



59
29m

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS TERMICO DE UN SISTEMA DE
CALEFACCION SOLAR PARA ALBERCA

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a n

JUAN CARLOS GIL MARISCAL

GABRIEL GERARDO HUET COVARRUBIAS

Dir. Dr. JOSE LUIS FERNANDEZ ZAYAS



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.

I N D I C E

NOMENCLATURA	1
INTRODUCCION	5
ANTECEDENTES	8
PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMATICO	13
SOLUCION NUMERICA DEL MODELO	31
DESARROLLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES	52
CALIBRACION DEL MODELO SIN CALENTADORES SOLARES	62
SELECCION DEL TIPO DE CAPTADOR	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS	82
APENDICE I	83
APENDICE II	86
APENDICE III	98

NOMENCLATURA

Variable	Variable en el programa	Definición	Unidad
a	A	Coefficiente de ajuste para las ganancias de calor	-
a _c	AC	Area del captador	m ²
a _p	A _p	Area de las paredes y piso de la alberca	m ²
a _s	A _s	Area de la superficie de la alberca	m ²
a _t	A _t	Area desarrollada de la tubería	m ²
b	B	Coefficiente de ajuste de pérdidas	m ²
c	C	Nubosidad en fracción del cielo cubierto (0 < c < 1)	-
c _p	4.183	Calor específico del agua a presión constante	J/Kg°C
e	2.718281	Número adimensional	-
E	E	Coefficiente de pérdidas del captador	w/m ² °c
f	F	Coefficiente de difusión, que es función de la velocidad del viento	w/m ² mm Hg
G	G	Irradiancia, o energía solar o global que recibe una superficie, medida como la cantidad de radiación solar total incidente sobre un plano por unidad de tiempo y por unidad de área	w/m ²
G _b	G _b	Componente directa o especular de la irradiancia	w/m ²
G _d	G _d	Componente difuso de la irradiancia	w/m ²
G _m	G _m	Valor máximo de la irradiancia, en un periodo determinado también puede referirse a alguno de sus componentes (G _{lm} , G _{dm})	w/m ²

NOMENCLATURA (Continuación)

Variable	Variable en el programa	Definición	Unidad
h_s	H_s	Hora solar verdadera referida al cero cuando es mediodía, positivo en las mañanas y negativo en las tardes	hr
j	J	Exponente de pérdidas	-
K	K	Conductividad térmica de las paredes y piso	w/m°C
L	L	Espesor de las paredes y piso de la alberca	m
L_d	L_d	Duración del día solar	hr
\dot{m}	M	Flujo másico del captador	m ³ /s
m_a	M_a	Masa total del agua de la alberca	m ³
n	N	Número del día del año	-
P_a	P_a	Presión parcial del vapor del aire	mm Hg
P_s	P_s	Presión de saturación del vapor a la temperatura superficial del agua	mm Hg
q_{at}	Q_{at}	Ganancia de calor por radiación atmosférica por unidad de área	w/m ²
Q_{aa}	Q_{aa}	Ganancia de calor por radiación atmosférica en la alberca	w
Q_{ac}	Q_{ac}	Ganancia de calor por radiación atmosférica en el captador	w
q_{cd}	Q_{cd}	Pérdidas de calor hacia las paredes y piso del cuerpo de agua	w/m ²
q_{cv}	Q_{cv}	Pérdidas debido a la convección del cuerpo de agua por unidad de área	w/m ²
Q_e	Q_e	Pérdidas de circulación hacia el captador	w
q_{ev}	Q_{ev}	Pérdidas debido a la evaporación del cuerpo de agua por unidad de área	w/m ²

NOMENCLATURA (Continuación)

Variable	Variable en el programa	Definición	Unidad
q_{ra}	Q_{ra}	Pérdidas debido a la radiación del cuerpo de agua	w/m^2
Q_s	Q_s	Ganancia de calor debido al colector solar	w
Q_{sa}	Q_{sa}	Ganancia de calor por radiación solar en el cuerpo de agua	w
Q_{sc}	Q_{sc}	Ganancia de calor por radiación solar en el captador	w
Q_{uc}	Q_{uc}	Calor útil en el captador	w
R_b	R_b	Factor de proyección	-
t	T	Tiempo	hr
T_{am}	T_{am}	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
T_{af}	T_{af}	Temperatura del agua de la alberca al pasar un Δt	$^{\circ}C$
T_{ag}	T_{ag}	Temperatura del agua de la alberca	$^{\circ}C$
T_c	T_c	Temperatura característica del captador	$^{\circ}C$
T_{ea}	T_{ea}	Temperatura a la entrada de la alberca	$^{\circ}C$
T_r	T_r	Temperatura de rocío del aire	$^{\circ}C$
T_{sc}	T_{sc}	Temperatura del agua a la salida del captador	$^{\circ}C$
T_t	T_t	Temperatura del medio que contiene al cuerpo de agua	$^{\circ}C$
U	U	Coefficiente de convección	$w/m^2^{\circ}C$
V	V	Velocidad del viento	m/s

NOMENCLATURA (Continuación)

Variable	Variable en el programa	Definición	Unidad
		Letras del alfabeto griego	
α_a	Ala	Absortividad del agua	-
α_c	Alc	Absortividad del captador	
β	Be	Angulo que forma la superficie del captador con la horizontal	°
λ	Ga	Rumbo, ángulo que forma el eje longitudinal del plano del captador con la dirección sur, positivo hacia el este y negativo al oeste, toma valores absolutos de 0 a 180°	°
δ	De	Declinación o ángulo entre la dirección de los rayos solares al mediodía verdadero sobre el plano del ecuador terrestre, positivo al norte y negativo al sur	°
θ	x7	Angulo entre la radiación solar directa y la normal al plano	°
ϕ	Fi	Latitud del lugar en estudio	°
ω	w	Angulo horario; varía en 15° cada hora y con hs, es positivo en las mañanas y negativo en las tardes	°
π	3.14159	Número adimensional	-
Δt	Dt	Incremento del tiempo en segundos	s

1. INTRODUCCION

Frecuentemente se encuentra en la literatura el uso de reglas empíricas para el diseño de sistemas de calefacción de albercas.

Es frecuente que un fabricante sugiera, por ejemplo, el empleo de la mitad del área de la superficie de la alberca para el captador. Esta regla es adecuada para ciertas condiciones particulares; sin embargo, en este estudio se demostrará que al variar otros parámetros de diseño se pueden alcanzar resultados del mismo orden con un área de captación menor, repercutiendo en el costo inicial de la instalación, así como en el espacio ocupado para el captador.

La utilidad de una instalación de este tipo varía no sólo con el tamaño y el lugar de la misma, sino con el uso a que esté destinada y las preferencias de las personas que la disfrutan.

En un sistema solar para calentamiento de albercas se aprecian las siguientes ventajas:

- a. Los requerimientos energéticos para la operación del sistema son mínimos
- b. El costo del mantenimiento durante un prolongado periodo de tiempo es mínimo
- c. La vida útil de operación del sistema es prolongada (típicamente de 30 a 50 años)
- d. No produce contaminación ambiental.

Sin embargo, la captación solar involucra los siguientes inconvenientes:

- a. La inversión inicial es elevada
- b. El área de captación ocupa un espacio considerable que podría utilizarse para alguna otra actividad
- c. Las condiciones climatológicas y geográficas afectan sensiblemente el funcionamiento del sistema
- d. El tiempo necesario para alcanzar una temperatura de comodidad al iniciar la operación del calentamiento de la alberca es prolongado (típicamente dos semanas)
- e. Estéticamente la instalación no es agradable a algunas personas.

Tomando en cuenta los aspectos anteriores el diseñador puede llegar a establecer el mejor calentador solar para cada aplicación en particular.

En este estudio se propone un modelo matemático que sirve como herramienta auxiliar para relacionar adecuadamente las características físicas y cli-

matológicas que afectan al sistema de calefacción, logrando llegar al planteamiento del sistema "óptimo".

Dicho modelo será resuelto con la ayuda de un computador que simule cualquier situación de ocurrencia de interés.

2. ANTECEDENTES

Hawlander y B.I. Brinkworth (ref 1) realizaron estudios sobre la aplicación de la energía solar para el calentamiento de albercas mediante un balance térmico de las ganancias y pérdidas de calor que ocurría en el sistema.

Es decir que el calor total almacenado en la alberca es igual al calor útil que el captador aporta más la ganancia de calor neta en la alberca menos sus pérdidas.

Esto queda expresado como:

$$Q_u + Q_n - Q_p = \text{calor total almacenado en la alberca} \quad (1)$$

El término Q_p involucra las pérdidas por radiación, convección, evaporación, conducción y un término que contempla las pérdidas de calor por evaporación debido a los bañistas que emergen.

Concluyeron de su trabajo utilizar un área de captación solar para el pa-

nel de 40 a 50% del área de la alberca, así como el uso de captadores desnudos pues sus trabajos experimentales demuestran que no es significativa la ventaja del uso de captadores con simple y doble vidrio (ver fig 1).

Para disminuir las pérdidas por evaporación que en su estudio resultan ser las más importantes recomiendan el uso de una cubierta de polietileno con cámaras de aire.

Entre los puntos de partida en su análisis matemático del sistema consideran que no existe estratificación de la temperatura del agua.

Otro autor que planteó este mismo problema mediante un balance térmico es N.A.C. Spelman (ref 2) el cual establece como puntos sobresalientes de su estudio que los sistemas de calefacción nunca deben utilizar un intercambiador de calor debido a la baja eficiencia con la que trabaja y el costo mayor en la inversión inicial.

En su trabajo experimental considera como un tiempo mínimo para alcanzar una temperatura de operación estable un periodo de 3 o 4 semanas.

En su estudio presenta una gráfica del Reino Unido en donde se observa la diferencia entre las temperaturas alcanzadas para albercas con captador y sin él, en el periodo de abril a octubre (ver fig 2).

En el estudio realizado por Francis de Winter (ref 3) plantea la solución del sistema mediante el uso de ecuaciones lineales entre la temperatura del agua y las pérdidas, utilizando como factores de ajuste las eficiencias del captador, de la bomba de circulación, etc.

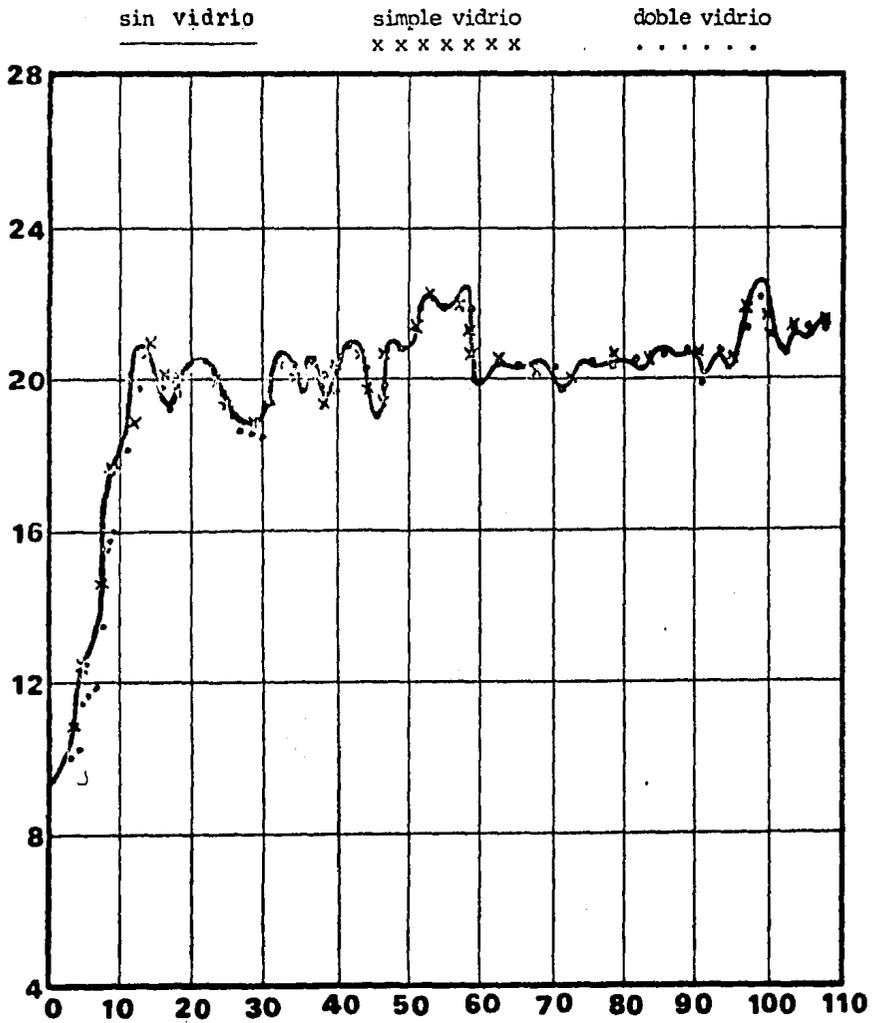


Fig 1. Efecto de los diferentes tipos de colectores (tomado de la ref 1).

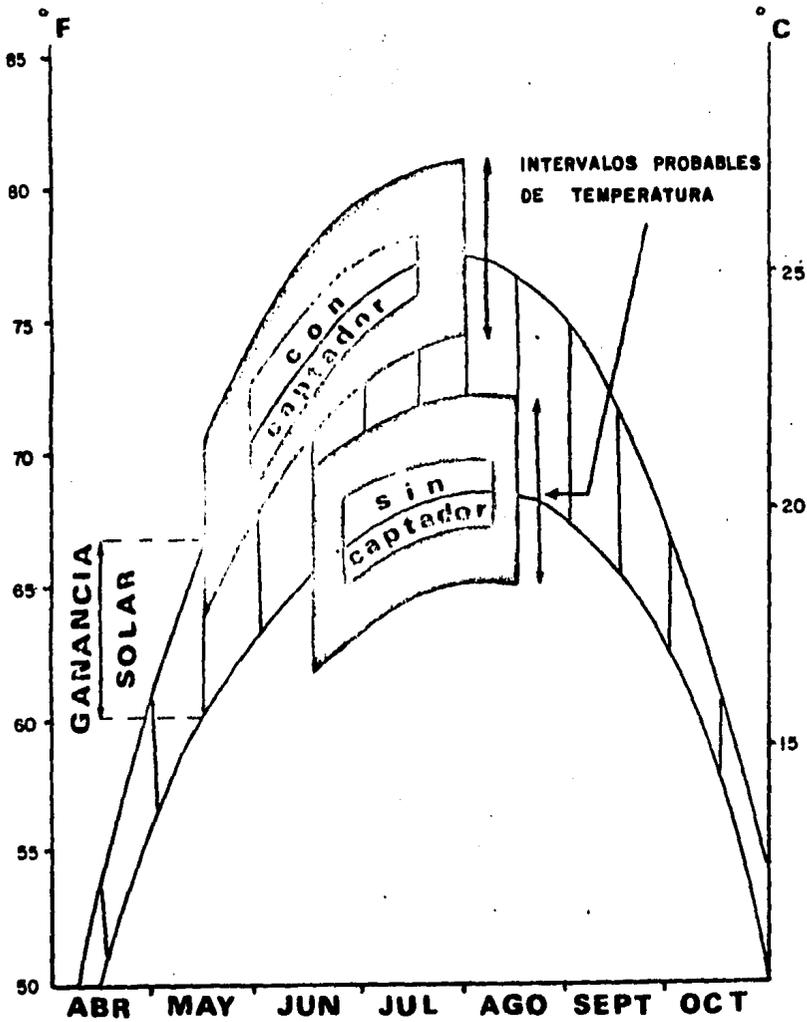


Fig 2. Curvas de la temperatura promedio de albercas con captador y sin él, en Inglaterra. Se asume que el área del colector es igual al 50% de la superficie de la alberca (tomado de la ref 2).

El enfoque que se le dará a este estudio estará basado en un balance térmico del sistema similar al planteado por las referencias (1) y (2).

Se considerará una temperatura característica del agua, que servirá como parámetro para el diseño y construcción del sistema, y mediante el modelo el diseñador podrá predecir dentro de un intervalo razonable la temperatura que alcanzará el agua.

3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMATICO

Balance de energía del sistema

Para poder plantear el balance de energía que ocurre en el sistema, se debe considerar con detalle las ganancias de calor y las pérdidas, así como la relación que existe entre el captador y la alberca.

La fig 3 muestra la instalación completa de donde se pueden deducir las siguientes ecuaciones:

$$Q_{\text{útil en la alberca}} = Q_{\text{ganado}} - Q_{\text{perdido}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{ganado}} = Q_{\text{sa}} + Q_{\text{aa}} + Q_{\text{s}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{perdido}} = Q_{\text{cd}} + Q_{\text{cv}} + Q_{\text{ev}} + Q_{\text{ra}} + Q_{\text{e}} \quad (4)$$

Por otro lado se tiene que:

$$Q_{\text{útil}}(\Delta T) = m_a c_p (T_{\text{af}} - T_{\text{ag}}) \quad (5)$$

de aquí que:

$$T_{af} = T_{ag} + \frac{Q_{\text{útil}} \Delta T}{m_a c_p} \quad (6)$$

$$T_{af} = T_{ag} + \frac{(Q_{sa} + Q_{aa} + Q_s - Q_{cd} - Q_{cv} - Q_{ev} - Q_{ra} - Q_e) \Delta t}{m_a c_p} \quad (7)$$

Una vez definido el modelo matemático se procederá a definir cada término que involucra éstos.

Cálculo de las ganancias solares

Para poder encontrar las ganancias solares sobre una superficie se requiere definir los siguientes factores:

La declinación solar δ que queda expresada como:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (8)$$

La duración del día solar L_d , que es el tiempo que transcurre del alba al ocaso y que se define como:

$$L_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\operatorname{Tan}\phi \operatorname{Tan}\delta) \quad (9)$$

La hora solar h_g que es la diferencia entre el mediodía y la hora civil, esto es:

$$h_g = 12 - t \quad (10)$$

Es claro que h_g se hace positiva antes del mediodía y negativa después de éste.

El ángulo horario ω , que está dado como: $\omega = 15 h_s$ (11)

La componente directa de la radiación solar G_b , que se calcula con la siguiente ecuación:

$$G_b = G_{bm} \cos^{1.5} \left(\frac{180 h_s}{L_d} \right) \quad (12)$$

La irradiancia o energía solar total que recibe una superficie se obtiene con la siguiente expresión:

$$G = G_m \cos^{1.2} \left(\frac{180 h_s}{L_d} \right) \quad (13)$$

G_{bm} y G_m se obtienen de las tablas de radiación máxima y máxima directa para el mes y lugar en cuestión (ver apéndice).

La radiación difusa G_d queda expresada de la siguiente forma:

$$G_d = G - G_b \quad (14)$$

y finalmente la radiación total G_T queda como

$$G_T = G_b R_b + G_d \quad (15)$$

Para el caso particular de la irradiación sobre la superficie del agua

$$G_{ta} = G_b + G_d \quad (16)$$

y para el caso de irradiación sobre el captador

$$G_{tc} = G_b R_b + G_d \quad (17)$$

En donde R_b es el factor de proyección que considera el efecto de la inclinación del captador, y se define como:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (18)$$

$$\cos\theta = \left| \begin{aligned} &\sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega \\ &+ \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \right| \quad (19)$$

$$\cos\theta_z = \left| \sin\delta \sin\phi + \cos\phi \cos\omega \right| \quad (20)$$

Ganancia de calor por radiación atmosférica

Es la ganancia provocada por la energía de onda larga recibida de la atmósfera, está en función de la temperatura ambiente y de la fracción de nubosidad de cielo cubierto; queda determinada como:

$$q_{at} = 1.524 \times 10^{-14} (1.8 T_{am} + 492)^6 (1 + 0.17 c^2) \quad (w/m^2) \quad (21)$$

$$\text{en donde } c = \frac{1000 - G_{max}}{1000} \quad (22)$$

para simular mejor el fenómeno físico no se puede considerar un valor constante de la temperatura ambiente, es por eso, que es necesario simularla con una ecuación que varíe con el tiempo.

Se puede considerar que una solución aceptable para la simulación de la T_{am} es una aproximación mediante la sobreposición de tres o cuatro funciones periódicas, esto es:

$$T_{am}(t) = a_0 + a_1 \sin c_1 \pi t + a_2 \cos c_2 \pi t + a_3 \sin c_3 \pi t \quad (23)$$

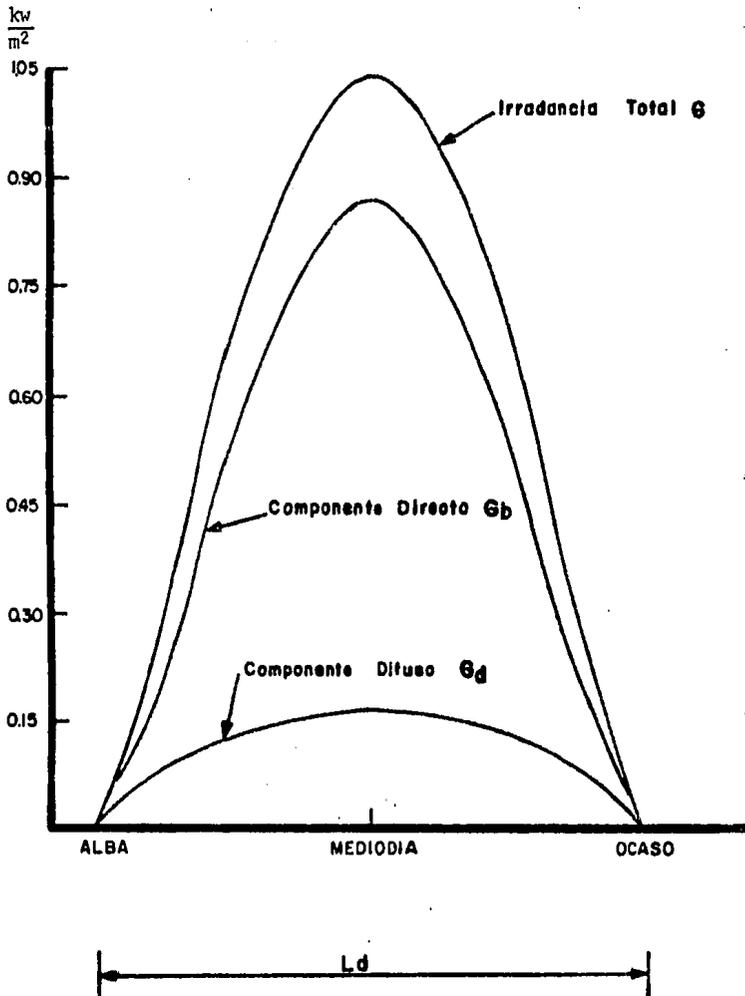


Fig 4. Radiación media diaria (tomado de la ref 4)

En realidad no existe una regla estricta para obtener las constantes de la ecuación (23).

