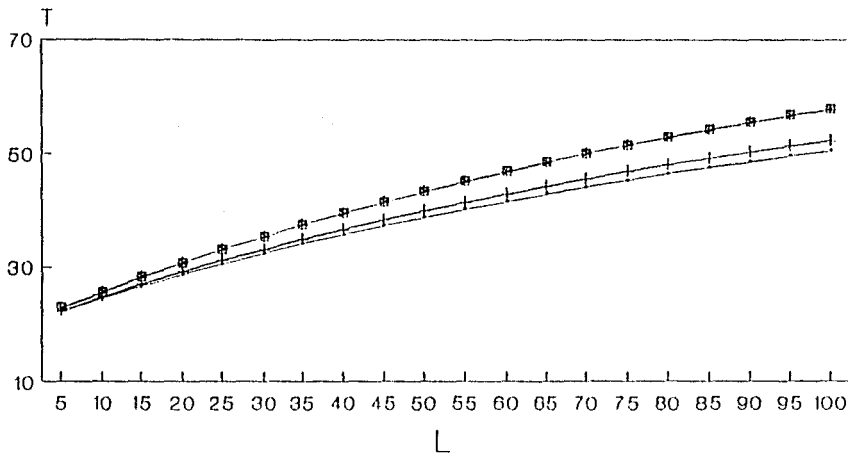
TO: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE, (°C)
L: LONGITUD DEL CALENTADOR, (m)

Fig. 4 Calentador de Aire

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

GRAFICA DE TO VS L

ZONA CENTRO



— SAN LUIS POTOSI
Tm: día 75

-|- D.F.
Tm: día 228

-*- LEON
Tm: día 268

-□- GUADALAJARA
Tm: día 198

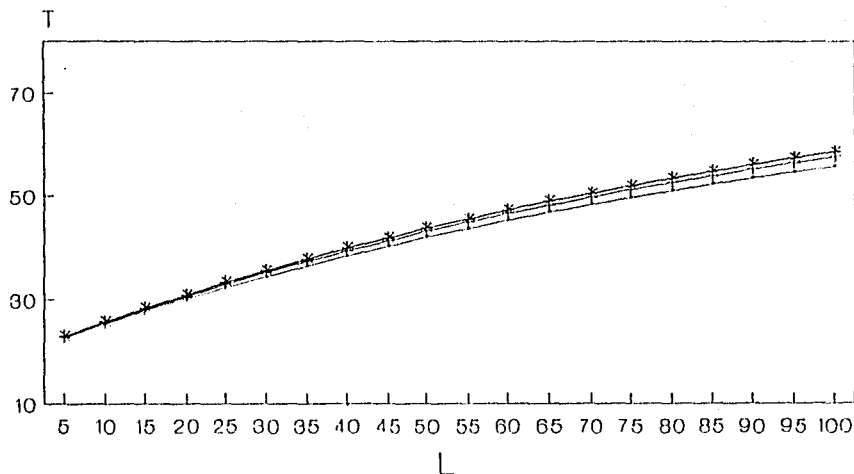
TO: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE, (°C)

L: LONGITUD DEL CALENTADOR, (m)

Fig 5 Calentador de Aire

GRAFICA DE T0 VS L

ZONA PACIFICO



--- TUXTLA GUTIERREZ
Tm: día 268

-|- OAXACA
Tm: día 198

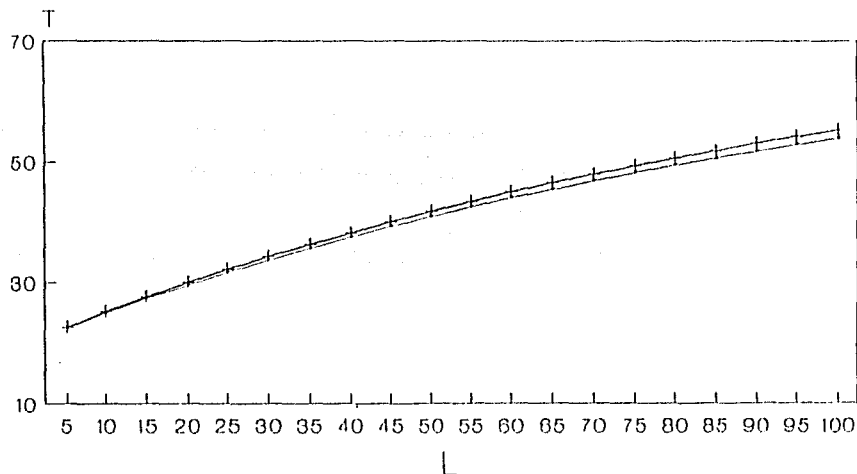
-|- ACAPULCO
Tm: día 17

T0: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE, (°C)
L: LONGITUD DEL CALENTADOR, (m)

Fig. 6 Calentador de Aire.

GRAFICA DE T0 VS L

ZONA GOLFO



— VERACRUZ Tm: día 162 -+ MERIDA Tm: día 268

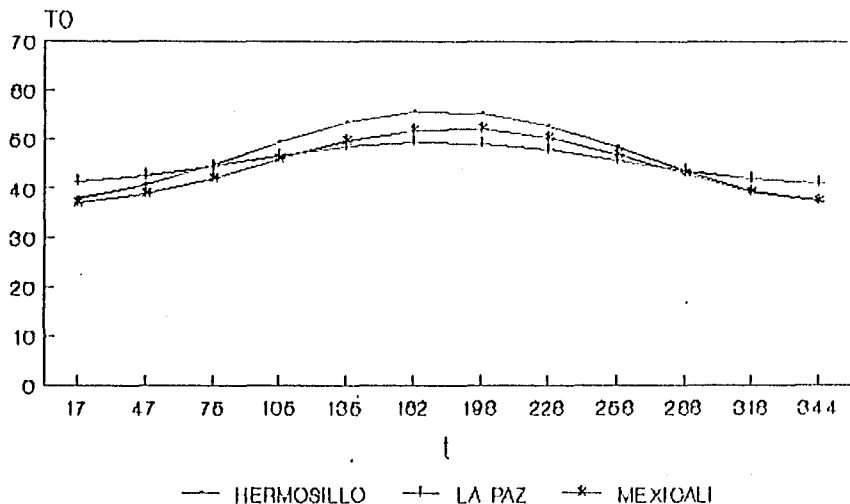
T0: TEMPERATURA DEL CALENTADOR, (°C)
L: LONGITUD DEL CALENTADOR, (m)

Fig.7 Calentador de Aire.

En las figuras 8 a la 12 se grafica la temperatura del aire contra el tiempo conservando una longitud de calentador constante e igual a 50 m.

GRAFICA DE TO VS t

ZONA NORTE 1

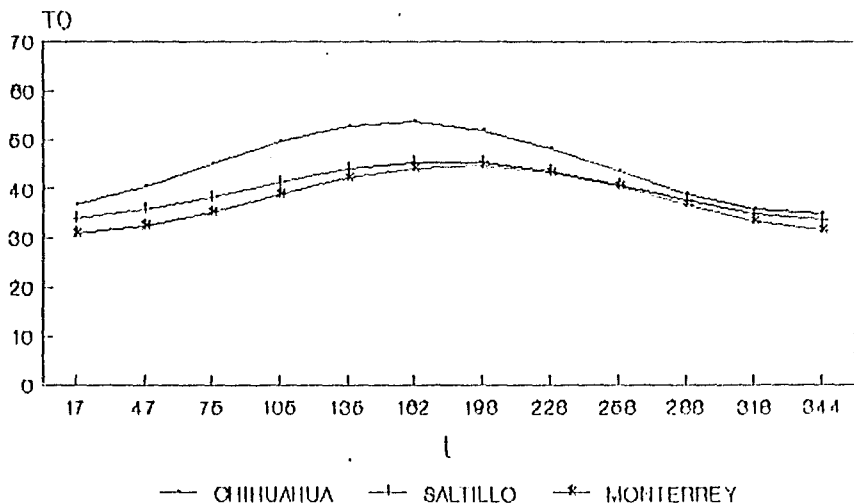


TO: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE. (°C)
 t: TIEMPO. (DÍAS)
 LA LONGITUD DEL CALENTADOR ES DE 50m

Fig. 8. Calentador de Aire.

GRAFICA DE T_0 VS t

ZONA NORTE 2

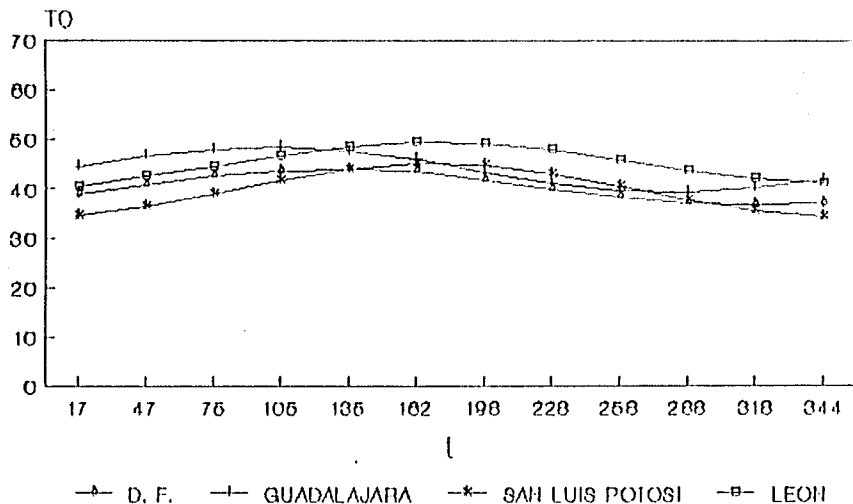


T_0 : TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE. ($^{\circ}$ C)
 t : TIEMPO, (DIAS)
 LA LONGITUD DEL CALENTADOR ES DE 50m

Fig.9. Calentador de Aire.

GRAFICA DE T₀ VS t

ZONA CENTRO

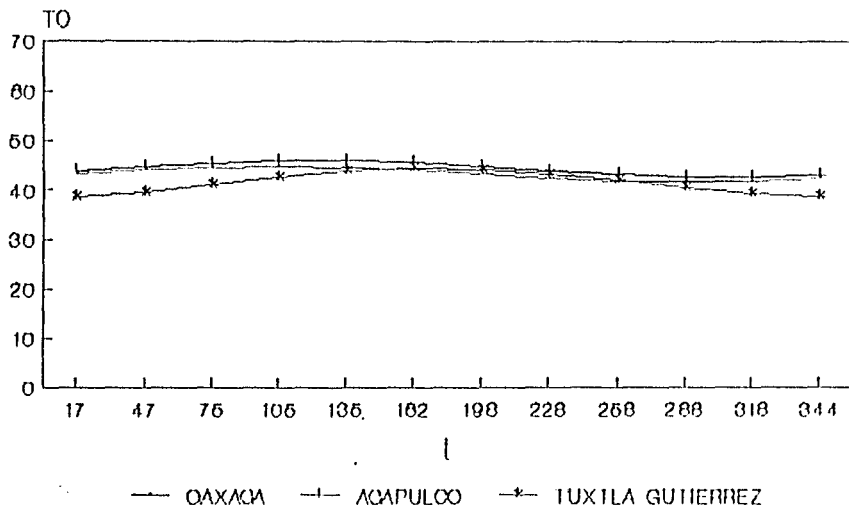


T₀: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE.(°C)
 t: TIEMPO, (DÍAS)
 LA LONGITUD DEL CALENTADOR ES DE 50m

Fig. 10. Calentador de Aire.

