Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

Calentador Solar Compacto de Alta Eficiencia para Agua Doméstica Rural

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

en el área mecánica

p r e s e n t a :

ARTURO LOPEZ CARRASCO

México, D. F. 1983

I N D I C E

RESUMEN

En este trabajo se analiza el comportamiento térmico de un calentador solar de agua "compacto", es decir, que integra en una sola unidad el captador solar y el tanque de almacenamiento. Para reducir las pérdidas térmicas a través del captador, se estudian dos opciones: instalar una doble cubierta de vidrio, en sustitución de la cubierta simple usual en estos aparatos y/o cubrir el captador con una tapa durante las últimas horas de la tarde.

El estudio parte de un modelo matemático formulado para este fin, capaz de describir las pérdidas de calor en cada alternativa. Los resultados se comparan con datos experimentales propios. Del modelo ya ajustado a las experiencias del laboratorio se desprenden conclusiones y recomendaciones para el diseño y la operación más eficientes de estos aparatos.

NOMENCLATURA

En el texto programado	En el texto escrito	Descripción	Unidades
ALVP	$\bar{A}$	Area promedio de A_1 y A_2	m^2
ALV1	A_1	Area del vidrio inferior	m^2
ALV2	A_2	Area del vidrio superior	m^2
	C_p	Calor específico	$\frac{kw\text{-}hr}{kg\text{-}°C}$
CTV	CTV	Conductividad térmica del vidrio	kw/m°C
C		Constante	
CTTE		Constante	
D	d	Distancia entre los vidrios	m
DIF1,3		Diferencia entre valores	
EV	E_v	Espesor del vidrio	m
FF	F	Factor de forma	
G	g	Constante gravitacional	m/s^2
GR	Gr	Número de Grashoff	
	h_c	Coeficiente superficial de transferencia de calor	$kw/m^2\ °C$
K	k_f	Conductividad térmica del fluido a temperatura de bulbo seco	kw/m°C
N	n	Constante	
PR	Pr	Número de Prandtl	

QC1,2	$q_{c1,2}$	Pérdidas de calor por convección	kw
QR1,2	$q_{r1,2}$	Pérdidas de calor por radiación	kw
QT		Pérdida del calor total	kw
RC1	R_{c1}	Resistencia térmica del aire entre las dos placas de vidrio	$m^2 °C/kw$
RC2	R_{c2}	Resistencia térmica del aire ambiente	$m^2 °C/kw$
TV	$R_{k1,2}$	Resistencia térmica del vidrio	$m^2 °C/kw$
	$R_{r1,2}$	Resistencia a la radiación	$m^2 °C/kw$
TA	T	Temperatura absoluta	K
T1	T_1	Temperatura del agua	°C
T2	T_2	Temperatura interior del vidrio inferior	°C
T3	T_3	Temperatura interior del vidrio superior	°C
T4	T_4	Temperatura exterior del vidrio superior	°C
T5	T_5	Temperatura ambiente	°C
TOL		Tolerancia	
V	V	Velocidad del aire	m/s

Del Albafeto Griego

BETA	β	Coeficiente de temperatura de la expansión volumétrica	1/°C
Nu	ν	Viscosidad cinemática	m^2/hr
	μ	Viscosidad absoluta	kg/mhr
	ρ	Densidad del aire	kg/m^3

	Δ	Diferencia entre valores
EPSIL	ε	Emisividad del vidrio

1. INTRODUCCION

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y la SAHOP colaboraron en el pasado en la implantación de varias instalaciones solares en el país. De esas investigaciones surgió el interés por conocer la factibilidad de desarrollar un calentador solar compacto de fácil fabricación para la comunidad rural mexicana, cuyo costo fuese bajo. Las características físicas del prototipo de una cubierta de vidrio, elaborado en esa ocasión, se muestran en la figura 1 y son las siguientes (ref 1):

Este calentador tiene una capacidad de 40 Lts de agua y está fabricado en fibra de vidrio y constituido por dos partes llamadas charolas. Entre las charolas tiene fibra de vidrio como aislante térmico y se protege por una lámina transparente de vidrio.

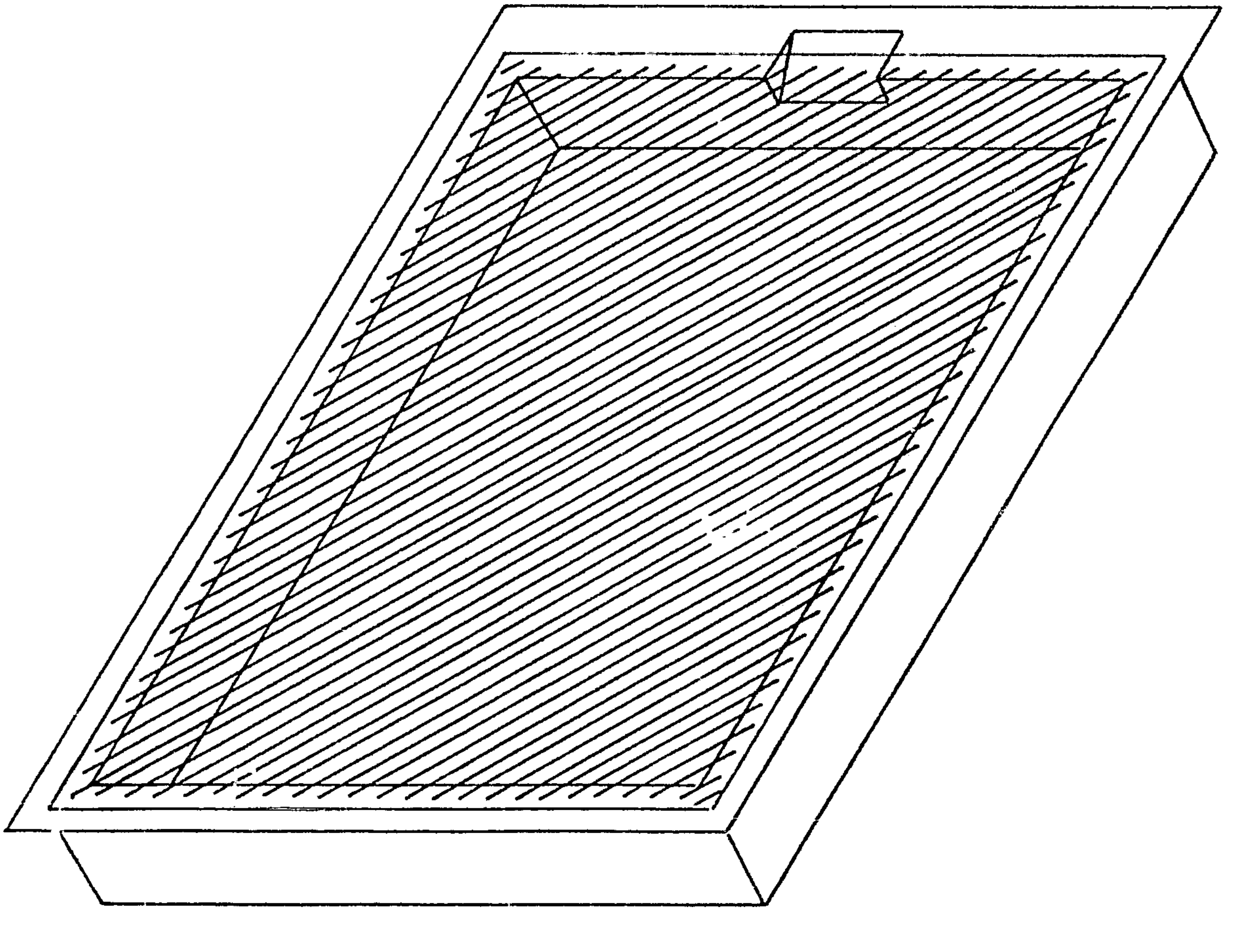


figura 1

Fig. 1 Esquema general del calentador solar compacto

En las pruebas realizadas en el prototipo de una cubierta de vidrio se obtuvieron estos resultados: el calentador iniciaba su calentamiento al comenzar el día solar. El agua, inicialmente a la temperatura del ambiente, incrementa su temperatura a lo largo del día, como se muestra en la figura 2, alcanzando su temperatura máxima antes de terminar el día solar. El agua tiene que utilizarse cerca de ese momento, ya que va perdiendo su temperatura hasta alcanzar la temperatura ambiente.

El objetivo de este trabajo es mejorar el diseño de este calentador para que pueda mantener una temperatura del agua aceptable en el momento que se desee utilizar; para ello se proponen dos alternativas, las cuales serán discutidas en los siguientes capítulos. Una de las alternativas es cubrir el calentador con una cubierta de dos capas de vidrio transparente separadas entre sí una distancia "*d*". La otra es cubrir al calentador con una tapa de fibra de vidrio, aislada térmicamente, en el momento de alcanzar su temperatura máxima.

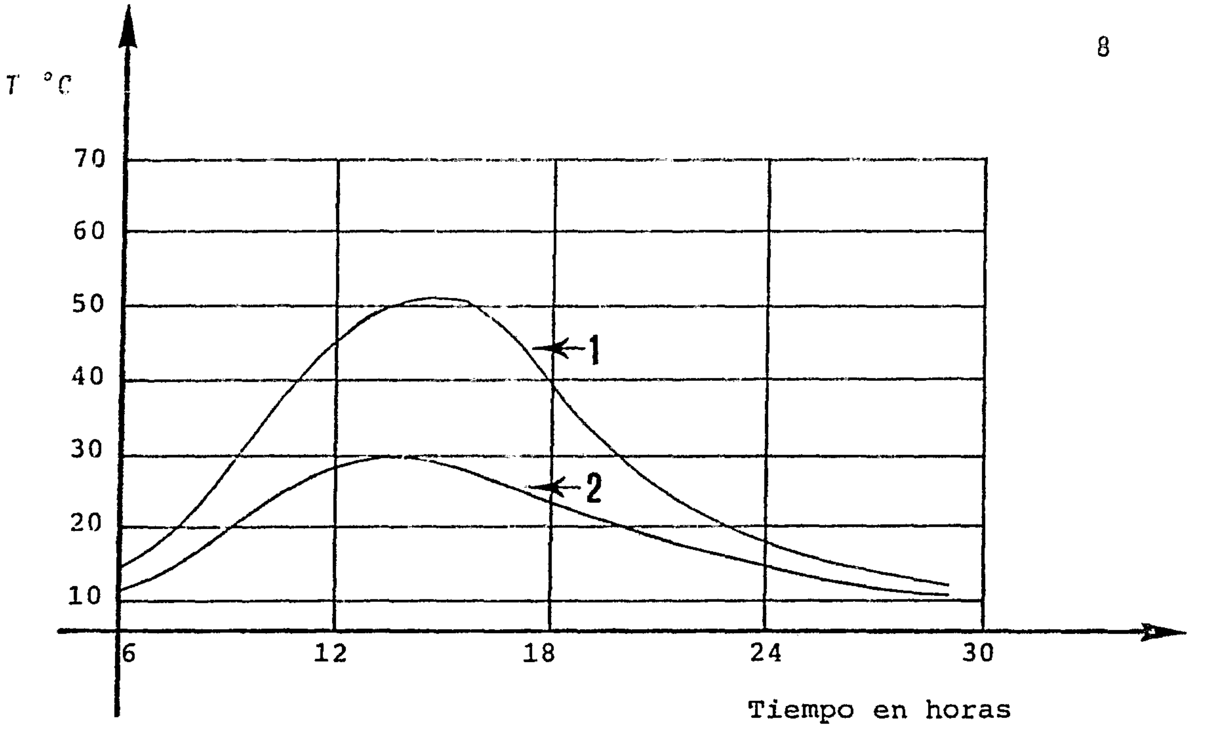


Fig. 2 Variación de la temperatura del agua a lo largo del día, capacidad del calentador 40 lts de agua, el calentador es el prototipo de una cubierta de vidrio.

(1) Temperatura del agua

(2) Temperatura ambiente

2. BASES TEORICAS

2.1 Balance térmico

Para el análisis teórico del funcionamiento de un calentador solar cualquiera es necesario conocer el balance térmico para cualquier instante del día; dicha expresión es:

$$Q_{sol} = Q_p + Q_a \qquad (1)$$

donde Q_{sol} es la cantidad de energía útil recibida del sol y absorbida por el calentador, Q_p son las pérdidas de calor y Q_a es la variación de energía interna en el calentador. Despreciando el calor que se almacena en el calentador en sí y estudiando únicamente el calor asimilado por el agua, lo cual es realista en este caso, la ecuación 1 se reescribe en forma de diferencias finitas:

$$T_i = T_{i-1} + \frac{Q_{sol} - Q_p}{M\ cp}\ \Delta t \tag{2}$$

donde ahora T_i es la temperatura del agua en el calentador después de un intervalo de tiempo Δt y T_{i-1} es la temperatura al inicio de dicho intervalo; el producto Mcp es la inercia térmica dada por el producto de la masa del agua por su calor específico. El valor de Q_{sol} suele escribirse como:

$$Q_{sol} = (\tau\alpha)\ (H_T\ A_C) \tag{3}$$

donde A_C es el área efectiva de captación solar, H_T es el valor instantáneo de la radiación solar total en el caso de interés y $(\tau\alpha)$ se conoce como el producto trasmitancia (ρ) por la absortancia (α) del vidrio y de la charola negra del fondo del calentador. En este caso, el valor de $(\tau\alpha)$ puede considerarse constante como (ref 2):

$$\textit{para un solo vidrio,}\ (\tau\alpha) \doteq 0.87 \tag{4}$$

$$\textit{para dos vidrios,}\ (\tau\alpha) \doteq 0.80 \tag{5}$$

El valor de H_T se obtiene de la siguiente ecuación:

$$H_T = H_d + H_b \tag{6}$$

Donde H_b, H_T, H_d son los flujos instantáneos de radiación solar directa, total y difusa respectivamente. En investigaciones recientes realizadas en el Instituto de Ingeniería se ha encontrado que las componentes de la radiación instantánea recibidas sobre un plano horizontal pueden expresarse como (ref 3):

$$H_b = H_{bm} \left(\cos \frac{t\ 180}{Ld}\right)^{1.2} \tag{7}$$

$$H_T = H_{Tm} \left(\cos \frac{t\ 180}{Ld}\right)^{1.5} \tag{8}$$

Donde t es la hora solar y Ld la duración efectiva del día, ambas en horas. Existe una relación entre t y Ld tal que $t = 0$ al medio día solar, $t = Ld/2$ al alba y $t = - Ld/2$ al ocaso y los valores con subíndice m en las ecuaciones 7 y 8 son los valores máximos de las componentes respectivas, correspondientes al medio día solar.

De unas gráficas obtenidas para el sur de la ciudad de México, los valores de H_{Tm} y H_{bm} durante un año son las siguientes (ref 3):

Mes	H_{Tm}	H_{bm}
Enero	645	474
Febrero	748	572
Marzo	797	603
Abril	750	534
Mayo	718	499
Junio	632	406
Julio	617	389
Agosto	636	408
Septiembre	637	416
Octubre	628	424
Noviembre	610	428
Diciembre	571	396

Las unidades están en W/m^2

La duración del día solar, Ld, se puede expresar en función del número del día del año:

$$Ld = \frac{2}{15} \cos^{-1} (\tan \phi \tan (23.45 \operatorname{sen} (360 \frac{284 + n}{365}))) \qquad (9)$$

donde n es el número del día en el año $(n = 1, 2, 3, \ldots, 365)$ y ϕ es la latitud del lugar (aproximadamente 19.45° para la ciudad de México). Todos los ángulos deben estar en grados.

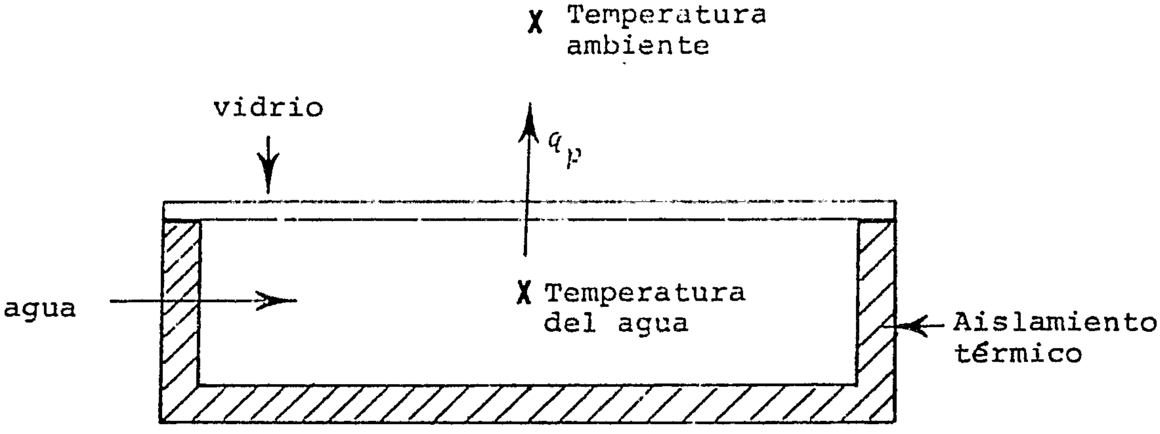
2.2 *Pérdida de calor para una capa de vidrio*

El flujo de calor recibido por el calentador produce un aumento en la temperatura del agua. El agua, al aumentar su temperatura, comienza a perder calor al ambiente según la relación:

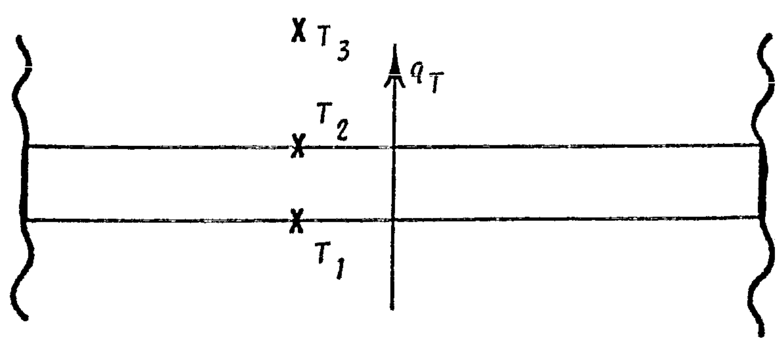
$$Q_p = \frac{A_c}{R} (T_{agua} - T_{amb}) \qquad (10)$$

donde Q_p es la pérdida de calor por conducción, convección natural, forzada y radiación al ambiente según el caso; T_{agua}, T_{amb}, son la temperatura del agua en el calentador y la del ambiente respectivamente; R es la resistencia térmica equivalente, que depende de las características físicas del calentador y condiciones ambientales; en este sistema las unidades de Q son $kW/m^2 °C$.