Las constantes a_0 , a_1 , a_2 y a_3 se obtienen dependiendo de las condiciones atmosféricas y las constantes c_1 , c_2 y c_3 están relacionadas directamente con el periodo de la curva.

De ahí que cada diseñador debe ser capaz de simular la temperatura ambiente según juzgue su criterio.

A continuación se muestra un ejemplo de comparación entre la temperatura real en el transcurso de un día y la simulada mediante la ecuación (23).

$$T_{am}(t) = 22 - 2.5 \sin(\pi t/24) - 3.9 \cos(2\pi t/24) - 0.64 \sin(2\pi t/24) \quad (24)$$

los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 y a_3 como c_1 , c_2 y c_3 fueron obtenidos por iteraciones hasta alcanzar una aproximación satisfactoria.

Tabla 1. Simulación de la temperatura ambiente

Hora	Temperatura ambiente real	Temperatura ambiente simulada
13:00	23.6	23.5
14:00	23.5	23.3
15:00	23.2	22.9
16:00	22.8	22.3
17:00	22.2	21.6
18:00	21.6	20.9
19:00	21.1	20.1
20:00	20.6	19.4
21:00	20.0	18.7

Tabla 1. (Continuación)

Hora	Temperatura ambiente real	Temperatura ambiente simulada
22:00	19.5	18.3
23:00	18.5	18.1
24:00	18.5	18.1
01:00	18.0	17.7
02:00	18.0	17.7
03:00	17.7	17.8
04:00	17.7	18.2
05:00	17.5	18.8
06:00	17.7	19.6
07:00	18.0	20.4
08:00	19.0	21.2
09:00	19.6	22.0
10:00	20.2	22.6
11:00	21.2	23.1
12:00	22.5	23.4

Ganancias de calor en el cuerpo de agua

$$Q_{sa} = \alpha_a G_{ta} a_s \quad [w] \quad (25)$$

$\alpha_a = 0.9$ para el agua

Ganancias atmosféricas en el cuerpo de agua

$$Q_{aa} = Q_{at} a_s \quad [w] \quad (26)$$

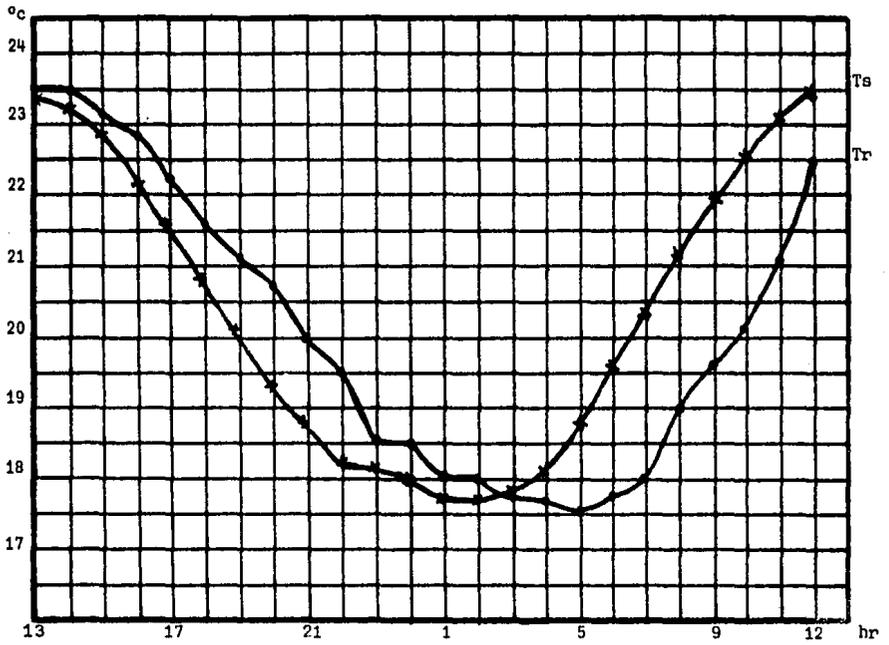


Fig 5. Comparación entre la temperatura real y la simulada mediante la ecuación (23)

Pérdidas debido a la convección en el cuerpo de agua

Es el calor perdido en el cuerpo de agua debido al transporte de energía provocada por el movimiento de las moléculas del agua hacia el medio ambiente. Está en función de la velocidad del viento y de la diferencia de temperatura entre el agua de la alberca y la temperatura ambiente.

El coeficiente de convección U queda definido por la ecuación de Mc Adams (ref 8) mediante la siguiente expresión:

$$U = 5.7 + 3.2 V \quad (27)$$

en donde V es la velocidad del viento (m/s)

$v = V(t)$ se obtiene a partir de datos reales medidos en el lugar en cuestión simulándola o bien tomando un valor promedio de ésta.

Finalmente, se puede evaluar el fenómeno de convección como:

$$q_{cv} = h(T_{ag} - T_{am}) \quad (w/m^2) \quad (28)$$

Pérdidas debido a la evaporación en el cuerpo de agua

Es el calor perdido en el cuerpo de agua debido a la acción de pasar del estado líquido al estado de vapor. Se lleva a cabo a cualquier temperatura hasta que el vapor ha alcanzado su presión máxima o presión de saturación.

Para evaluar las pérdidas por evaporación se utiliza la combinación del método de Dalton, Ryan-Harleman y Urquidi (ref 5).

La expresión queda como:

$$q_{ev} = f(v) (p_s - p_a) \quad (w/m^2) \quad (29)$$

en donde el problema principal es evaluar el coeficiente de difusión f en función de la velocidad del viento.

Ryan-Harleman (ref 5) propuso una función lineal para evaluar el coeficiente f en el cual se obtiene que a bajas velocidades del viento el coeficiente de difusión tiende a ser cero, por lo que las pérdidas son nulas.

Para velocidades altas la función tiende a sobrestimar el coeficiente f , según se muestra en la fig 6.

Por otro lado el estudio realizado por Urquidi (ref 5) establece una función lineal que sobrestima el coeficiente f , tanto para valores bajos de velocidad del viento como para valores altos de ésta.

Se evaluará dicho coeficiente f como un promedio de los dos criterios anteriores

$$f = f(v)$$

$$f = 2.901 V + 4.813 \quad (w/m^2 \text{ mmHg}) \quad (30)$$

$$P_s = 162.9 \times 10^6 e^{-\alpha_1} \quad (31)$$

$$\alpha_1 = 7482.6 / (1.8 T_{ag} + 430.36) \quad (32)$$

$$P_a = 162.9 \times 10^6 e^{-\alpha_2} \quad (33)$$

$$\alpha_2 = 7482.6 / (1.8 T_r + 430.36) \quad (34)$$

La temperatura de rocío t_r se obtiene de la carta psicrométrica del lugar. Se puede simular a partir de los datos experimentales mediante ecuaciones

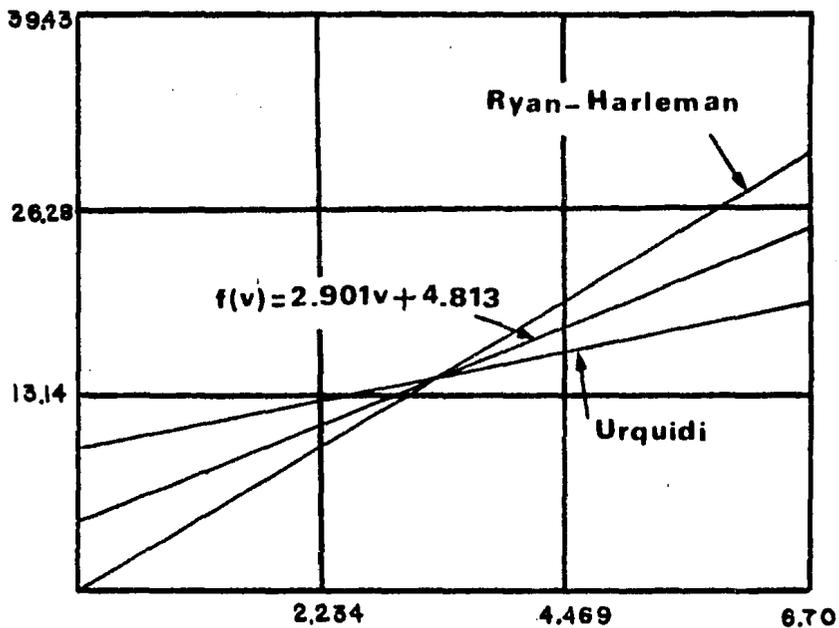


Fig 6. Variación de f con el viento (tomada de la ref 5)

lineales.

Pérdidas debido a la radiación del cuerpo de agua

Es la energía radiante emitida por el cuerpo de agua debido a su temperatura, transmitida al medio ambiente en forma de ondas electromagnéticas.

La ecuación de pérdida por radiación queda como:

$$Q_{ra} = 5.27 \times 10^{-9} (1.8 T_{ag} + 292)^4 \quad (w/m^2) \quad (35)^*$$

Pérdidas de calor hacia las paredes y piso del cuerpo de agua

Son las pérdidas que ocurren por la falta de un aislamiento adecuado en las paredes y piso de la alberca. Pueden no ser consideradas pues son muy pequeñas. Las pérdidas por conducción quedan determinadas como:

$$q_{cd} = -\frac{K(T_{ag} - T_t)}{L} \quad (w/m^2) \quad (36)$$

Ver fig 7.

Ganancias de calor en el captador

Al igual que en el cuerpo de agua el captador absorberá calor y perderá éste; la diferencia entre estos dos será básicamente el calor suministrado al agua que circula dentro de él.

De la fig 8 se deduce el siguiente balance:

$$Q_{uc} = Q_{ganado} - Q_{perdido} \quad (37)$$

$$Q_{ganado} = Q_{sc} + Q_{ac} \quad (38)$$

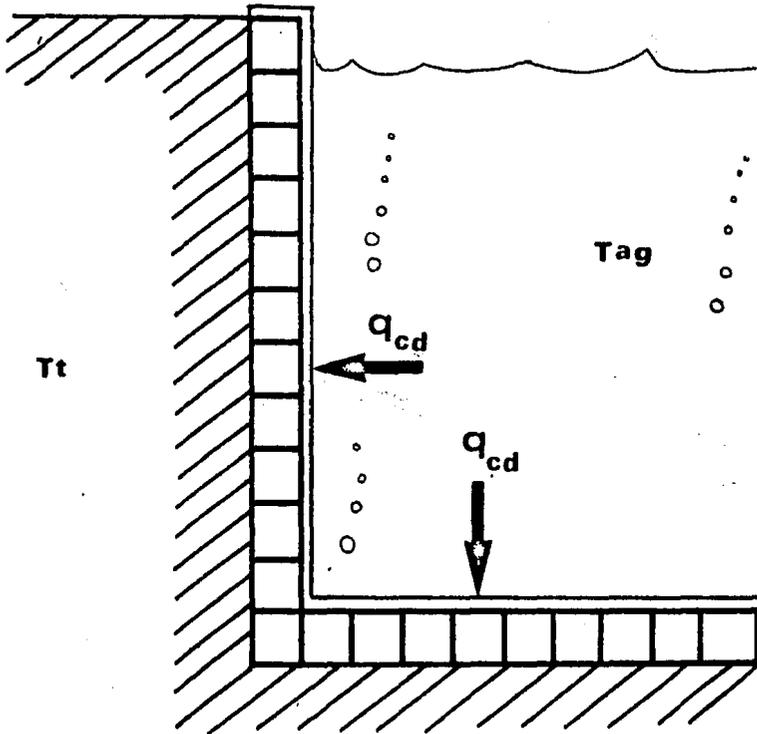


Fig 7. Pérdidas por conducción

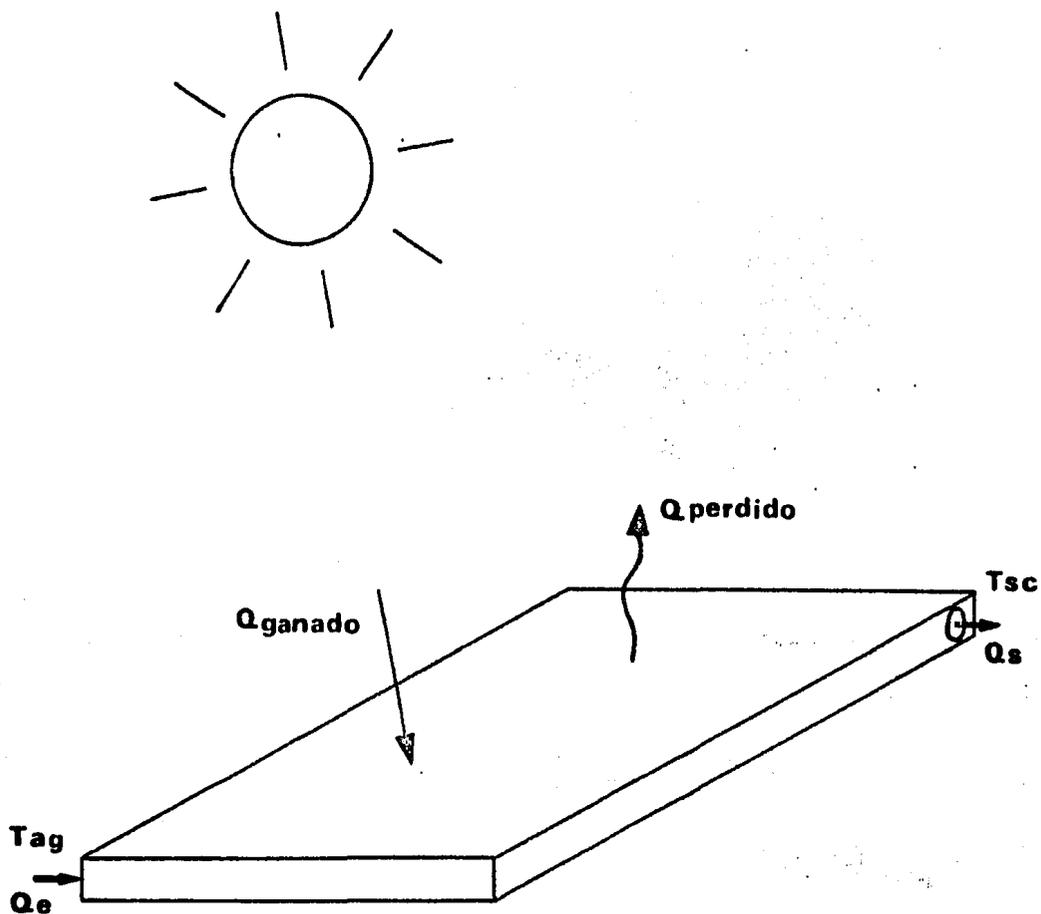


Fig 8. Balance de energía en el captador

Ganancias solares en el captador

$$Q_{sc} = \alpha_c G_{TC} a_c \quad (w) \quad (39)$$

si se trata de una superficie selectiva:

$$\alpha_c = 0.95 \text{ (captador desnudo)}$$

Ganancias atmosféricas en el captador

$$Q_{ac} = q_{at} a_c \quad (w) \quad (40)$$

Pérdidas de calor en el captador

La solución que al parecer resulta ser más aceptable para calcular las pérdidas totales en un captador es la combinación de métodos analíticos corroborados con resultados experimentales.

El estudio realizado por J.L. Fernández (ref 6) nos dice que las pérdidas térmicas en un captador se puede calcular haciendo una analogía con un circuito eléctrico. Tratándose de un captador desnudo sin aislamiento la expresión global que encierra las pérdidas en el captador es:

$$q_p = E(T_c - T_{am})^j \quad (w/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (41)$$

en donde el coeficiente E y la potencia j tienen un valor de

$$E = 25.192 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ C$$

$$j = 1.1406$$

$$q_p = 25.192 (T_c - T_{am})^{1.1406} \quad (w/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (42)$$

Calor útil en el captador

$$Q_{\text{útil}} = \dot{m} c_p (T_{\text{sc}} - T_{\text{ag}}) \quad (43)$$

Temperatura del agua a la salida del captador

Considerando las ganancias totales y las pérdidas, así como el flujo másico en el captador, la temperatura a la salida de éste es:

$$T_{\text{sc}} = T_{\text{ag}} + \frac{Q_g - Q_p}{\dot{m} c_p} \quad (44)$$

$$T_{\text{sc}} = T_{\text{ag}} + \frac{Q_{\text{sc}} + Q_{\text{ac}} - Q_p}{\dot{m} c_p} \quad (45)$$

Pérdidas de calor en tuberías de circulación

Si la tubería de descarga a la salida del captador no se encuentra aislada existirán pérdidas, y la temperatura que entrará a la alberca será distinta que la de la salida del captador.

Estas pérdidas repercuten en una disminución en la temperatura que entra a la alberca. Esta temperatura puede ser evaluada con la siguiente ecuación:

$$T_{\text{ea}} = T_{\text{sc}} - \frac{a_t U (T_{\text{sc}} - T_{\text{am}})}{\dot{m} c_p} \quad (46)$$

Ganancias de calor debido al colector solar

$$Q_s = \dot{m} c_p T_{\text{ea}} \quad (w) \quad (47)$$

Pérdidas de calor por circulación al colector

$$Q_e = \dot{m} c_p \Delta T_g \quad (w) \quad (48)$$

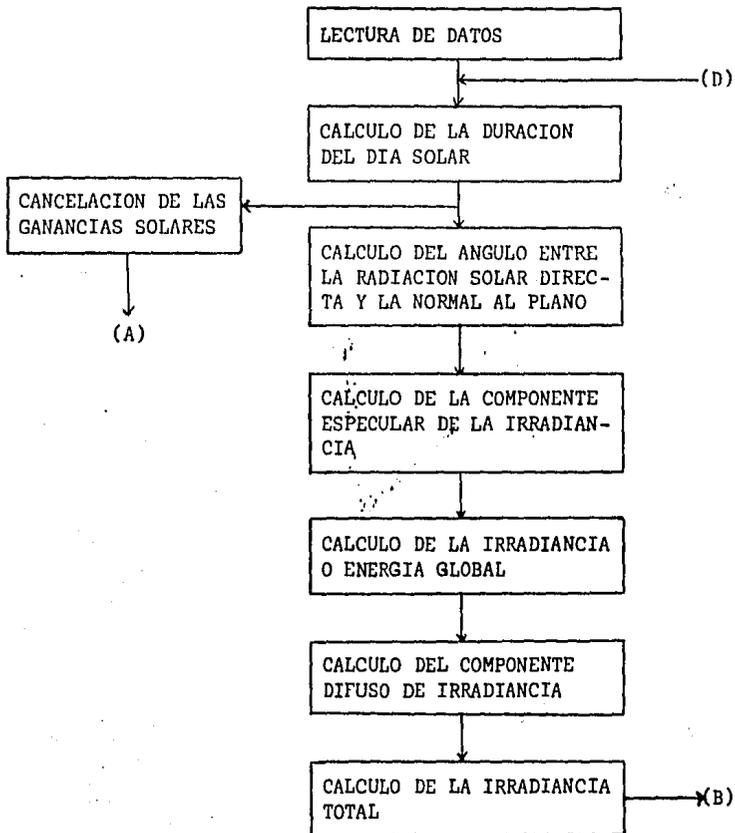
La combinación adecuada de las ecuaciones anteriores permitirá, como se muestra adelante, simular en computadora la operación de una alberca, con o sin un sistema solar de calentamiento.

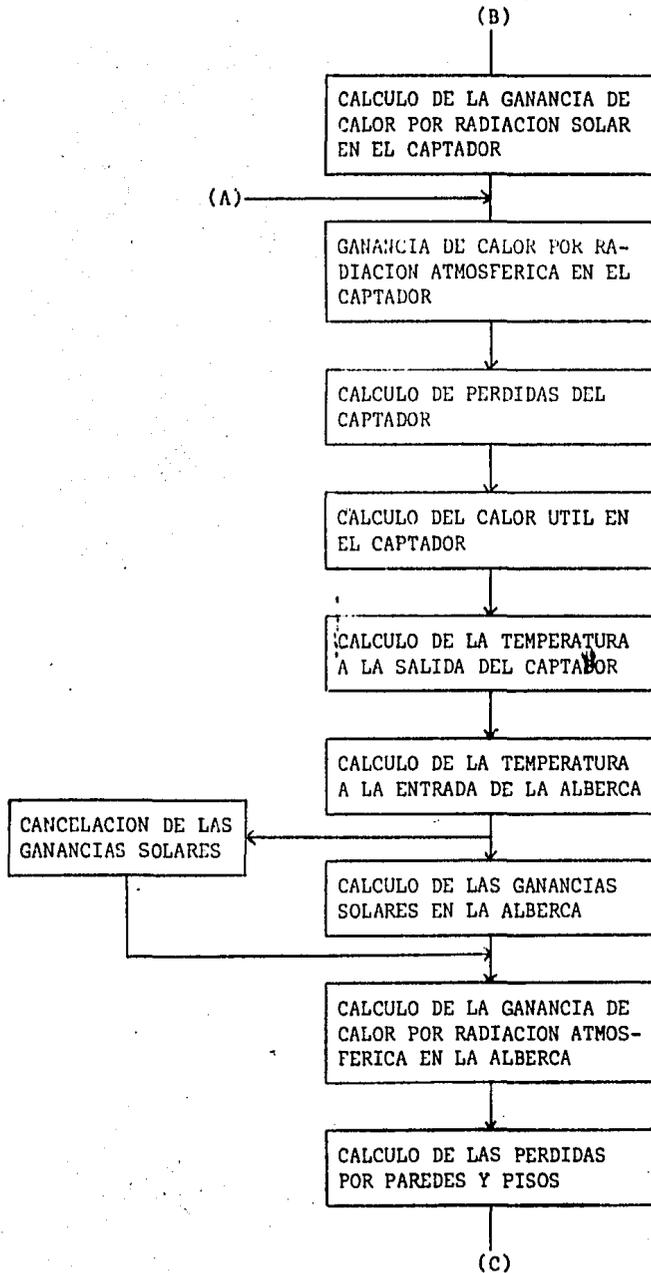
4. SOLUCION NUMERICA DEL MODELO

Para un diseñador resulta atractivo poder simular la temperatura a la que estará una alberca bajo ciertas condiciones; y mejor aún, variar las condiciones de diseño de tal forma que pueda conseguir la mejor solución tanto en costo como en condiciones de operación.