GRAFICA DE T₀ VS t

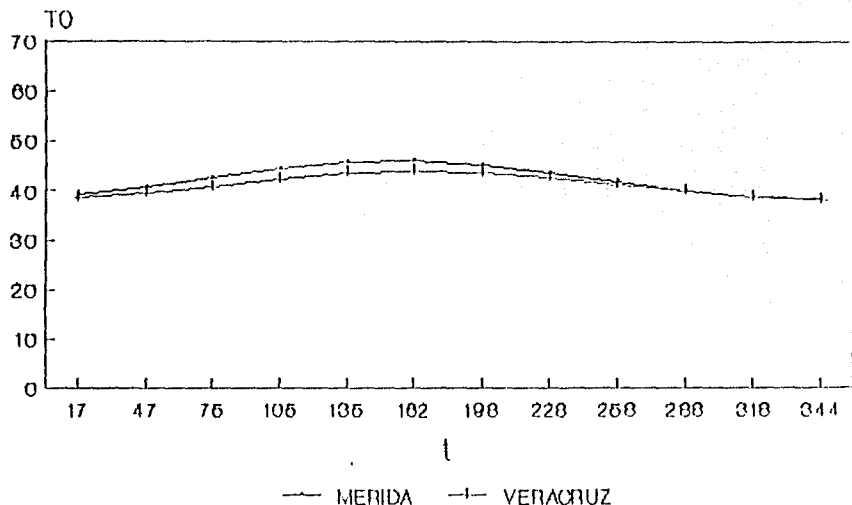
ZONA PACIFICO



T₀: TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE, (°C)
 t: TIEMPO, (DÍAS)
 LA LONGITUD DEL CALENTADOR ES DE 50m

Fig. 11. Calentador de Aire.

GRAFICA DE T_0 VS t ZONA GOLFO



T_0 : TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE, ($^{\circ}$ C)

t : TIEMPO, (DÍAS)

LA LONGITUD DEL CALENTADOR ES DE 60m

Fig. 12. Calentador de Aire.

```

10 REM CALCULO DE TS AIRE PARA CALENTADOR
20 DIM TP(12),DIA(12),Z(100),TA(100)
30 REM CONSTANTES DE CALCULO
40 HRPL=1239111:R=172800:ROCFE=5879.08:HF=261600:CF=1004.7:MP=271801:TF=20:W
=.01721:A1=.68173
50 REM DATOS DE CADA LUGAR
60 CLS:INPUT "LUGAR=":CIU$:INPUT "A=":AB:INPUT "B=":BB:INPUT "C=":CB:INPUT "G=":
G:INPUT "I=":I:INPUT "J=":J:A=AB*1E+07:B=BB*1E+07:C=CB*1E+07
70 REM CALCULO DDE CONSTANTES
80 K2=(HRPL*TPL+R*G*A*A1)/ROCFE:I4=(R*I*J*C*A1)/ROCFE:I1=(R*B*HRPL)/ROCFE:I3=(R*B*
I*B*A1)/ROCFE
90 B1=(I4*W+K2*K1)/(W*2+K1*2):C1=(I1*I4-K2*W)/(W*2+K1*2)
100 GOSUB 1000
110 FOR I=1 TO 12
120 PRINT:LPRINT CIU$:LPRINT"DIA":I:TP(I)=(K2/I1)+B1*SIN(W*DIA(I))+C1*COS(W*DIA(
I)):LPRINT "TP=":TP(I):PRINT
130 GOSUB 2000
140 NEXT I
150 INPUT "SE VA A HACER OTRO CALCULO? 'SI=1':SI:IF SI=1 THEN GOTO 50:ELSE END
1000 REM SUBRRUTINA PARA DATOS DE DIA PROMEDIO
1010 OPEN "I",#1,"DIAS.DAT"
1020 FOR K=1 TO 12
1030 INPUT #1,DIA(K)
1040 NEXT K:CLOSE #1:RETURN
2000 REM SUBRRUTINA PARA CALCULO DE TS DEL AIRE
2010 K1P=HF/(MP*CF)
2020 FOR Z=5 TO 100 STEP 5
2030 TA(Z)=(20-TP(I))*EXP(K1P*Z*-1)+TP(I)
2040 LPRINT "TA(":Z:)",TA(Z)
2050 NEXT Z:RETURN

```


Capítulo V

DESTILADOR

Uno de los dispositivos solares al que se le puede sacar mucho provecho es el destilador, pues su utilidad puede estar tanto en el uso doméstico como en el industrial ya que debido a su construcción es fácil de instalar y el lugar que ocupe depende de la cantidad de destilado que se desee obtener.

El comportamiento de este dispositivo se conocerá también haciendo un análisis térmico en el agua y en la placa. (fig. 1).

Balance en el agua:

$$-Q_{cagv} - Q_{eagv} - Q_{ragv} + Q_{cpag} + \bar{H}(1-\gamma_r)(1-\gamma_v)\gamma_{ag} = (dC_{pe})_{ag} \frac{dT_{ag}}{dt} \quad (1)$$

Balance en la placa:

$$-Q_{cpag} - Q_{cpa} + \bar{H}(1-\gamma_r)(1-\gamma_{ag})\gamma_p = (dC_{pe})_p \frac{dT_p}{dt} \quad (2)$$

Haciendo un ensamble agua-placa:

$$-Q_{cagv} - Q_{eagv} - Q_{ragv} - Q_{caga} + 1.01\bar{H}(1-\gamma_r)(1-\gamma_v) = (dC_{pe})_{ag} \frac{dT_{ag}}{dt} \quad (3)$$

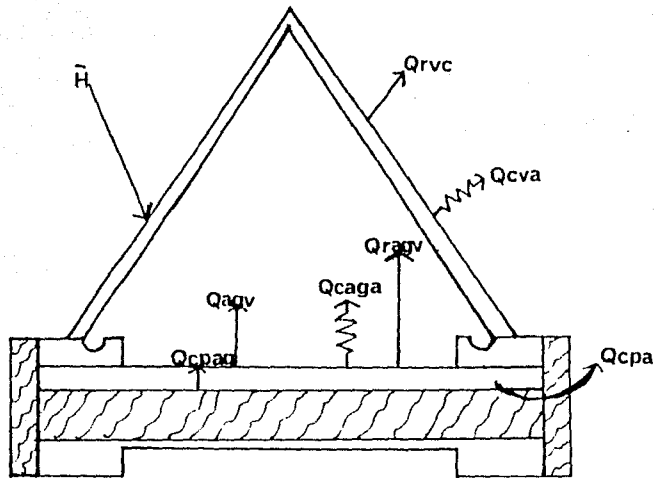


Fig.1 Esquema de un Destilador

siendo las ganancias de calor por medio de la radiación solar y las pérdidas por medio del calor por convección del agua al vidrio, por evaporación del agua al vidrio, por radiación del agua al vidrio y por conducción del agua al aire.

Los símbolos utilizados en la ecuación 3 son:

Q_{cagv} es el calor perdido por convección agua-vidrio,

Q_{eagv} es el calor perdido por evaporación agua-vidrio,

Q_{ragv} es el calor perdido por radiación agua-vidrio,

Q_{caga} es el calor perdido por conducción agua-aire,

$1.01\bar{H}(1-\gamma_r)(1-\gamma_v)$ es el calor ganado por radiación solar. Este término involucra el fenómeno de invernadero y la reflexión.

Los calores por conducción, convección y radiación involucrados en la ecuación 3 están definidos por la ecuación 16, 17 y 26 del capítulo II respectivamente. El calor por evaporación agua-

vidrio está definido de la siguiente forma (14):

$$Q_{eagv} = 0.013hc_{agv}(P_{ag}-P_v) \quad (4)$$

con esto la ecuación 3 queda:

$$- hc_{agv}(T_{ag}-T_v) - 0.013hc_{agv}(P_{ag}-P_v) - h_{ragv}(T_{ag}-T_v)$$

$$- K_b(T_{ag}-T_a) + 1.01\bar{H}(1-\gamma_r)(1-\gamma_v) = (dC_{pe})_{ag} \frac{aT_{ag}}{at} \quad (5)$$

$$\text{Sea} \quad P_{ag} = 293.3T_{ag} - 3955.5 \quad (6)$$

$$P_v = 293.3T_v - 3955.5 \quad (7)$$

Sustituyendo 6 y 7 en la ecuación 4:

$$Q_{eagv} = 0.013hc_{agv}293.3(T_{ag}-T_v) \quad (8)$$

sustituyendo 8 en 5 :

$$- hc_{agv}(T_{ag}-T_v) - 8.8129hc_{agv}(T_{ag}-T_v)$$

$$- h_{ragv}(T_{ag}-T_v) - K_b(T_{ag}-T_a)$$

$$+ 1.01\bar{H}(1-\gamma_r)(1-\gamma_v) = (dC_{pe})_{ag} \frac{aT_{ag}}{at} \quad (9)$$

Tomando en consideración las ecuaciones 43 y

44 del capítulo II y reordenando términos:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{ag}}{dt} + T_{ag} & \left[\frac{hc_{agv} + 8.8129hc_{agv} + hr_{agv} + K_b}{(dC_{pe})_{ag}} \right] \\ & = T_v \left[\frac{hc_{agv} + 8.8129hc_{agv} + hr_{agv}}{(dC_{pe})_{ag}} \right] \\ & + \left[\frac{K_b T_a + 1.01 H (1-\gamma_r) (1-\gamma_v)}{(dC_{pe})_{ag}} \right] \\ & + \left[\frac{K_b a r_t + 1.01 (1-\gamma_r) (1-\gamma_v) a r}{(dC_{pe})_{ag}} \right] \text{sen}(wt) \\ & + \left[\frac{b r_t K_b + 1.01 (1-\gamma_r) (1-\gamma_v) b r}{(dC_{pe})_{ag}} \right] \text{cos}(wt) \quad (10) \end{aligned}$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección se calcula con la ecuación 22 del capítulo II, y el de transferencia de calor por radiación se calcula con la ecuación 27 del mismo capítulo.