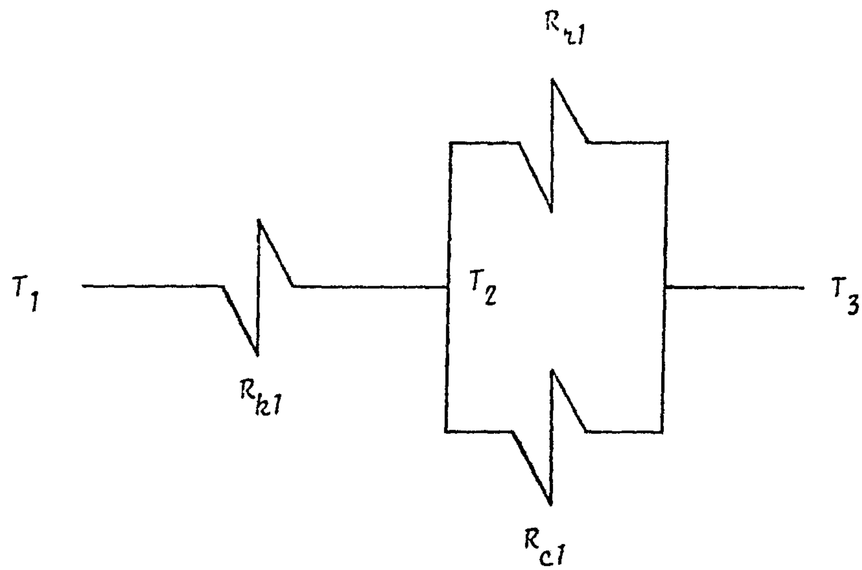
Se puede obtener la resistencia equivalente R en función de las características del diseño, las propiedades físicas de sus materiales y la velocidad del aire circulante. Considérese el prototipo de una cubierta de vidrio mostrado en la figura 1, esquematizado como se muestra en la figura siguiente:



Dadas las reducidas temperaturas de operación, que se presentan en este tipo de calentadores (menores a 60°C) pueden despreciarse las pérdidas térmicas a través del aislamiento, de tal modo que $\dot{Q}_p$ ocurre solo a través del vidrio. La figura siguiente es la representación esquemática de la lámina de vidrio y la distribución de temperaturas.



El flujo de calor puede representarse analógicamente como si-
gue:



donde T_1 es la temperatura del agua, T_2 la temperatura en la superficie exterior del vidrio, T_3 la temperatura ambiente, R_{k1} la resistencia a la conducción por el vidrio, R_{r1} la resistencia a la radiación y R_{c1} la resistencia a la convección forzada, que es función de la velocidad del viento.

Con el concepto anterior se procederá a establecer el modelo matemático de las pérdidas de calor en el prototipo de una cubierta de vidrio.

El modelo se compone de las siguientes relaciones funcionales:

La conducción por el vidrio se expresa como:

$$q_T = \frac{A_1}{R_{k1}} (T_1 - T_2) \tag{11}$$

donde

$$R_{k1} = \textit{espesor del vidrio/conductividad térmica del vidrio} \tag{12}$$

La componente de pérdidas por radiación se evalúa así:

$$q_{r1} = A_1 \; F \; \sigma \varepsilon_1 \; (T_2^4 - T_3^4) \tag{13}$$

donde T es la temperatura en grados K (absolutos)

Por último, el término de pérdidas por convección forzada se expresa de esta manera:

$$q_{c1} = \frac{A_1}{R_{c1}} (T_2 - T_3) \tag{14}$$

donde

$$R_{c1}^{-1} = (5.7 + 3.8 \; v) \times 10^{-3} \tag{15}$$

El sistema de ecuaciones anterior describe el flujo neto de calor perdido a través del sistema de una cubierta de vidrio. El grupo de ecuaciones, sin embargo, no tiene solución cerrada y debe resolverse por algún método numérico adecuado, como el de aproximaciones sucesivas.

2.3 Proceso iterativo para una cubierta de vidrio

La finalidad de este proceso es establecer un algoritmo para la solución del modelo matemático; asimismo, obtener una gráfica de pérdidas como función de la diferencia de temperaturas $(T_1 - T_3)$, la cual dará información teórica de la forma en que se comporta el calentador solar.

Para el prototipo de una cubierta de vidrio ya se tienen dimensiones prestablecidas las cuales son:

1. espesor del vidrio 3.0 mm

2. charola interna. Esta mide por el interior, 0.60 m x 0.80 m, en el fondo, y 0.635 m x 0.835 m al borde del nivel del agua

3. charola exterior. Esta mide por el interior, 0.66 m x 0.86 m en el fondo y de 0.695 m x 0.895 m en el borde

4. Aislamiento. El aislamiento térmico utilizado en este apárato es lana de vidrio, de baja densidad, del tipo utilizado en refrigeración y en ductos de aire acondi-

cionado, colocada en colchonetas de 1" (2.54 cm) de espesor

5. Cubierta de vidrio. En el prototipo desarrollado se utilizó una lámina de vidrio de 0.685 m x 0.91 m x 3 mm de espesor, redondeadas las esquinas.

El algoritmo se explicará como sigue:

Copiando la ecuación 11

$$q_T = \frac{A_1}{R_{k1}} (T_1 - T_2) \qquad (11)$$

para la solución de esta ecuación es necesario conocer q_T ó T_2, que pueden expresarse en función de T_1. La forma final de la solución al modelo puede así expresarse como $q_T = q_T\ (T_1 - T_2)$, que es una relación monotónicamente creciente. La solución puede implantarse calculando valores de q_T para pares de valores de T_1 y T_2.

El valor inicial de T_1 se puede suponer tomando en cuenta la figura 2, la cual muestra una temperatura máxima para T_1 de aproximadamente 51.0°C. Físicamente el calentador solar permite una temperatura máxima de 60.0°C aproximadamente, ya que a temperaturas mayores la fibra de vidrio pierde sus propiedades de rigidez. Tomando en cuenta lo anterior el rango de temperaturas para T_1 se encuentra entre 25.o°C y 51.0°C; de igual forma, en la figura 2 se muestra el rango máximo y mínimo de la temperatura ambiente para ese caso en particular, las cuales son T_3 mínima de 11.0°C y T_3 máxima 30.0°C. Por lo tanto, se iniciará el proceso iterativo con un par de valores para T_1 y T_2.

de lo anterior

$$T_1 = 45.0°C \quad ó \quad 318.0 \ K$$

$$T_2 = 44.2°C \quad ó \quad 317.2 \ K$$

$$E_v = 3.0 \ mm$$

$$V = 1.0 \ m/s$$

de la ecuación 11

$$q_T = \frac{A_1}{R_{k1}} (T_1 - T_2) \qquad (11)$$

donde

$$A_1 = 0.5376 \ m^2$$

La conductividad térmica del vidrio, CTV, es aproximadamente

$$CTV = 1.05 \times 10^{-3} \ kwm/°C$$

La resistencia térmica es, por lo tanto,

$$R_{t1} = \frac{E_{v}}{CTV} \qquad (12)$$

$$= \frac{3.0 \times 10^{-3}}{1.05 \times 10^{-3}}$$

$$R_{t1} = 2.8571 \; \frac{°C \; m^2}{kw}$$

Calculando con este valor la pérdida de calor para este par de valores de temperatura,

$$q_T = \frac{0.5376}{2.8571} \; (318.0 - 317.2)$$

$$q_T = 0.1505 \quad kw$$

La solución de q_T fué inmediata. Para T_3 la solución no es directa ya que se tienen 2 pérdidas simultáneas, de radiación y convección forzada, por lo que la solución de T_3 es más compleja. Para la obtención de T_3 se adoptará un proceso iterativo el cual consiste en, primero, suponer una temperatura T_3 $(T_3 < T_2)$ la cual se sustituye en la ecuación de pérdida de radiación y convección forzada $(q_{r1}$ y $q_{c1})$ respectivamente; el resultado de la suma de $(q_{r1} + q_{c1})$ deberá ser igual a q_T; si no es así, el valor de T_2 debe corregirse.

El criterio de corrección de T_2 es el que sigue:

Si $\quad q_T > q_{c1} + q_{r1} \qquad T_2$ aumenta

$\quad q_T < q_{c1} + q_{r1} \qquad T_2$ disminuye

Para el ejemplo numérico se supone $T_3 = 29.85°C\ (302.85\ K)$. De la ecuación de pérdida por radiación,

$$q_{r1} = A_1\ F\ \sigma\ \varepsilon_1\ (T_2^4 - T_3^4) \tag{13}$$

de tablas para el material en cuestión y para la geometría de interés (ref 2)

$$\varepsilon = 0.90$$
$$F = 1.0$$
$$\sigma = 5.674x\ 10^{-11}\ \frac{kw}{m^2 K^4}$$
$$A_1 = 0.5376\ m^2$$

de la ecuación 13

$$q_{r1} = 0.5376(1.0)(5.674x10^{-11})(0.90)(317.2^4 - 302.85^4)$$

$$q_{r1} = 4.698\ x\ 10^{-2}\ \ kw$$

La solución del flujo de calor por convección puede obtener-se si se conoce la velocidad del aire. Por ejemplo,

$$V = 1.0 \ m/s$$

de la ecuación 15

$$R_{c1}^{-1} = (5.7 + 3.8 \ (1.0)) \times 10^{-3}$$

$$R_{c1}^{-1} = 9.5 \times 10^{-3}$$

de la ecuación 14

$$q_{c1} = \frac{0.5376}{1.0526 \times 10^{2}} \ (317.2 - 302.85)$$

$$q_{c1} = 7.329 \times 10^{-2}$$

obtenidos los valores de q_{r1} y q_{c1} se suman

$$q_{r1} + q_{c1} = 4.698 \times 10^{-2} + 7.329 \times 10^{-2}$$

$$q_{r1} + q_{c1} = 0.1203 \quad kw$$

Tomando en cuenta el criterio de corrección para T_2

$$q_T = 0.1505 \quad kw$$

$$q_{r1} + q_{c1} = 0.1203 \quad kw$$

por lo tanto

$$q_T > q_{r1} + q_{c1}$$

aumentamos ahora el valor de T_2 a $44.5°C$ $(317.5\ K)$

de la ecuación 11

$$q_T = \frac{0.5376}{2.8571}(318.0 - 317.5)$$

$$q_T = 0.0941 \quad kw$$

de la ecuación 13

$$q_{r1} = 0.5376\ (1.0)(5.674x10^{-11})(0.90)(317.5^4 - 302.85^4)$$

$$q_{r1} = 4.803 \times 10^{-2} \quad kw$$

de la ecuación 14

$$q_{c1} = \frac{0.5376}{1.0526 \times 10^2}(317.5 - 302.85)$$

$$q_{c1} = 7.4822 \times 10^{-2} \quad kw$$

$$q_T = 0.0941 \quad kw$$

$$q_{r1} + q_{c1} = 0.1229 \quad kw$$

por lo tanto

$$q_T < q_{r1} + q_{c1}$$

disminuimos el valor de T_2 a $44.355°C$ $(317.355\ K)$

de la ecuación 11

$$q_T = \frac{0.5376}{2.8571} (318.0 - 317.355)$$

$$q_T = 0.1214 \quad kw$$

de la ecuación 13

$$q_{r1} = 0.5376\ (1.0)(5.674 x 10^{-11})(0.90)(317.355^4 - 302.85^4)$$

$$q_{r1} = 4.7525 \times 10^{-2} \quad kw$$

de la ecuación 14

$$q_{c1} = \frac{0.5376}{1.0526 \times 10^2} (317.355 - 302.85)$$

$$q_{c1} = 7.4082 \times 10^{-2} \ kw$$

$$q_T = 0.1214 \ kw$$

$$q_{r1} + q_{c1} = 0.1216 \ kw$$

Nótese que ambos valores son ahora aceptablemente similares. Obtenida la T_2 que cumple con la condición establecida, el paso siguiente es localizar el punto en una gráfica q_T *vs.* $(T_1 - T_3)$. Este punto es para $q_T \doteq 0.1215$ y $(T_1 - T_3) = (45.0°C - 29.85°C)$. Ahora se realiza el mismo proceso para otro par de valores $(T_1 - T_3)$ para encontrar el valor correspondiente de T_2 y de igual manera localizar el siguiente punto en la gráfica. Como se puede observar el proceso puede hacerse automáticamente en una computadora.

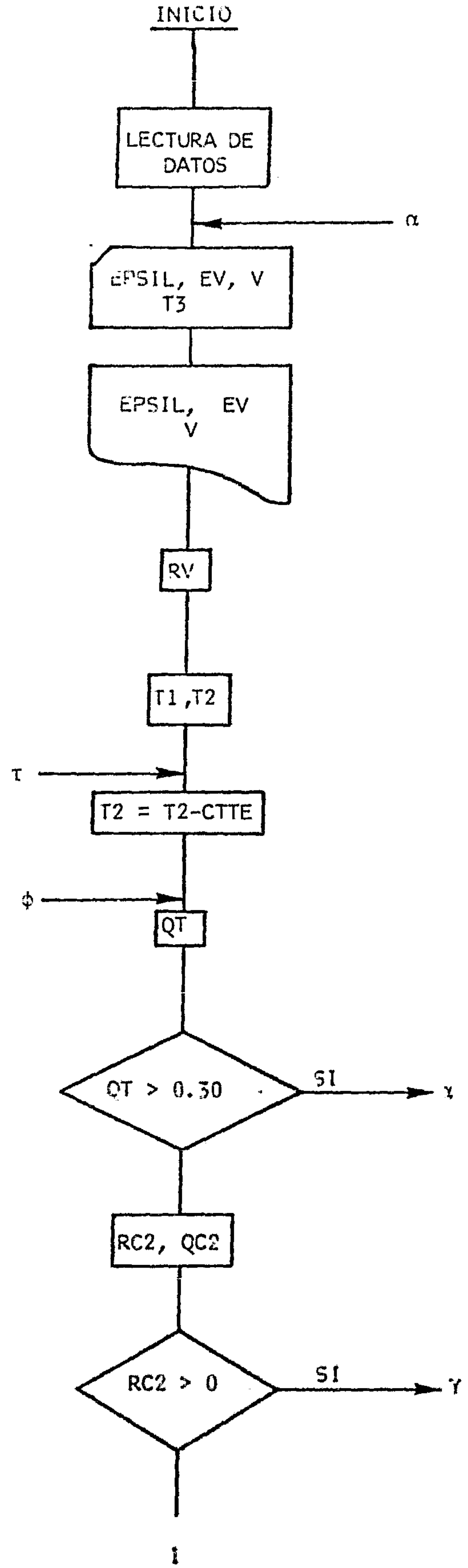
2.4 *Programa de computadora para una cubierta de vidrio*

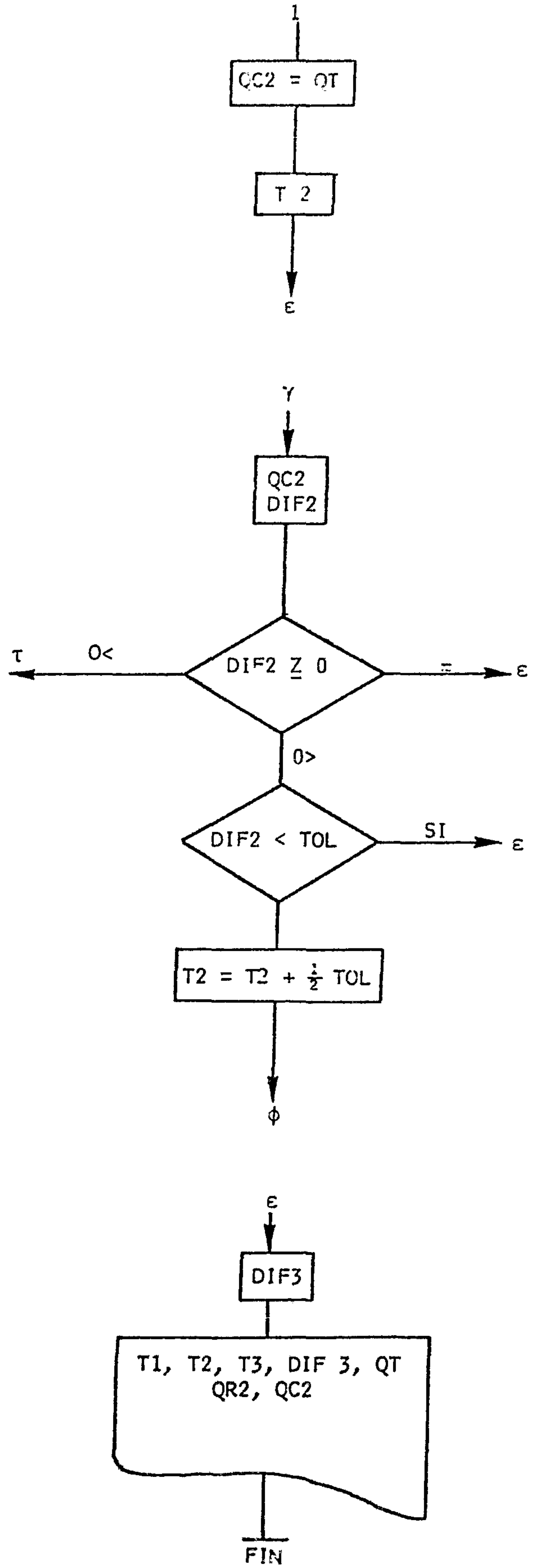
El programa fué realizado en lenguaje Fortran IV, para una computadora B 6700, la que se encuentra en la Ciudad Universitaria en el edificio del IIMAS. También se muestra una parte de los resultados obtenidos por dicho programa.