Por ello este capítulo contiene un programa en lenguaje Basic que proporciona al lector una herramienta accesible de diseño y que por su sencillez resulta fácil su aplicación a cualquier tipo de computador.

Diagrama de bloques:





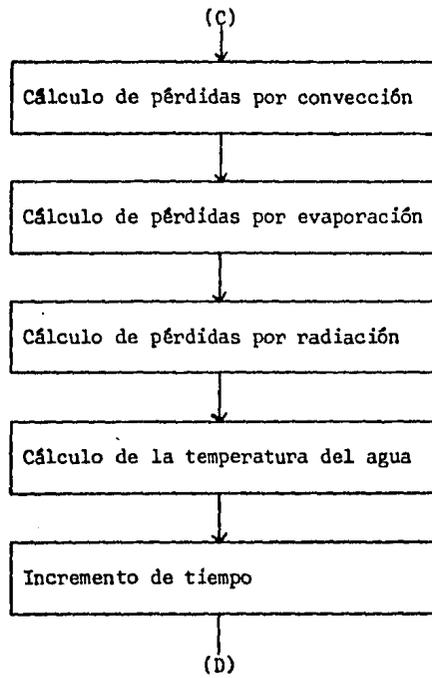
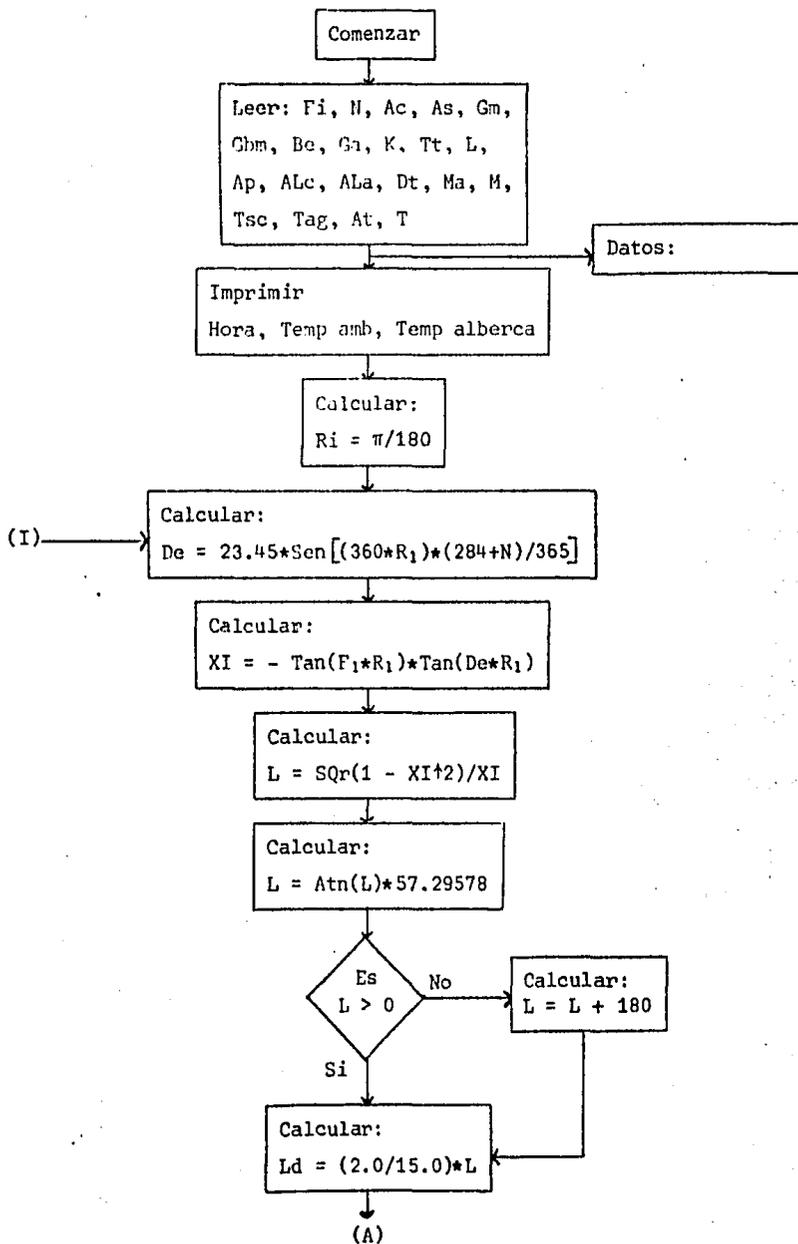
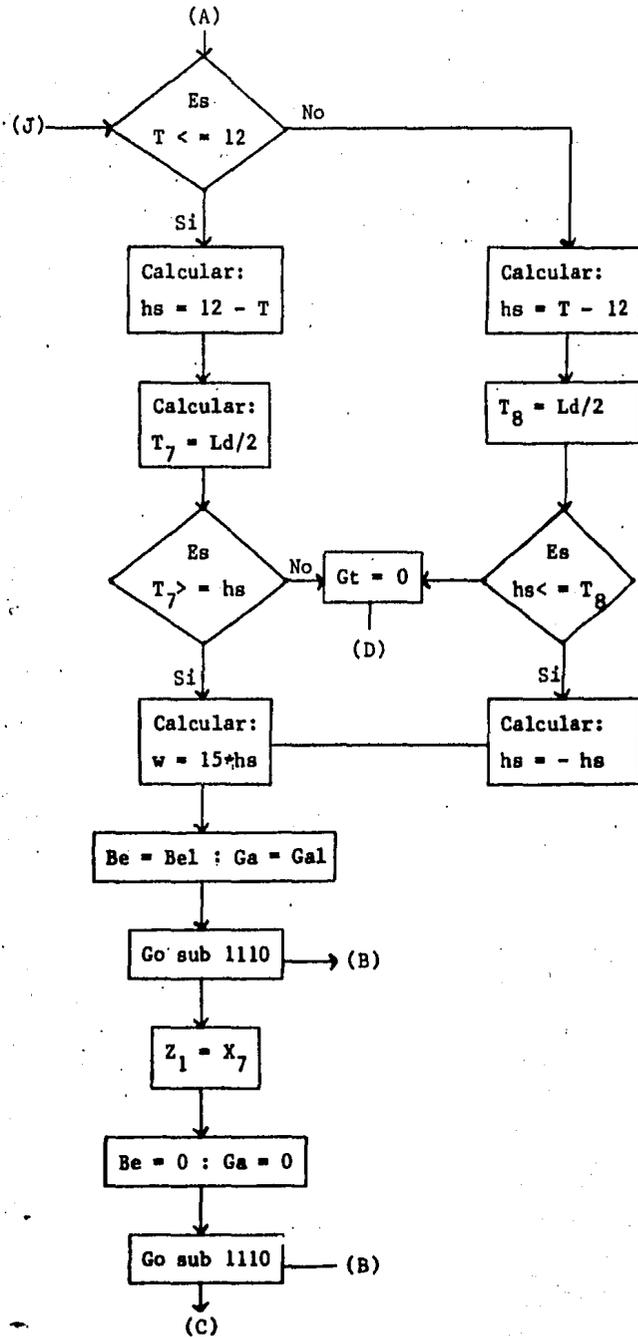
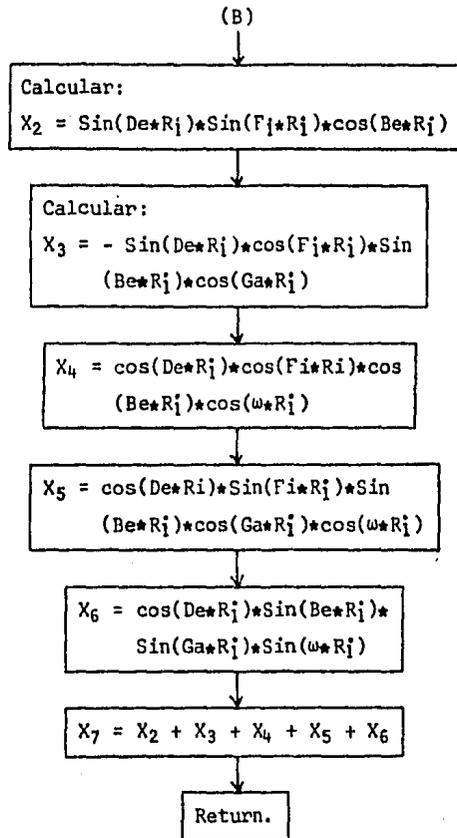
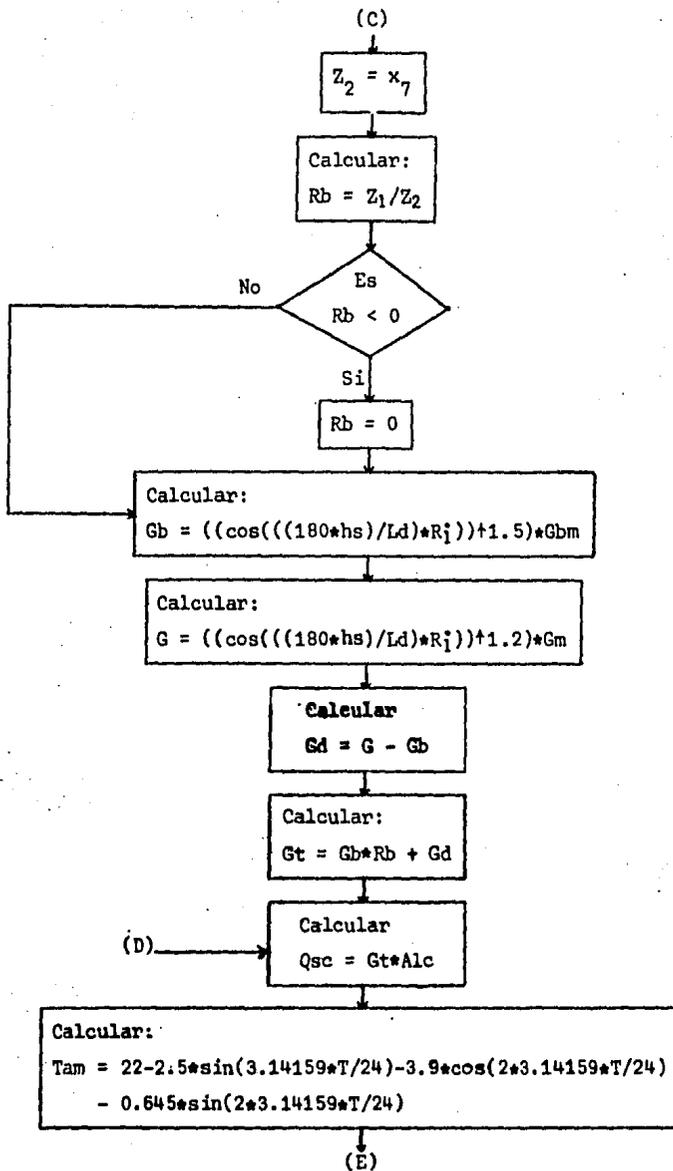


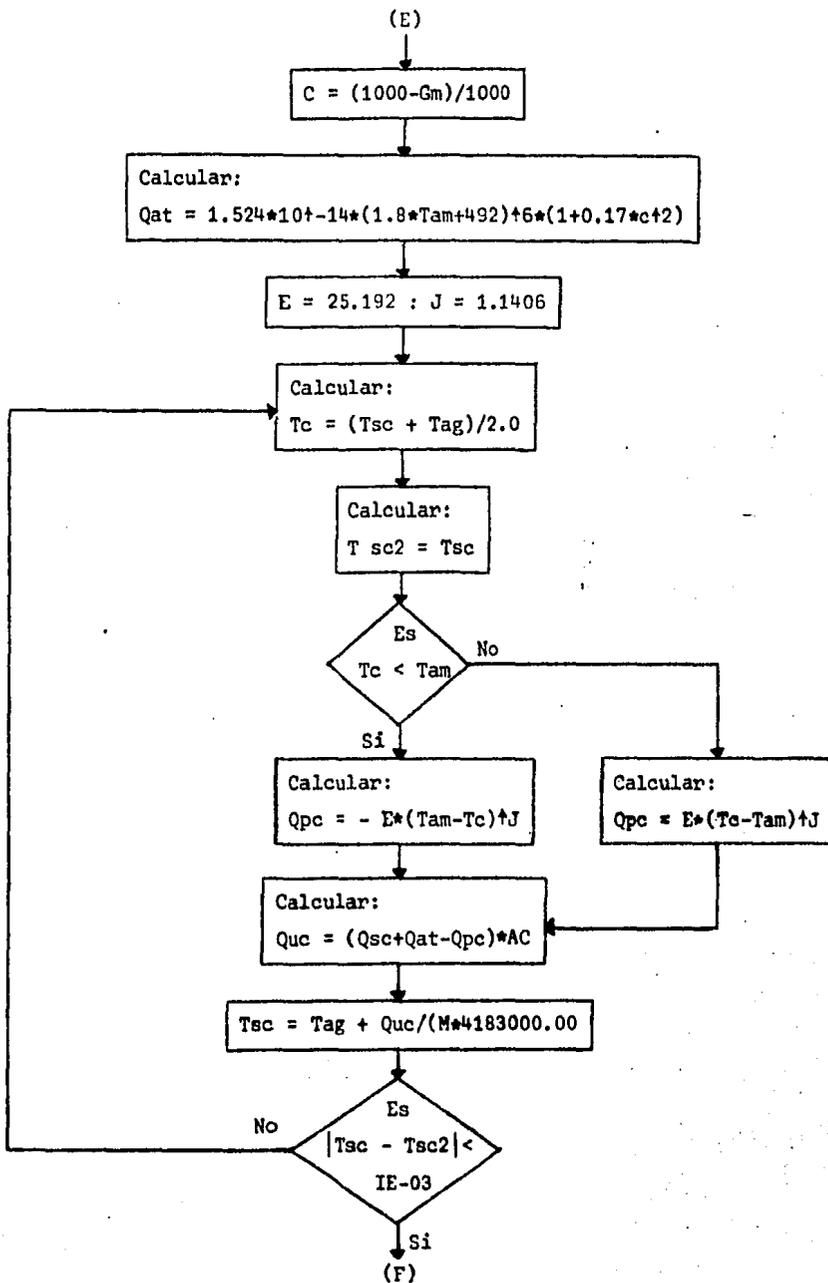
Diagrama de flujo:

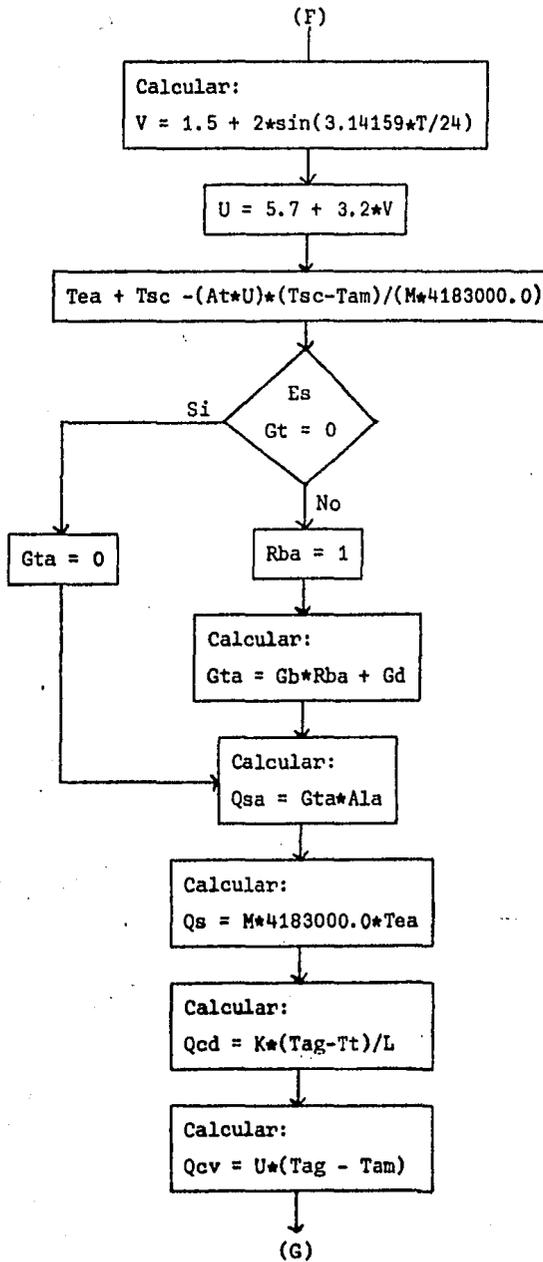


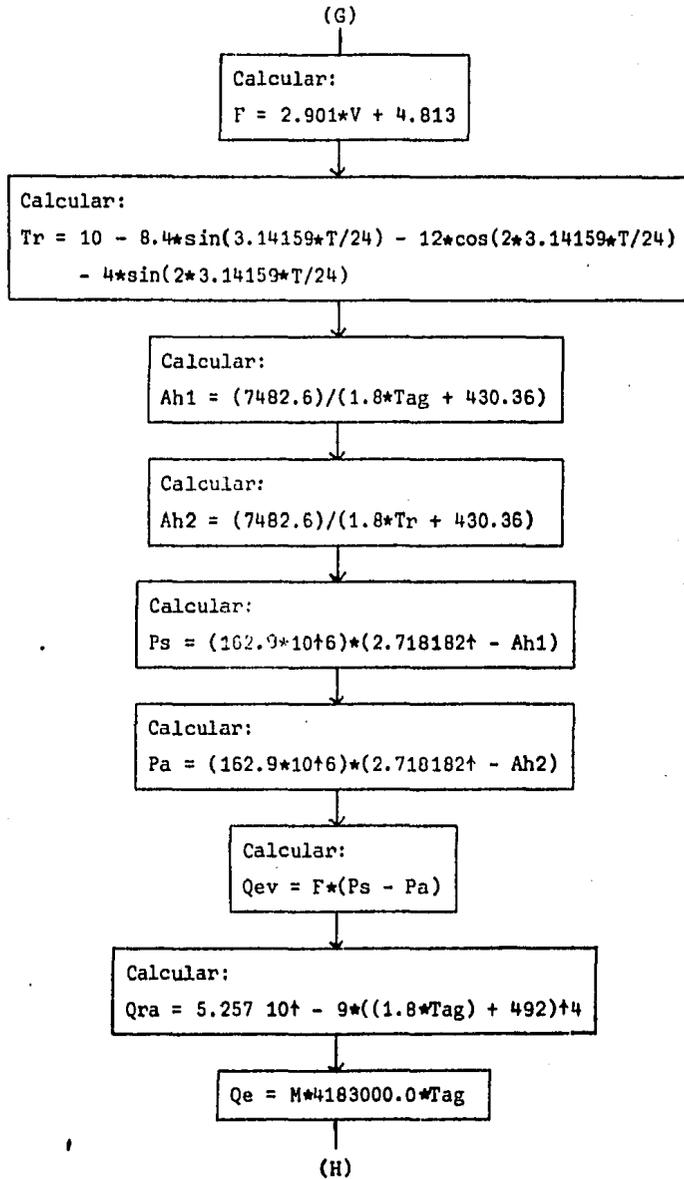


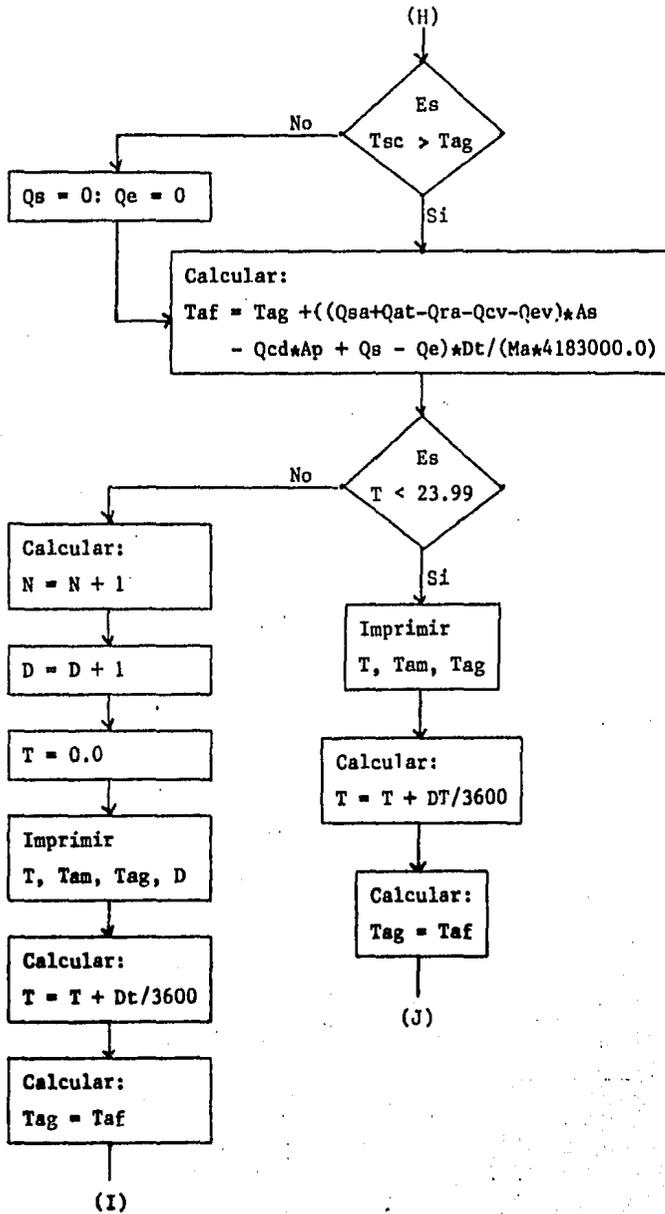












LISTADO DEL PROGRAMA

list

```

10 Rem ENTRADA DE DATOS: EN ESTA PARTE DEL PROGRAMA SE REGISTRAN
11 Rem LOS DATOS GEOGRAFICOS, FISICOS Y VARIABLES DE DISEÑO QUE
12 Rem SE VAN NECESARIOS EN EL CALCULO.
13 Rem NOTAS: A) EL MEN.COM SE CONTIENEN DE LOS APENDICES I Y II
14 Rem      B) LA TEMPERATURA A LA SALIDA DEL CAPTADOR TSC
15 Rem      SE SUPONE SER IGUAL A LA TEMPERATURA DEL AGUA
16 Rem      PARA INICIAR EL CALCULO.
17 Read Fin:Ar:As:G:Gm:Rb:Gals:Ts:La:Ap:Alc:Ala:Dt:Ma:Ms:Tsc
21 Read Tag:At:T
22 DIM A*(10) : TEMPLAMBIENTE*, TEMPLAERVAL*, DIA*
71 Rem CALCULO DE LA DURACION DEL DIA: EN ESTE PASO SE CALCULA
72 Rem LA DURACION DE LA IRRADIANCIA SOLAR EN EL DIA SEGUN SU
73 Rem LOCALIZACION DENTRO DEL ANO, ASI COMO LA DECISION DE
74 Rem CALCULAR O CANCELAR LA RADIACION SOLAR DEPENDIENDO DE
75 Rem LA HORA QUE SEA.
80 Ri=3.14159/180
90 Da=23.44*Sin((360*(Ri)*(284+N)/365))
100 Xi=-Tan(Fi*Ri)+Tan(Da*Ri)
110 L=Sen((1-Xi^2)/2)
120 L=Atn(L)*57.29578
130 If L>=0 Then Goto 150
140 L=+180
150 Ld=(2.0/15.0)*L
160 If T<=12 Then Goto 180
170 Goto 220
180 Hs=12-T
190 T7=Ld/2
200 If T7>=Hs Then Goto 270
210 Goto 450
220 Hs=T-12
230 T8=Ld/2
240 If Hs<=T8 Then Goto 280
250 Goto 450
260 Hs=Hs+
270 Hs=15*Hs
280 Pe=Re1 : G=Ge1
290 G=Sub 1120
300 Rem CALCULO DE THETA Y THETA Z: EN ESTE PASO SE CALCULA
301 Rem EL ANGULO ENTRE LA RADIACION SOLAR DIRECTA Y LA NORMAL
302 Rem AL PLANO.
310 Z1=X7
320 Pe=0 : G=0
330 G=Sub 1120
340 Z2=X7
350 Rb=Z1/Z2
360 If Rb<0 Then Rb=0
370 Rem CALCULO DE GR: EN ESTE PASO SE CALCULA LA COMPONENTE
371 Rem DIRECTA O ESPECULAR DE LA IRRADIANCIA MEDIANTE UNA
372 Rem ECUACION QUE VARIA EN FUNCION DE LA HORA SOLAR.
380 Gb=((Cos(((180*Hs)/Ld)*Ri)))/1.5)*Gm
390 Rem CALCULO DE GI EN ESTE PASO SE CALCULA LA ENERGIA
391 Rem SOLAR GLOBAL QUE RECIBE LA SUPERFICIE EN QUESTION
392 Rem VARIA CON LA HORA SOLAR.
400 G=((Cos(((180*Hs)/Ld)*Ri)))/1.2)*Gm
410 Rem CALCULO DE GD: EN ESTE PASO SE CALCULA LA COMPONENTE
411 Rem DIFUSA DE LA IRRADIANCIA COMO UNA COMBINACION LINEAL
412 Rem ENTRE LA ENERGIA SOLAR GLOBAL Y LA COMPONENTE ESPECULAR.
420 Gd=G-Gb
430 Rem CALCULO DE GT: EN ESTE PASO SE CALCULA LA GANANCIA SOLAR
431 Rem TOTAL COMO UNA COMBINACION LINEAL ENTRE LA COMPONENTE
432 Rem ESPECULAR, LA COMPONENTE DIFUSA Y EL FACTOR DE PROYECCION.
440 Gt=Gb+Rb+Gd : Goto 460
450 Gt=0
460 Rem CALCULO DE GSC: EN ESTE PASO SE CALCULA LA RADIACION SOLAR
461 Rem EN EL CAPTADOR COMO FUNCION DE LA GANANCIA SOLAR TOTAL

```

```

450 Rem Y LA ABSORTIVIDAD DEL CAPTADOR.
470 Gsc=Gt*Alc
480 Rem CALCULO DE TAM: EN ESTE PASO SE CALCULA LA TEMPERATURA
491 Rem AMBIENTE MEDIANTE LA APROXIMACION DE FUNCIONES SENOIDALES
482 Rem SOPPEUESTAS.
490 Q=2.5*Sin(3.14159*T/24)
491 P=3.9*Cos(2*3.14159*T/24)
492 Q=0.645*Sin(2*3.14159*T/24)
493 Tam=22-0-P-Q
500 Rem CALCULO DE QAT: EN ESTE PASO SE CALCULA LAS GANANCIAS POR
501 Rem RADIACION ATMOSFERICA CON UNA ECUACION QUE ESTA EN FUNCION
502 Rem DE LA NUBOSIDAD DEL CIELO CUBIERTO Y LA TEMP. AMBIENTE.
510 C=(1000-Gm)/1200
520 Qat=1.524*1011-14*(1.8*Tam+492)+6*(1+0.17*C12)
530 Rem CALCULO DE QPC: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
531 Rem DEL CAPTADOR COMO UNA FUNCION EXPONENCIAL. EL COEFICIENTE
532 Rem E Y EL EXPONENTE J DEPENDEN DEL TIPO DE CAPTADOR.
540 E=29.192 ; J=1.1406
550 Tc=(Tsc+Tag)/2.0
560 Tsc2=Tsc
570 If Tc<Tam Then Goto 590
580 Qpc=E*(Tc-Tam)J ; Goto 600
590 Qpc=E*(Tam-Tc)J
600 Rem CALCULO DE QUC: EN ESTE PASO SE CALCULA EL CALOR UTIL
601 Rem EN EL CAPTADOR COMO UNA FUNCION LINEAL ENTRE LA RADIACION
602 Rem SOLAR EN EL CAPTADOR, LA RADIACION ATMOSFERICA, LAS
603 Rem PERDIDAS DE CALOR EN EL CAPTADOR Y SU AREA.
610 Quc=(Qsc+Qat-Qpc)*Ac
620 Rem CALCULO DE TSC: EN ESTE PASO SE CALCULA LA TEMPERATURA A
621 Rem LA SALIDA DEL CAPTADOR MEDIANTE UN PROCESO ITERATIVO.
622 Rem LA ECUACION CONSIDERA EL INCREMENTO DE LA TEMPERATURA
623 Rem DEBIDO A LA GANANCIA META EN EL CAPTADOR.
630 Tsc=Tag+Quc/(M*418000.0)
640 If Abs(Tsc-Tsc2)<1E-03 Then Goto 660
650 Goto 590
660 Rem CALCULO DE TEA: EN ESTE PASO SE CALCULA LA TEMPERATURA
661 Rem A LA ENTRADA DE LA ALBERCA CONSIDERANDO QUE EXISTEN
662 Rem PERDIDAS DE CALOR EN EL TRAYECTO DEL CAPTADOR HACIA
663 Rem LA ALBERCA.
670 V=1.5+2*Sin(3.14159*T/24)
680 U=5.7+3.2*V
690 Tpa=Tsc-(At*U)*(Tsc-Tam)/(M*418000.0)
700 If Gt=0 Then Goto 740
710 Rem CALCULO DE QSA: EN ESTE PASO SE CALCULA LA GANANCIA
711 Rem SOLAR EN LA ALBERCA, MULTIPLICANDO LA GANANCIA TOTAL
712 Rem POR LA ABSORTIVIDAD DEL AGUA.
720 Rba=1
730 Gsa=Gh*Rba+Gd ; Goto 750
740 Gsa=0
750 Gsa=Gta*Ala
760 Rem CALCULO DE QSA: EN ESTE PASO SE CALCULA LA GANANCIA
761 Rem DE CALOR EN LA ALBERCA PROVOCADA POR EL AGUA QUE
762 Rem PROVIENE DEL CAPTADOR.
770 Gsa=M*418000.0*Qsa
780 Rem CALCULO DE QCD: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
781 Rem POR CONDUCCION HACIA LAS PAREDES Y PISO DE LA ALBERCA.
790 Gcd=Ks*(Tag-Tt)/l
800 Rem CALCULO DE QCV: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
801 Rem POR CONVECCION.
810 Gcv=Ua*(Tag-Tam)
820 Rem CALCULO DE GEV: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
821 Rem POR EVAPORACION. LA TEMPERATURA DE ROCIO SE OBTIENE
822 Rem EN BASE A LA TEMPERATURA DE BULBO SECO Y BULBO HUMEDO.
830 F=2.901*V+4.813
840 X=8.4*Sin(3.14159*T/24)
841 Y=12*Cos(2*3.14159*T/24)
842 Z=4*Sin(2*3.14159*T/24)
843 Tr=10-X-Y-Z
850 Ah1=(7487.6)/(1.8*Tag+430.34)
860 Ah2=(7487.6)/(1.8*Tr+430.34)

```

```

870 Pz=(162.9*10^6)*(2.718^Rit-Ah1)
880 Pa=(162.9*10^6)*(2.718^Rit-Ah2)
890 Qev=F*(Ps-Pa)
900 Rem CALCULO DE GRA: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
910 Rem POR RADIACION
910 Gra=5.257*10^4*9*(1.8*Tag)+492)14
920 Rem CALCULO DE Qe: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
921 Rem DE CALOR EN LA ALBERCA DEBIDO A LA CANTIDAD DE AGUA
922 Rem QUE VA HACIA EL CAPTADOR.
930 Qe=M*4183000.0*Tag
940 Rem CALCULO DE TAF: EN ESTE PASO SE CALCULA LA TEMPERATURA
941 Rem DE AGUA DE LA ALBERCA AL FINAL DE CADA CICLO.
950 If Tsc>Tag Then Goto 990
960 Qs=0 : Qe=0
970 Taf=Tag+((Qsa+Qat-Gra-Qev-Qcv)*As-Qcd*Ap+Qs-Qe)*Dt/(M*4183000.0)
1000 Rem CALCULO DEL INCREMENTO DEL TIEMPO: EN ESTE PASO SE
1001 Rem INCREMENTA EL TIEMPO Y EL DIA HACIENDO UN PROGRAMA
1002 Rem CONTINUO.
1010 If T(27.999) Then Goto 1070
1020 N=N+1 : T=Q.0
1030 D=D+1
1040 @ T,Tam,Tag,D
1050 T=T+Dt/3600 : Tag=Taf
1060 Goto 90
1070 @ T,Tam,Tag
1080 T=T+Dt/3600 : Tag=Taf
1090 Goto 160
1100 Rem SUBROUTINA THETA
1110 X2=(Sin(D*Pi)*Sin(Fi*Pi)*Cos(B*Pi))
1120 X3=-(Sin(D*Pi)*Cos(Fi*Pi)*Sin(B*Pi)*Cos(G*Pi))
1130 X4=Cos(D*Pi)*Cos(Fi*Pi)*Cos(B*Pi)*Cos(W*Pi)
1140 X5=Cos(D*Pi)*Cos(Fi*Pi)*Sin(B*Pi)*Cos(G*Pi)*Cos(W*Pi)
1150 X6=Cos(D*Pi)*Sin(B*Pi)*Sin(G*Pi)*Sin(W*Pi)
1160 X7=X2+X3+X4+X5+X6
1170 Return
1180 Data 20,123,40,96,863,676,30,0,0.8,10,0,2,156,0,95,0,9,3600,144,2.2E-03
1190 Data 10,10,0,508,0

```

>>

TABLA DE RESULTADOS

HORA	TEMP. AMBIENTE	TEMP. AL PERCA	DJA
8	21.226344665221	18	
9	21.991928297406	19.593841026662	
10	22.640179677144	11.349209985855	
11	23.121556711082	12.230358780482	
12	23.399998288422	13.184494433137	
13	23.45543749485	14.157375380572	
14	23.285187815256	15.079746578015	
15	22.904107536983	15.894331361992	
16	22.343531473681	16.552572055637	
17	21.649243756471	17.023190738241	
18	20.877245052342	17.296375874267	
19	20.091736671905	17.395453696916	
20	19.358597961595	17.431746873797	
21	18.741668407663	17.445883712833	
22	18.297959642636	17.444488924437	
23	18.073514088431	17.434813247643	
0	18.099996789213	17.423420357902	1
1	17.739635701442	17.417082582552	
2	17.652953231102	17.396670245393	
3	17.829490317826	17.369066926883	
4	18.241411869852	17.348996214982	
5	18.845677109526	17.31865743986	
6	19.587229845273	17.308868231978	
7	20.402783955501	17.352483432207	
8	21.226344665221	17.557419331093	
9	21.991928297406	17.940652985883	
10	22.640179677144	18.487378331888	
11	23.121556711082	19.162587427326	
12	23.399998288422	19.916346812285	
13	23.45543749485	20.689741494119	
14	23.285187815256	21.422627727685	
15	22.904107536983	22.049606312556	
16	22.343531473681	22.528681072881	
17	21.649243756471	22.828894271795	
18	20.877245052342	22.9353644154827	
19	20.091736671905	22.877775841459	
20	19.358597961595	22.764756528489	
21	18.741668407663	22.637369561353	
22	18.297959642636	22.501815943282	
23	18.073514088431	22.364970376677	
0	18.099996789213	22.233841031289	2
1	17.739635701442	22.115133836775	
2	17.652953231102	21.988104542783	
3	17.829490317826	21.834412498973	
4	18.241411869852	21.691924683722	
5	18.845677109526	21.554298879572	
6	19.587229845273	21.438549228304	
7	20.402783955501	21.362559664313	
8	21.226344665221	21.456458274461	
9	21.991928297406	21.729288625132	
10	22.640179677144	22.164258554555	
11	23.121556711082	22.732415898659	
12	23.399998288422	23.377877725186	
13	23.45543749485	24.043418016714	
14	23.285187815256	24.666971048385	
15	22.904107536983	25.198608051698	
16	22.343531473681	25.567332599926	
17	21.649243756471	25.767022812817	
18	20.877245052342	25.781428466998	
19	20.091736671905	25.63453621686	
20	19.358597961595	25.436268829748	
21	18.741668407663	25.228533608997	
22	18.297959642636	25.017510938811	
23	18.073514088431	24.818882745671	
0	18.099996789213	24.612897381663	3
1	17.739635701442	24.432748778895	

2	17.652953271102	24.275483013373
3	17.829490337826	24.00911551207
4	18.241411869852	23.821878840752
5	18.845677109526	23.621751344818
6	19.587229845273	23.43613584414
7	20.482983855501	23.327947568247
8	21.226344665221	23.342429716449
9	21.991928297406	23.556386136443
10	22.648179677144	23.93492166897
11	23.121556711082	24.443888200821
12	23.399998288422	25.031133207515
13	23.45543749485	25.648120796873
14	23.285187815856	26.208349642356
15	22.904187536983	26.678295304159
16	22.343531473681	27.00337718351
17	21.649843756471	27.153803564758
18	20.87745852342	27.12153992751
19	20.091736671985	26.930659864589
20	19.358997961595	26.690254902193
21	18.74168487663	26.442994615355
22	18.297959642636	26.195001830172
23	18.073514888431	25.953800489957
24	18.099996789213	25.723787161859
25	17.739635781442	25.513827315951
26	17.652953271102	25.286388485135
27	17.829490337826	25.049785302859
28	18.241411869852	24.812144468854
29	18.845677109526	24.581874368789
30	19.587229845273	24.364428893953
31	20.482983855501	24.209579277508
32	21.226344665221	24.215731159813
33	21.991928297406	24.401533693926
34	22.648179677144	24.752022083367
35	23.121556711082	25.232298741349
36	23.399998288422	25.792718855614
37	23.45543749485	26.374539988811
38	23.285187815856	26.916313845652
39	22.904187536983	27.368758221985
40	22.343531473681	27.661585529839
41	21.649843756471	27.788932644039
42	20.87745852342	27.735874235785
43	20.091736671985	27.523952285785
44	19.358997961595	27.263824811885
45	18.74168487663	26.998899252981
46	18.297959642636	26.732866559697
47	18.073514888431	26.474888997392
48	18.099996789213	26.230678819577
49	17.739635781442	26.006839621554
50	17.652953271102	25.765432617442
51	17.829490337826	25.514696218989
52	18.241411869852	25.263889113256
53	18.845677109526	25.018859259519
54	19.587229845273	24.789597228183
55	20.482983855501	24.619882443319
56	21.226344665221	24.613235181217
57	21.991928297406	24.786181672085
58	22.648179677144	25.123712748185
59	23.121556711082	25.598963464598
60	23.399998288422	26.138412987479
61	23.45543749485	26.707474914797
62	23.285187815856	27.234864221838
63	22.904187536983	27.669488785681
64	22.343531473681	27.959898923186
65	21.649843756471	28.0761888892922
66	20.87745852342	28.012759458687
67	20.091736671985	27.792763652889
68	19.358997961595	27.523487954917
69	18.74168487663	27.249448869214
70	18.297959642636	26.976331168675
71	18.073514888431	26.718942963877

18
19
20
21
22
23
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
0

20.87724084342
22.071734471905
19.37597941595
18.741419497447
18.297259642636
18.073514080431
18.099996789213
17.739635701442
17.652953231102
17.829490337826
18.2414111869852
18.045677109526
19.587229045273
20.402983855501
21.276344665221
21.991928297406
22.640179677144
23.121556711002
23.799998288422
23.45543749485
23.205187115056
22.904107536983
22.343531473601
21.649043756471
20.877245052342
20.091736671925
19.358997961595
18.741668407663
18.297959642636
18.073514080431
18.099996789213

20.101708525637
27.52674361917
27.70212510775
27.429615094997
27.16052247952
25.082562465491
26.633440195611
26.398497507761
26.14587288921
25.083071368294
25.621012578024
25.365596805255
25.125276958518
24.947449596426
24.932261951511
25.095787524707
25.422076554144
25.870822967998
26.414480410609
26.971770421555
27.409956130901
27.912429841151
28.193314046018
28.303198296692
28.233952110169
28.009837811106
27.732578249447
27.451582744711
27.172107665678
26.905796803039
26.644348583644

9

18

Los resultados obtenidos en el programa se han graficado en la figura N° 9 de donde se puede ver la temperatura a la que estará la alberca una vez alcanzado el estado permanente.

En los capítulos siguientes se compararán los resultados obtenidos en el programa con los datos obtenidos en campo, y finalmente se calibrará el programa, para así obtener una solución confiable de diseño.

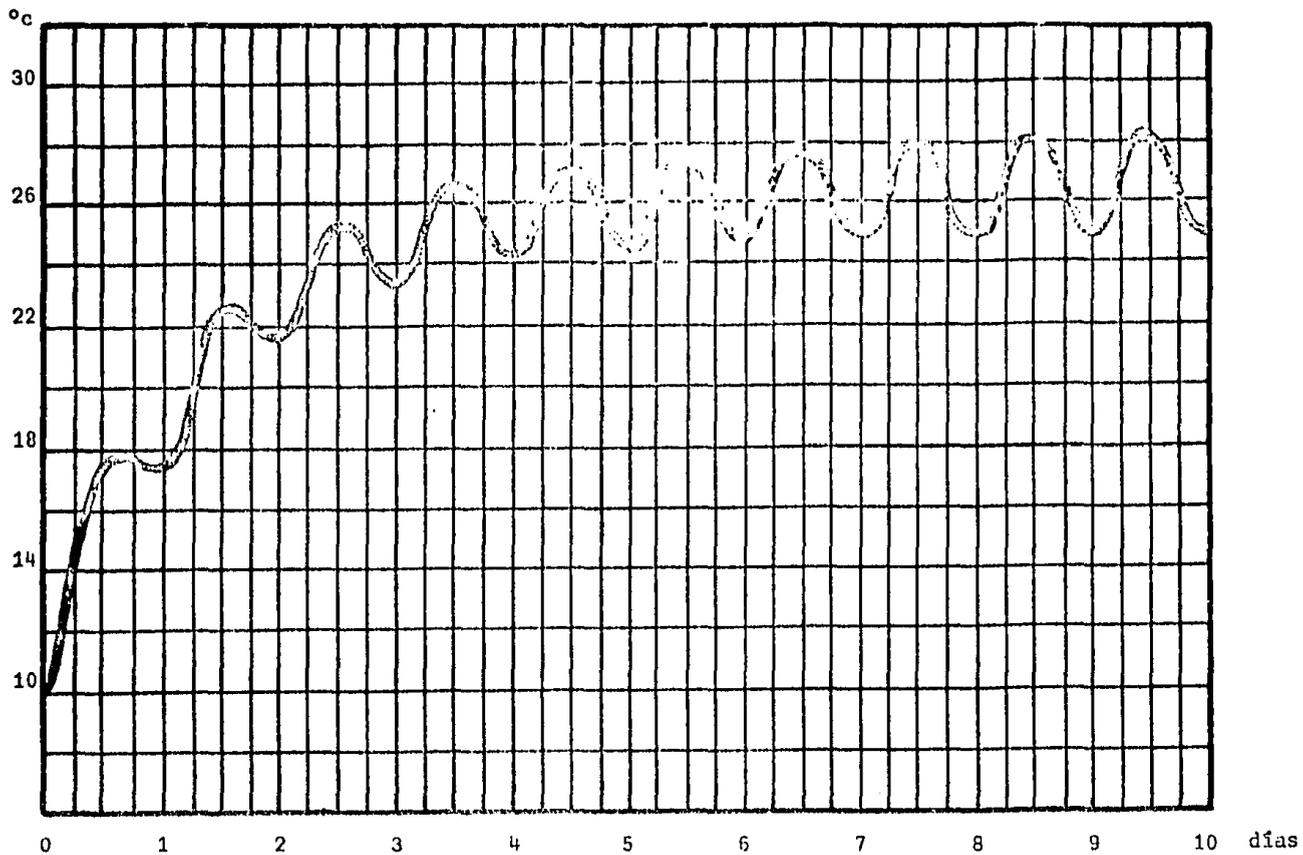


Fig 9. Gráfica de los resultados obtenidos en el programa

5. DESARROLLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

Uno de los puntos que más inquieta de una aproximación matemática mediante un modelo es conocer qué tanta cercanía tiene éste con respecto al fenómeno que se quiere representar.