Simplificando la ecuación 10:

$$\frac{dT_{ag}}{dt} + T_{ag} K_1 = K_2 + K_3 \text{sen}(wt) + K_4 \text{cos}(wt) \quad (11)$$

su solución es:

$$T_{ag} = C_1 e^{-K_1 t} + \beta + \Gamma \text{sen}(wt) + \Omega \text{cos}(wt) \quad (12)$$

siendo:

$$\beta = \frac{K2}{K1} \quad (13)$$

$$\Gamma = \frac{K1K3+K4w}{w^2+K1^2} \quad (14)$$

$$\Omega = \frac{K1K4-K3w}{w^2+K1^2} \quad (15)$$

Para evaluar la Cte. α :

$$t = 0, T_{ag} = 17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Cte = 17 - \beta - \Omega \quad (16)$$

Sustituyendo 16 en 12:

$$T_{ag} = [17 - \beta - \Omega]e^{-K1t} + \beta + \Gamma \sin(\omega t) + \Omega \cos(\omega t) \quad (17)$$

Con la ecuación anterior se obtiene la temperatura que alcanza el agua dentro del destilador. Para obtener la cantidad de destilado es necesario obtener las temperaturas del agua, T_{ag} , durante el año y ya con estas volver a la ecuación 8 y calcular los calores de evaporación agua-vidrio también a lo largo del año. Dividiendo este Q_{agv} entre el calor latente de vaporización a cada T_{ag} se obtiene la cantidad de destilado, $Dest$.

Los resultados se muestran en las siguientes figuras en donde se grafica la cantidad de destilado contra el tiempo, para cada zona de la República en la que se está trabajando.

Los valores de los coeficientes de transferencia de calor calculados con las ecuaciones 22 y 27 del capítulo II son:

$$h_{cagv} = 2.124E5 \text{ J/m}^2\text{dia}^\circ\text{C}$$

$$h_{ragv} = 5.8727E5 \text{ J/m}^2\text{dia}^\circ\text{C}$$

Los valores constantes (14) son:

$$K_b = 1.728E5 \text{ J/m}^2\text{dia}^\circ\text{C}$$

$$\gamma_v = 0.01$$

$$\gamma_r = 0.03$$

$$d = 1000 \text{ kg/m}^3$$

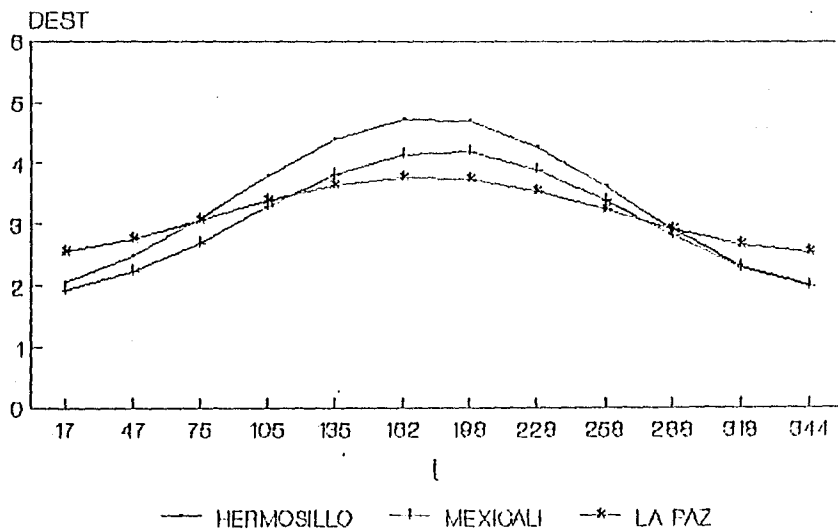
$$C_p(\text{ag}) = 4186.7 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$e(\text{ag}) = 0.01 \text{ m}$$

$$T_v = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

GRAFICA DE DEST VS t

ZONA NORTE 1

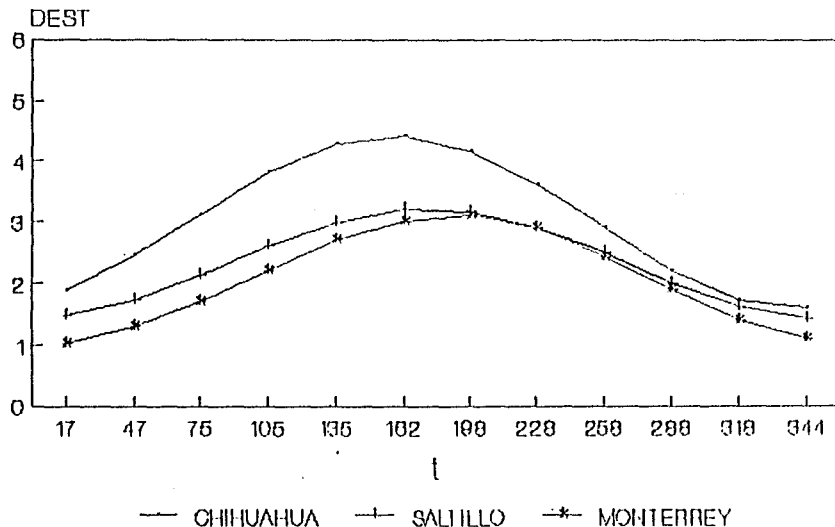


DEST: DESTILADO (kg/m² día)
t: TIEMPO, (días)

Fig. 2. Destilador.

GRAFICA DE DEST VS t

ZONA NORTE 2

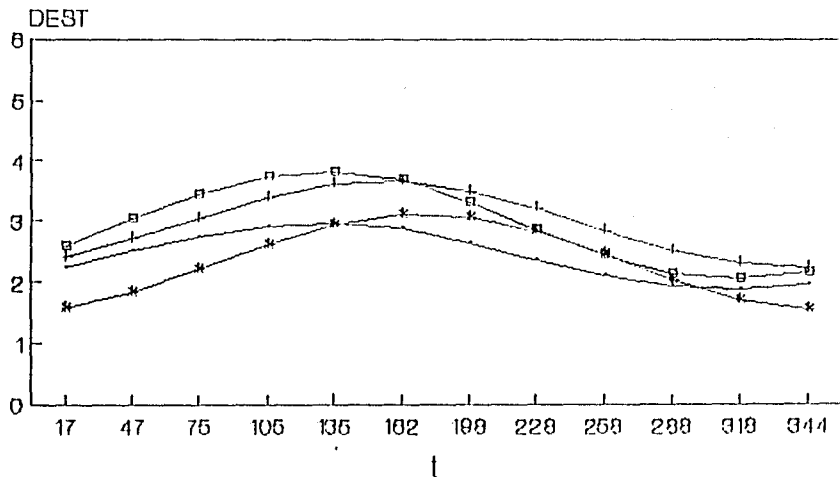


DEST: DESTILADO, (lg/m³día)
t: TIEMPO, (días)

Fig. 3. Destilador.

GRAFICA DE DEST VS t

ZONA CENTRO



— D. F. + LEON * SAN LUIS POTOSI □ GUADALAJARA

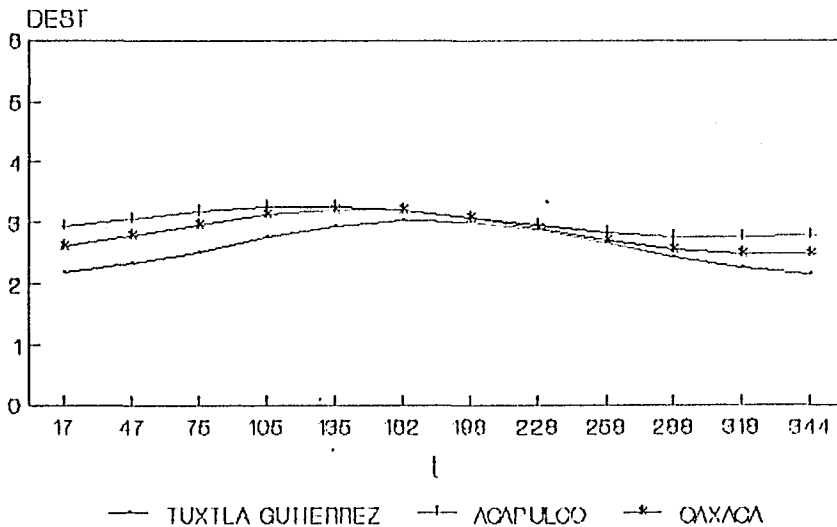
DEST: DESTILADO, (kg/m² día)

t: TIEMPO, (días)

Fig. 4. Destilador.

GRAFICA DE DEST VS t

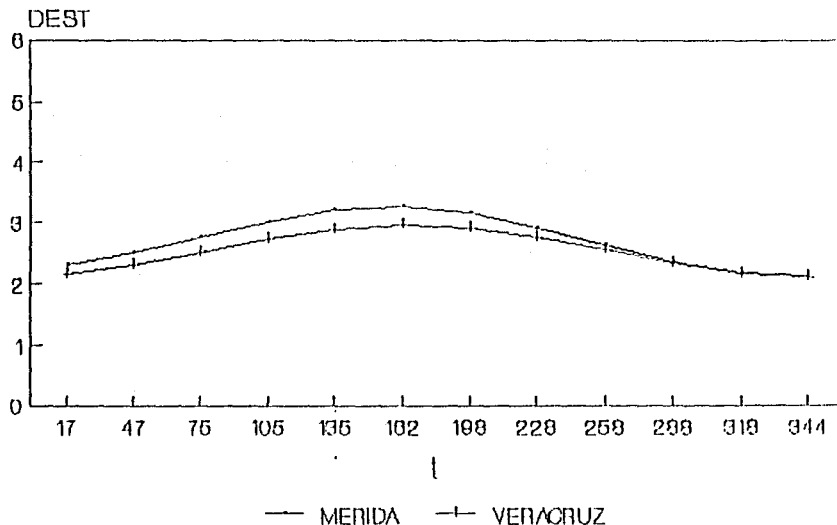
ZONA PACIFICO



DEST: DESTILADO, (kg/m² dfa)
t: TIEMPO, (días)

Fig. 5. Destilador.