Programa de cómputo para una cubierta de vidrio

```
          BURROUGHS B...  SYST  AS FORTRAN COMPILATION ...  3.3.32   FRI..

FILE  5=LL,UNIT=READER
FILE  6=II,UNIT=PRINTER

      LL=5
      II=6
      DATA ALVI/5375.E-4/
     *,CTTE /1.2-3/
     *,CTV /.. 5E-3/
     *,FF/1.N/
     *,SIGMA/56.742-12/
     *,TOL/1.1E-3/
1    READ ( , ,  , END= ...   ) ...   , AV , ...
       ... IS THE LOG ... FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT A
2    FORMAT ( ... .5)
     PRINT*//,EPSEL,...
     ...=EV/CTV
     DO 1500 TI=... , 3.19 ... ,
     T2=TI
3    T2=T2-CTTE
4    DT=ALVI*(TI-T2)/ /
     IF ( DT .GT.  .3  ) ...
       W22= . /((5.7+3.5*W) .   . )
     QR2=ALV ...  ...
     IF (Q2. .GT.   ) ...
     Q..=DT
     T2=T ... Q2 ...
     GO TO 1...
530  Q22=ALVI*(T2-T3)/ ...
       DIF2=DT-(Q22+Q... )
     IF (DIF.) 600 , 3.. , 7
```

```
600    GO T. 3
700    IF()IF? .LI. TOL ) GO TO
       T2=T2+1.5*TOL
       GO TO 4
900    GO TO 14
1400   DIF3=T -T3
       WRITE ( 3 , 145  ) T1,T2,T3, 1F:,QT,QR2,QC2
1450   FORMAT(/,5X,3HT1=,F2 .14,2X,3HT2=,F2 .14,2X,5HT3=,F20.14,/,5X,
      *5HDIF3=,F17.14,2X,3HQT=,F17.14,2X,4HQR2=,F17.14,2X,4HQC2=,F17.14)
1500   C O N T I N U
       GO TO :
2000   C A L L    X I T
       E N D
```


INICIO
LECTURA DE DATOS
α
EPSIL, EV, V
T3
EPSIL, EV
V
RV
T1 ,T2
τ
T2 = T2-CTTE
ϕ
QT
QT > 0.30
SI
γ
RC2, QC2
RC2 > 0
SI
γ
1


1
QC2 = QT
T 2
ε
Y
QC2
DIF2
τ
0<
DIF2 Z̲ 0
=
ε
0>
DIF2 < TOL
SI
ε
T2 = T2 + ½ TOL
ϕ
ε
DIF3
T1, T2, T3, DIF 3, QT
QR2, QC2
FIN

```
EPSIL=0.9  EV=0.375  V=3.0

T1= 29[illegible]72  T2= 279.3314999998558  T3= 273.1500000000114688
DIF3= 7.[illegible]  DT= 0.[illegible]375379198446  DR2= 0.01577147325335  DC2= 0.02083890816249

T1= 28[illegible].9999999998[illegible]16  T2= 28[illegible].772[illegible]1234224  T3= 273.15000000000114688
DIF3= 8.[illegible]  DT= 0.[illegible]47755723  DR2= 0.01312359326472  DC2= 0.02258153950794

T1= 282.[illegible]98534  T2= 281.7435.[illegible]368896  T3= 273.15000000000114688
DIF3= 9.[illegible]  DT= 0.4326303544554  DR2= 0.0234961995505  DC2= 0.02679268196512

T1= 282.999999999[illegible]48  T2= 282.715[illegible]1251424  T3= 273.1500000000114688
DIF3=1[illegible]  DT= [illegible]99752755  DR2= 0.0222692457.7415  DC2= 0.02975936331396

T1= 284.[illegible]55536  T2= 283.695[illegible]1443960  T3= 273.15000000000114688
DIF3=11.[illegible]  DT= [illegible]38157.5215  DR2= 0.02531562535495  DC2= 0.03274585572600

T1= 28[illegible].99999999913[illegible]  T2= 284.5575[illegible]57792  T3= 273.15000000000114688
DIF3=1[illegible]  DT= [illegible]5414797[illegible]6553  DR2= 0.02776252175144  DC2= 0.03557225136336

T1= 285.[illegible]9749  T2= 285.324[illegible]656624  T3= 273.15000000000114688
DIF3=13.[illegible]  DT= 0.[illegible]5991145544.95  DR2= 0.03323453532236  DC2= 0.03859776513572

T1= [illegible]5.9999999999[illegible]312  T2= 2[illegible]5.[illegible]49152  T3= 273.15000000000114688
DIF3=14.[illegible]  DT= [illegible]3599771953  DR2= 0.03273323312395  DC2= 0.04167475230443

T1= 2[illegible]  T2= 287.57[illegible]14597152  T3= 273.15000000000114688
DIF3=15.[illegible]  DT= [illegible]147174752[illegible]  DR2= 0.03525490321224  DC2= 0.04454557450395

T1= [illegible]14638  T2= 288.54[illegible]758300  T3= 273.15000000000114688
DIF3=16.[illegible]  DT= 0.[illegible]3345923335[illegible]  DR2= 0.03573321753392[illegible]  DC2= 0.04752259714524

T1= 2[illegible].99999999957[illegible]  T2= 289.[illegible]1342992  T3= 273.15000000000114688
DIF3=17.[illegible]  DT= 0.[illegible]1615729555  DR2= 0.04037533111291[illegible]  DC2= 0.05059551959152

T1= 291.[illegible]81920  T2= 290.4[illegible]111436843  T3= 273.15000000000114688
DIF3=1[illegible]  DT= 0.[illegible]74503775.83  DR2= 0.04297443560420  DC2= 0.05357344223600

T1= 291.9999999999834464  T2= 291.452[illegible]124[illegible]  T3= 273.15000000000114688
DIF3=19.[illegible]  DT= 0.1.31115779753[illegible]  DR2= 0.04557533459524  DC2= 0.05554233257264

T1= 293.[illegible]49152  T2= 292.42[illegible]551152  T3= 273.15000000000114688
DIF3=2[illegible]  DT= 0.1[illegible]  DR2= 0.04324553275335  DC2= 0.05951522533792

T1= 29[illegible].999999999[illegible]1696  T2= 293.598[illegible]1671168  T3= 273.15000000000114688
DIF3=21.[illegible]  DT= 0.11440127567200  DR2= 0.05092344545356  DC2= 0.05246751347443

T1= 295.[illegible]16334  T2= 294.352[illegible]1213523  T3= 273.15000000000114688
DIF3=22.[illegible]  DT= 0.12[illegible]37759321  DR2= 0.05362391175440  DC2= 0.06545300597934

T1= 296.[illegible]72  T2= 295.5315[illegible]79552  T3= 273.15000000000114688
DIF3=23.[illegible]  DT= 0.12575495533327  DR2= 0.05535762115403  DC2= 0.06345306213556

T1= 296.99999999998[illegible]516  T2= 295.5015[illegible]1245734  T3= 273.15000000000114688
DIF3=24.[illegible]  DT= 0.1314297574640[illegible]  DR2= 0.05911515550552  DC2= 0.07140325245595

T1= 298.[illegible]98514  T2= 297.27[illegible]1547254  T3= 273.15000000000114688
DIF3=25.[illegible]  DT= 0.1372627.726[illegible]  DR2= 0.05137535[illegible].75150  DC2= 0.07437257850415

T1= 298.99999999995[illegible]42  T2= 298.[illegible]45575  T3= 273.15000000000114688
DIF3=26.[illegible]  DT= .1431.[illegible]5732.3[illegible]  DR2= 0.0547073577460  DC2= 0.07754343632331
```

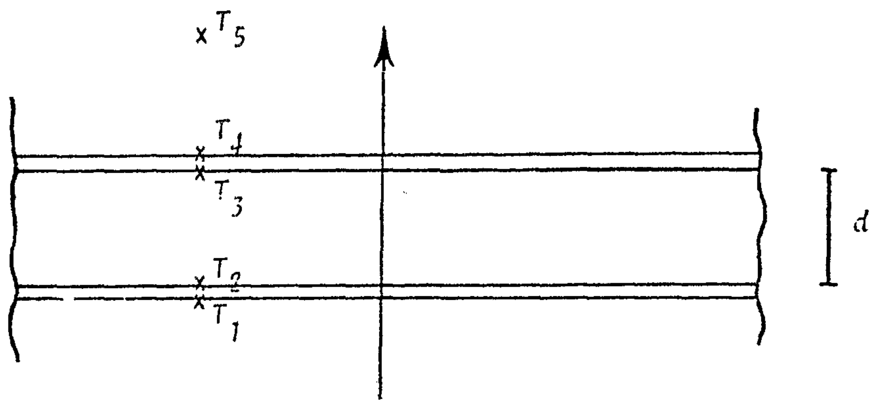
2.5 *Pérdida de calor para dos capas de vidrio*

Como se mencionó en la sección 2.2, el agua del calentador al aumentar su temperatura, comienza a perder calor, y se puede observar en la figura 2 cómo el prototipo de una cubierta de vidrio pierde calor hasta llegar a la temperatura ambiente. Al incorporar una doble cubierta de vidrio se pretende reducir esta pérdida de calor, es decir, permitir que el agua mantenga una temperatura aceptable a cualquier hora.

En los estudios realizados en el prototipo de una cubierta de vidrio, se observó el efecto del aire sobre el calentador, es decir, a mayor velocidad del aire mayor es la pérdida de calor. Al colocar una capa más de vidrio, el efecto del viento no es directamente sobre el vidrio que se encuentra en contacto con el agua caliente, y con la resistencia térmica que forma el aire que se encuentra entre las dos capas de vidrio, el agua podrá mantener una mayor temperatura.

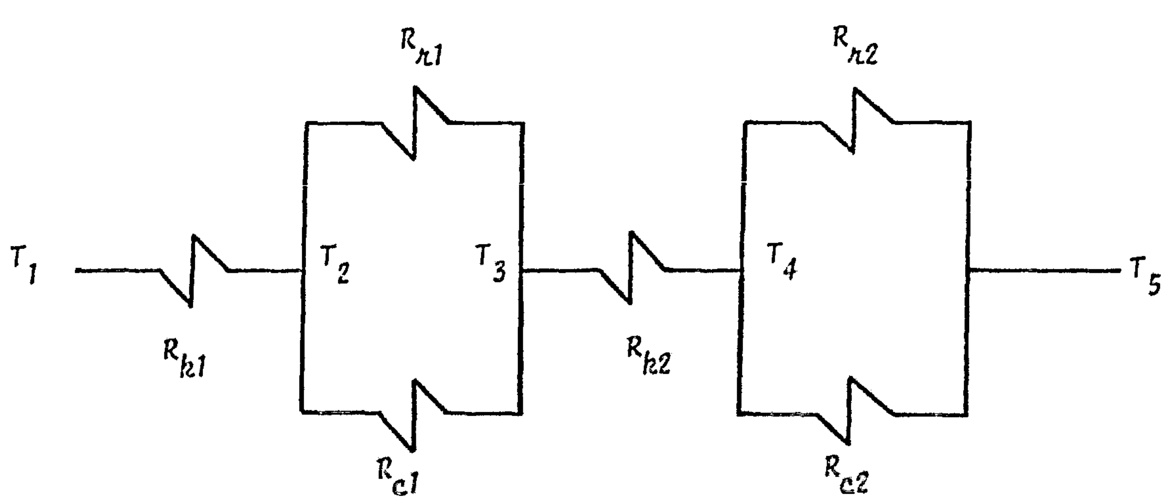
A continuación se presenta la formulación matemática de la pérdida de calor utilizando dos capas de vidrio.

Representación esquemática de las láminas paralelas de vidrio.



Se puede observar en esta figura cómo se encuentran distribuidas las temperaturas y la dirección de la pérdida de calor. Al colocar 2 capas de vidrio se pretende evitar que el viento entre en contacto con la primera capa de vidrio, y así disminuir las pérdidas.

Para encontrar el valor numérico de las diferentes temperaturas y el de la pérdida, se procederá a establecer un modelo matemático. La representación analógica es la que sigue:



La figura anterior es la representación analógica del diseño en estudio. Esta ayuda a establecer el modelo matemático para conocer cómo se comporta el sistema y así obtener el diseño óptimo.

El modelo se compone de las siguientes relaciones funcionales:

La conducción por el primer vidrio se expresa como:

$$q_T = \frac{A_1}{R_{k1}} (T_1 - T_2) \tag{11}$$

donde

$$R_{k1} = \text{espesor del vidrio/conductividad térmica del vidrio} \tag{12}$$

El término de convección natural es:

$$q_{c1} = \frac{A_1}{R_{c1}} (T_2 - T_3) \tag{14}$$

donde

$$R_{c1} = \frac{d}{k_f \; C (Gr \cdot Pr)^n} \tag{16}$$

y

$$Gr = \beta g d^3 \; (T_2 - T_3)/\nu^2 \tag{17}$$

donde Gr es el número de Grashoff y Pr es el número de Prandtl. Los valores de la constante C y n suelen aceptarse como:

Para Gr de 10^4 a 3.2×10^5, $C = 0.21$, $n = 1/4$

Para Gr de 3.2×10^5 a 10^7, $C = 0.075$, $n = 1/3$

La componente de pérdidas por radiación se evalúa así:

$$q_{r1} = \bar{A}\ F\ \sigma\ (T_2^4\ \varepsilon_1 - T_3^4\ \varepsilon_2) \qquad (18)$$

Como en este caso $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, entonces

$$q_{r1} = \bar{A}\ F\ \sigma\varepsilon\ (T_2^4 - T_3^4) \qquad (19)$$

La conducción por el segundo vidrio es:

$$q_T = \frac{A_2}{R_{k2}}\ (T_3 - T_4) \qquad (20)$$

Hacia el exterior, el flujo de calor es, por un lado de convección forzada calculada como:

$$q_{c2} = \frac{A_2}{R_{c2}}\ (T_4 - T_5) \qquad (21)$$

donde

$$R_{c2}^{-1} = (5.7 + 3.8\ v) \times 10^{-3} \tag{15}$$

y por otro lado, por radiación al ambiente, calculada como:

$$q_{r2} = A_2\ F\ \sigma\varepsilon_2\ (T_4^4 - T_5^4) \tag{22}$$

El sistema de ecuaciones anterior describe el flujo neto de calor perdido a través del sistema de doble cubierta. El grupo de ecuaciones, sin embargo, no tiene solución cerrada y debe resolverse por algún método numérico adecuado, como el de aproximaciones sucesivas.

2.6 *Proceso iterativo*

La finalidad de este proceso es establecer un algoritmo para la solución del modelo matemático. Se pretende graficar las pérdidas q_T contra la diferencia de temperaturas $(T_1 - T_5)$, temperatura del agua menos temperatura ambiente, y de esta manera conocer los factores que afectan las pérdidas de calor.