La validez del uso del modelo matemático se obtiene de la comparación de los resultados que ofrece éste, con respecto a los datos experimentales que se obtienen en campo.

El análisis experimental requiere del estudio cuidadoso de las variables para considerar sólo aquellas que afectan realmente al sistema físico.

A continuación se muestra el desarrollo de las pruebas realizadas el 13 de junio de 1984 en Cuernavaca, Morelos.

Las variables medidas fueron: la temperatura ambiente o de bulbo seco, la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura del agua y la velocidad del viento.

La irradiancia solar, así como la nubosidad del cielo cubierto se obtuvieron mediante Tablas (ver Apéndice II) o bien estimativamente.

La temperatura ambiente se midió mediante un termómetro de bulbo de mercurio. La temperatura de bulbo húmedo se obtuvo cubriendo el bulbo del termómetro con una franela húmeda, haciendo pasar aire rápidamente.

La temperatura del agua se obtuvo utilizando un termómetro de alcohol colocado en el centro geométrico de la alberca suspendido mediante un flotador. Para poder hacer la lectura de la temperatura una persona tenía que sumergirse en la alberca.

Para medir la velocidad del viento se fabricó un disco inscribiendo en él, círculos con diámetros de diferente tamaño desde 5 cm hasta 50 cm, de forma tal que al generar humo en el centro del disco se podía medir su velocidad mediante un cronómetro (ver fig 10).

El disco se colocó en la orilla de la alberca y todas las lecturas de las variables mencionadas fueron medidas cada hora durante un intervalo de 24 horas (ver fig 11).

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos aquel día:

Tabla 2. Condiciones geográficas
y geométricas

Lugar: Cuernavaca, Morelos Fecha: 13/VI/84		
Variable	Magnitud	Unidad
A_s	23.56	m^2
A_p	40.83	m^2
n	163	-
ϕ	18.91	°
m_a	35.34	m^3

Tabla 3. Condiciones climatológicas

1	2	3	4	5	6
Hora	Tam(Tbs)	Tbh	Tag	v	Tr
13:00	23.6	15	25	0.2	9
14:00	23.5	15	25.2	0.2	9
15:00	23.2	15	25.4	0.1	9
16:00	22.8	15.5	25.5	0.3	10
17:00	22.2	14.8	25.2	0.2	9
18:00	21.6	15	24.7	0	10.5
19:00	21.1	14.6	24.2	0.7	10
20:00	20.5	14.8	23.5	3	11
21:00	20.0	14.5	23.5	0.2	10.5
22:00	19.5	14.5	23.4	2	11.5
23:00	18.5	14.5	23.0	0	11.5
00:00	18.5	14.5	23.0	0	11.5
01:00	18.0	14.6	22.5	0	12.1
02:00	18.0	14.6	22.5	0	12.1
03:00	17.7	15	22.0	0	13

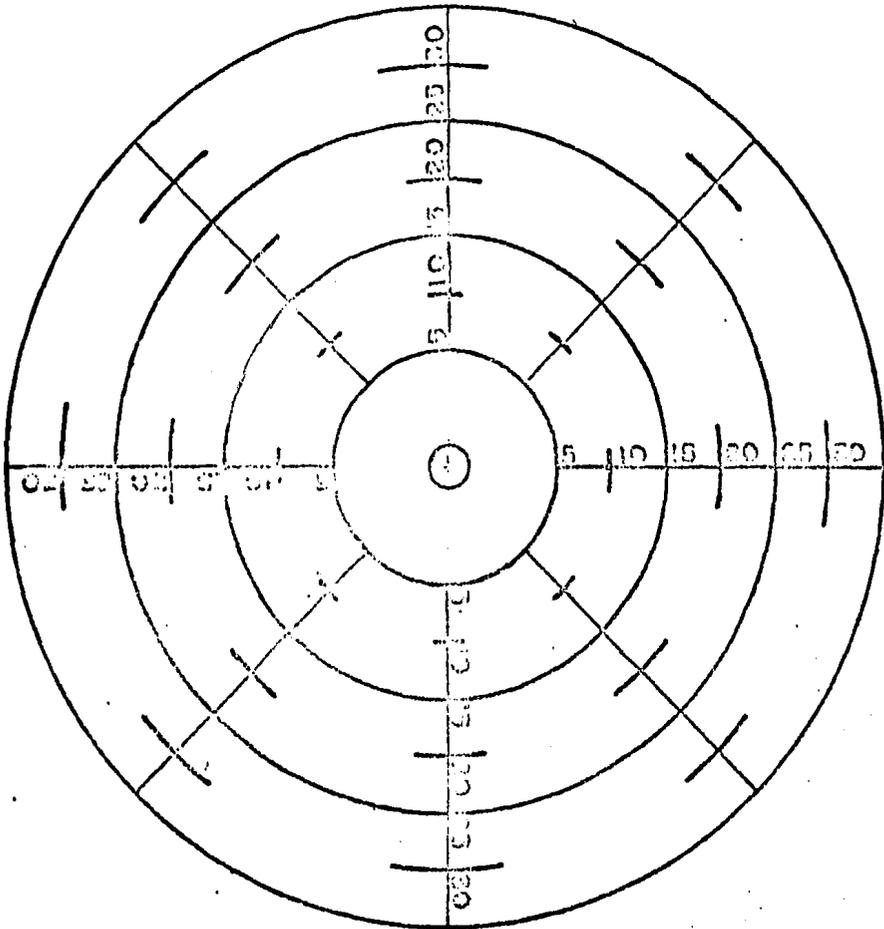


Fig 10. Disco fabricado para medir la velocidad del viento

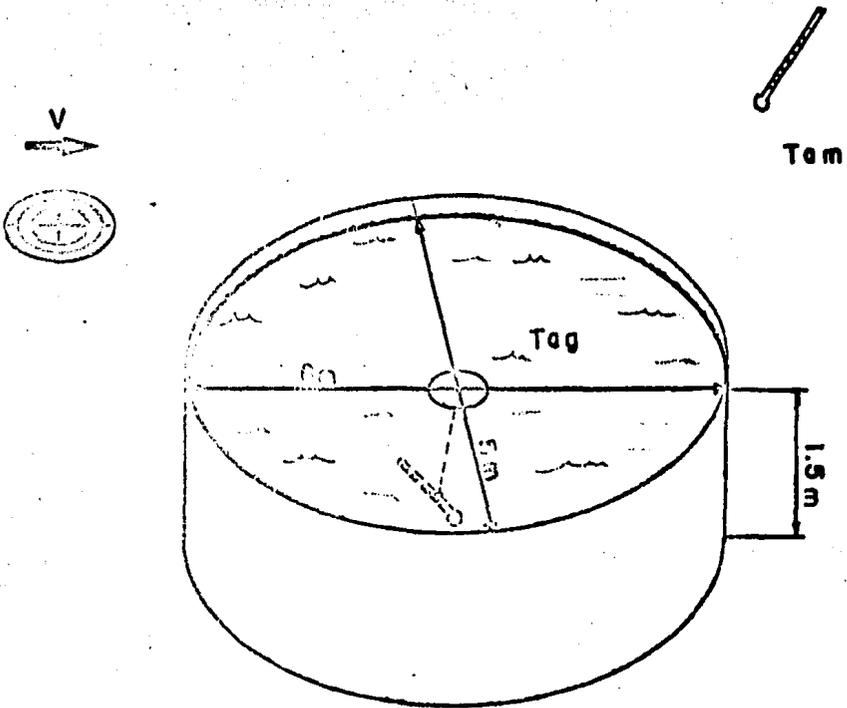


Fig 11. Pruebas realizadas en campo

Tabla 3. (Continuación)

1	2	3	4	5	6
Hora	Tam (tbs)	Tbh	Tag	v	Tr
04:00	17.7	15	22.0	0	13
05:00	17.5	15.5	22.0	0.2	14
06:00	17.7	15	22.5	0	13
07:00	18.0	14.6	23.0	0	12.1
08:00	19.0	14	24.0	0	11.5
09:00	19.6	14.5	24.4	0.1	11.5
10:00	20.2	14.5	24.8	0.2	11
11:00	21.2	14.6	25.0	0.2	10
12:00	22.5	15	25.0	0.2	9

Los datos obtenidos en la tabla 3 se han graficado en la figura 12 en donde se muestran las curvas de variación en un periodo de 24 hs. Debido a las condiciones climatológicas tan favorables del lugar la temperatura del agua, se encuentra siempre arriba de la temperatura ambiente.

Se puede ver que la velocidad del viento no varía considerablemente en el transcurso del día, pudiéndose considerar un valor promedio constante, para simularla.

Teniéndose la temperatura ambiente y la temperatura de bulbo húmedo, con la ayuda de la carta psicrométrica del lugar se puede obtener la temperatura de rocío que se muestra en la columna 6 de la tabla 3.

Con base en los datos experimentales obtenidos se procederá a la calibración del modelo matemático como se muestra más adelante.

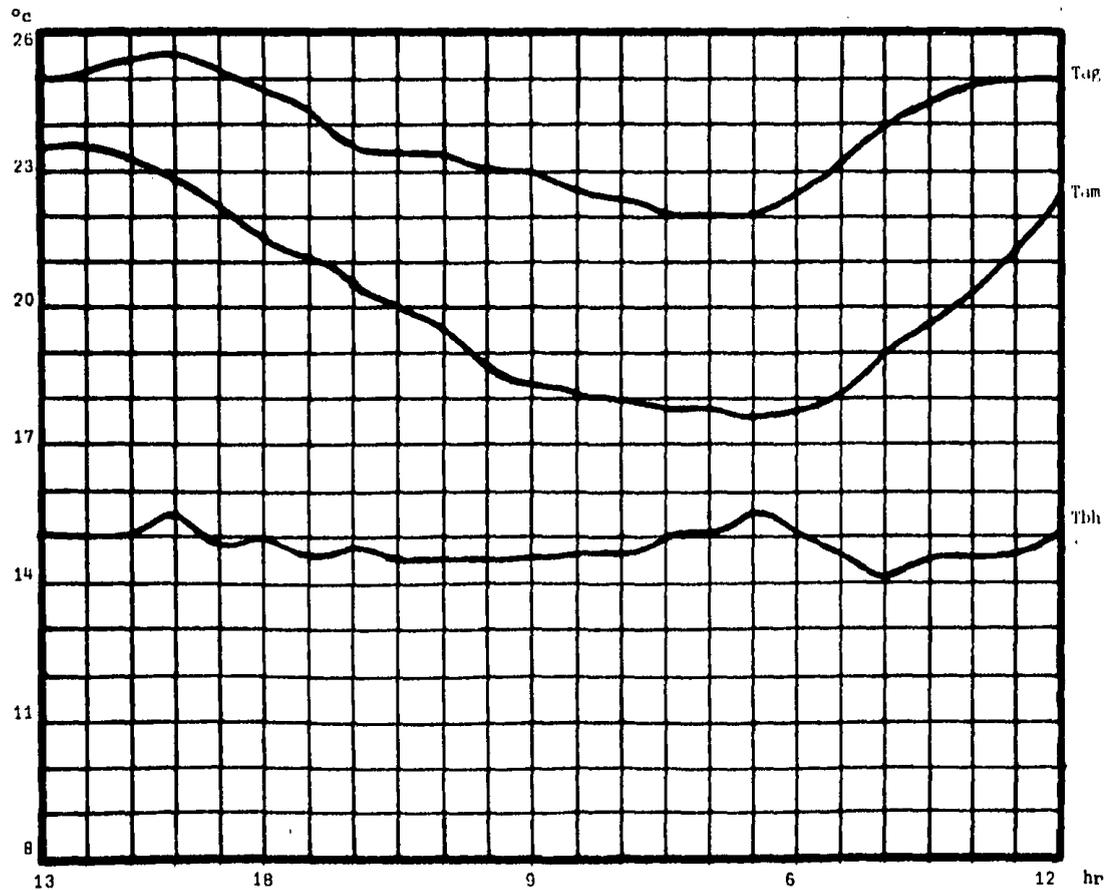


Fig 12. Gráfica de los resultados obtenidos en campo



Fig 12a. Medición de la temperatura del ambiente



Fig 12b. Medición de la temperatura de bulbo húmedo



Fig 12c. Medición de la temperatura del agua

6. CALIBRACION DEL MODELO SIN CALENTADORES SOLARES

Aun cuando las ecuaciones experimentales usadas en el modelo simulan aproximadamente el fenómeno físico, existen variaciones sensibles entre los resultados experimentales obtenidas en campo y los teóricos simulados por el modelo.

Para reducir estas variaciones el modelo debe calibrarse introduciendo en éste los datos más cercanos a la realidad, y haciendo uso de factores de ajuste.

Además debe comprobarse que el modelo sin captador puede representar una situación específica. De este modo, al considerar después las ganancias de calor en el cuerpo de agua provocado por el captador los resultados serán más aproximados a la realidad.

Si se observan con cuidado las variables que se introducen en el programa considerándolo sin captador se puede concluir que a no ser por la temperatura de rocío, los demás datos pueden considerarse como constantes.

La simulación de la temperatura ambiente y la de rocío mediante la superposición de varias funciones senoidales no es lo suficientemente precisa como para poder garantizar el ajuste del modelo matemático.

Una solución factible a este problema puede ser el uso de rectas que actúan con diferentes pendientes en función del intervalo que pretenden representar.

A continuación se presentan las Tablas y gráficas de la temperatura ambiente y la de rocío, así como las ecuaciones empleadas para poder simularlas (ver figs 13 y 14).

Tabla 4. Comparación entre la temperatura ambiente real y la simulada

Hora	Tam real	Tam sim
13	23.6	23.59
14	23.5	23.40
15	23.2	23.2
16	22.8	22.71
17	22.2	22.19
18	21.6	21.67
19	21.1	21.15
20	20.5	20.63
21	20.0	20.11
22	19.5	19.59
23	18.5	19.07
24	18.5	18.55
1	18	18
2	18	17.94
3	17.7	17.88
4	17.7	17.82

Tabla 4. (Continuación)

Hora	Tam real	Tam sim
5	17.5	17.76
6	17.7	17.7
7	18.0	18.33
8	19.0	18.95
9	19.6	19.58
10	20.2	20.20
11	21.2	21.33
12	22.5	22.46

Ecuaciones utilizadas:

$T_{\text{sim}} = -0.47T + 19.06$	$1 < T < 6$
$T_{\text{sim}} = 0.32T + 13.95$	$6 < T < 10$
$T_{\text{sim}} = 1.15T + 8.86$	$10 < T < 13$
$T_{\text{sim}} = -0.2T + 26.2$	$13 < T < 15$
$T_{\text{sim}} = -0.52T + 31.03$	$15 < T < 24$

Tabla 5. Comparación entre la temperatura de rocío real y la simulada

Hora	Tr real	Tr sim
13	9	9
14	9	9
15	9	9
16	10	9.25
17	9	9.6
18	10.5	10

Tabla 5. (Continuación)

Hora	Tr real	Tr sim
19	10	10.4
20	11	10.75
21	10.5	11.1
22	11.5	11.5
23	11.5	11.5
24	11.5	11.5
1	12	11.75
2	12	12.25
3	13	12.9
4	13	13.4
5	14	14
6	13	13
7	12	12.25
8	11.5	11.5
9	11.5	11.5
10	11	10.9
11	10	10
12	9	9

Ecuaciones utilizadas:

$$Tr = 0.5T + 11.5 \quad 0 < T < 5$$

$$Tr = -0.83T + 18.17 \quad 5 < T < 8$$

$$Tr = 11.5 \quad 8 < T < 9$$

$$Tr = -0.83T + 19 \quad 9 < T < 12$$

$$Tr = 9 \quad 12 < T < 15$$

$$Tr = 0.35T + 3.75 \quad 15 < T < 22$$

$$Tr = 11.5 \quad 22 < T < 24$$

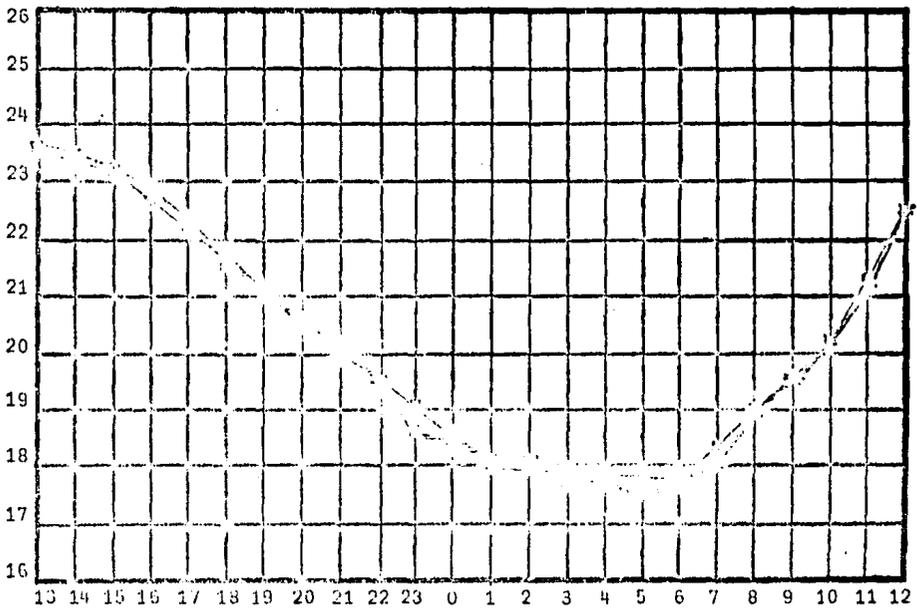


Fig 13. Gráfico de la simulación de la temperatura ambiente mediante ecuaciones lineales

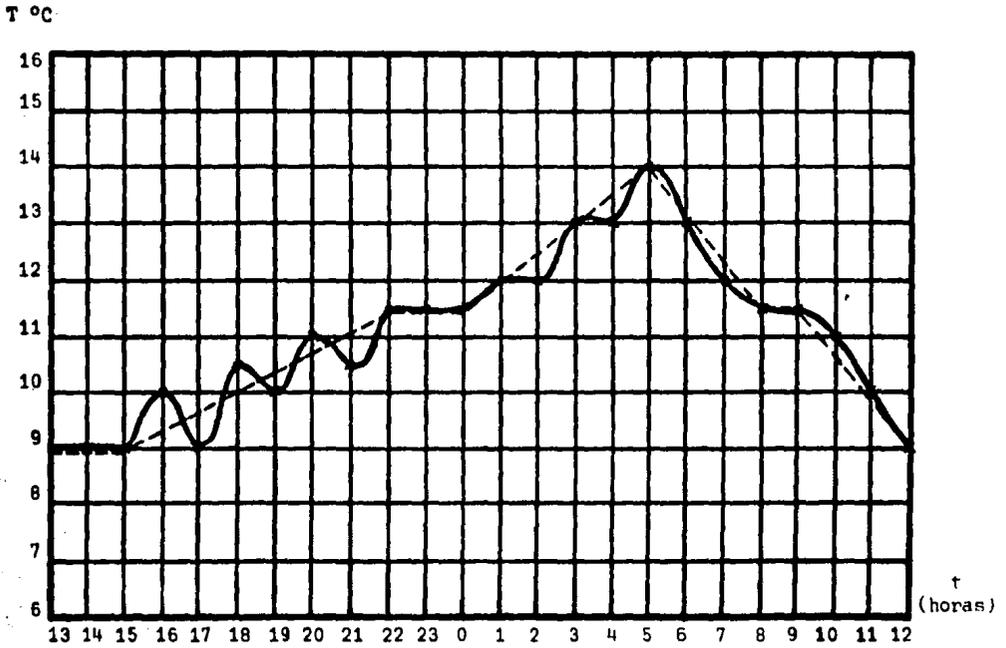


Fig 14. Gráfica de la simulación de la temperatura de rocío mediante ecuaciones lineales

Una vez habiendo aproximado lo más posible las temperaturas ambiente y de rocío a las reales medidas en campo.

Se propone un ajuste en la ecuación (7) de la forma:

$$T_{af} = T_{ag} + \frac{[a Q_g - b Q_p] \Delta t}{m_a c_p} \quad (4a)$$

en donde los coeficientes a y b son factores de ajuste que debieran ser cercanos a la unidad.

El factor a afecta directamente las ganancias de calor del cuerpo de agua y se puede interpretar como el coeficiente de ajuste de las ganancias por haberlas considerado como un promedio en lugar de los valores puntuales exactos medidos en campo.