GRAFICA DE DEST VS t ZONA GOLFO



DEST: DESTILADO, (kg/m³día)
t: TIEMPO, (días)

Fig. 6. Destilador.

```

10 REM CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA OBTENIDA EN EL DESTILADOR SOLAR
20 REM CONSTANTES DE CALCULO
30 CLS:HCVW=212400!;X1=809822!;HRWV=587270!;KB=172800!;A1=.88173;TV=30;CW=41867!;
W=.01721
40 REM INTRODUCCION DE DATOS DE CALCULO
50 DIM TW(12),DIA(12),QEWV(12),DEST(12),DT(12),CVAP(20),TEMP(20),LVAP(20)
60 INPUT "LUGAR=";CIU$:INPUT "A=";A:INPUT "B=";B:INPUT "C=";C:INPUT "G=";G:INPUT
"I=";I:INPUT "J=";J
70 REM CALCULO DE CONSTANTES
80 K1=(HCVW+X1+HRWV+KB)/CW
90 K2P=HCVW+X1+HRWV
100 K2=(TV*K2P+KB*G+A1*A)/CW
110 K3=(KB*I+A1*B)/CW
120 K4=(KB*J+A1*C)/CW
130 B0=(K4*W+K1*K3)/(W^2+K1^2)
140 C0=(K1*K4-K3*W)/(W^2+K1^2)
150 A0=K2/K1
160 GOSUB 1000
170 PRINT "TW          ", "DT          ", "Qewv          ":LPRINT CIU$
180 FOR K=1 TO 12
190 TW(K)=A0+B0*SIN(W*DIA(K))+C0*COS(W*DIA(K))
200 DT(K)=TW(K)-TV
210 QEWV(K)=X1*DT(K)
220 PRINT TW(K),DT(K),QEWV(K)
230 GOSUB 2000
250 DEST(K)=QEWV(K)/FB
260 LPRINT "DEST(";DIA(K);")=";DEST(K)
270 NEXT K
280 INPUT "SE VA A HACER OTRO CALCULO? 'SI'=1";SI:IF SI=1 THEN GOTO 60 :ELSE END
1000 REM DIA PROMEDIAD
1010 OPEN "I",#1,"DIAP.DAT"
1020 FOR K=1 TO 12
1030 INPUT #1,DIA(K)
1040 NEXT K:CLOSE #1:RETURN
2000 REM CALOR DE VAPORIZACION AGUA
2010 OPEN "I",#1,"CVAP.DAT"
2020 FOR I=1 TO 20
2030 INPUT #1,TEMP(I),LVAP(I)
2040 NEXT I:CLOSE #1
2050 AB=INT(TW(K));BB=TW(K)-AB
2060 FOR I=1 TO 20:IF AB=TEMP(I) THEN GOTO 2080
2070 NEXT I
2080 CVAP(I)=LVAP(I);CB=CVAP(I)-LVAP(I+1);DB=1-BB;EB=DB*CB;FB=LVAP(I+1)+EB
2090 RETURN

```

Capítulo VI

ESTANQUE

Los tres dispositivos solares que fueron analizados en los capítulos anteriores son sistemas en los que de alguna manera la energía solar se transforma en calor que se transfiere a un fluido para su aprovechamiento, sin embargo, ninguno de ellos incluye en si mismo un almacén de energía.

Un estanque solar no convectivo es un dispositivo que además de ser un colector de energía también actúa como un almacén térmico. Estos estanques contienen una solución salina que es precisamente en la que puede almacenarse la energía. La forma en que trabajan los estanques puede explicarse considerando que no hay una distribución uniforme de la sal, sino que ésta aumenta con la temperatura por lo que se evita la convección, ya que las sales disueltas aumentan la densidad y esto hace que la temperatura crezca hacia la zona de mayor densidad. Por lo tanto el gradiente de densidad hace que se desarrolle un gradiente de temperatura.

Para explicar mejor como es un estanque (fig.

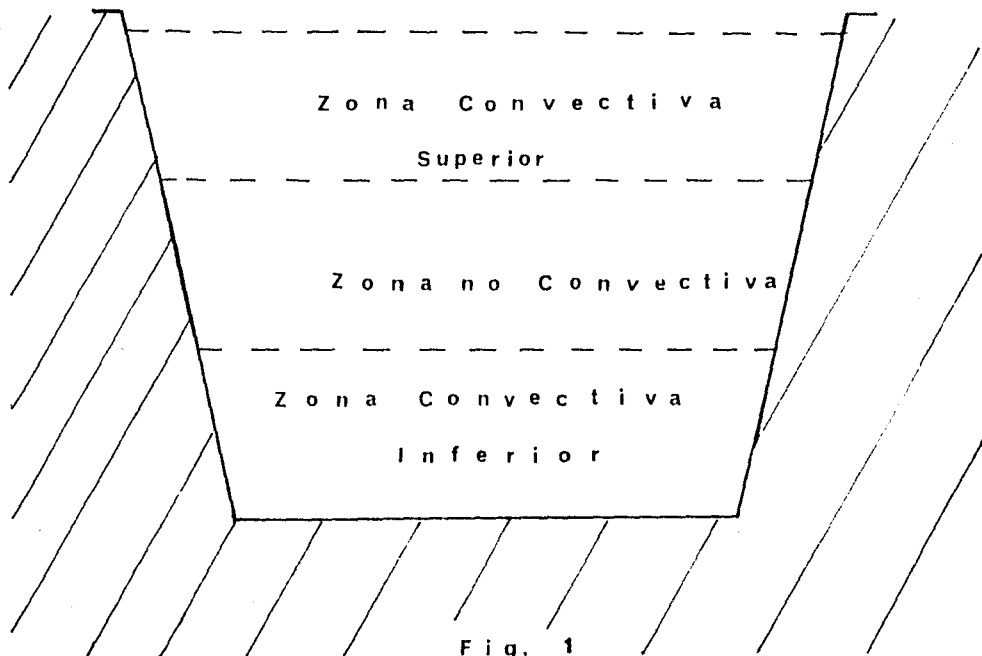


Fig. 1
Esquema de un Estanque

1), se puede decir que existen 3 regiones: la primera es conocida como zona convectiva superior, aquí la solución salina se encuentra muy diluida; la segunda es la zona no convectiva, y aquí es donde se desarrollan los gradientes de temperatura y de densidad; la tercera zona también es convectiva, aunque aquí la densidad y la temperatura son mayores ya que la zona intermedia la aísla de la atmósfera.

Para medir la cantidad de radiación que recibe la zona inferior se debe tomar en cuenta que de la radiación que llega a la superficie del agua una parte penetra al fondo del estanque y otra se refleja. La que entra se va atenuando con la profundidad.

Para medir ésta atenuación se propuso (4) la siguiente función:

$$h(x) = a - b \ln x \quad (1)$$

donde: $a = 0.73$ y $b = 0.08$, cuando x está dada en centímetros.

x está dada por:

$$x = z \sec \theta r = z / \cos \theta r \quad (2)$$

donde: z es la profundidad,

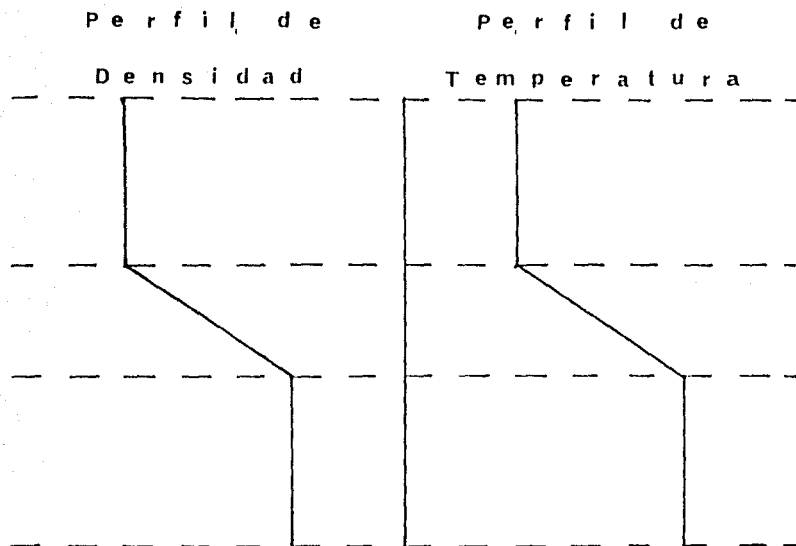


Fig.2 Comportamiento de la densidad y la temperatura en las tres zonas del estanque

θ_r es el ángulo de refracción.

Cuando θ está dada en metros $a = 0.36$. Aplicando 2 a 1 tenemos:

$$h(z) = a - b \ln z / \cos \theta_r \quad (3)$$

La cantidad de energía en forma de calor que se alcanza en la zona inferior del estanque se va a conocer por medio de un balance de energía.

De ref. (8) se tiene que:

$$\begin{aligned} dC_p(z_3-z_2) \frac{dT_o}{dt} + K \frac{T_o-T_a}{z_2-z_1} \\ - K_t \frac{T_g-T_o}{\Delta z_2} = \bar{H}(1-S^n)h(z_2) \end{aligned} \quad (4)$$

donde: z es la profundidad; los subíndices indican la zona que representan.

T_a es la temperatura del aire ambiente,

T_g es la temperatura del suelo,

K es la conductividad térmica de la solución salina,

K_t es la conductividad térmica del suelo,

S^n es la reflejancia, que es la cantidad de radiación que se refleja hacia el medio ambiente,

z_2 es la distancia al sumidero de calor en el suelo.

T_0 es la temperatura de la zona convectiva inferior.

Se llegó a la ecuación anterior asumiendo que la temperatura en la zona superior es igual a la temperatura ambiente y tomando en cuenta que las pérdidas de calor en la zona convectiva inferior a la superior son a través de la zona no convectiva.

Para fines prácticos se recomienda (8) que el principio de año se inicie a partir del 21 de Junio; por esta razón se debe hacer un cambio de variable en las ecuaciones analíticas de la radiación solar y de la temperatura ambiente (43 y 44 del capítulo II) donde ahora la variable tiempo (t) va a llevar el símbolo γ . Las ecuaciones quedan:

$$\overline{H} = \widehat{H} + ar \sin(w\gamma) + br \cos(w\gamma) \quad (5)$$

$$T_a = \overline{T}_a + art \sin(w\gamma) + brt \cos(w\gamma) \quad (6)$$

Las nuevas variables son:

γ es el tiempo, en días, contados a partir del 21 de Junio,

ω es el número de días, contando a partir del 21 de

Junio, en el que el estanque se expuso por primera vez a la radiación solar.

Sustituyendo 5 en 4 y dividiendo todo en dCp , tenemos:

$$\begin{aligned} & (z_3-z_2) \frac{dT_o}{dy} + \alpha t \frac{(T_o-T_a)}{(z_2-z_1)} - Kt \frac{(T_g-T_o)}{dCp \Delta z_2} \\ &= \frac{(\hat{H} + a_r \sin(\omega y) + b_r \cos(\omega y)) (1-\delta^n) h(z_2)}{dCp} \end{aligned} \quad (7)$$

donde $\alpha t = K/dCp =$ difusividad térmica.