El algoritmo se explicará como sigue:

Copiando la ecuación 11

$$q_T = \frac{A_1}{R_{t1}} (T_1 - T_2) \qquad (11)$$

Para resolver esta ecuación hay que conocer T_1 y T_2, que pueden expresarse como funciones de T_1. La forma final de la solución al modelo puede así expresarse como $q_T = q_T\ (T_1 - T_2)$, que es una relación monotónicamente creciente. La solución puede implantarse calculando valores de q_T para pares de valores de T_1 y T_2.

suponiendo:

$T_1 = 45.0°C \qquad (318.0\ K)$

$T_2 = 44.6°C \qquad (317.6\ K)$

$T_5 = 14.03°C \qquad (287.03\ K)$

$E_v = 3.0\ mm$

$d = 2.54\ cm$

$V = 1.0\ m/s$

como en el caso anterior,

$$R_{t3} = \frac{E_v}{CTV} \qquad (12)$$

$$= \frac{3.0 \times 10^{-3}}{1.05 \times 10^{-3}}$$

$$R_{k1} = 2.8571 \ \frac{°C \ m^2}{kw}$$

con este valor y la ecuación 11

$$q_T = \frac{A_1}{R_{k1}} (T_1 - T_2) \qquad (11)$$

$$q_T = \frac{0.5376}{2.8571} (318.0 - 317.6)$$

$$q_T = 0.0753 \quad kw$$

La solución de q_T, función de T_1, T_2, es inmediata; la solución de T_3 es más compleja. Para ello se procederá por un método iterativo en el cual se supone un valor de T_3. Al resolver la ecuación con una T_3 inicial se obtienen q_{c1} y q_{r1}. La suma de estas pérdidas deberá ser igual a q_T; si no es así, el valor inicial de T_3 debe corregirse. El criterio de "corrección" de T_3 es el que sigue:

Si

$q_T > q_{c1} + q_{r1}$ $\qquad$ T_3 disminuye

$q_T < q_{c1} + q_{r1}$ $\qquad$ T_3 aumenta

En el ejemplo numérico se supone T_3 = 25.0°C (298.0 K); de tablas se obtienen los siguientes valores:

$$\beta = 3.6628 \times 10^{-3} \quad 1/°C$$

$$g = 9.81 \quad m/s^2$$

$$\nu = 1.5102 \times 10^{-5} \quad m^2/s$$

$$Pr = 0.71$$

$$k_f = 2.5508 \times 10^{-5} \quad kw/m°C$$

De la ecuación 17

$$Gr = \frac{3.6628 \times 10^{-3}(9.81)(2.54 \times 10^{-2})^3(317.6 - 298.0)}{(1.5102 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 5.0602 \times 10^4$$

De la ecuación 16

$$R_{c1} = \frac{2.54 \times 10^{-2}}{(2.5508 \times 10^{-5})(0.21)((5.0602 \times 10^4)(0.71))^{1/4}}$$

$$R_{c1} = 3.4441 \times 10^2$$

De la ecuación 14

$$q_{c1} = \frac{0.5376}{3.441 \times 10^2}(317.6 - 298.0)$$

$$q_{c1} = 0.0306$$

De tablas para el material en cuestión y para la geometría de interés;

$$\varepsilon = 0.90$$

$$F = 1.0$$

$$\sigma = 5.674 \times 10^{-11} \frac{kw}{m^2 \ K^4}$$

$$\bar{A} = 0.6943 \ m^2$$

De la ecuación 19

$$q_{r1} = 0.5943 \ (1)(5.674 \times 10^{-11})(0.90)(317.6^4 - 298.0^4)$$

$$q_{r1} = 0.0695$$

Tomando en cuenta el criterio de correción para T_3

$$q_T = 0.0753 \quad kw$$

$$q_{c1} + q_{r1} = 0.0306 + 0.0695$$

$$= 0.1001$$

$$q_T < q_{c1} + q_{r1} \qquad T_3 \text{ aumenta}$$

por lo tanto el valor de T_3 se aumenta a 302.77 K ($29.77°C$)

De la ecuación 17

$$Gr = \frac{3.6628 \times 10^{-3}(9.81)(2.54 \times 10^{-2})^{3}(317.6 - 302.77)}{(1.5102 \times 10^{-5})^{2}}$$

$$Gr = 3.8287 \times 10^{4}$$

De la ecuación 16

$$R_{c1} = \frac{2.54 \times 10^{-2}}{(2.5508 \times 10^{-5})(0.21)((3.8287 \times 10^{4})(0.71))^{1/4}}$$

$$R_{c1} = 3.6928 \times 10^{2}$$

De la ecuación 14

$$q_{c1} = \frac{0.5376}{3.6928 \times 10^{2}}(317.6 - 302.77)$$

$$q_{c1} = 0.0216 \quad kw$$

De la ecuación 19

$$q_{r1} = 0.5943\ (1)(5.674 \times 10^{-11})(0.90)(317.6^{4} - 302.77^{4})$$

$$q_{r1} = 0.0538 \quad kw$$

Tomando en cuenta el criterio de "corrección" para T_3

$$q_T = 0.0753 \quad kw$$

$$q_{c1} + q_{r1} = 0.0216 + 0.0538$$

$$= 0.0754 \quad kw$$

Como se puede observar el valor de $T_3 = 302.77$ K es aceptablemente aproximado y se toma como correcto; como siguiente paso se calcula el valor de T_4.

De la ecuación 21

$$T_4 = T_3 - \frac{q_T \; R_{k2}}{A_2} \tag{23}$$

donde

$$A_2 = 0.6510 \quad m^2$$

$$R_{k2} = R_{k1} = 2.8571 \quad \frac{°C \; m^2}{kw}$$

por lo tanto

$$T_4 = 302.77 - \frac{0.0753 \; (2.8571)}{0.6510}$$

$$T_4 = 302.4393 \quad K$$

Tomando en cuenta la $T_5 = 287.09$ supuesta en un principio

De la ecuación 22

$$q_{r2} = (0.6510)(1.0)(5.674\times10^{-11})(0.90)(302.4393^4 - 287.03^4)$$

$$q_{r2} = 0.0525 \quad kw$$

De la ecuación 15

$$R_{c2}^{-1} = (5.7 + 3.8\ v) \times 10^{-3} \qquad (15)$$

donde $\quad v = 1.0\ m/s$

$$R_{c2}^{-1} = 9.5 \times 10^{-3} \qquad\qquad R_{c2} = 1.0526 \times 10^{2}$$

De la ecuación 21

$$q_{c2} = \frac{0.6510}{1.053 \times 10^{2}}\ (302.4393 - 287.03)$$

$$q_{c2} = 0.0953 \quad kw$$

$$q_{T} = 0.0753 \quad kw$$

$$q_{c2} + q_{r2} = 0.1478 \quad kw$$

Tomando en cuenta el criterio de corrección pero para T_2;

$$q_T > q_{c2} + q_{r2} \qquad T_2 \quad \text{aumenta}$$

$$q_T < q_{c2} + q_{r2} \qquad T_2 \quad \text{disminuye}$$

por lo tanto el valor de T_2 disminuye a $T_2 = 317.469\ K$

De la ecuación 11

$$q_T = \frac{0.5376}{2.8571}\ (318.0 - 317.469)$$

$$q_T = 0.1 \quad kw$$

De igual forma se adopta un proceso iterativo en el cual se supone inicialmente un valor de T_3

$$T_3 = 297.969 \quad K$$

De la ecuación 17

$$G_r = \frac{3.6628x10^{-3}\ (9.81)(2.54x10^{-2})^3(317.469 - 297.969)}{(1.5102\ x\ 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 5.034\ x\ 10^4$$

De la ecuación 16

$$R_{c1} = \frac{2.54 \times 10^{-2}}{(2.5508\times10^{-5})(0.21)((5.034\times10^{4})(0.71))^{1/4}}$$

$$R_{c1} = 3.449 \times 10^{2}$$

De la ecuación 14

$$q_{c1} = \frac{0.5376}{3.449 \times 10^{2}} (317.469 - 297.969)$$

$$q_{c1} = 0.0304 \quad kw$$

De la ecuación 19

$$q_{r1} = 0.5943 \; (1.0)(5.674\times10^{-11})(0.90)(317.469^{4} - 297.969^{4})$$

$$q_{r1} = 0.0690 \quad kw$$

Tomando en cuenta el criterio de corrección para T_3

$$q_T = 0.10$$

$$q_{r1} + q_{c1} = 0.0994$$

El valor obtenido con una $T_3 = 297.969$ da un valor satisfactorio, por lo tanto se tomará como correcto.

De la ecuación 23

$$T_4 = 297.969 - \frac{0.10\ (2.8571)}{0.6510}$$

$$T_4 = 297.530$$

Tomando en cuenta la $T_5 = 287.03$

De la ecuación 22

$$q_{r2} = (0.6510)(1.0)(5.674\times10^{-11})(0.90)(297.530^4 - 287.03^4)$$

$$q_{r2} = 0.0349 \quad kw$$

De la ecuación 21

$$q_{c2} = \frac{0.6510}{1.053 \times 10^2}\ (297.530 - 287.03)$$

$$q_{c2} = 0.0649 \quad kw$$

Tomando en cuenta el criterio de corrección para T_2

$$q_T = 0.10 \quad kw$$

$$q_{c2} + q_{r2} = 0.0998 \quad kw$$

La suma de $q_{c2} + q_{r2}$ es aproximadamente el valor de $q_T = 0.10\ kw$; obtenida la T_2 que cumple con las condiciones establecidas, el paso siguiente es localizar el punto en una gráfica q_T *vs.* $(T_1 - T_5)$; este punto es para $q_T = 0.10$ y $(T_1 - T_5) = (318.0\ K - 287.03\ K)$. Ahora se realiza el mismo proceso para otro par de valores $(T_1 - T_5)$ para encontrar el valor correspondiente de T_2, y de igual manera localizar el siguiente punto en la gráfica. Como se puede observar el proceso puede hacerse automáticamente en una computadora.

2.7 *Programa de computadora para el prototipo de doble cubierta de vidrio*

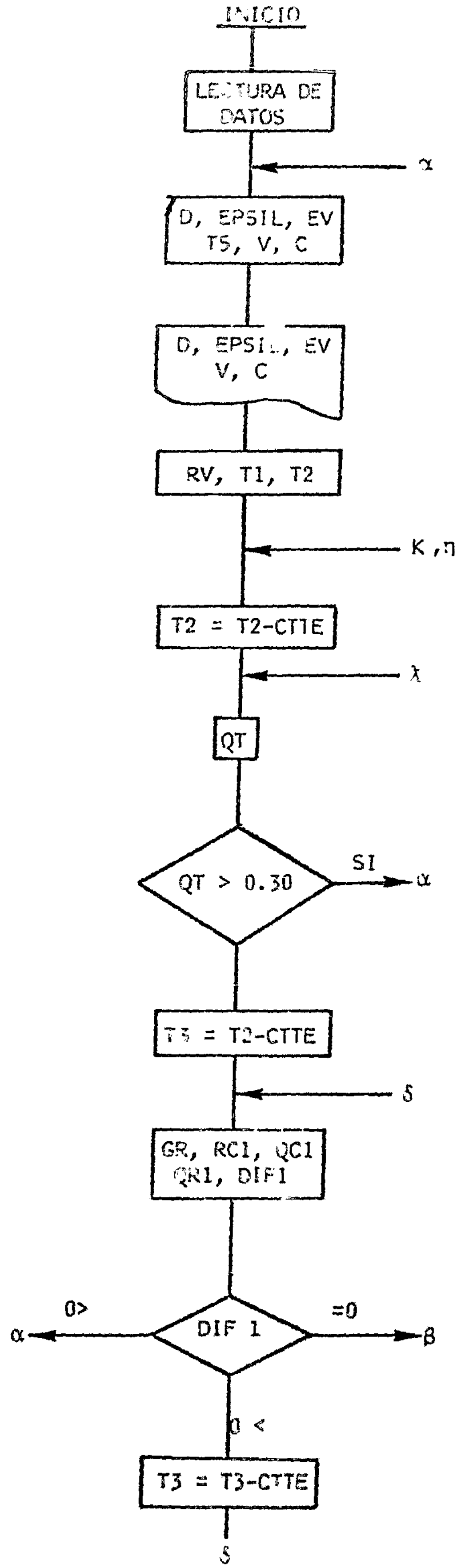
El programa fué realizado en lenguaje Fortran IV, para una computadora B 6700, la que se encuentra en la Ciudad Universitaria en el edificio del IIMAS.

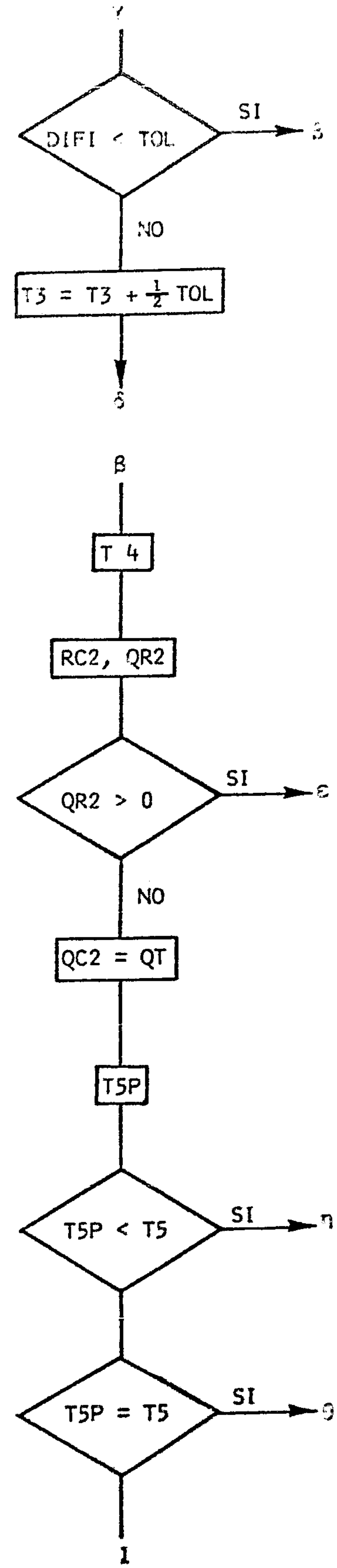
Programa de cómputo para el prototipo de doble cubierta

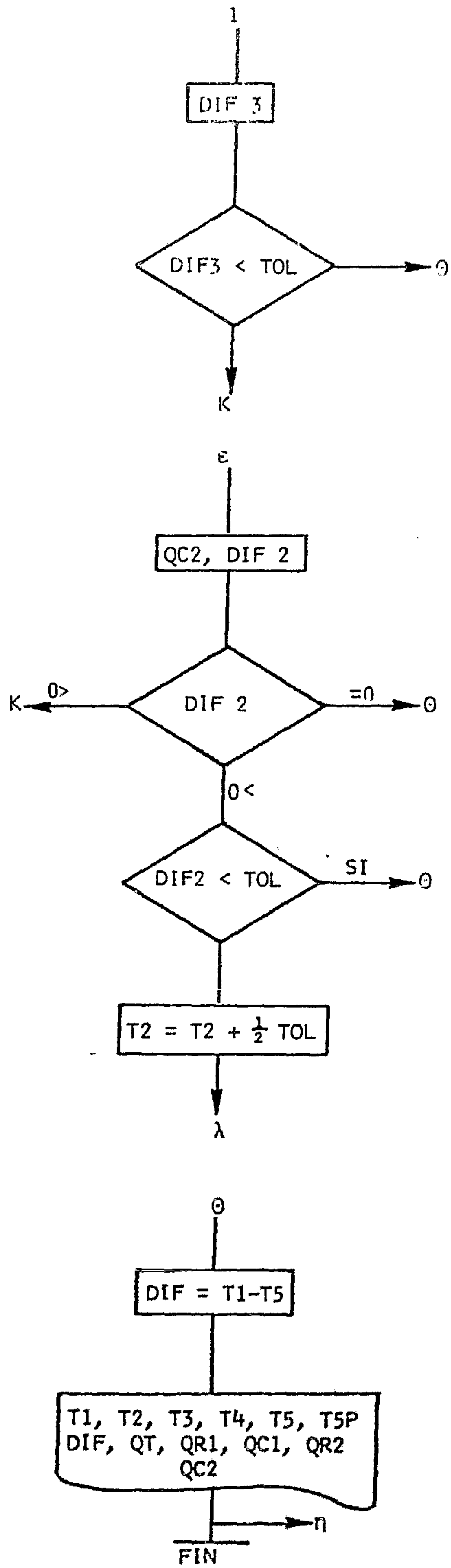
```
            BURROUGHS LARGE SYSTEMS FORTRAN COMPILATION   MARK 3.3.323WEDNESDAY
                                           T E S I S / S O L A R   O N   D I S K
                                           = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
FILE  5=LL,UNIT=READER
FILE  6=II,UNIT=PRINTER

      LL=5
      II=6
      REAL K , N , NU
      DATA ALV1/5376.E-4/
     *,     ALV2/6510.E-4/
     *,     ALVP/5945.E-4/
     *,     BETA/3.6628E-3/
     *,     CTTE/1.E-3/
     *,      CTV/1.05E-3/
     *,        FF/1./
     *,         G/9.81/
     *,         K/2.5538E-5/
     *,         N/25.E-2/
     *,        NU/15.172E-6/
     *,        PR/71.E-2/
     *,     SIGMA/56.74E-12/
     *,        TOL/1.0E-2/
10     READ ( 5 , 20 , END = 2000 ) D , EPSIL , EV , TS , V , C
       002:0116:1  IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT
20     FORMAT ( 6E10.5 )
       PRINT*//,D , EPSIL , EV , V , C
       RV = EV / CTV
       DO 1500 T1 = 2.74E 2 , 3.19E 2 , 1
            T2 =T1
30       T2 =T2-CTTE
40       DT =ALV1*(T1-T2)/RV
            IF ( DT .GT. 0.30 ) GO TO 10
```

```
      T3 =T2-CTTE
50    GP =G*BETA*D**3.0*(T2-T3)/NU**2.0
      RC1 =D/(K*C*(GR*PR)**N)
      QC1 =ALV1*(T2-T3)/RC1
      QR1 =ALV1*FF*SIGMA*EPSIL*(T2**4.0-T3**4.0)
      DIF1 =QT-(QR1+QC1)
      IF ( DIF1 ) 200 , 300 , 100
100   T3 =T3-CTTE
      GO TO 50
200   IF ( DIF1 .LT. TOL ) GO TO 300
      T3 =T3+0.5*TOL
      GO TO 50
300   T4 = T3-QT*RV/ALV2
400   RC2 =1. /((5.7+3.8*V)*1.0E-3)
      QR2 = ALV2*FF*SIGMA*EPSIL*(T4**4.0-T5**4.0)
      IF ( QR2 .GT. 0.0 ) GO TO 500
      QC2 =QT
      T5P =T4-QC2*RC2/ALV2
450   IF ( T5P .LE. T5 ) GO TO 1500
      IF ( T5P .EQ. T5 ) GO TO 1400
      DIF3 =T5P-T5
      IF ( DIF3 .LT. TOL ) GO TO 1400
      GO TO 50
500   QC2 =ALV2*(T4-T5)/RC2
      DIF2 =QT-(QR2+QC2)
      IF ( DIF2 ) 600 , 800 , 700
600   GO TO 3
700   IF ( DIF2 .LT. TOL ) GO TO 1400
      T2 =T2+0.5*TOL
      GO TO 40
800   GO TO 1400
1400  DIF =T1-T5
      WRITE ( 6 , 1450 ) T1 , T2 , T3 , T4 , T5P , T5 , DIF , QT ,
```

```
      *      QR1 , QC1 , QR2 , QC2
1450       FORMAT(/,5X,3HT1=,F14.1,2X,3HT2=,F14.1,2X,3HT3=,F14.1,2X,
      *      3HT4=,F14.1,2X,4HTSP=,F14.1,2X,3HT5=,F5.1,2X,4HDIF=,F14.1,
      *      /,5X,3HQT=,F7.5,2X,4HQR1=,F17.14,2X,4HQC1=,F17.14,2X,4HQR2=,
      *      F17.14,2X,4HQC2=,F17.14)
1500  C O N T I N U E
      GO TO 10
2000  C A L L  E X I T
      E N D
```