El factor b afecta directamente las pérdidas totales en el cuerpo de agua y se puede interpretar como el coeficiente de ajuste por haber introducido el error que aporta a la ecuación general cada una de las ecuaciones que integran ésta.

De este modo, con base en el perfil de la temperatura del agua medida en campo el programa en su versión sin captador debe poder simular la temperatura a la que estará el agua.

Tanto el factor a y b se obtienen por iteraciones sucesivas hasta poder simular la temperatura deseada.

A continuación se muestra el listado del programa en la versión sin captador.

list

```

2 Rem ENTRADA DE DATOS: EN ESTA PARTE DEL PROGRAMA SE REGISTRAN
3 Rem LOS DATOS GEOGRAFICOS, FISICOS Y VARIABLES DE DISEÑO QUE
4 Rem SFERAN NECESARIOS EN EL CALCULO.
5 Rem NOTAS: A) FI, GM, GBM SE OBTIENEN DE LOS APENDICES I Y II
6 Rem          B) LA TEMPERATURA A LA SALIDA DEL CAPTADOR TSC
7 Rem          SE SUPONE SER IGUAL A LA TEMPERATURA DEL AGUA
8 Rem          PARA INICIAR EL CALCULO.
9 Read Fi, Ni, As, Gm, Gbm, Ki, Tt, L, Ap, Aa, Dt, Ma, Tag, T
10 Input A, B
11 a="TIEMPO", "TEMP. AMBIENTE", "TEMP. ALBERCA", "DIA"
12 Rem CALCULO DE LA DURACION DEL DIA: EN ESTE PASO SE CALCULA
13 Rem LA DURACION DE LA IRRADIANCIA SOLAR EN EL DIA SEGUN SU
14 Rem LOCALIZACION DENTRO DEL AÑO, ASI COMO LA DECISION DE
15 Rem CALCULAR O CANCELAR LA RADIACION SOLAR DEPENDIENDO DE
16 Rem LA HORA QUE SEA.
17 Ri=3.14159/180
18 De=23.45*Sin((360*Ri)*(284+N)/365)
19 X1=-Tan(Fi*Ri)*Tan(De*Ri)
20 L=Sin(1-X1^2)/X1
21 l=Atn(l)*57.29578
22 If L>0 Then Goto 50
23 L=L+180
24 Ld=(2.0/15.0)*l
25 If T<=12 Then Goto 160
26 Goto 230
27 Hs=12-T
28 T7=Ld/2
29 If T7=Hs Then Goto 280
30 Goto 460
31 Hs=T-12
32 T8=Ld/2
33 If Hs<=T8 Then Goto 270
34 Goto 460
35 Hs=-Hs
36 W=15*Hs
37 Rem CALCULO DE GR: EN ESTE PASO SE CALCULA LA COMPONENTE
38 Rem DIRECTA O ESPECULAR DE LA IRRADIANCIA MEDIANTE UNA
39 Rem ECUACION QUE VARIA EN FUNCION DE LA HORA SOLAR
40 Gb=((Cos(((180*Hs)/Ld)*Ri))^1.5)*Gbm
41 Rem CALCULO DE G: EN ESTE PASO SE CALCULA LA ENERGIA
42 Rem SOLAR GLOBAL QUE RECIBE LA SUPERFICIE EN CUESTION
43 Rem VARIA CON LA HORA SOLAR.
44 G=((Cos(((180*Hs)/Ld)*Ri))^1.2)*Gm
45 Rem CALCULO DE GD: EN ESTE PASO SE CALCULA LA COMPONENTE
46 Rem DIFUSA DE LA IRRADIANCIA COMO UNA COMBINACION LINEAL.
47 Rem ENTRE LA ENERGIA SOLAR GLOBAL Y LA COMPONENTE ESPECULAR
48 Gd=.5*Gb
49 Rem CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR EN LA ALBERCA
50 Rba=1
51 Gte=Gb+Rba*Gd : Goto 498
52 Gte=0
53 Rem CALCULO DE TAM: EN ESTE PASO SE CALCULA LA TEMPERATURA
54 Rem AMBIENTE MEDIANTE LA APROXIMACION DE FUNCIONES LINEALES
55 If T<=6 Then Goto 496
56 If T<=10 Then Goto 497
57 If T<=13 Then Goto 498
58 If T<=15 Then Goto 499
59 If T<=24 Then Goto 500
60 Tam=-0.86*T+18.86 : Goto 510
61 Tam=0.67*T+13.93 : Goto 510

```

```

498 Tam=1.133*T+8.56 : Goto 510
499 Tan=-0.7*T+26.2 : Goto 510
500 Tam=-0.52*T+31.83 : Goto 510
510 Rem CALCULO DE QAT: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS GANANCIAS POR
511 Rem RADIACION ATMOSFERICA CON UNA ECUACION QUE ESTA EN FUNCION
512 Rem DE LA HUBOSIDAD DEL CIELO CUBIERTO Y LA TEMP. AMBIENTE.
513 C=(1000-Gm)/1000
514 Qat=1.524*10^1-14*(1.8*Tam+492)+A*(1+0.17*C^1.2)
515 V=1+2.54*Sin(3.14159*T/24)
516 U=5.7+3.2*V
517 Qso=Sta*A1a
518 Rem CALCULO DE QCD: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
519 Rem POR CONDUCCION HACIA LAS PAREDES Y PISO DE LA ALBERCA.
520 Qcd=K*(Tag-Tt)/L
521 Rem CALCULO DE QCV: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
522 Rem POR CONVECCION.
523 Qcv=U*(Tag-Tan)
524 Rem CALCULO DE QEV: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
525 Rem POR EVAPORACION. LA TEMPERATURA DE ROCIO SE OBTIENE
526 Rem EN BASF A LA TEMPERATURAS DE BULBO SECO Y BULBO HUMEDO.
527 F=2.901*V+4.813
528 Rem CALCULO DE LA TEMPERATURA DE ROCIO
529 If T<=5 Then Goto 922
530 If T<=8 Then Goto 923
531 If T<=9 Then Goto 924
532 If T<=12 Then Goto 925
533 If T<=15 Then Goto 926
534 If T<=22 Then Goto 927
535 If T<=24 Then Goto 928
536 Tr=0.5*T+11.5 : Goto 930
537 Tr=-0.83*T+18.17 : Goto 930
538 Tr=11.5 : Goto 930
539 Tr=-0.83*T+19 : Goto 930
540 Tr=9 : Goto 930
541 Tr=-0.35*T+3.75 : Goto 930
542 Tr=11.5 : Goto 930
543 Ah1=(7482.6)/(1.8*Tag+430.76)
544 Ah2=(7482.6)/(1.8*Tr+430.76)
545 Ps=(162.9*10^6)/(2.7182811-Ah1)
546 Pa=(162.9*10^6)/(2.7182811-Ah2)
547 Qev=F*(Ps-Pa)
548 Rem CALCULO DE GRA: EN ESTE PASO SE CALCULAN LAS PERDIDAS
549 Rem POR RADIACION.
550 Gr=5.257*10^1-9*(1.8*Tag)+472)+4
551 Rem CALCULO DE TAF: EN ESTE PASO SE CALCULA LA TEMPERATURA
552 Rem DE AGUA DE LA ALBERCA AL FINAL DE CADA CICLO.
553 Qp=(Gr+Qev+Qcv)*As+Qcd*Ap
554 Qg=(Qsa+Qat)*As
555 Taf=Tag+(A*Qg-B*Qp)*Dt/(Ma+183220.0)
556 Rem CALCULO DE INCREMENTO DE TIEMPO: EN ESTE PASO SE
557 Rem INCREMENTA EL TIEMPO Y EL DIA HACIENDO UN PROGRAMA
558 Rem CONTINUO.
559 If T<23.99 Then Goto 1070
560 N=N+1 : T=0.0 : Goto 1070
561 D=D+1
562 @ T,Tan,Tag,D
563 T=T+Dt/3600
564 Tag=Taf
565 Goto 500
566 @ T,Tan,Tag
567 T=T+Dt/3600
568 Tag=Taf
569 Goto 1000
570 Data 18.91,163,23.56,788,498,0.8,15,0.2,40,83,0.9,3600,35.34,25,13

```

En la figura 15 se observa que las temperaturas al iniciar y al finalizar el ciclo en estado estacionario son iguales para las dos curvas, y que las diferentes entre éstas a lo largo del día se deben a la simplificación de que existe una temperatura característica del cuerpo de agua en lugar de un campo de temperaturas variable en el espacio, así como a la generalización de algunas condiciones climatológicas (radiación solar y nubosidad).

Sin embargo, a pesar de esta aparente inexactitud, para un diseñador de sistemas solares la solución que aporta el modelo le proporciona el intervalo de temperaturas del agua requerido para poder proyectar una instalación en forma razonablemente confiable.

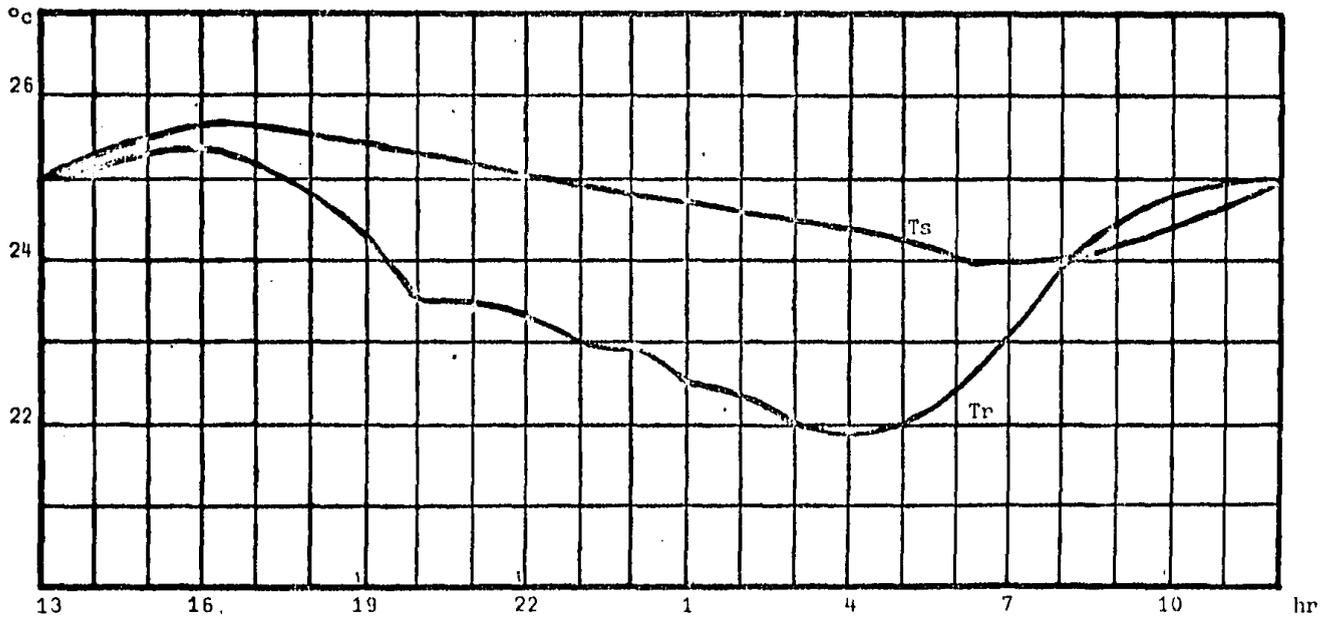


Fig 15. Comparación entre la temperatura real del agua de la alberca y la simulada mediante el programa

7. SELECCION DEL TIPO DE CAPTADOR

En los capítulos anteriores se habló del comportamiento térmico del sistema de calefacción. Este capítulo se enfocará a la selección del tipo de panel solar adecuado para este sistema.

Normalmente los paneles empleados son de construcción sencilla ya sea de tubos con aletas colectoras o bien de placas paralelas (fig 16).

Entre las simulaciones que pueden realizarse con el modelo matemático se pueden obtener resultados para distintos tipos de captadores, como los que tienen una cubierta de vidrio y aislante en la parte posterior y los llamados simples o desnudos.

Los paneles aislados aunque reducen la captación de radiación solar también reducen considerablemente las pérdidas térmicas.

Graficando los resultados obtenidos en la simulación de ambos tipos de captadores se obtuvieron las curvas de la figura 17.

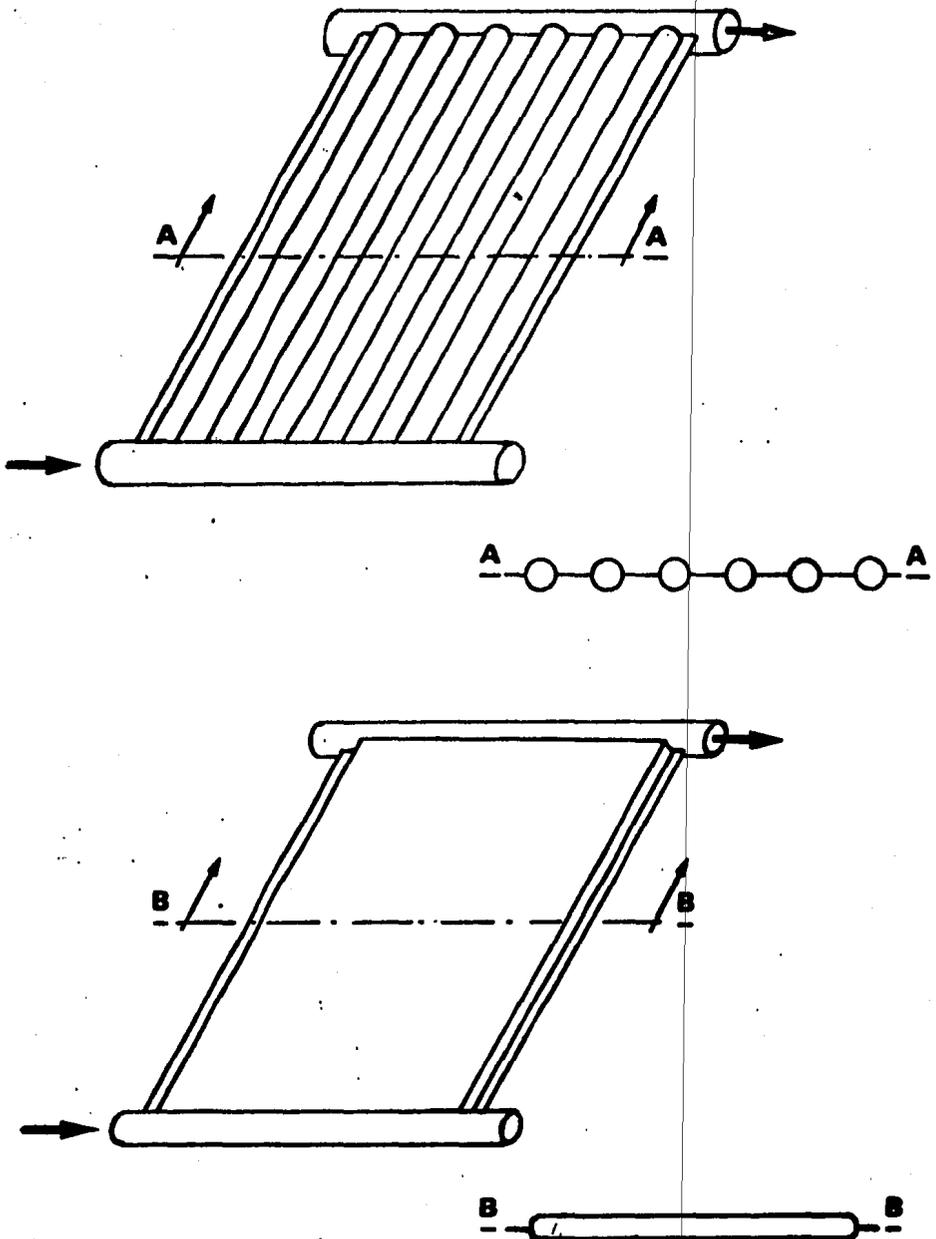


Fig 16. Tipos de captadores

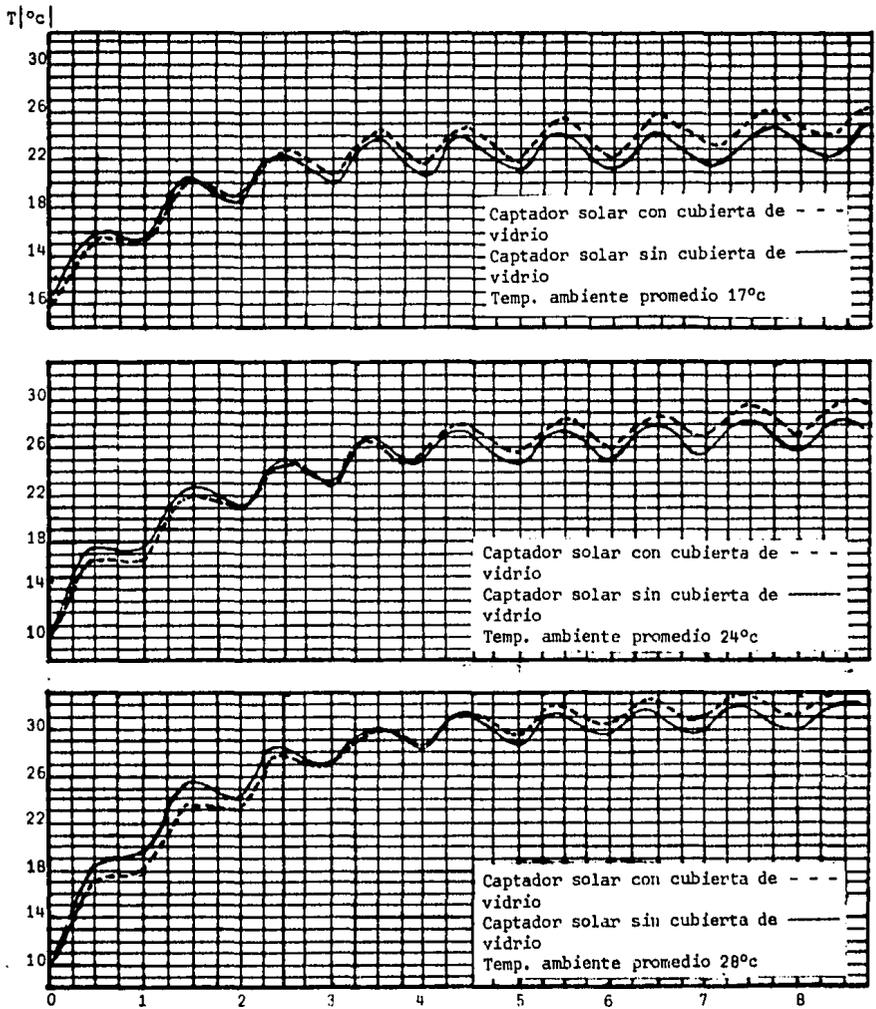


Fig 17. Comparación entre captadores con vidrio y sin él

Se puede observar que las temperaturas alcanzadas para los dos tipos de colector en la alberca no tienen una diferencia mayor que 1 o 2°C entre sí y que la respuesta térmica al inicio del funcionamiento hasta alcanzar una variación cíclica estacionaria de temperaturas es muy semejante para ambos tipos de colectores. Por lo anterior se concluye que aunque los sistemas con panel desnudo alcanzan una temperatura máxima ligeramente menor a la del sistema aislado y en un periodo un poco más prolongado, no es conveniente el uso de sistemas aislados debido a la gran diferencia en el costo inicial de la instalación y las escasas ventajas que puede aportar.

Existen distintos criterios para el diseño de paneles solares, pero en general todos coinciden en que el cobre es el material ideal ya que no tiene problema de corrosión y tiene una conductividad térmica muy elevada.

Los paneles deben ser soldados con estaño evitando cámaras de aire en las uniones ya que estas funcionarían como aislante térmico.

La distribución de la circulación del agua por los paneles debe ser en arreglos serie-paralelo, buscando que las temperaturas a la salida de los paneles no sea muy elevada para reducir las pérdidas térmicas en esos paneles a un mínimo.

Las dimensiones de los colectores varían dependiendo de las características geográficas y climatológicas del lugar, así como de la temperatura requerida por el usuario. Por lo tanto, el modelo propuesto proporciona el área del captador requerida para alcanzar la temperatura deseada.

La figura 18 muestra una instalación completa de un sistema de calefacción de alberca.