Si $d_1 = z_3-z_2$ y $z_1 = z_2-z_1$

$$\begin{aligned} & \frac{dT_o}{dy} + \alpha t \frac{(T_o-T_a)}{d_1 \Delta z_1} - Kt \frac{(T_g-T_o)}{dCp \Delta z_2 d_1} \\ &= \frac{(\hat{H} + a_r \sin(\omega y) + b_r \cos(\omega y)) (1-\delta^n) h(z_2)}{dCp d_1} \end{aligned} \quad (8)$$

Sustituyendo 6 en 8:

$$\begin{aligned} & \frac{dT_o}{dy} + \frac{\alpha t T_o}{d_1 \Delta z_1} - \alpha t \frac{(\bar{T}_a + a_r t \sin(\omega y) + b_r t \cos(\omega y))}{d_1 \Delta z_1} \\ &= \frac{(T_g-T_o)}{dCp \Delta z_2 d_1} = \frac{(\hat{H} + a_r \sin(\omega y) + b_r \cos(\omega y)) (1-\delta^n) h(z_2)}{dCp d_1} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{Si} \quad h' = \frac{(1-\delta^n) h(z_2)}{dCp d_1} \quad (10)$$

y reagrupando términos:

$$\begin{aligned} & \frac{dT_o}{dy} + \frac{atT_o}{d1\Delta z1} + \frac{KtT_o}{dCp\Delta z2d1} \\ &= \frac{KtT_g}{dCp\Delta z2d1} + h'(H+ar \operatorname{sen}(wy)+brt \operatorname{cos}(wy)) \\ & \quad + at \frac{(\bar{T}_a+art \operatorname{sen}(wy)+brt \operatorname{cos}(wy))}{d1\Delta z1} \end{aligned} \quad (11)$$

Reordenando términos queda la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dT_o}{dy} + qT_o = A1 + B1\operatorname{sen}(wy) + C1\operatorname{cos}(wy) \quad (12)$$

donde:

$$q = \frac{at}{d1\Delta z1} + \frac{Kt}{dCp\Delta z2d1} \quad (13)$$

$$A1 = \frac{KtT_g}{dCp\Delta z2d1} + \widehat{H}h' + \frac{at\bar{T}_a}{d1\Delta z1} \quad (14)$$

$$B1 = h'ar + \frac{artat}{d1\Delta z1} \quad (15)$$

$$C1 = h'br + \frac{brtat}{d1\Delta z1} \quad (16)$$

La solución de la ecuación 12 es:

$$T_o = Cte e^{-q\gamma} + \pi + \beta \sin(\omega\gamma) + \Gamma \cos(\omega\gamma) \quad (17)$$

Tomando la condición inicial:

$$\gamma = 0, T_o = T_e$$

entonces:

$$Cte = \frac{T_e - \pi - \beta \sin(\omega 0) - \Gamma \cos(\omega 0)}{e^{-q 0}} \quad (18)$$

Por lo tanto la ecuación 17 queda:

$$T_o = \pi + \beta \sin(\omega\gamma) + \Gamma \cos(\omega\gamma) + (T_e - \pi - \beta \sin(\omega 0) - \Gamma \cos(\omega 0)) e^{q\gamma - q\gamma} \quad (19)$$

donde:

$$\pi = \frac{A1}{q} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{C1w + qB1}{w^2 + q^2} \quad (21)$$

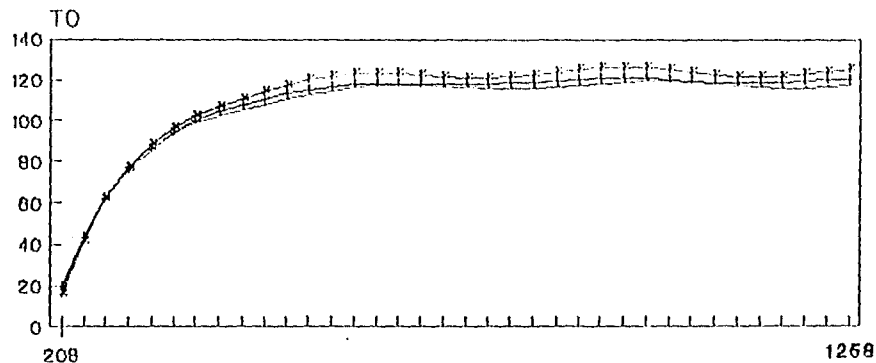
$$\Gamma = \frac{C1q - B1w}{w^2 + q^2} \quad (22)$$

La ecuación 19 nos da la temperatura de la zona convectiva inferior a lo largo del tiempo cuando la radiación solar se va almacenando sin que haya extracción de salmuera caliente. Para el estanque

solar es recomendable que se tomen periodos de tiempo mayores a los tomados en los dispositivos anteriores (1 año), por lo que se va a tomar un lapso de 3 años.

Las figuras 3, 4, 5, 6 y 7 muestran el comportamiento térmico del estanque durante un periodo de tres años, en los lugares de la República que se seleccionaron.

GRAFICA DE T_0 VS t ZONA NORTE 1 (SIN EXTRACCION)

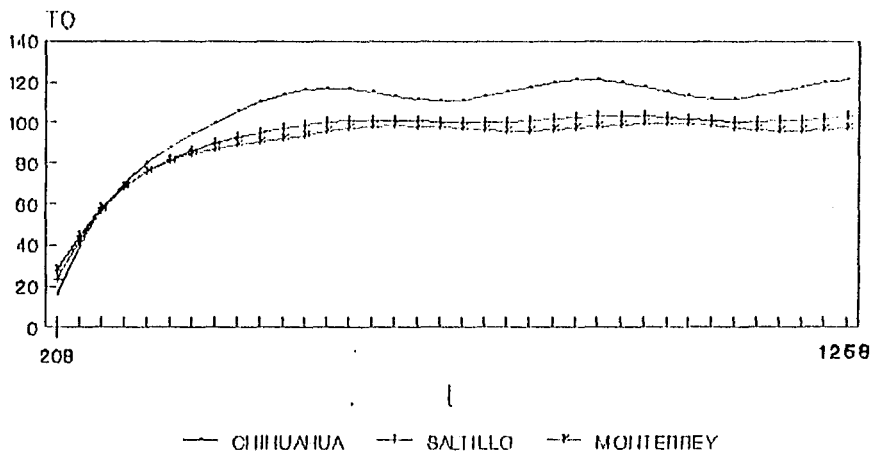


— MEXICALI —+— LA PAZ —x— HERMOSILLO

T_0 : TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA
INFERIOR, ($^{\circ}$ C).
 t : TIEMPO, (DIAS).

Fig. 3. Estanque.

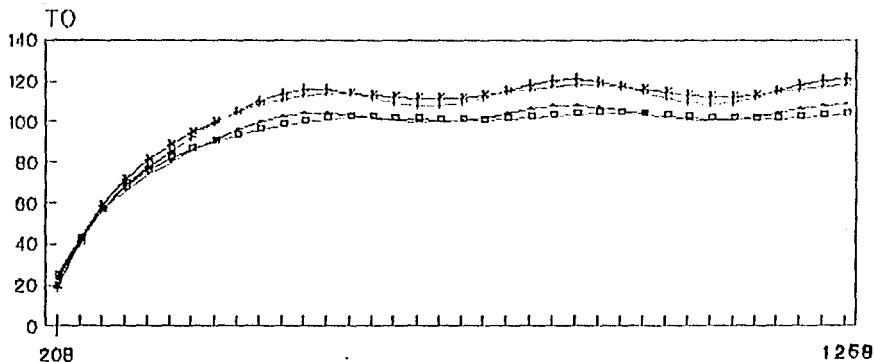
GRAFICA DE T_0 VS t ZONA NORTE 2 (SIN EXTRACCION)



T_0 : TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA
INFERIOR, ($^{\circ}$ C).
 t : TIEMPO, (DIAS).

Fig. 4. Estanque.

GRAFICA DE T_0 VS t ZONA CENTRO (SIN EXTRACCION)

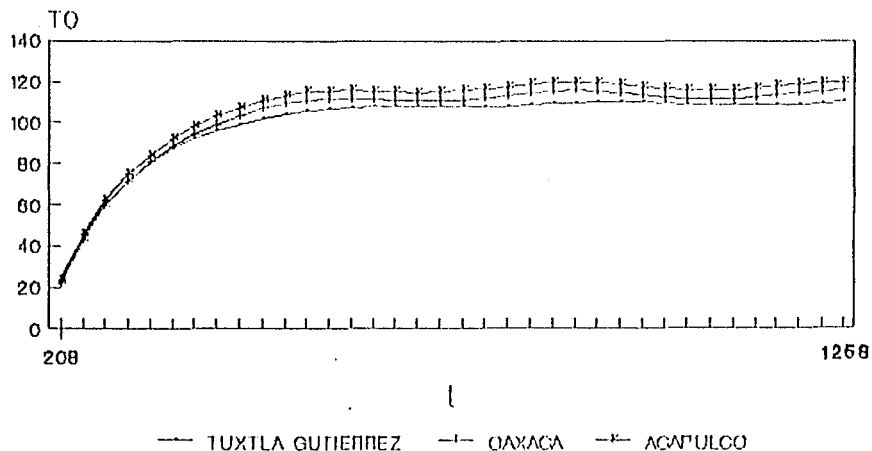


—•— D.F. -+- GUADALAJARA -x- LEON -□- SAN LUIS POTOSI

T_0 : TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA
INFERIOR, ($^{\circ}$ C).
 t : TIEMPO, (DIAS).

Fig. 5. Estanque.

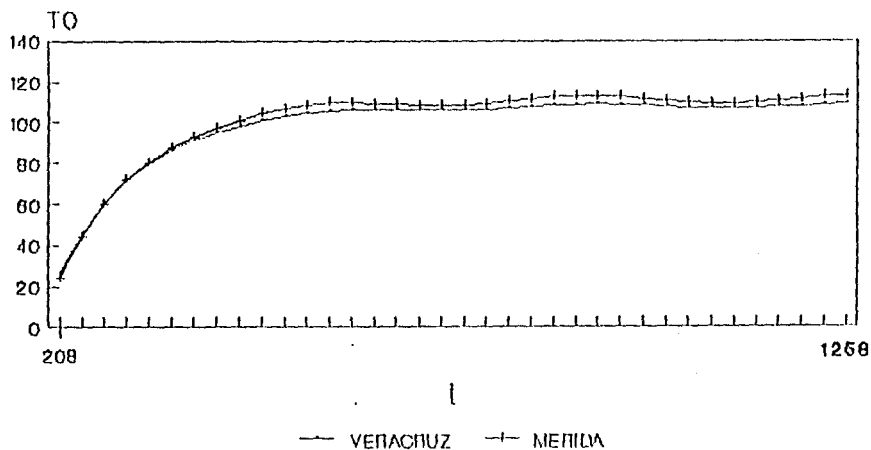
GRAFICA DE T_0 VS t ZONA PACIFICO (SIN EXTRACCION)



T_0 : TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA
INFERIOR, (°C).
 t : TIEMPO, (DÍAS).

Fig 6 Eslanque

GRAFICA DE T_0 VS t ZONA GOLFO (SIN EXTRACCION)



T_0 : TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA
INFERIOR, (°C).
 t : TIEMPO, (DIAS).

Fig. 7. Estanque.

Con la ecuación 19 se obtiene la temperatura de la zona convectiva inferior, pero de los resultados obtenidos se observa que en esta zona se alcanzan temperaturas mayores a la temperatura de ebullición de la solución salina, por lo que es necesario extraer alguna cantidad de energía en esta zona.