INICIO
LECTURA DE DATOS
α
D, EPSIL, EV
T5, V, C
D, EPSIL, EV
V, C
RV, T1, T2
K, η
T2 = T2-CTTE
λ
QT
QT > 0.30
SI
α
T3 = T2-CTTE
δ
GR, RC1, QC1
QR1, DIF1
DIF 1
0>
α
=0
β
0 <
T3 = T3-CTTE
δ


DIFI < TOL
SI
NO
T3 = T3 + ½ TOL
β
T 4
RC2, QR2
QR2 > 0
SI
ε
NO
QC2 = QT
T5P
T5P < T5
SI
η
T5P = T5
SI
θ
1


1
DIF 3
DIF3 < TOL
Θ
K
ε
QC2, DIF 2
DIF 2
0>
K
=0
Θ
0<
DIF2 < TOL
SI
Θ
T2 = T2 + ½ TOL
λ
Θ
DIF = T1-T5
T1, T2, T3, T4, T5, T5P
DIF, QT, QR1, QC1, QR2
QC2
n
FIN

```
D=0.0254   EPSIL=0.9   EV=0.003   V=1.0   C=0.21

T1=274.0000000000  T2=273.9859999976  T3=273.2179998720  T4=273.2072643864  TSP= 0.0000000000  T5=273.0:  DIF=
QT=0.00245  QR1= 0.00191198735219  QC1= 0.00053422284410  QR2= 0.00056140983914  QC2= 0.00128182659596

T1=275.0000000000  T2=274.9759999960  T3=273.4999997544  T4=273.4785287826  TSP= 0.0000000000  T5=273.0:  DIF=  2.0000000000
QT=0.00489  QR1= 0.00569042514362  QC1= 0.00120465944024  QR2= 0.00127813714828  QC2= 0.00295746125678

T1=276.0000000000  T2=275.9619999756  T3=275.8159975416  T4=275.7317951848  TSP= 0.0000000000  T5=275.0:  DIF=  3.0000000000
QT=0.00734  QR1= 0.00541378537405  QC1= 0.00192798915167  QR2= 0.00212450925145  QC2= 0.00468349999502

T1=277.0000000000  T2=276.9469999912  T3=274.0989995248  T4=274.0552317752  TSP= 0.0000000000  T5=275.0:  DIF=  4.0000000000
QT=0.00997  QR1= 0.00723140681736  QC1= 0.00274406605759  QR2= 0.00267161251461  QC2= 0.00652603071544

T1=278.0000000000  T2=277.9329999888  T3=274.4169994124  T4=274.3475703688  TSP= 0.0000000000  T5=275.0:  DIF=  5.0000000000
QT=0.01251  QR1= 0.00902129135438  QC1= 0.00358694940555  QR2= 0.00357361549054  QC2= 0.00854703659815

T1=279.0000000000  T2=278.9189999864  T3=274.7279993000  T4=274.6611089655  TSP= 0.0000000000  T5=275.0:  DIF=  6.0000000000
QT=0.01524  QR1= 0.01079317065646  QC1= 0.00444347963172  QR2= 0.00453545284682  QC2= 0.0102731234024

T1=280.0000000000  T2=279.9149999348  T3=275.0559991912  T4=274.9875475556  TSP= 0.0000000000  T5=275.0:  DIF=  7.0000000000
QT=0.01733  QR1= 0.01255183301432  QC1= 0.00532425758155  QR2= 0.00545648441041  QC2= 0.01226197879172

T1=281.0000000000  T2=280.8899999816  T3=275.3639992768  T4=275.2731603520  TSP= 0.0000000000  T5=275.0:  DIF=  8.0000000000
QT=0.02370  QR1= 0.01442113117272  QC1= 0.00627822266272  QR2= 0.00624133545400  QC2= 0.01403928259655

T1=282.0000000000  T2=281.8749999792  T3=275.6359987543  T4=275.5827751416  TSP= 0.0000000000  T5=275.0:  DIF=  9.0000000000
QT=0.02352  QR1= 0.01628016489464  QC1= 0.00724169540136  QR2= 0.00723769822984  QC2= 0.01597516049400

T1=283.0000000000  T2=282.8599999768  T3=276.0159988552  T4=275.9003859328  TSP= 0.0000000000  T5=275.0:  DIF= 10.0000000000
QT=0.02634  QR1= 0.01813130855432  QC1= 0.00821025844264  QR2= 0.00797317612912  QC2= 0.01773743630264
```

3. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE DOBLE CUBIERTA DE VIDRIO

3.1 Identificación de las variables de diseño

Con la ayuda del programa en lenguaje Fortran IV, para la computadora B-6700 que se encuentra en el Centro de Servicios de Cómputo (CSC) de la Universidad Nacional Autónoma de México, se obtienen las ayudas de diseño para el prototipo de doble cubierta de vidrio. El diseño es similar al prototipo de una cubierta de vidrio, es decir, es un diseño cuyo costo de fabricación es bajo y el proceso de fabricación es sencillo; las dimensiones básicas son similares, la capacidad es de 40 litros y la diferencia básica entre ambos aparatos es el uso de dos cubiertas de vidrio en el segundo, separadas una distancia "*d*" entre sí.

Para obtener el diseño óptimo, primero se identifican las variables de diseño; ellas son: la distancia que separa a las placas paralelas que es llamada "d", el espesor de las placas, identificada por "E_v". Una variable adicional es la velocidad del aire, identificada por "v". De las tres, la velocidad del aire v depende de las condiciones ambientales. Para el caso particular de este diseño, se aceptó considerar una velocidad del aire constante de 1 m/s.

El diseño del calentador se reduce, por lo tanto, a seleccionar el mejor par de valores espesor de placa-distancia entre placas. Esta selección se hace, en última instancia, en forma subjetiva; aquí se desarrollan criterios de selección que resultan de inspeccionar los resultados del modelo matemático haciendo variar el espesor y la distancia en forma independiente. Los resultados principales se discuten adelante con ayuda de las gráficas que se consideran más ilustrativas.

La gráfica de la fig 3 presenta las magnitudes del calor perdido para diferentes distancias entre las placas paralelas de vidrio. Estas curvas son para los siguientes valores:

curva 1	$d = 0.005$ m
curva 2	$d = 0.00254$ m
curva 3	$d = 1.0$ m

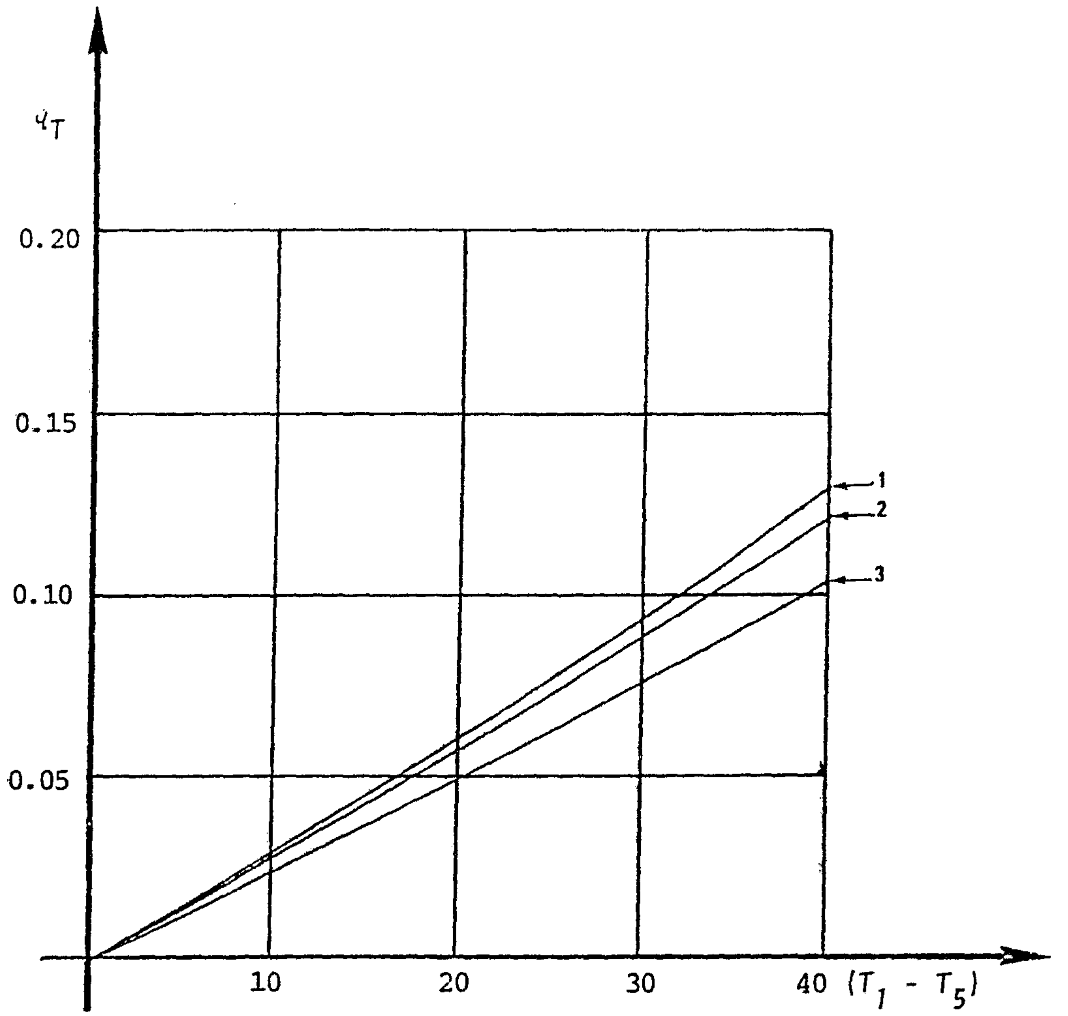


Fig. 3 Gráfica que corresponde al prototipo de doble cubierta de vidrio, y representa diferentes distancias entre los vidrios

d_1 = 5.0 mm	curva 1	ε = 0.9
d_2 = 2.54 cm	curva 2	E_v = 3.0 mm
d_3 = 1.0 m	curva 3	V = 1.0 m/s

El valor, constante en estas gráficas, del espesor del vidrio es de $E_v = 0.003$ *m*. Este valor fue tomado del prototipo para una capa de vidrio. En ese caso (ref 1) se recomendaba un vidrio con este espesor por ser el más resistente y manejable dentro del estrecho rango de los vidrios económicos: espesores más delgados se rompen fácilmente y espesores más gruesos tienen un costo más alto.

De las curvas presentadas se puede observar una disminución de las pérdidas de un 17% si la distancia crece de 0.005 m a 1 m.

Hacer el calentador con una distancia muy grande entre vidrios involucra, para su construcción, una cantidad de material mucho mayor y presenta un grave problema de manejo; por lo tanto, la distancia de 1 m no es recomendable. Algunos autores recomiendan una distancia de 2.54 cm (1.0 pulgada). La curva 2 representa esta distancia y presenta una disminución en las pérdidas de un 7% respecto a la distancia de 0.005 m.

En varios experimentos de otros autores (ref 2) se ha observado, como también se aprecia en la fig 3, que aumentos importantes en la distancia entre placas conducen cada vez a reducciones menores en las pérdidas de calor. Esto es, se adopta la distancia $d = 0.0254$ *m* por conveniencia constructi va, aunque esta selección implica que las pérdidas serán un 10% mayores que si la distancia fuera $d = 1$ m.

La gráfica de la fig 4 ilustra la variación del flujo de calor con el espesor del vidrio E_v, que es la segunda variable de diseño. Se puede observar, por ejemplo, que la diferencia entre la curva que corresponde al espesor de 1.0 mm y la de 1.0 cm, es del orden de 0.01 kW o 10%. Es decir, no afecta térmicamente en gran medida el utilizar un espesor de 1.0 cm, pero sí en el aspecto económico. Este espesor corresponde al rango de los cristales, los cuales tienen un costo elevado. Se tienen graficadas también las curvas que representan a los espesores de 3.0 mm y 5.0 mm.

Se observa que, siendo pequeña la influencia del espesor del vidrio en el comportamiento térmico del aparato, su selección puede hacerse esencialmente por criterios económicos, y puede así quedar sustanciada la decisión de usar vidrio de 3 mm.

Nótese, sin embargo, que aun removiendo toda limitación económica en la selección de d y E_v, y seleccionando $d = 1$ m y $E_v = 1$ cm, no se reducirían las pérdidas térmicas más allá de un 20% de las que se tienen con $d = 0.0254$m y $E_v = 0.3$ cm.

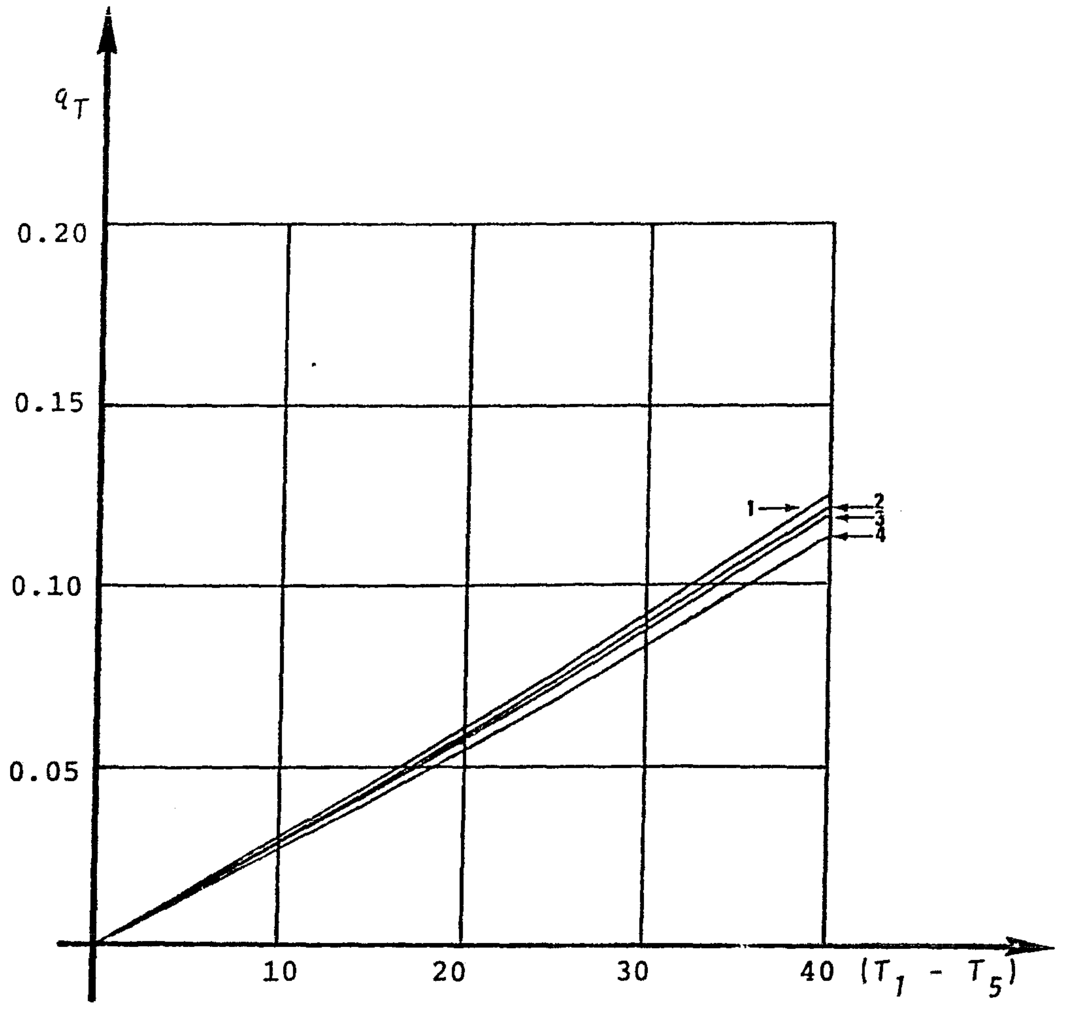


Fig. 4 Gráfica correspondiente a las curvas que represen- tan a diferentes espesores de vidrio, para el pro- totipo de doble cubierta de vidrio

d = 2.54 cm	$E_v 1$ = 1.0 mm
E = 0.90	$E_v 2$ = 3.0 mm
V = 1.0 m/s	$E_v 3$ = 5.0 mm
	$E_v 4$ = 1.0 cm