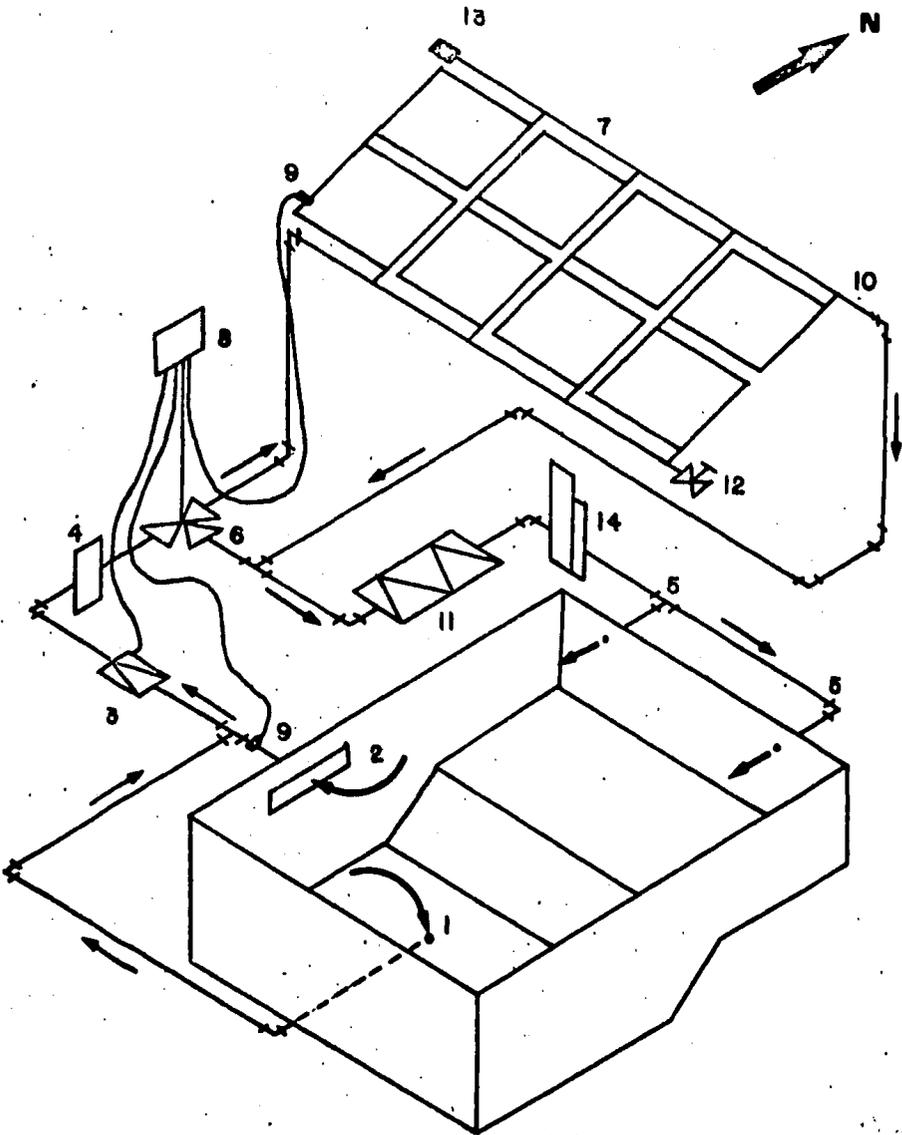


Fig 18. Instalación completa (tomado de la ref 7)

Si siguiendo el esquema dibujado, el agua sale del vaso de la alberca a través del sumidero (1) y el rebosadero (2), impulsada por la bomba (3). Pasa por el filtro (4) y el clorador (14) y de aquí, normalmente, retornaría al vaso por el lado opuesto (5).

Al introducir la instalación solar, el agua es conducida a una válvula de tres vías (6), controlada manualmente. De este modo, cuando hay energía disponible en los paneles solares, el controlador diferencial de temperaturas (8 y 9) arrancará la bomba toda vez que la temperatura de los paneles será superior a la de la alberca. La válvula (6) permite operar el sistema de circulación manualmente para fines de filtrado y cloración sin pasar por los paneles solares (7).

Los colectores solares se montan en serie-paralelo con la salida del agua caliente en la esquina superior (10), que se encuentra diagonalmente opuesta a la entrada.

Conviene instalar una válvula de vaciado (12) en el otro extremo inferior, así como un respiradero en el punto más alto, o una válvula de alivio por sobrepresión, según convenga (13). El agua calentada mediante el sol vuelve al circuito de la depuradora (4) en un punto anterior a la conexión de cualquier equipo auxiliar de calefacción opcional (11).

Hasta aquí se ha mostrado una forma de encontrar el área de captación requerida mediante un modelo sencillo de aplicar y se ha descrito la instalación completa y aspectos necesarios para poder implantar un sistema de este tipo.

De acuerdo a lo anterior dependerá del diseñador el criterio y la forma que juzgue más conveniente para llevar a cabo una instalación solar de este tipo, auxiliado por el modelo propuesto para seleccionar el área adecuada de captadores.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del planteamiento anterior se puede concluir que:

1. Debido a que la República Mexicana se encuentra ubicada en una zona de gran insolación anual, los sistemas solares son una solución viable para la calefacción de albercas

2. Se puede lograr simular la temperatura que alcanzará una alberca mediante un modelo matemático.

La confiabilidad del uso de éste, dependerá de la validez de las ecuaciones que integran el modelo así como que esté calibrado adecuadamente. Se ha demostrado que ese modelo puede ser tan preciso como 1 o 2°C

3. La relación de áreas captador-alberca depende de las condiciones geográficas y climatológicas del lugar en cuestión así como de las variables de diseño. La tabla 6 muestra las temperaturas alcanzadas para diferentes condiciones.

Tabla 6. Comparación entre variables de diseño.
 La tabla contiene la temperatura máxima del agua una vez alcanzado el estado estacionario ($A_s = 96 \text{ m}^2$, $\beta = 30^\circ$, captador simple)

\dot{m} ↓ \begin{matrix} AC \\ AS → \end{matrix}	24 m ²	48 m ²	72 m ²
	25%	50%	75%
0.0011	25.71	27.51	28.69
0.0022	25.82	27.80	29.19
0.004	25.88	27.94	29.45

Se observa que al aumentar el flujo de la bomba de circulación, disminuyen las pérdidas térmicas en el captador, repercutiendo en un aumento en la temperatura del agua. Sin embargo esta variación es menos sensible que al variar el área de captación, en donde la ganancia de calor en el captador repercute en variaciones mayores sobre la temperatura del agua.

4. El uso de captadores desnudos es el más recomendable ya que los requerimientos de calor de la alberca son satisfechos adecuadamente por éstos, y el costo de la inversión es menor a cualquier otro tipo.
5. Las pérdidas por evaporación se pueden reducir al instalar una cubierta de polietileno con cámaras de aire en la superficie de la alberca; esto repercute en la necesidad de un área de captación menor.

REFERENCIAS

1. M.N.A. Hawlader & B.J. Brinkwoth. "An analysis of solar heated outdoor swimming pools", presented at ISES-UK practical experience with Solar Heated Swimming Pools, Conf. London, oct. 1978
2. N.A.C. Spelman. "The estimation of size and performance of solar collectors for heating swimming pools", presented at ISES-UK practical experience with Solar Heated Swimming Pools, Conf. London, oct. 1978
3. Francis de Winter. "How to design and build a solar swimming pool heater", Altas Corporation, Santa Clara, California, U.S.A., 1975
4. Fernández Zayas José L. y Estrada-Cajigal Vicente. "Cálculo de la radiación solar instantánea en la república mexicana", Instituto de Ingeniería, UNAM, Pub. 472, 1983
5. G. Hiriart Le Bert. "Síntesis de modelos matemáticos para estimar la evaporación en estanques", Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, 1978 (preparado para CFE)
6. Fernández Zayas José L. "Modelo simplificado para calcular pérdidas de captadores solares planos", Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, 1983
7. Kevin Mc Cartney & Brian Ford. "Agua caliente solar. Manual práctico", H. Blume Ediciones, Rosario 17, Madrid-5
8. W.H. Mc Adams. "Heat Transmission", Mc Graw-Hill Book Co., 3a. Edición, Nueva York, U.S.A., 1954

Apéndice I. Latitudes de las principales ciudades de la república mexicana

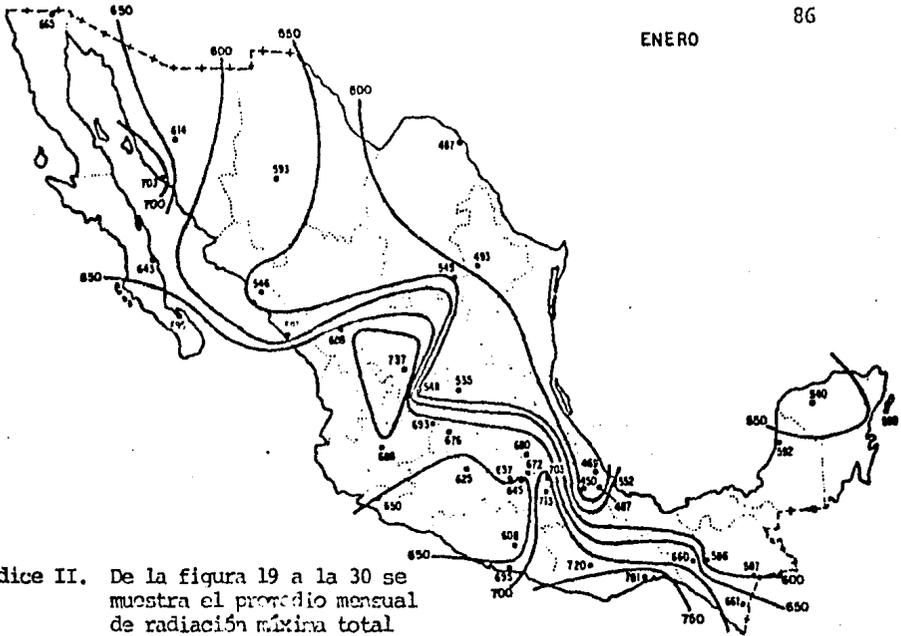
Estado	Ciudad	Latitud ϕ
Aguascalientes	Aguascalientes	21.88°
Baja California	Ensenada	31.86°
	Mexicali	32.48°
	La Paz	24.16°
	Tijuana	32.48°
Campeche	Campeche	19.51°
	Cd. del Carmen	18.63°
Coahuila	Monclova	26.58°
	Nueva Rosita	27.91°
	Piedras Negras	28.7°
	Saltillo	25.43°
Colima	Colima	19.23°
	Manzanillo	19.06°
Chiapas	Tapachula	14.9°
	Tuxtla Gutiérrez	16.75°
Chihuahua	Chihuahua	28.63°
	Cd. Juárez	31.73°
D.F.	D.F.	19.41°
Durango	Durango	24.01°
	Cd. Lerdo	25.5°
Guanajuato	Celaya	20.32°
	Guanajuato	21.01°
	León	21.13°
	Salvatierra	20.21°

Apéndice I (Continuación)

Estado	Ciudad	Latitud ϕ
Guerrero	Acapulco (Ixtapa)	16.5°
	Chilpancingo	17.55°
	Taxco	18.55°
Hidalgo	Pachuca	20.1°
	Tulancingo	20.1°
Jalisco	Guadalajara	20.68°
	Lagos	21.36°
	Porto Vallarta	20.53°
México	Texcoco	19.5°
	Toluca	19.28°
Michoacán	Apatzingan	19.08°
	Morelia	19.7°
	Zamora	19.98°
	Zacápu	19.83°
Morelos	Cuatla	20.18°
	Cuernavaca	18.91°
Nayarit	San Blas	21.53°
	Tepic	21.51°
Nuevo León	Montemorelos	25.2°
	Monterrey	25.66°
Oaxaca	Oaxaca	17.06°
	Santa Cruz	16.2°
Puebla	Puebla	19.05°
	Tehuacán	18.45°

Apéndice I (Continuación)

Estado	Ciudad	Latitud ϕ
Querétaro	Querétaro	20.6°
Quintana Roo	Cozumel	20.51°
	Cancún	21.08°
San Luis Potosí	San Luis Potosí	22.5°
Sinaloa	Culiacán	24.8°
	Mazatlán	23.21°
	Topolobampo	25.6°
Sonora	Guaymas	27.71°
	Hermosillo	29.05°
	Nogales	30.35°
	Cd. Obregón	27.41°
Tabasco	Villa Hermosa	17.98°
Tamaulipas	Matamoros	25.88°
	Nuevo Laredo	27.5°
	Tampico	22.21°
	Cd. Victoria	23.73°
Tlaxcala	Tlaxcala	19.41°
Veracruz	Jalapa	19.53°
	Orizaba	18.85°
	Veracruz	19.33°
Yucatán	Mérida	20.96°
	Valladolid	20.68°
Zacatecas	Fresnillo	23.16°
	Zacatecas	22.78°



Apéndice II. De la figura 19 a la 30 se muestra el promedio mensual de radiación máxima total (G_n), en W/m^2