Para evaluar esta extracción de energía se le agrega un nuevo término a la ecuación 7:

$$\begin{aligned} & (z_3-z_2) \frac{dT_o}{dy} + at \frac{(T_o-T_a)}{(z_2-z_1)} - Kt \frac{(T_g-T_o)}{dCp\Delta z_2} \\ & = \frac{(H+ar \operatorname{sen}(wy)+br \operatorname{cos}(wy))(1-S^{11})h(z_2)}{dCp} \\ & - \frac{\%H+\%ar \operatorname{sen}(wy)+\%br \operatorname{cos}(wy)}{dCp} \end{aligned} \quad (23)$$

Reagrupando términos y tomando en cuenta la ecuación 6 y la ecuación 10, tenemos:

$$\begin{aligned} & \frac{dT_o}{dy} + T_o \left[\frac{at}{d1\Delta z_1} + \frac{Kt}{dCp\Delta z_2 d1} \right] \\ & = (h'\hat{A} - \frac{\% \hat{A}}{dCpd1}) + \frac{at\bar{T}_a}{d1\Delta z_1} + (h'ar + \frac{atart}{d1\Delta z_1} - \frac{\%ar}{dCpd1}) \operatorname{sen}(wy) \\ & + (h'br + \frac{atbrt}{d1\Delta z_1} - \frac{\%br}{dCpd1}) \operatorname{cos}(wy) + \frac{KtT_g}{dCp\Delta z_2 d1} \end{aligned} \quad (25)$$

Agrupando:

$$\frac{dT_0}{dy} + qT_0 = A_1 + B_1 \text{sen}(wy) + C_1 \text{cos}(wy) \quad (25)$$

donde:

$$q = \frac{\alpha t}{d_1 \Delta z_1} + \frac{Kt}{dCp \Delta z_2 d_1} \quad (26)$$

$$A_1 = h' \hat{H} - \frac{\% \hat{H}}{dCp d_1} + \frac{Kt T_g}{dCp \Delta z_2 d_1} + \frac{\alpha \bar{T}_a}{d_1 \Delta z_1} \quad (27)$$

$$B_1 = h' a r + \frac{\alpha t a r t}{d_1 \Delta z_1} - \frac{\% a r}{dCp d_1} \quad (28)$$

$$C_1 = h' b r + \frac{\alpha t b r t}{d_1 \Delta z_1} - \frac{\% b r}{dCp d_1} \quad (29)$$

La solución a la ecuación 25 queda:

$$T_0 = Cte e^{-qy} + \pi + \beta \text{sen}(wy) + \gamma \text{cos}(wy) \quad (30)$$

Si $\gamma = \pi$, $T_0 = T_e$

$$T_0 = \pi + \beta \text{sen}(wy) + \gamma \text{cos}(wy)$$

$$+ [T_e - \pi - \beta \text{sen}(w\phi) - \gamma \text{cos}(w\phi)] e^{q\phi} e^{-qy} \quad (31)$$

donde:

$$\pi = \frac{A_1}{q} \quad (32)$$

$$\beta = \frac{C1w + gE1}{w^2 + q^2} \quad (33)$$

$$\Gamma = \frac{C1g - B1w}{w^2 + q^2} \quad (34)$$

Con la ecuación 31 se calculan las temperaturas de la zona convectiva inferior con extracción de energía. Las figuras 8, 9, 10, 11 y 12 son las gráficas correspondientes a las diferentes zonas seleccionadas.

Para realizar los cálculos se utilizaron las siguientes constantes (14):

$$Kt = 8.294E4 \text{ J/mdia}^\circ\text{C}$$

$$K = 5.3E4 \text{ J/mdia}^\circ\text{C}$$

$$d = 1099 \text{ kg/m}^3$$

$$Cp = 3.572E3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$z1 = 0.2 \text{ m}$$

$$z2 = 1.2 \text{ m}$$

$$z3 = 3.0 \text{ m}$$

$$z2 = 8.2 \text{ m}$$

$$sn = 0.03$$

$$\theta r = 20.74^\circ$$

$T_g = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_e = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

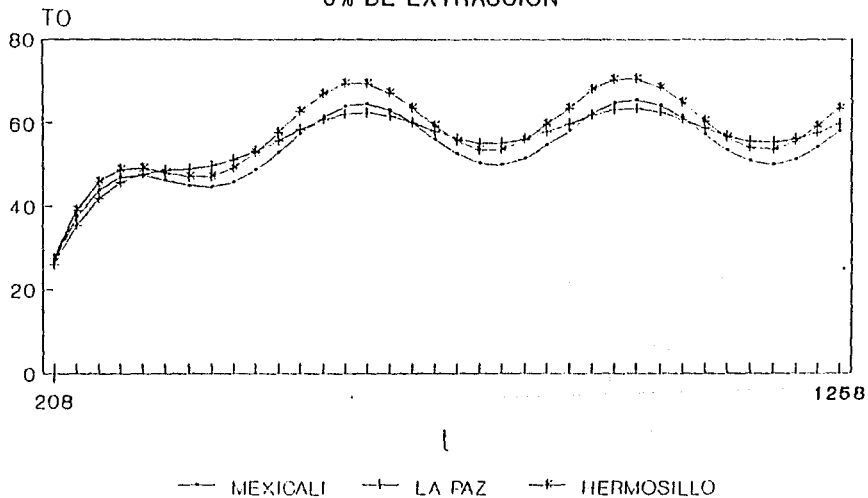
$h(z_2) = 0.1704334$

El porcentaje de extracción fue del 5%.

GRAFICA DE T0 VS t

ZONA NORTE 1

5% DE EXTRACCION



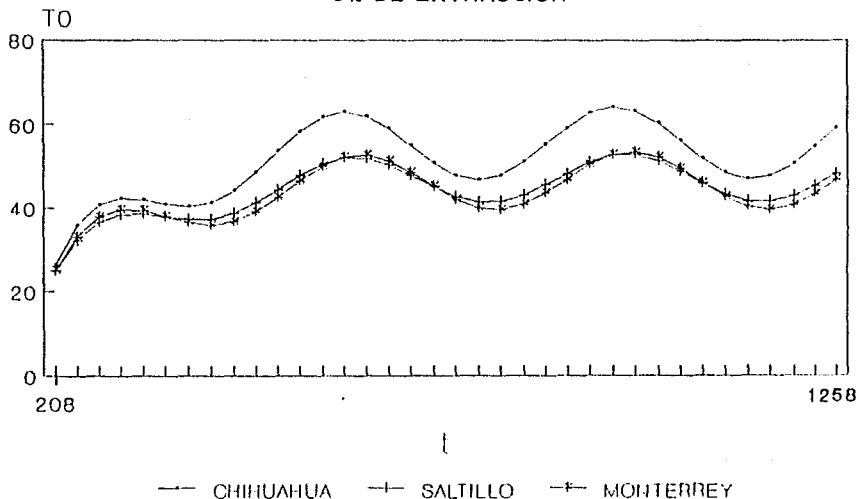
T0: TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA
INFERIOR, (°C).
t: TIEMPO, (DIAS).

Fig. 8 Estanque.

GRAFICA DE TO VS t

ZONA NORTE 2

5% DE EXTRACCION



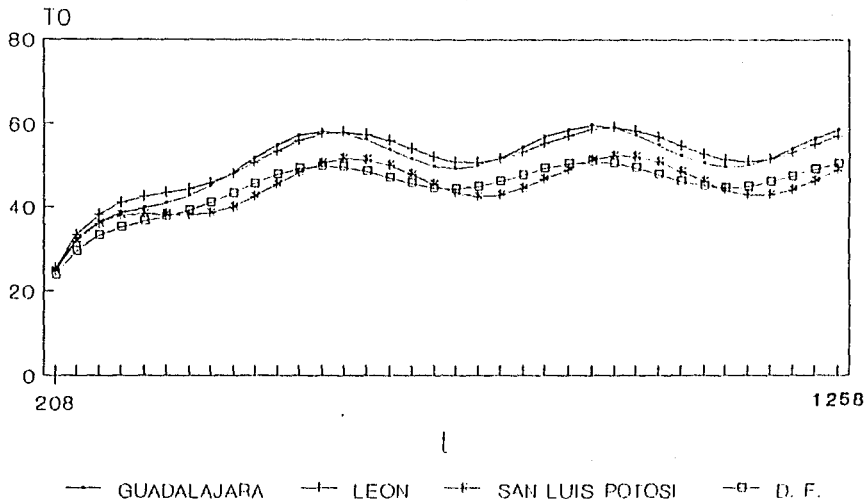
TO: TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA
INFERIOR, (°C).
t: TIEMPO, (DIAS).

Fig. 9 Estanque.

GRAFICA DE T_0 VS t

ZONA CENTRO

5% DE EXTRACCION



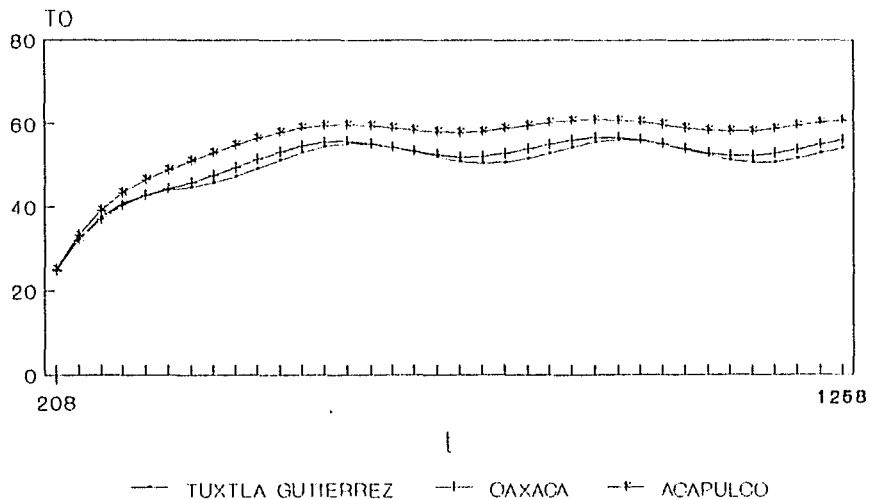
T_0 : TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA
INFERIOR, ($^{\circ}$ C).
 t : TIEMPO, (DIAS)

Fig. 10 Estanque.