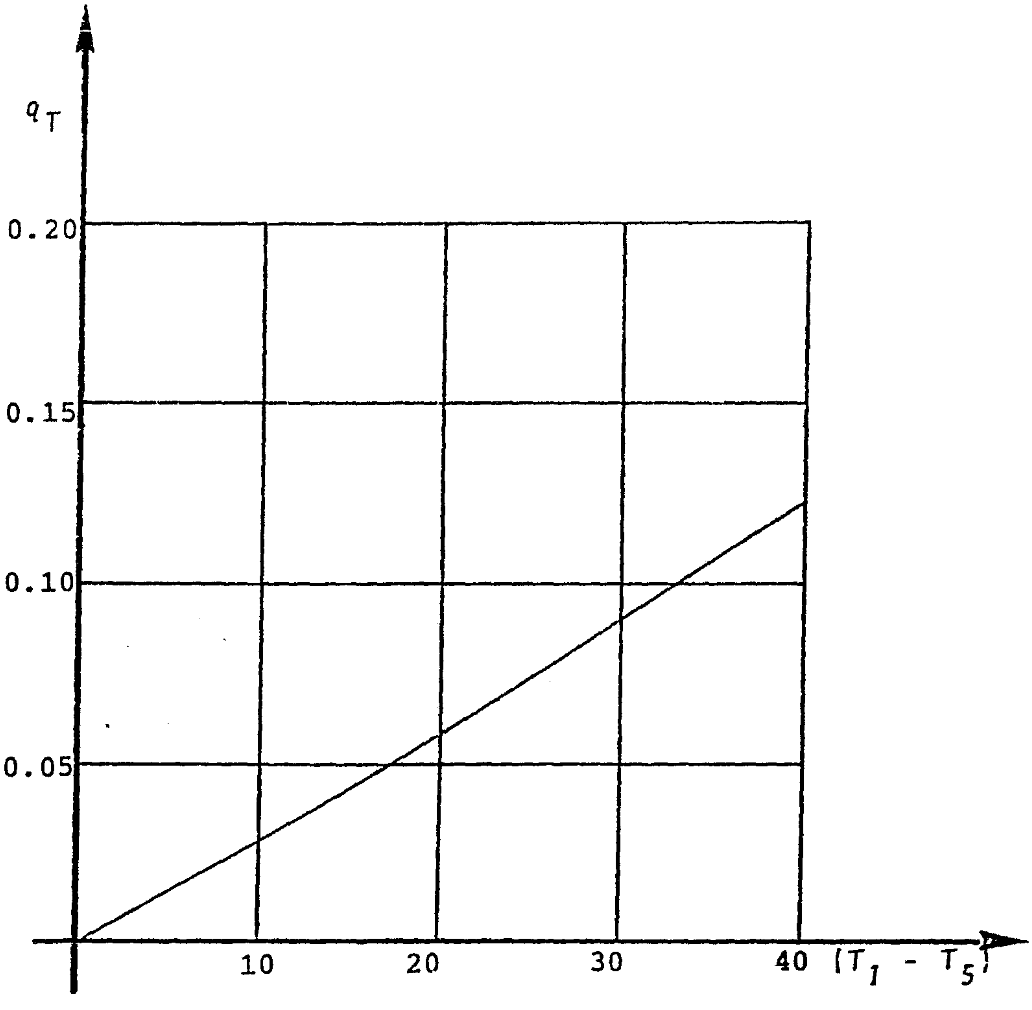


Fig. 5 Gráfica que muestra la curva que representa al prototipo de doble cubierta de vidrio con las dimensiones de diseño

$d = 2.54$ cm

$E_v = 3.0$ mm

$E = 0.90$

$V = 1.0$ m/s

La gráfica 5 corresponde a la curva que representa las pérdidas teóricas del prototipo de doble cubierta de vidrio, con las dimensiones de las variables seleccionadas anteriormente. A continuación se presentan los dibujos del prototipo con dichas dimensiones. El modelo físico se fabricó en fibra de vidrio, con un proceso similar con el que se fabricó el prototipo de una cubierta de vidrio.

Las figuras 6, 7 y 8, representan los dibujos esquemáticos del prototipo de doble cubierta de vidrio. La escala es 1:400 y las unidades se encuentran en cm. La figura 6 representa el corte a lo ancho, la figura 7 el corte a lo largo y la figura 8 es el dibujo que representa a la tapa de fibra de vidrio que se discute más adelante, y cuyas dimensiones son:

Dimensión	Corte a lo largo	Corte a lo ancho
A	101.3	81.3
B	96.3	77.0

Las unidades son cm.

La figura 8 representa a la tapa aislada térmicamente con fibra de vidrio. Su uso representa la segunda opción que se estudiará tanto teóricamente como experimentalmente. Con ella se pretende también evitar la pédida de calor. Para

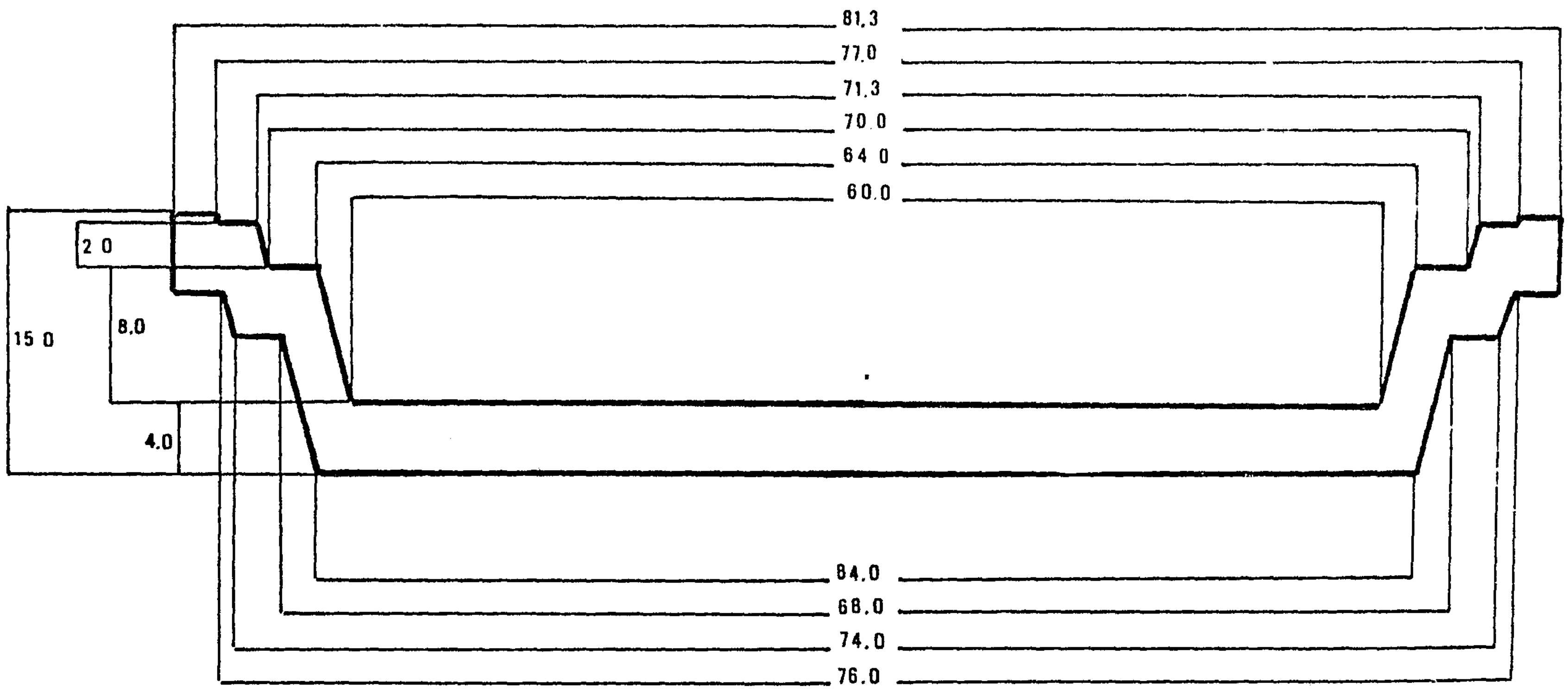


FIGURA 6

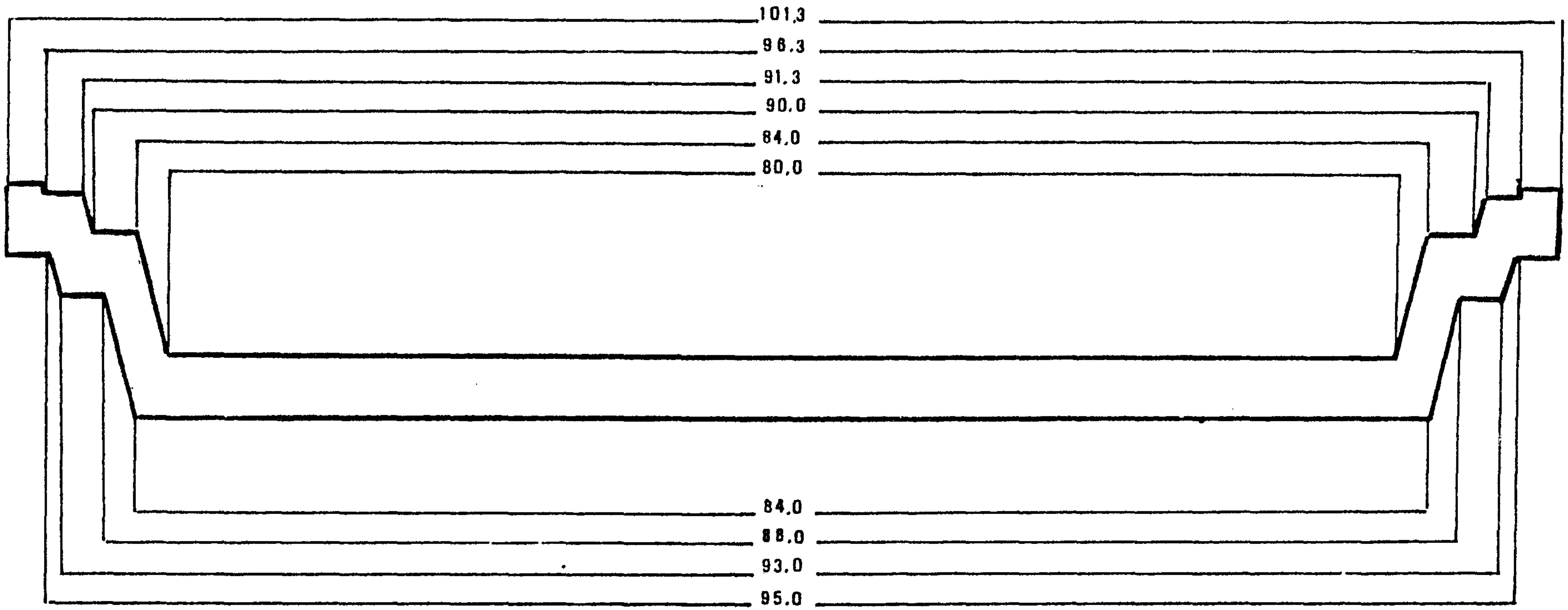


FIGURA 7

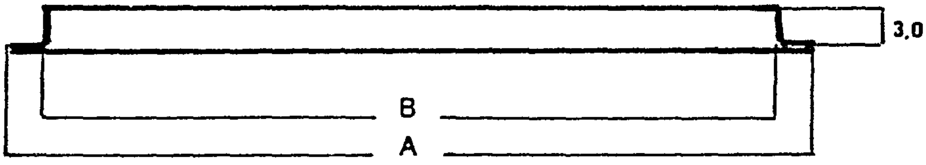
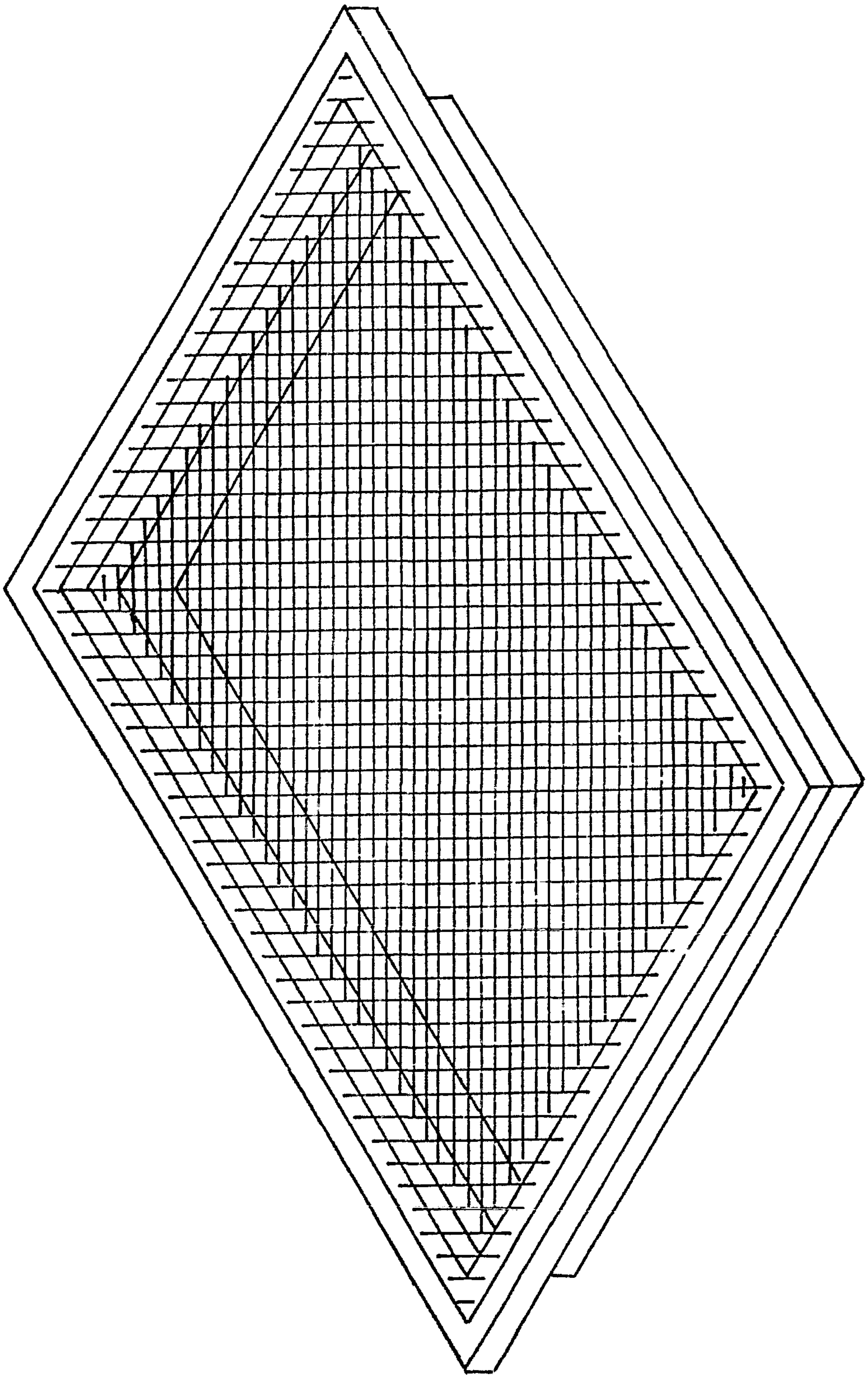
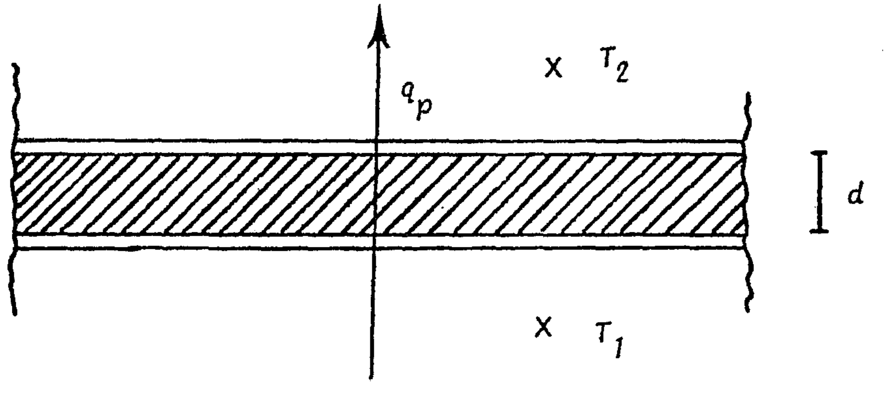


FIGURA 8



ello deberá utilizarse cuando termina el día solar, para evitar que el aire esté en contacto con los vidrios y que de esta forma se enfríe el agua que se encuentra en el calentador. A continuación se presenta el análisis matemático de la pérdida de calor por la tapa:



La figura anterior representa una sección de la tapa con fibra de vidrio en su interior; d es el espesor de la tapa y q_p es el calor perdido.