Fig. 19

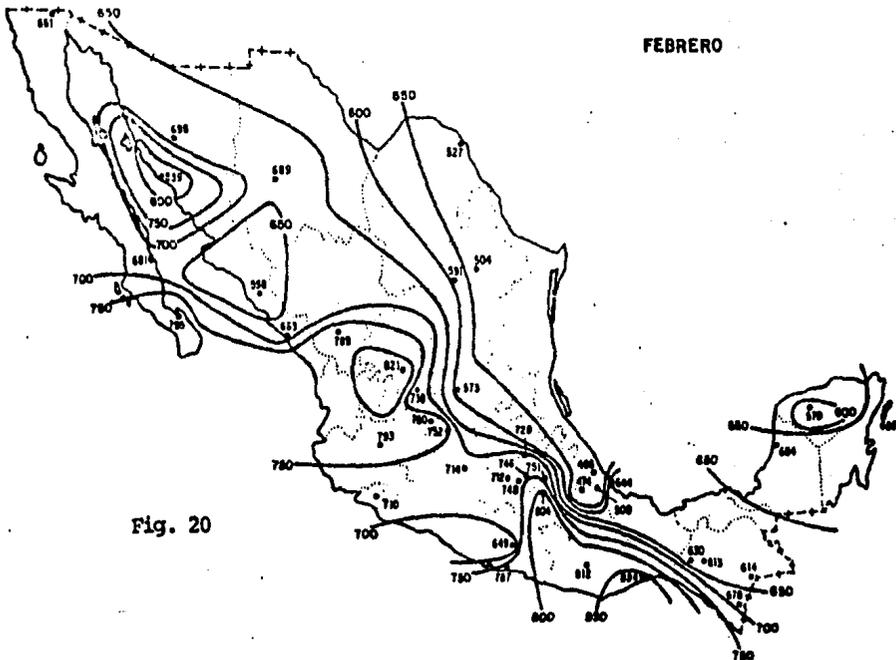


Fig. 20

MARZO

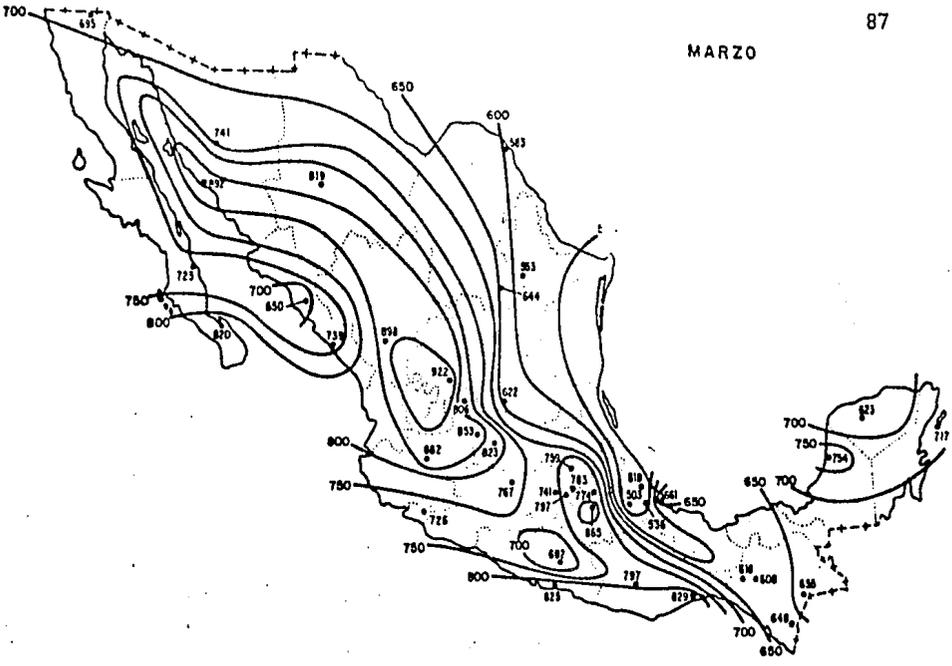


Fig. 21

ABRIL

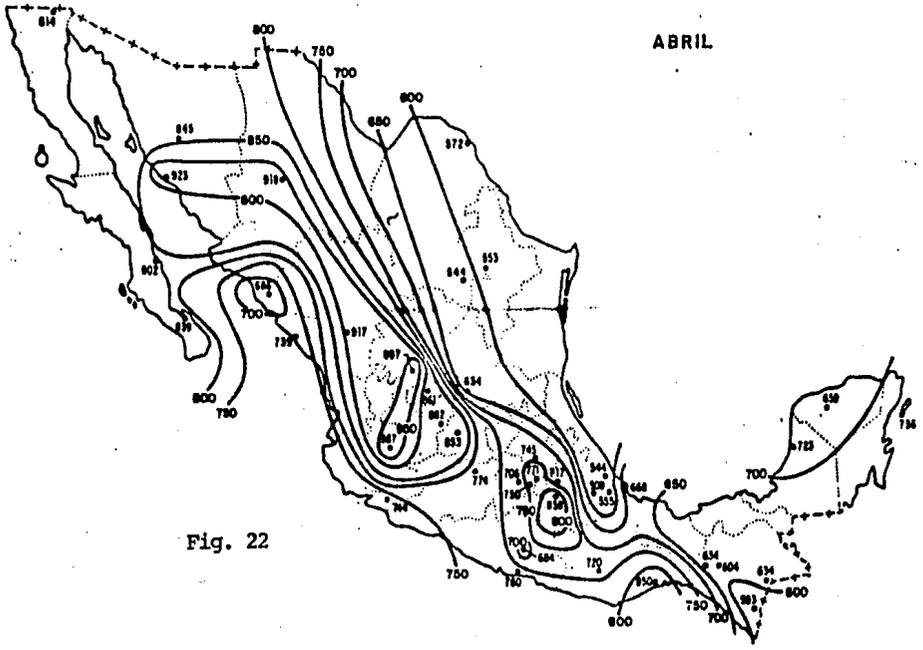


Fig. 22

SEPTIEMBRE

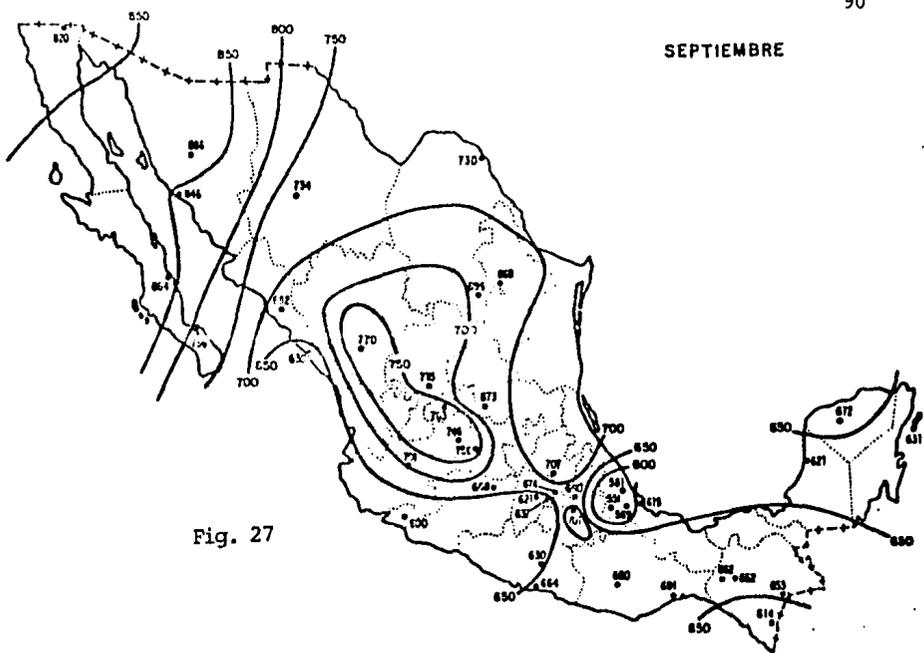


Fig. 27

OCTUBRE

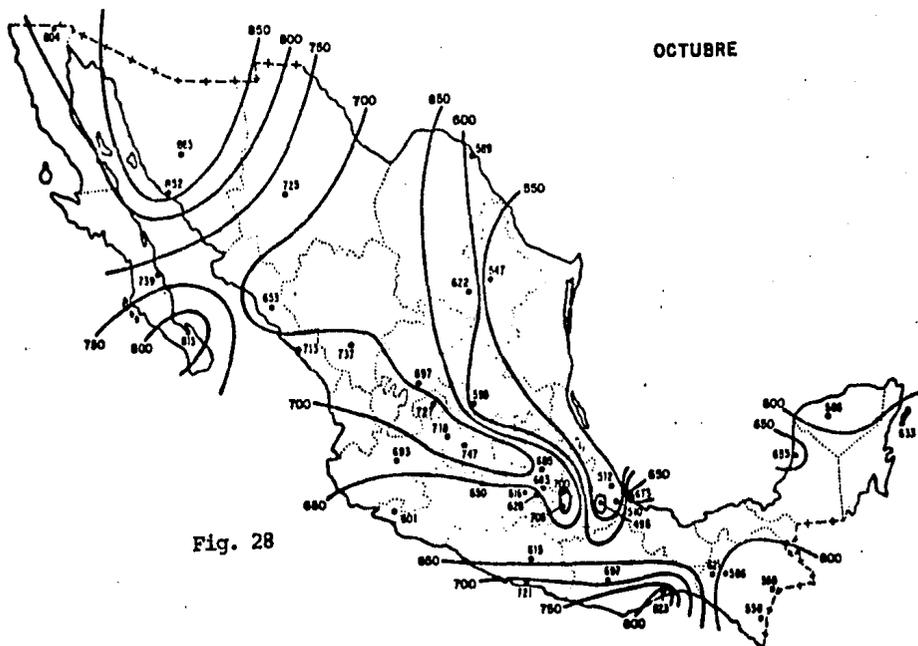


Fig. 28

NOVIEMBRE

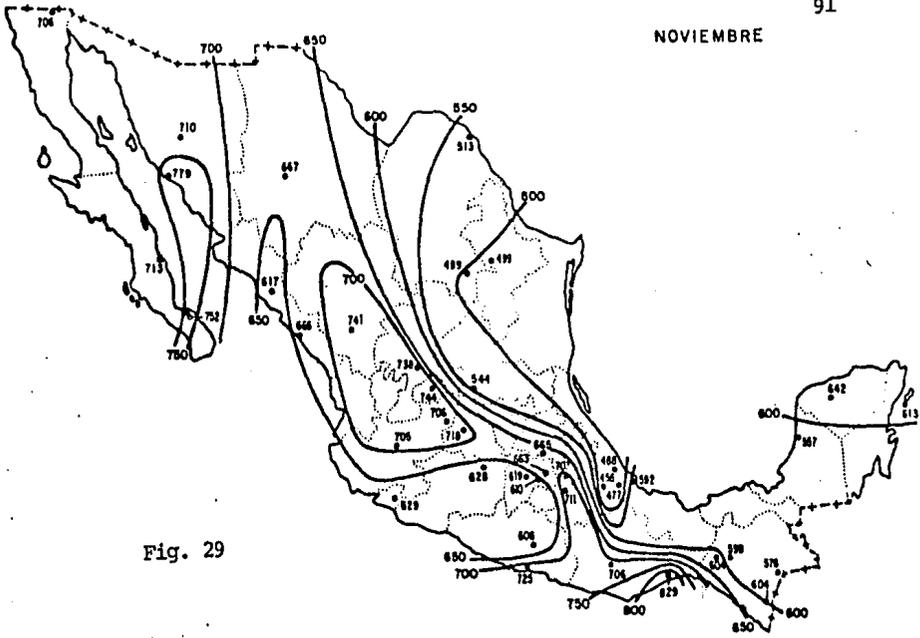


Fig. 29

DICIEMBRE

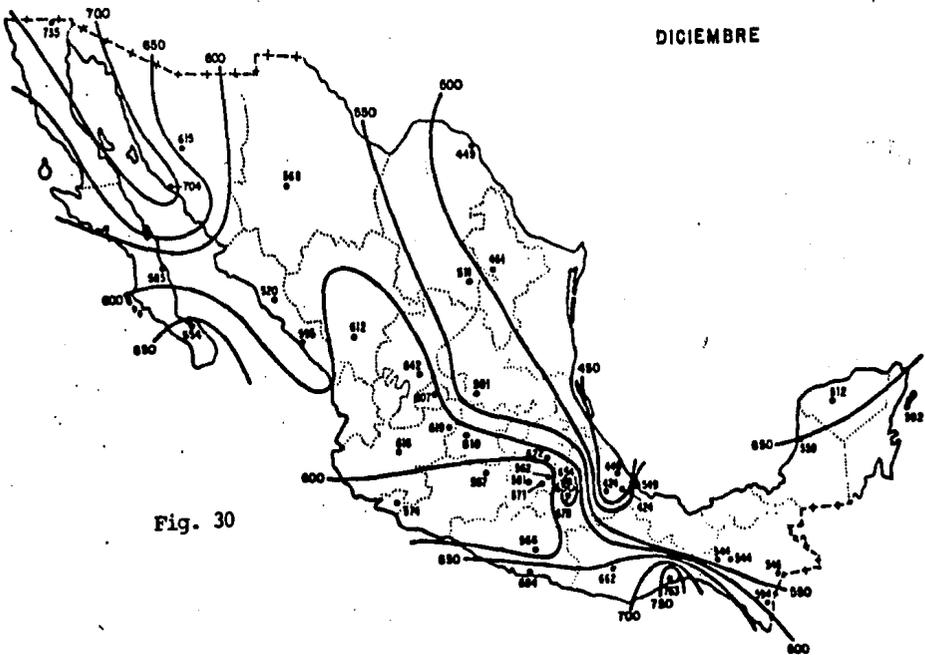
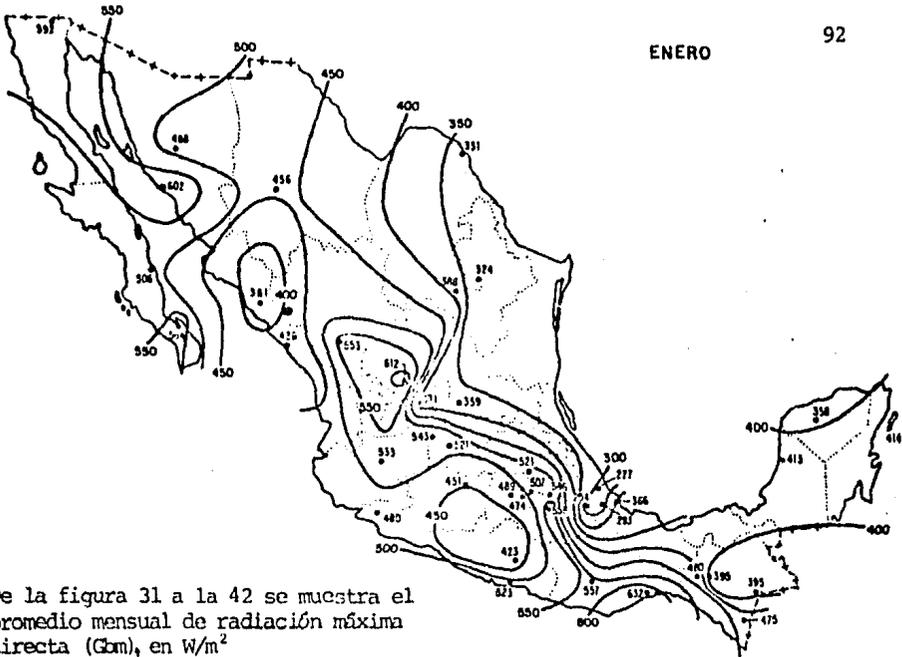


Fig. 30



De la figura 31 a la 42 se muestra el promedio mensual de radiación máxima directa (G_{max}), en W/m^2

Fig. 31

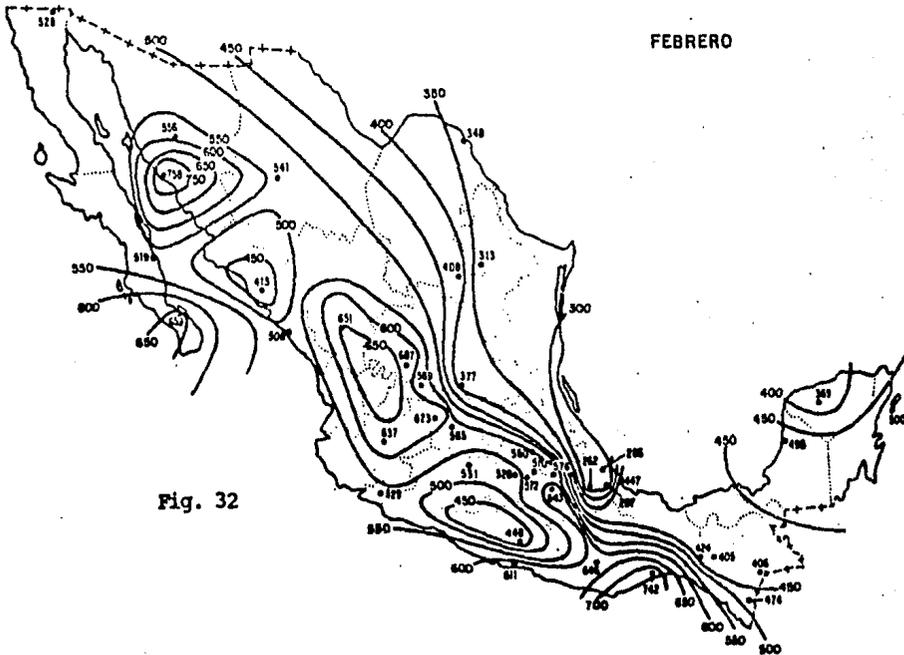


Fig. 32

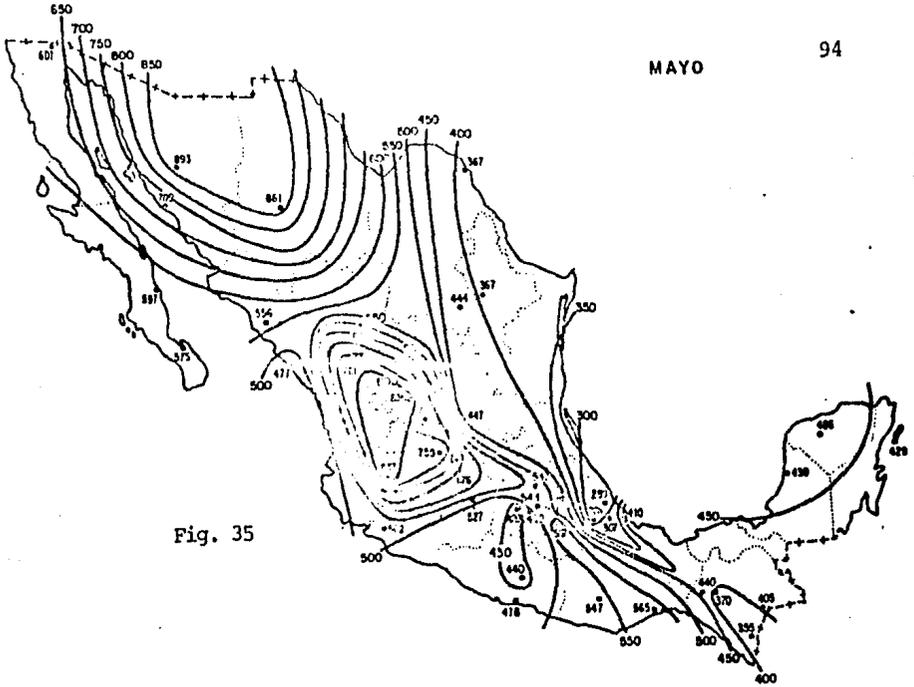


Fig. 35

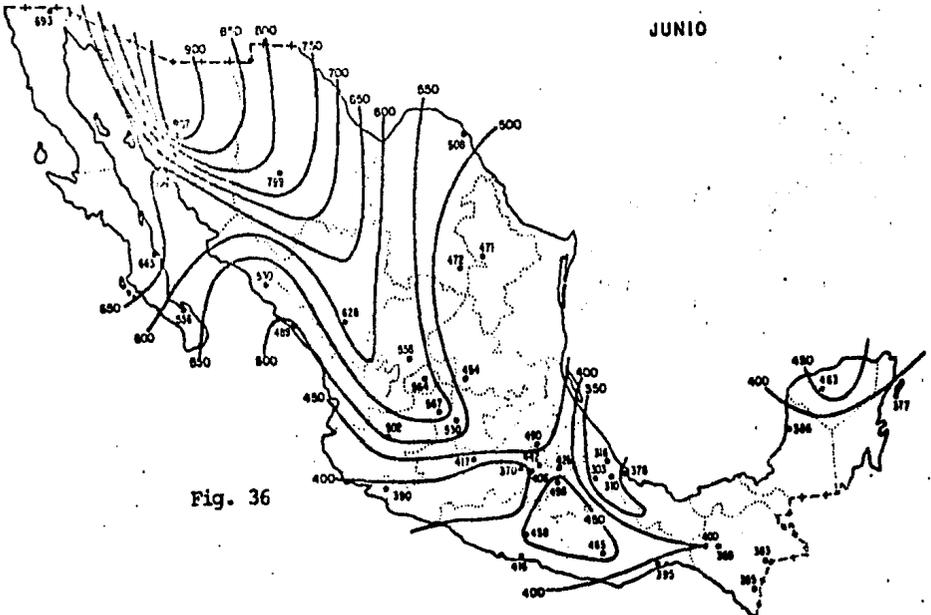


Fig. 36

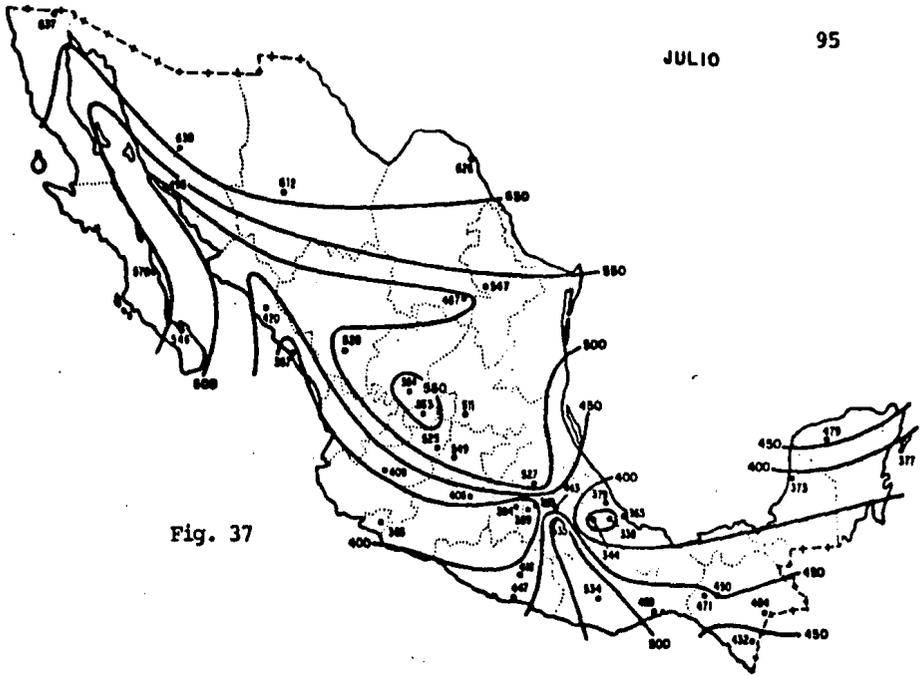


Fig. 37

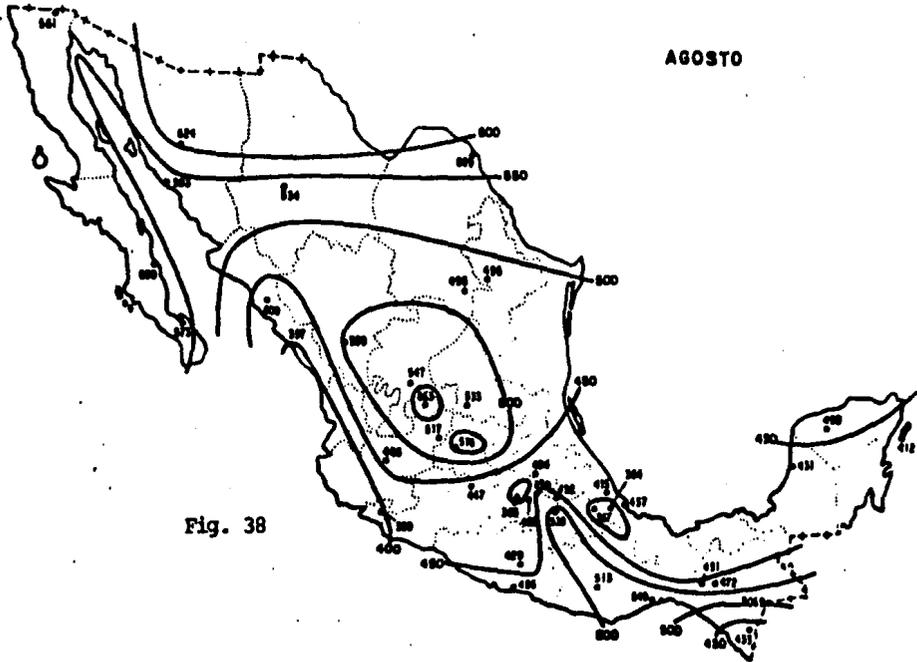
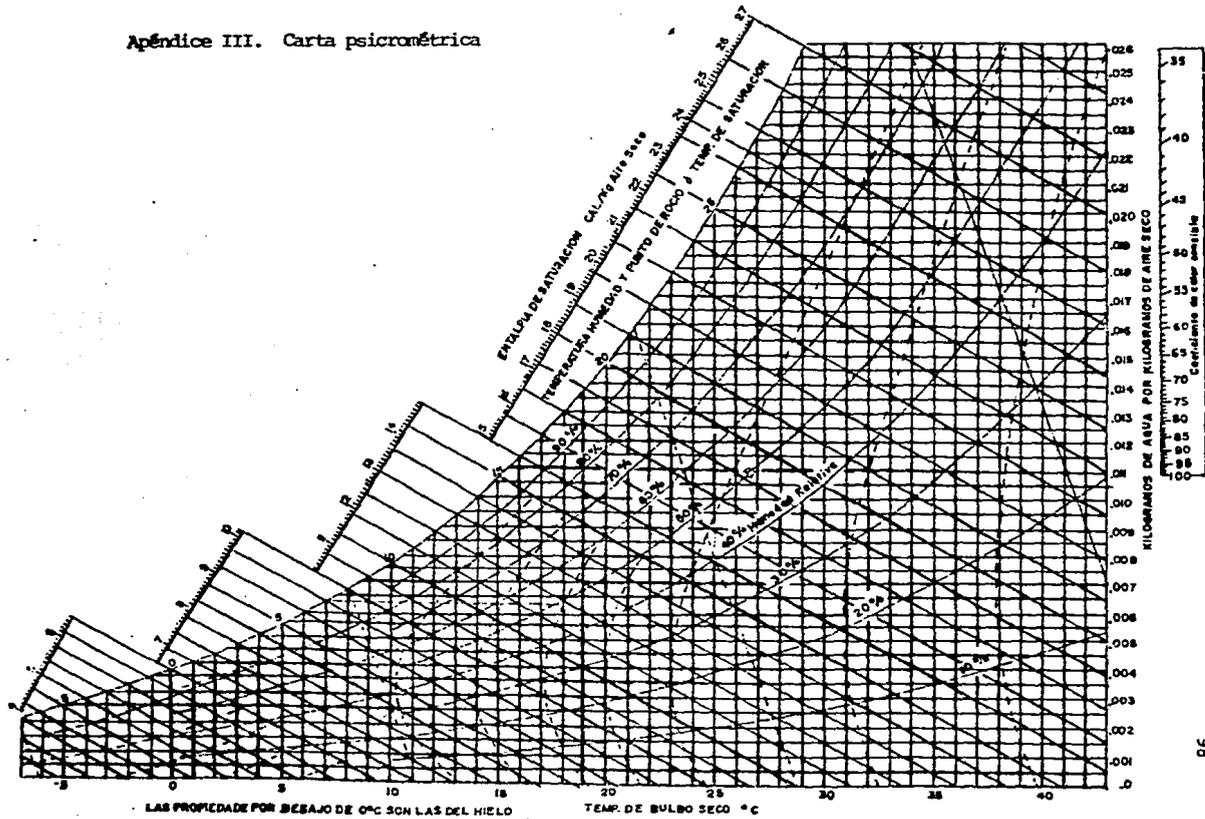
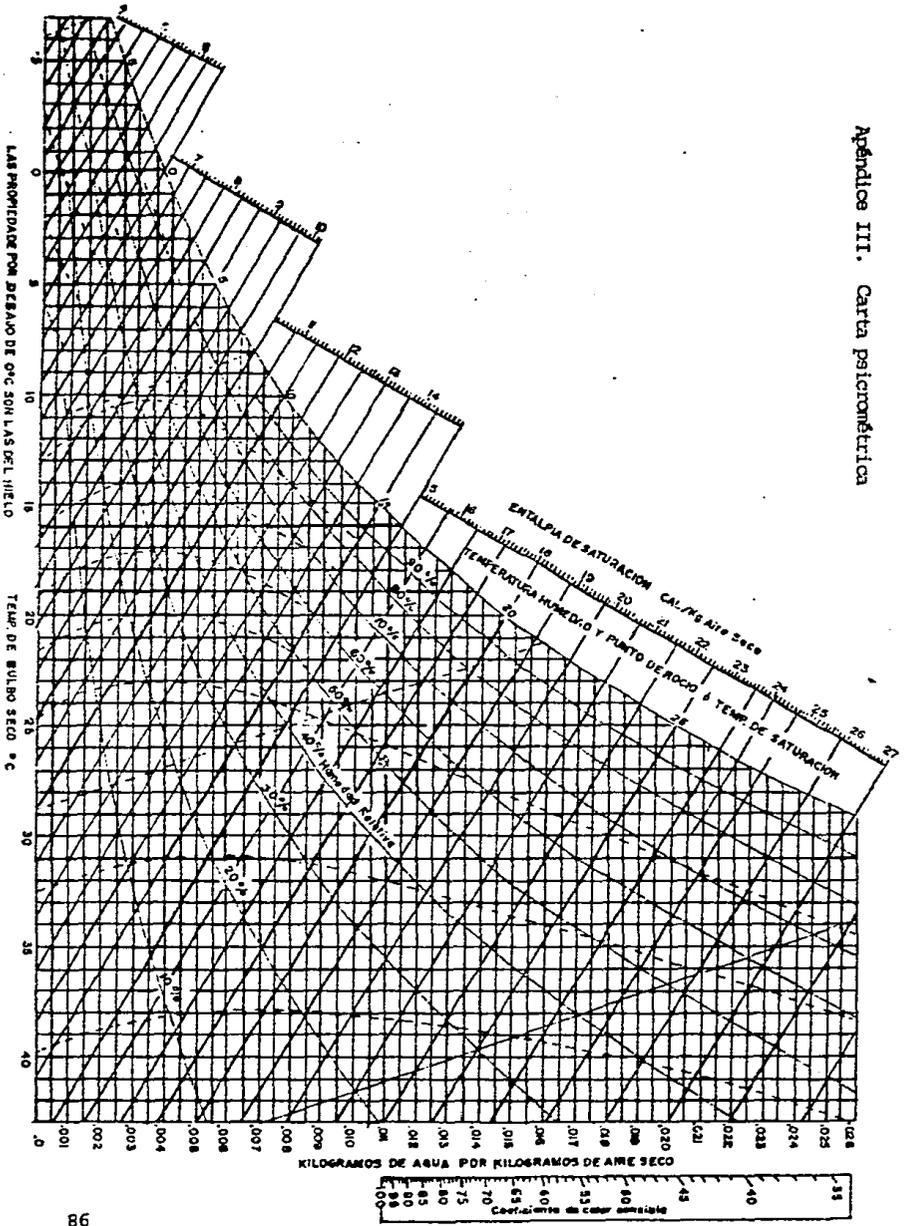


Fig. 38

Apéndice III. Carta psicrométrica



Apéndice III. Carta psicrométrica



LAS PROPORCIONES POR DECIMO DE GRADO SON LAS DEL HIELO