GRAFICA DE T0 VS t

ZONA PACIFICO

5% DE EXTRACCION



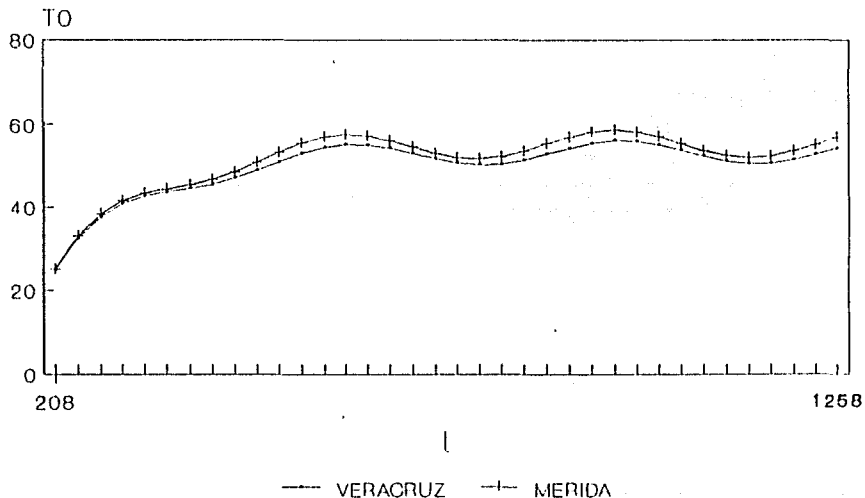
T0: TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA INFERIOR, (°C).
t: TIEMPO, (DIAS).

Fig. 11 Estanque.

GRAFICA DE T0 VS t

ZONA GOLFO

5% DE EXTRACCION



T0: TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA
INFERIOR, (°C).
t: TIEMPO, (DIAS).

Fig. 12 Estanque.

```

10 REM CALCULO DE LA ZONA CONVECTIVA INFERIOR
20 REM (SIN EXTRACCION DE ENERGIA)
30 REM CONSTANTES DE CALCULO
40 I=53000;ALF=.0135;RO=1099;CF=2572;TE=20;KT=82940;DZ1=1;DZ2=0.2;D=1.3;TG=15
4W=.01721;HZ=.176434;ROL=.03;E=190
50 DIM T0(36),TAO(36)
60 REM CALCULO DE VALORES CONSTANTES EN GENERAL
70 HF=(1-ROL)*HZ/(RO*CF*D)
80 ALF=(ALT/(D*DZ1))*(1/(RO*CF*D*DZ2))
90 REM VALORES CONSTANTES DE LAS ECUACIONES ANALITICAS DE RADIACION Y TEMPERATUR
A
100 CLS:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT TAB(22)"VALORES DE RADIACION (*10^-7)":INF
UT "CIUDAD: ";CIUD:INPUT "NOMBRE DEL ARCHIVO: ";AR#:INPUT "HP=";AB:INPUT "at=";B
B:INPUT "bt=";CB:A=AB*1E+07;P=BB*1E+07;C=CB*1E+07
110 PRINT:PRINT:PRINT TAB(22)"VALORES DE TEMPERATURA AMBIENTE":INPUT "Tamb=";IG:IN
PUT "art=";I:INPUT "brt=";J
120 REM CALCULO DE VALORES CONSTANTES PARA CADA LUGAR
130 A1=(I*TIG)/(RO*CF*D*DZ2)+(A*HF)+(ALT*G)/(D*DZ1);B1=(B*HF)+((I*ALT)/(D*D
Z1))
140 PI=A1/ALF;BETA=(D1*W+ALF*B1)/(W^2+ALF^2);GAMA=(D1*ALF-B1*W)/(W^2+ALF^2);TCE=
(TE-PI-BETA*SIN(W*E)-GAMA*COS(W*E))*EXP(ALF*E)
150 CLS:PRINT:PRINT:PRINT TAB(20)"ECUACION DE T0 PARA ";CIUD#:PRINT:PRINT:PRINT T
AB(20)"T0= ";D1: " + ";BETA: "SEN(W*TAO) + ";GAMA: "COS(W*TAO) + ";TCE: " * E^(-ALFA*
TAO)"
160 GOSUB 1000
170 GOSUB 2000
180 GOSUB 3000
190 INPUT "SE VA A HACER OTRO CALCULO (SI=1)=";SI:IF SI=1 THEN GOTO 90
200 END
1000 REM SUBROUTINA PARA DATOS DE TIEMPO
1010 OPEN "I",#1,"B:TAO.DAT"
1020 FOR I=1 TO 36
1030 INPUT #1,TAO(I)
1040 NEXT I:CLOSE #1:RETURN
2000 REM SUBROUTINA DE CALCULO DE T0
2010 FOR I=1 TO 36
2020 T0(I)= PI+BETA*SIN(W*TAO(I))+GAMA*COS(W*TAO(I))+TCE*EXP(ALF*TAO(I)*-1)
2030 PRINT "T0(";TAO(I);)=" ";T0(I)
2040 NEXT I:RETURN
3000 REM SUBROUTINA DE INTRODUCCION DE RESULTADOS A ARCHIVO
3010 OPEN "O",#1,AR#
3020 FOR I=1 TO 36
3030 PRINT #1,T0(I)
3040 NEXT I:CLOSE #1:RETURN

```



```

10 REM CALCULO DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA CONVECTIVA
20 REM INTERIOR (CON EXTRACCION DE ENERGIA)
30 CLS:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT TAB(32)"ESTACION SOLAR"
40 REM VALORES CONSTANTES
50 I=5.00001:RO=1.089:CF=2572:(ALT+.0135:TE+20):T=209400:(C1=1:CC=8.2:DI=1.8:T6=1
5:W=.01721:HCZ=.170434:RCL=.03:EE=130
60 DIM TAO(36),T0(36),TOM(36),TOL(36),TOH(36)
70 REM CALCULO DE VALORES CONSTANTES
80 HF=(C1-ROCL*HCZ)/(RO*CF*I)
90 P=(ALT/(DI*DI))+(C1/(RO*CF*DI))
100 INPUT "ZONA A TRABAJAR: ";AA:INPUT "NUMERO DE ESTADOS=":N:INPUT "NOMBRE DEL
ARCHIVO: ";AR:
110 REM VALORES DE RADIACION Y TEMPERATURA AMBIENTE
120 FOR R=1 TO N
130 CLS:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT TAB(32)" ZONA ";AA:PRINT:PRINT:PRINT TAB(32)" E
STADO ";R
140 PRINT:PRINT:PRINT TAB(20)"VALORES DE RADIACION(+10 -7)":PRINT:INPUT "H=":AD:
INPUT "a=":AB:INPUT "b=":CB:AA=AB*1E+07:B=BB*1E+07:C=CB*1E+07:INPUT "CANTIDAD D
E EXTRACCION=":FE
150 PRINT:PRINT:PRINT TAB(20)"VALORES DE TEMPERATURA AMBIENTE":PRINT:INPUT "T="
:G:INPUT "a=":I:INPUT "b=":J
160 REM CALCULO DE VALORES CONSTANTES PARA CADA CIUDAD
170 A1=A*(HF+(FE/(RO*CF*DI)))+(DI*T6)/(RO*CF*DI)+(ALT*G)/(I*I*DI)
180 B1=H*B*((ALT*I)/(DI*DI))-((F*B)/(RO*CF*DI))
190 C1=H*C*((ALT*I)/(DI*DI))-((F*C)/(RO*CF*DI))
200 P1=A1/D:ETA=(C1*W*B)/(W*2+D):GAMA=(C1*B-D*W)/(W*2+D):TCE=(TE-PI
-BETA*SIN(W*E)-GAMA*COS(W*E))*EXP(D*E)
210 GOSUB 1000
220 GOSUB 2000
230 NEXT R
240 GOSUB 3000
250 INPUT "SE VA A HACER OTRO CALCULO (SI=1)=":SI:IF SI=1 THEN GOTO 100
260 END
1000 REM SUBROUTINA DE DATOS DE TIEMPO
1010 OPEN "I",#1,"IAO.DAT"
1020 FOR I=1 TO 36
1030 INPUT #1,TAO(I)
1040 NEXT I:CLOSE #1:RETURN
2000 REM SUBROUTINA DE CALCULO DE T0
2010 FOR I=1 TO 36
2020 T0(I)=PI*(BETA*SIN(W*TAO(I))+GAMA*COS(W*TAO(I))+TCE*EXP(D*TAO(I))-1)
2030 CLS:PRINT:PRINT TAB(20)"TEMPERATURA DE LA ZONA CONVECTIVA INFERIOR VARIANDO
CON EL TIEMPO":PRINT:PRINT:T0(I)
2031 IF R=1 THEN TOM(I)=T0(I)
2032 IF R=2 THEN TOL(I)=T0(I)
2033 IF R=3 THEN TOH(I)=T0(I)
2040 NEXT I:RETURN
3000 REM SUBROUTINA DE INTRODUCCION DE RESULTADOS A ARCHIVO
3010 OPEN "O",#1,AR#
3020 FOR I=1 TO 36
3030 PRINT #1,TAO(I),TOM(I),TOL(I),TOH(I)
3040 NEXT I:CLOSE #1:RETURN

```

Capítulo VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Calentador de agua.

En la figura 6 del capítulo III se puede observar que el comportamiento de un calentador de agua en Mexicali y Hermosillo sería muy similar ya que la temperatura de salida del agua varía en aproximadamente 2°C , en cambio, para La Paz la diferencia de temperaturas con las dos ciudades anteriores es de alrededor de 8°C .

Por lo anterior se concluye que se puede instalar un calentador de agua con las características señaladas en el capítulo III para la zona Norte 1 ya que en los tres estados que la componen se podrían alcanzar temperaturas máximas de entre 40°C a 48°C , que son temperaturas óptimas para agua caliente de uso doméstico.

Para la zona Norte 2 se observa en la figura 7 que en Saltillo y Monterrey las temperaturas que se alcanzarían son muy similares, mientras que en Chihuahua se lograrían temperaturas mucho más elevadas (con una diferencia de 10°C

aproximadamente), aunque al final del año en las tres ciudades se alcancen temperaturas muy similares.

En esta zona la instalación de un calentador de agua no sería conveniente según el modelo, ya que las temperaturas que podría alcanzar el agua son menores que en la zona Norte 1 (con excepción de Chihuahua), y no serían útiles para el uso doméstico ya que se lograrían temperaturas menores de 38 °C. Es necesario agrandar las dimensiones del calentador para obtener temperaturas mayores.

En el centro de la República se observa (fig. 8) que el comportamiento térmico de un calentador de agua es similar en las cuatro ciudades seleccionadas ya que la mayor diferencia de temperaturas es de 4 °C entre San Luis Potosí y León.

La instalación de un calentador de agua en esta zona convendría ya que se podrían alcanzar temperaturas hasta de 40 °C.

En las ciudades que componen la zona Pacífico se observa por la figura 9 que se pueden llegar a obtener temperaturas muy cercanas a los 40 °C sin que haya una gran diferencia con la temperatura menor

(≈ 33 °C).

Un calentador de agua en esta zona tendría un comportamiento térmico no muy variable ya que la diferencia entre la temperatura mayor y la menor sería de 7 °C. Para Acapulco el calentador podría usarse; para las otras dos ciudades (Oaxaca y Tuxtla Gutiérrez) el calentador requerirá mayor área de captación de tal manera que alcance temperaturas mayores de 40 °C.