Las dimensiones son las siguientes, y corresponden a dar un aislamiento térmico a la tapa de igual espesor que el del resto del aparato:

$$d = 0.03 \ m$$
$$A = 0.7293 \ m^2$$

de la ecuación unidimensional de conducción,

$$q_p = \frac{Ak}{d} (T_1 - T_2)$$

De tablas, la conductividad del aislante es

$$4.07 \times 10^{-5} \quad kW/m°C$$

sustituyendo en la ecuación anterior,

$$q_p = \frac{0.7293 \ (4.07)}{0.03} (T_1 - T_2) \ (10^{-5})$$

$$q_p = 9.89 \times 10^{-4} \ (T_1 - T_2) \ kW$$

para la solución teórica, se despeja T_2:

$$T_2 = T_1 - \frac{q_p}{9.89 \times 10^{-4}}$$

Se elabora ahora una gráfica asignando valores a q_p de 0.01 hasta 0.13. Se adopta un valor de $T_1 = 45°C$. Se presenta la gráfica correspondiente a las pérdidas teóricas en la fig 9. Se puede observar que las pérdidas con tapa son un 40% del valor correspondiente a las pérdidas sin tapa, como se vió en la fig 5 anterior.

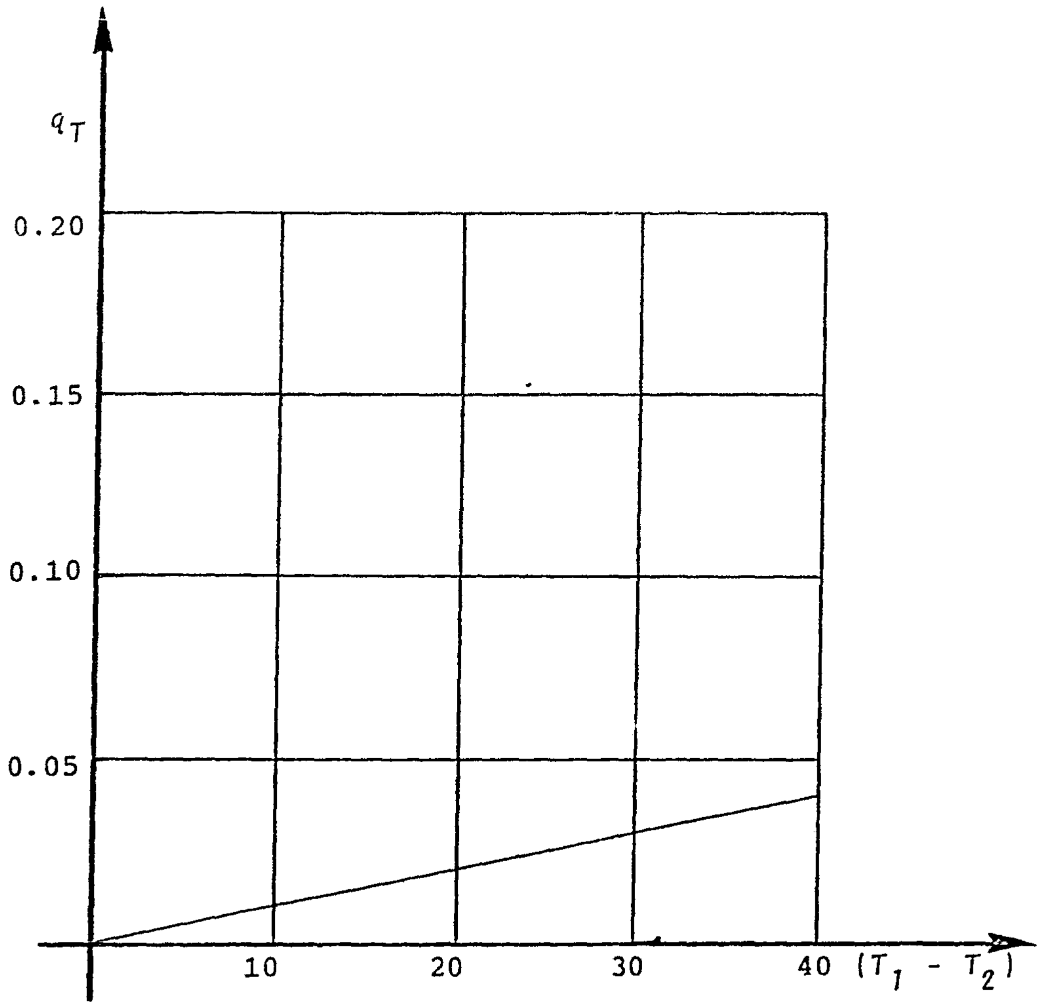


Fig. 9 Gráfica correspondiente al prototipo con cubierta o tapa de fibra de vidrio, que muestra las pérdidas teóricas.

3.2 *Desarrollo de las pruebas experimentales*

En esta sección se relatan las pruebas experimentales y la forma como se realizaron en el prototipo de doble cubierta de vidrio. Primero se explicará en qué condiciones se realizaron las pruebas. La finalidad de estos estudios es medir las pérdidas de calor. Ya que, como se observó en el balance térmico, es preferible medir los flujos de calor perdido en ausencia de la radiación solar, el calentador se instaló en un cuarto completamente cerrado. Así, se tiene una velocidad nula del aire. Se instaló un termómetro de mercurio en vidrio para medir la temperatura ambiental; asimismo, en el centro de las placas de vidrio se barrenaron dos orificios por los cuales se introdujo un termómetro igual al anterior para medir la temperatura del agua. El agua se calentaba previamente a una temperatura aproximada de 45°C a 55.0°C. Cada hora se tomaban las lecturas en los dos termómetros, las cuales se registraban con la finalidad de graficarlas posteriormente. Se realizaron 4 pruebas con doble capa de vidrio, 4 pruebas con una capa de vidrio, 4 pruebas con la tapa y doble cubierta de vidrio y 4 pruebas con la tapa y una capa de vidrio. La duración de cada prueba fue de 12 h.

Para obtener las pérdidas de calor experimentalmente, se usa la siguiente ecuación:

$$q_T = M\ C_p \frac{(T_{i-1} - T_i)}{\Delta t} \qquad (24)$$

donde

q_T pérdida de calor total medida, kW

M masa de agua en el calentador, kg

C_p calor específico del agua, KJ/kg°C

T_i temperatura del agua al final del intervalo, °C

T_{i-1} temperatura del agua al inicio del intervalo, °C

Δt intervalo de tiempo, s

Las pruebas se hicieron, en todos los casos, para intervalos de una hora (3600 s), con 40 kg de agua cuyo calor específico es 4.18 KJ/kg°C. Con estos valores en la ec 24 se tiene

$$q_T = 4.644 \times 10^{-2}\ \Delta T \qquad (25)$$

En la tabla 1 se presenta la primera prueba y a continuación se explica cómo se obtuvo.

Se realizaron 4 pruebas con doble cubierta de vidrio; la primera comenzó a las 10:00 h am y finalizó a las 22:00 h, es decir, 12 horas más tarde. Se midió la temperatura del agua (T_1) cada hora, igualmente la temperatura ambiente (T_5). ΔT representa la diferencia de temperaturas entre T_1 - T_5; T_1 - T_5 es la diferencia de temperaturas entre el agua y el aire, como promedio en el intervalo y se obtiene tomando en cuenta el promedio entre dos temperaturas T_1. El valor de q_T corresponde a Q_T para la gráfica y se obtiene de la ecuación 24.

En las tablas 2, 3 y 4 se presentan los resultados de las tres pruebas restantes; asimismo, se incluye la gráfica que representa las pérdidas reales de las cuatro pruebas. Sobre esta gráfica se presenta también, para comparación, la curva teórica correspondiente a las dimensiones del prototipo, a la temperatura del aire del experimento y a una velocidad nula del viento.

Nótese que la curva teórica se despega mucho de los resultados experimentales, particularmente a temperaturas del agua de 20°C o más sobre la del ambiente. Además de la dispersión de los resultados del experimento, parecen haber otros fenómenos de transmisión de calor presentes en el experimento pero que no observa el modelo matemático.

Puede decirse a priori que las ecuaciones que, en el modelo matemático propuesto, describen el flujo de calor, son precisas y confiables en cuanto a los fenómenos de conducción y radiación. Es difícil, sin embargo, modelar adecuadamente la convección. Por un lado, hay diversos modos de perturbar la convección natural entre placas de vidrio (ref 4), de modo que el modelo puede predecir coeficientes convectivos menores

HORA	T1	T5	ΔT	Δt	$\overline{T1-T5}$	Q_T
10:00	51.0	25.0				
11:00	49.0	25.0	2.0	1.0	25.0	9.3×10^{-2}
12:00	47.0	25.0	2.0	1.0	23.0	9.3×10^{-2}
13:00	45.0	25.0	2.0	1.0	21.0	9.3×10^{-2}
14:00	44.0	26.0	1.0	1.0	18.5	4.6×10^{-2}
15:00	43.0	26.0	1.0	1.0	17.5	4.6×10^{-2}
16:00	42.0	26.0	1.0	1.0	16.5	4.6×10^{-2}
17:00	40.5	26.0	1.5	1.0	15.3	6.9×10^{-2}
18:00	40.0	26.0	0.5	1.0	14.3	2.3×10^{-2}
19:00	39.0	26.0	1.0	1.0	13.5	4.6×10^{-2}
20:00	38.0	25.0	1.0	1.0	13.5	4.6×10^{-2}
21:00	37.0	25.0	1.0	1.0	12.5	4.6×10^{-2}
22:00	36.0	25.0	1.0	1.0	11.5	4.6×10^{-2}

Tabla 1. Prueba realizada el día 9 de junio de 1982, con doble cubierta de vidrio. Las unidades corresponden a la ec 24.

HORA	T1	T5	ΔT	Δt	$\bar{T}1-T5$	Q_T
9:30	35.0	22.0				
10:30	35.0	22.0	0	1.0	13.0	0
11:30	34.5	23.0	0.5	1.0	11.75	2.3×10^{-2}
12:30	33.5	23.0	1.0	1.0	11.0	4.6×10^{-2}
13:30	33.0	23.0	0.5	1.0	10.25	2.3×10^{-2}
14:30	32.5	23.0	0.5	1.0	9.75	2.3×10^{-2}
15:30	31.5	23.0	1.0	1.0	9.0	4.6×10^{-2}
16:30	31.0	23.0	0.5	1.0	8.25	2.3×10^{-2}
17:30	30.5	23.0	0.5	1.0	7.75	2.3×10^{-2}
18:30	30.0	23.0	0.5	1.0	7.25	2.3×10^{-2}
19:30	30.0	23.0	0	1.0	7.25	0
20:30	29.5	23.0	0.5	1.0	6.75	2.3×10^{-2}
21:30	29.0	23.0	0.5	1.0	6.25	2.3×10^{-2}

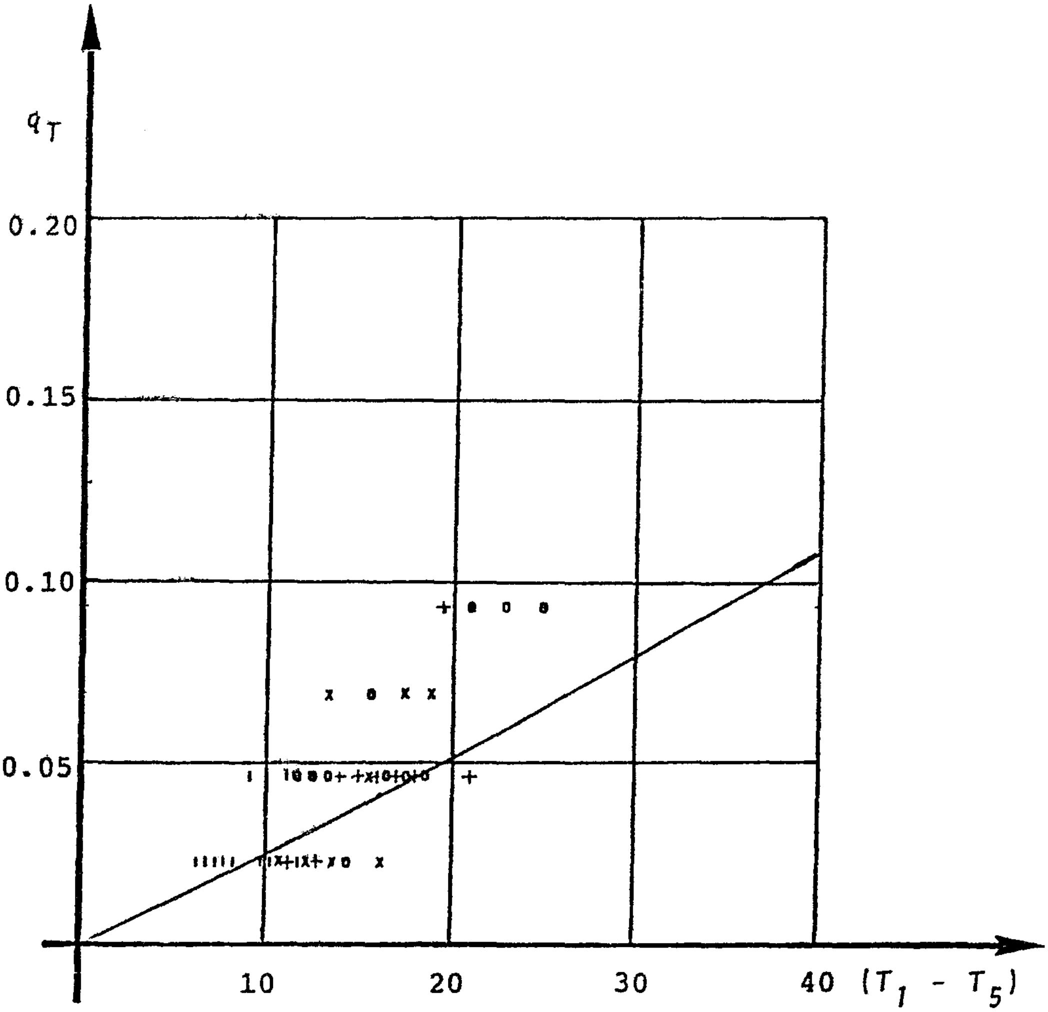
Tabla 2. Prueba realizada el 15 de junio de 1982 con doble cubierta de vidrio. Unidades de la ec 24.

HORA	T1	T5	ΔT	Δt	$\overline{T1-T5}$	Q_T
9:30	42.0	22.5				
10:30	40.5	22.5	1.5	1.0	18.75	6.9×10^{-2}
11:30	39.0	22.5	1.5	1.0	17.25	6.9×10^{-2}
12:30	38.5	22.5	0.5	1.0	16.25	2.3×10^{-2}
13:30	37.5	22.5	1.0	1.0	15.5	4.6×10^{-2}
14:30	37.0	23.5	0.5	1.0	13.75	2.3×10^{-2}
15:30	35.5	23.0	1.5	1.0	13.25	6.9×10^{-2}
16:30	35.0	23.0	0.5	1.0	12.25	2.3×10^{-2}
17:30	34.0	23.0	1.0	1.0	11.5	4.6×10^{-2}
18:30	33.5	23.0	0.5	1.0	10.75	2.3×10^{-2}
19:30	33.0	23.0	0.5	1.0	10.25	2.3×10^{-2}
20:30	32.5	23.0	0.5	1.0	9.75	2.3×10^{-2}
21:30	32.0	22.5	0.5	1.0	9.75	2.3×10^{-2}

Tabla 3. Prueba realizada el 14 de junio de 1982 con doble cubierta de vidrio. Unidades de la ec 24.

HORA	T1	T5	ΔT	Δt	$\overline{T1-T5}$	Q_T
12:00	45.0	23.5				
13:00	44.0	23.5	1.0	1.0	21.0	$4.6x10^{-2}$
14:00	42.0	23.5	2.0	1.0	19.5	$9.3x10^{-2}$
15:00	41.0	23.5	1.0	1.0	18.0	$4.6x10^{-2}$
16:00	40.0	23.5	1.0	1.0	17.0	$4.6x10^{-2}$
17:00	39.0	23.5	1.0	1.0	16.0	$4.6x10^{-2}$
18:00	38.0	23.5	1.0	1.0	15.0	$4.6x10^{-2}$
19:00	37.0	23.5	1.0	1.0	14.0	$4.6x10^{-2}$
20:00	36.0	23.0	1.0	1.0	13.5	$4.6x10^{-2}$
21:00	35.5	23.0	0.5	1.0	12.75	$2.3x10^{-2}$
22:00	34.5	23.5	1.0	1.0	11.5	$4.6x10^{-2}$
23:00	34.0	23.0	0.5	1.0	11.25	$2.3x10^{-2}$
24:00	33.5	23.0	0.5	1.0	10.75	$2.3x10^{-2}$

Tabla 4. Prueba realizada el 12 de junio de 1982, con doble cubierta de vidrio. Unidades de la ec 24.



o- prueba realizada el 9 de junio de 1982, tabla 1

ı- prueba realizada el 15 de junio de 1982, tabla 2

x- prueba realizada el 14 de junio de 1982, tabla 3

+- prueba realizada el 12 de junio de 1982, tabla 4

Fig. 10 Gráfica correspondiente al prototipo de doble cubierta de vidrio, con las dimensiones reales y una velocidad de aire nula a los reales hasta por un factor de 1/100. Por otro lado, la suposición de que el viento es de velocidad nula es de difícil defensa. Puede también haber otras imprecisiones en el modelo pero probablemente nunca tan importantes como las anotadas.