Las dos ciudades seleccionadas para representar el Golfo de México presentan un comportamiento similar (fig. 10) con una diferencia de temperaturas de 2 °C. Como en la zona anterior la diferencia entre las temperaturas mayor y menor no es muy grande (aproximadamente 7 °C), y se alcanzan temperaturas hasta de 40 °C por lo que se requerirán mayores dimensiones para el calentador.

En general la instalación de un calentador de agua es recomendable exceptuando la zona Norte 2, sin embargo, se debe tomar en cuenta que en éste trabajo sólo se utilizaron datos de temperatura ambiente y de radiación solar para cada ciudad seleccionada, sin

haberse tomado en consideración otros factores que también afectan el comportamiento térmico del calentador, como es la nubosidad, etc.

7.2 Calentador de aire.

Las figuras de la 3 a la 7 del capítulo IV muestran la variación de la temperatura de salida del aire con respecto a la longitud del calentador, viendo en todas ellas que la temperatura va en aumento a medida que es mayor la longitud, pero después de los 50 m aunque la temperatura sigue elevándose, su aumento no es tan pronunciado como en los primeros 50 m, por lo que se seleccionó esta longitud para conocer la variación de la temperatura de salida del aire respecto al tiempo. Las figuras de la 8 a la 12 del capítulo IV muestran esta variación a una longitud constante de 50 m.

La figura 8 que representa la zona Norte 1 muestra que existe una diferencia de temperatura máxima alcanzada por cada ciudad que es de alrededor de 2 °C siendo La Paz la que tiene la menor temperatura máxima y Hermosillo la de mayor temperatura máxima. En esta figura se observa que se

pueden alcanzar temperaturas de salida de aire hasta de 56 °C, que es una temperatura útil para el secado de diversos productos.

En la zona Norte 2 (fig. 9) se puede observar que la temperatura de salida de aire para Saltillo y Monterrey es similar mientras que para Chihuahua es mayor y su diferencia es de 8 °C. En ésta zona se alcanzan temperaturas de hasta 45 °C en Saltillo y Monterrey, y en Chihuahua de 53 °C por lo que se podría instalar un calentador de aire aquí aunque tendría un comportamiento diferente en Saltillo y Monterrey que en Chihuahua. En las dos primeras ciudades se requerirán mayores dimensiones del captador.

En la figura 10 se observa que el comportamiento del calentador de aire sería diferente para el D. F. y Guadalajara que para San Luis Potosí y León ya que éstos últimos presentarían su temperatura máxima el día 162, mientras que para el D. F. sería el día 135 y para Guadalajara el día 105. Sin embargo, su comportamiento durante el año es muy parecido en las 4 ciudades, siendo León el que alcanza las

temperaturas más elevadas (49 °C) y el D. F. el que presenta las temperaturas menores, de aproximadamente 42 °C.

Las temperaturas que se alcanzan en esta zona no son óptimas para la instalación de un calentador de aire con las características que se indicaron. Se requerirá rediseño.

Para la zona Pacífico (fig. 11) las temperaturas alcanzadas en las tres ciudades no son muy diferentes y no son recomendables para la instalación del calentador en este lugar, ya que se obtendrían temperaturas de sólo 46 °C. Se necesitarán mayores dimensiones de calentador.

En la zona Golfo no se recomienda instalar un calentador de aire ya que la temperatura máxima que se alcanzaría sería de 46 °C, por lo que no se podría usar para presecado.

7.4 Destilador.

La cantidad de destilado que se obtendría para la zona Norte 1 sería la mayor para Hermosillo y la menor para La Paz, teniendo una diferencia de 0.9 kg/m² día (fig. 2 cap. 4).

En esta zona la cantidad de destilado que se obtendría es buena pues se pueden obtener hasta 4.7 kg/m² día de agua.

La figura 3 del capítulo V que representa a la zona Norte 2 muestra el comportamiento del destilador que es similar para Saltillo y Monterrey alcanzando hasta 3 kg de agua por día, mientras que para Chihuahua es mayor y alcanza hasta 4.4 kg por día siendo la diferencia de 1.4 kg por día. En Chihuahua la cantidad de destilado por año es muy buena por lo que se puede recomendar el uso de este dispositivo.

En el centro de la República aunque se obtendrían cantidades menores de destilado (fig. 4, cap. V), también se podría recomendar la instalación de un destilador solar, ya que se podrían llegar a obtener cantidades hasta de 3.9 kg/m² día. El D. F. es la ciudad donde se obtendría una menor cantidad de destilado, que llega a los 2.9 kg/m² día, por lo que no se recomienda su uso, debiéndose aumentar el área de captación.

Aun cuando el comportamiento del destilador en Tuxtla Gutiérrez es un poco diferente al de las otras

2 ciudades de la zona Pacifico (fig. 5, cap V), se puede decir que en las tres ciudades se puede obtener un comportamiento similar del destilador además de que se obtienen buenos resultados en la cantidad de agua destilada, llegando a ser hasta de 3.2 kg/m² día en Acapulco por lo que se recomendaría instalar un destilador solar en ésta zona.

Para la zona Golfo también se obtuvieron buenos resultados, ya que en Mérida (fig. 6, cap. V) se llegan a obtener hasta 3.3 kg de agua por día de exposición; para Veracruz se pueden llegar a obtener 2.9 kg de agua por día, lo cuál es bajo.

7.5 Estanque.

En las figuras 3, 4, 5, 6 y 7 del capítulo VI se muestra como aumenta la temperatura de la zona convectiva inferior de un estanque en las diferentes zonas de la República Mexicana; de estas figuras se observó que la temperatura aumenta durante los primeros 400 días de exposición y después llega a un periodo en donde la temperatura adquiere un comportamiento sinusoidal; sin embargo, las temperaturas que se alcanzarían en el periodo de

calentamiento llegarían a ser mayores que la temperatura de ebullición de la solución salina. Lo anterior sería un problema ya que si la solución ebulliciera afectaría a la zona no convectiva y ésta perdería su carácter aislante, por lo que se recomienda una extracción de energía en la zona convectiva inferior.

La cantidad de energía que se decidió extraer fue del 5%.

La figura 8. cap. VI muestra la temperatura de la zona convectiva inferior en la zona Norte 1. Como se esperaba la temperatura se comporta de manera similar que cuando no hay extracción de energía, solo que en este caso las temperaturas mayores no alcanzan los 80 °C, siendo Hermosillo la ciudad que presenta las temperaturas mayores (88 °C), aunque en general el comportamiento térmico del estanque en esta zona sería adecuado teniendo en cuenta la extracción de energía.

En la zona Norte 2 se observa una similitud en el comportamiento del estanque en Saltillo y Monterrey, alcanzándose en éstos lugares temperaturas de alrededor de 52 °C, mientras que en Chihuahua se eleva más la temperatura (64 °C).

En la zona Centro el comportamiento del estanque es muy parecido en todos los lugares, y se observa que Leon y Guadalajara presentan las temperaturas más altas (80 °C), mientras que San Luis Potosí y el D. F. presentan temperaturas máximas de 52 °C.

La construcción del estanque solar en las 3 zonas anteriores, basada en este trabajo, tendría

buenos resultados debido a que se pueden alcanzar temperaturas muy elevadas que serian utiles para diversos procesos de transferencia de calor.

La figura 11 que representa la zona Pacifico muestra la similitud en el comportamiento del estanque en las tres ciudades involucradas, donde la temperatura mayor la tiene Acapulco y es de 60 °C. En Oaxaca y Tuxtla Gutiérrez se presenta un comportamiento con mucho mayor parecido donde la mayor temperatura alcanzada es de 56 °C. Aquí también se obtienen temperaturas iguales que sugieren la construcción del estanque solar.

La zona Golfo representada en la figura 12 muestra que el comportamiento del estanque seria muy similar si se construyera en cualquier lugar de esta zona ya que las 2 ciudades que se seleccionaron muestran un comportamiento casi igual.

En general con los resultados obtenidos se podria recomendar la instalación ó construcción de los cuatro dispositivos solares en cualquier lugar de la República Mexicana, sin embargo se debe tomar en cuenta que éstos resultados son de una simulación

matemática que no toma en cuenta algunos factores que afectan directamente el comportamiento de estos dispositivos, como puede ser la cantidad de nubosidad ó la presencia de huracanes ó tormentas en los lugares que colindan con el mar ó cualquier otro tipo de cambios climatológicos.

En éste trabajo se pretende dar una vista general de lo que es el comportamiento térmico de los cuatro dispositivos solares, siendo una buena fuente ya que si se tomaran en cuenta, haciendo pruebas experimentales, todos los factores que afectan el comportamiento de los dispositivos, sería de un alto costo, por lo que éste trabajo podría servir a cualquier persona que se interesara en la instalación de cualquiera de éstos dispositivos solares en cualquiera de las zonas en que se trabajó, tomando en cuenta las características físicas que se señalaron en cada caso.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Almanza, R. y López, S. "Radiación solar global en la República Mexicana mediante datos de insolación". Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, No. 357, Octubre 1975.
- 2.- Atlas del Agua. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1976.
- 3.- Balling, R. C. Jr. "Harmonic analysis of monthly insolation levels in the United States". *Solar Energy*, 31, 293, 1983.
- 4.- Bryant, H. C. and Colbeck, I. "A solar pond for London?". *Solar Energy*, 19, 321, 1977.
- 5.- Duffie, John A., Beckman, William A., "Solar Energy for Thermal Processes". John Wiley and sons, New York, 1980.
- 6.- Hollands, K. G. T., *et al.*, "Correlation Equations for Free Convection Heat Transfer in Horizontal Layers of Air and Water". *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 18, 879, 1975.

- 7.- Janzen, T. J. "Solar Engineering Technology", Prentice-Hall, New Jersey, 1982.
- 8.- Lara Arellano, Javier A. "Modelo Teórico de un Estanque Solar No Convectivo Aplicable a la República Mexicana". Tesis Profesional. Facultad de Química. UNAM, México, 1983.
- 9.- Mc. Adams, W. C., "Heat Transmission". 3rd. ed., Mc. Graw-Hill Book Co., New York, 1954.
- 10.- Mahan, Bruce H., "Elementary Chemical Thermodynamics". W. A. Benjamin Inc. New York, 1963.
- 11.- Malik, M. A. S., et al. "Solar Distillation". Pergamon Press, Ltd. 1st. ed., 1982.
- 12.- Manrique, José A. "Energía Solar: Fundamentos y aplicaciones fototérmicas". Harla S. A. de C. V., México, 1984.

- 13.- Normales Climatológicas, Período 1941-1970.
Dirección General de Geología y
Meteorología. Servicio Meteorológico
Mexicano, S. A. G., México, 1976.
- 14.- Perry, R. H. and Chilton, C. H. "Chemical
Engineers' Handbook". 5th. ed. Mc.
Graw-Hill, Tokio, 1973.
- 15.- "Solar Energy Engineering", A. A. M. Sayigh
Editor, Academic Press, New York, 1977.