Ya que se desea ajustar el modelo matemático a las condiciones del experimento, pueden considerarse la velocidad del viento y una constante C como factor del coeficiente de convección natural entre las placas de vidrio como variables de ajuste. Se puede adquirir alguna sensibilidad con respecto a los valores que deben asumir υ y C observando la variación del flujo de calor cuando se varían υ y C en forma independiente. Así, las figs 11 y 12 ilustran, respectivamente, los valores de Q_T variando υ y C. Se observa que el resultado es satisfactorio cuando, en la fig 11, $C = 0.21$ y $\upsilon = 20\ m/s$ o en la fig 12, cuando $\upsilon = 0$ y $C = 1.68$. Ninguno de estos pares de valores parece razonable; sin embargo, y aceptando que la limitación de la precisión del experimento impone restricciones en la precisión del ajuste, puede aceptarse una solución de compromiso haciendo $C = 1.68$ y $\upsilon = 0\ m/s$, los que ya no parecen tan ficticios. Estos factores de ajuste, naturalmente, son representativos del prototipo solo en condiciones de operación similares a las del experimento.

Se realizó otra prueba en el prototipo de doble cubierta de

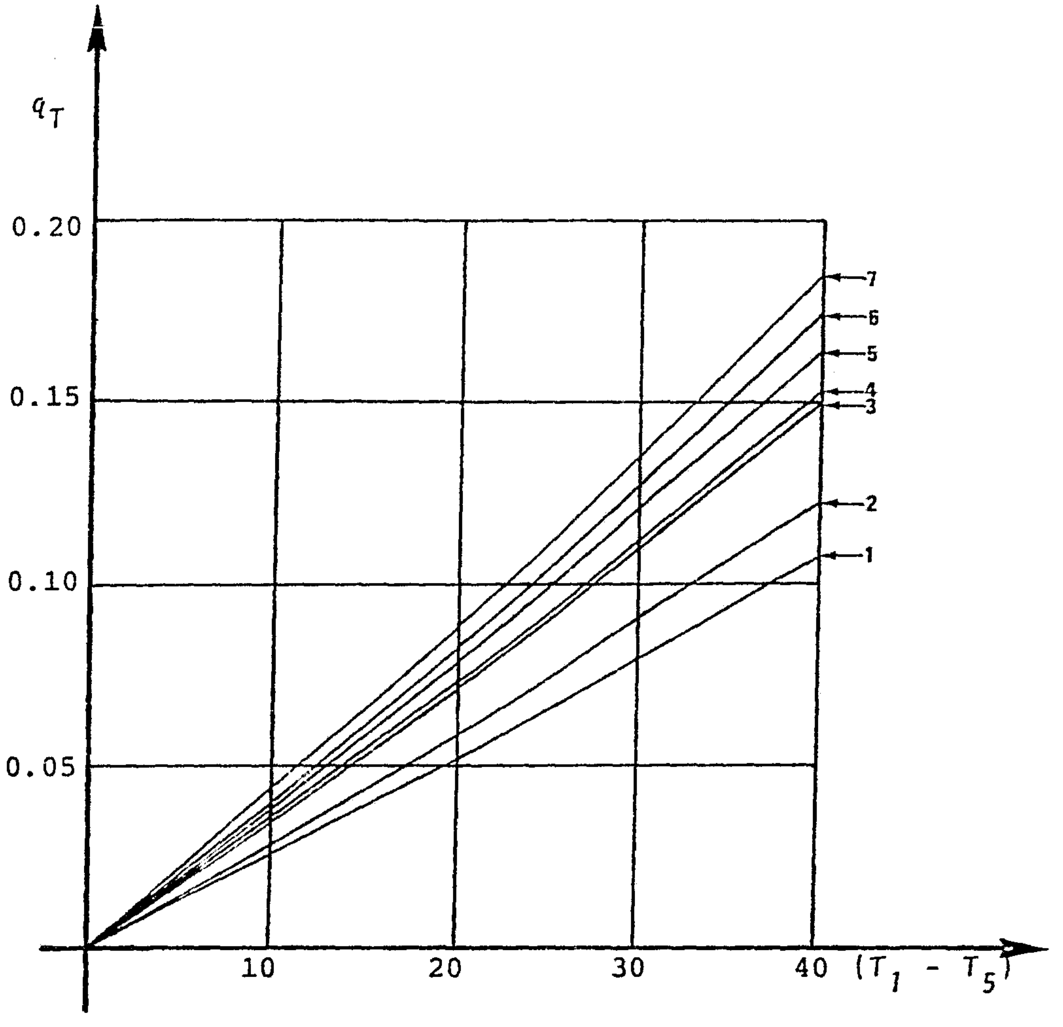


Fig. 11 Gráfica correspondiente al prototipo de doble cubierta de vidrio, variando la velocidad del aire.

$V_1 = 0$

$V_2 = 1.0$ m/s

$V_3 = 5.0$ m/s

$V_4 = 6.0$ m/s

$V_5 = 10.0$ m/s

$V_6 = 20.0$ m/s

$V_7 = 100.0$ m/s

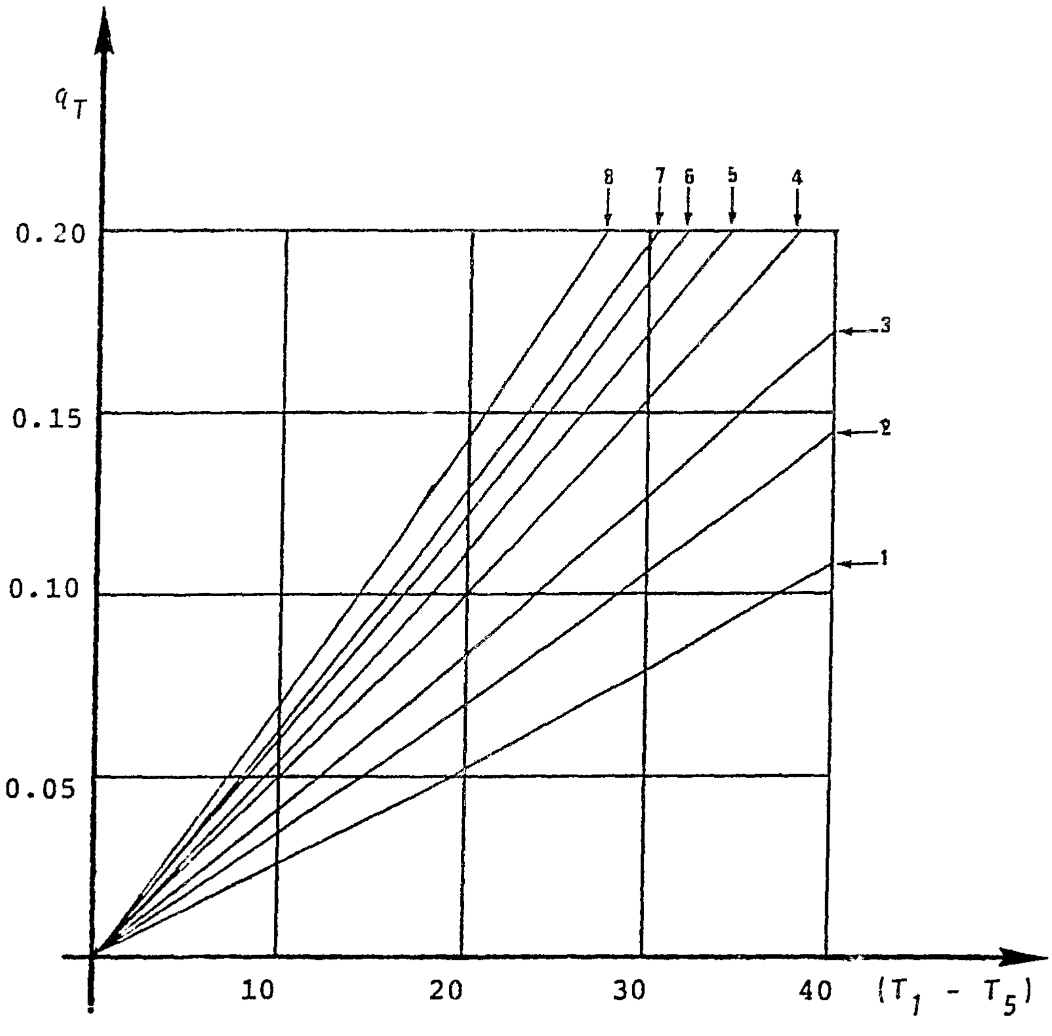


Fig. 12 Gráfica correspondiente a diferentes valores de la constante C, para doble cubierta de vidrio

$C_1 = 0.21$	$C_5 = 6.72$	$d = 2.54$ cm
$C_2 = 0.84$	$C_6 = 13.44$	$E = 0.90$
$C_3 = 1.68$	$C_7 = 26.80$	$E_v = 3.0$ mm
$C_4 = 3.36$	$C_8 = 107.52$	$V = 0$

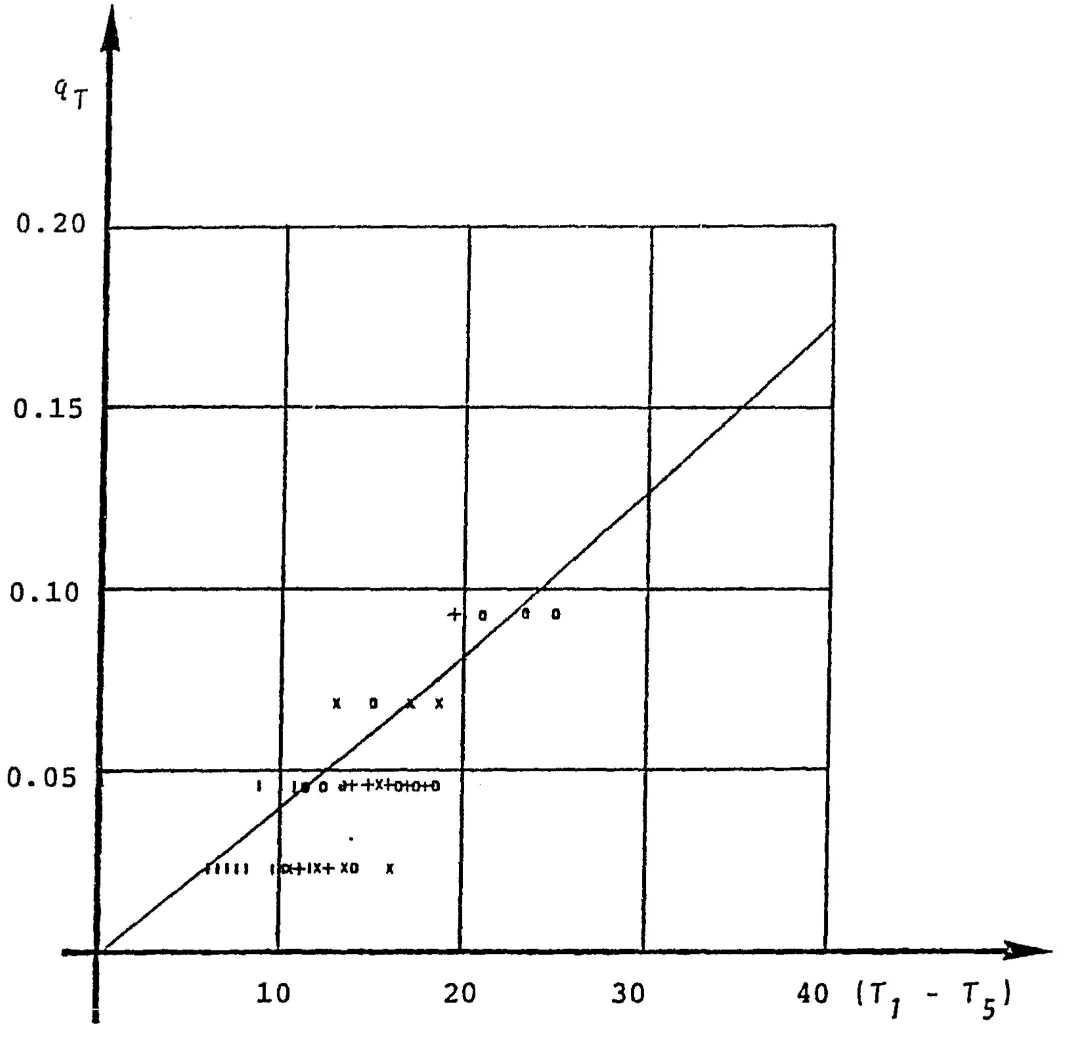


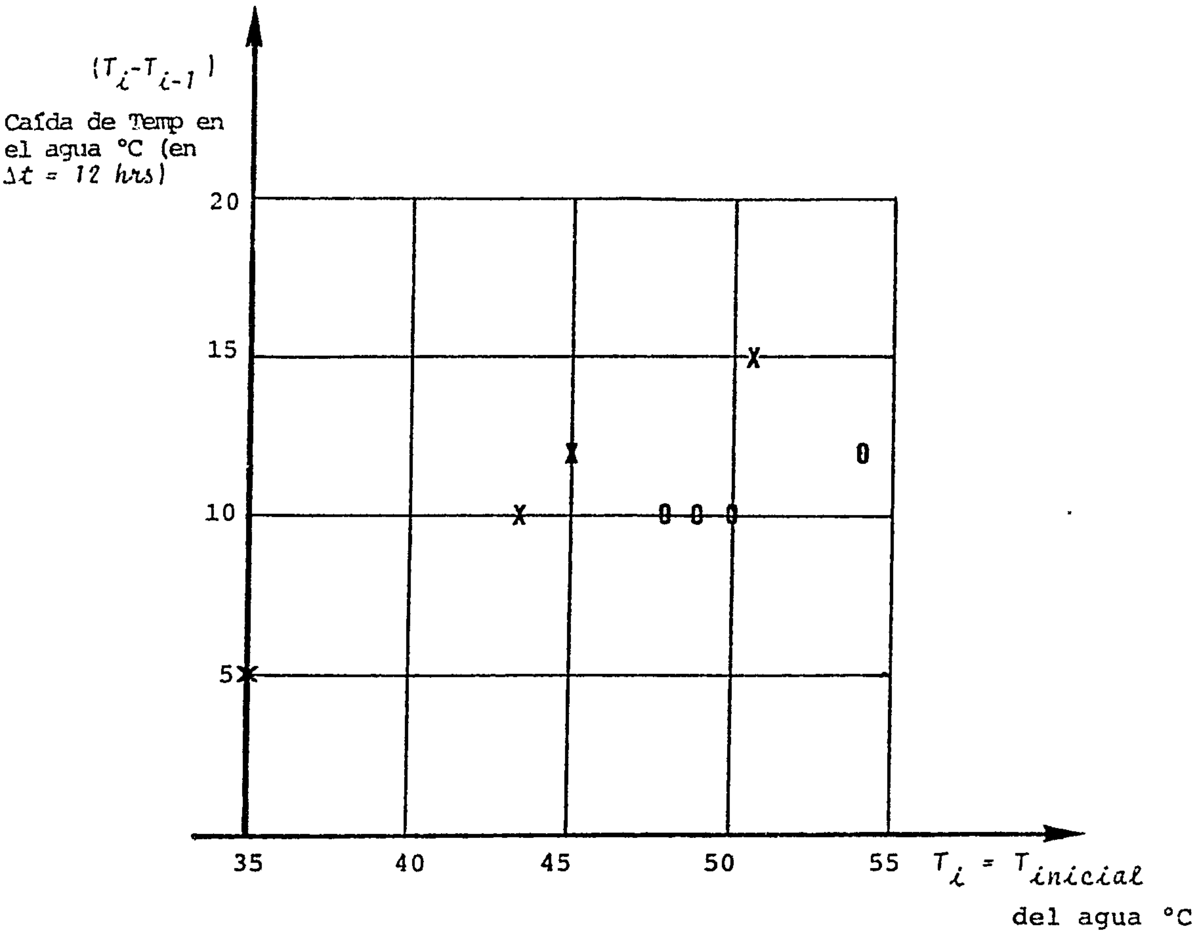
Fig. 13 Gráfica que corresponde al prototipo de doble cubierta de vidrio en la cual se muestra la curva que se ajusta a los resultados experimentales, que se obtiene con un valor de la constante $C = 1.68$, $V = 0$

vidrio pero en esta ocasión se colocó la tapa aislante de fibra de vidrio. También en esta condición se realizaron 4 pruebas pero ahora únicamente se midió la temperatura inicial y la final después de 12 horas. Se compararon las pruebas realizadas sin tapa y con tapa y, como ilustra la gráfica de la fig 14, se puede observar que es posible alcanzar una mayor temperatura final al utilizar la tapa aislante.

Con el fin de completar la información experimental, a continuación se presentan resultados de las pruebas realizadas en el prototipo, pero con una sola cubierta de vidrio. La fig 15 presenta los resultados experimentales y la curva teórica con una velocidad cero.

Se puede observar que la pérdida en un prototipo con una cubierta de vidrio es mayor a las obtenidas en el prototipo de doble cubierta de vidrio. Con estos resultados se demuestra que al utilizar dos cubiertas de vidrio se obtienen temperaturas mayores en el agua después de periodos de 12 horas.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de observar el comportamiento del calentador de una y de dos placas de vidrio, con tapa aislante sobrepuesta, en periodos de 12 horas. La gráfica de la fig 16, elaborada con estos resultados para el caso de una sola cubierta, destaca el beneficio aislante de la tapa de fibra de vidrio.



SIMBOLOS O - doble cubierta de vidrio con tapa
X - doble cubierta de vidrio sin tapa

Fig. 14 Variación de la caída de temperatura del agua en el calentador solar después de un período de 12 hrs para varias temperaturas al inicio, con tapa (O) y sin tapa (X). Doble cubierta de vidrio

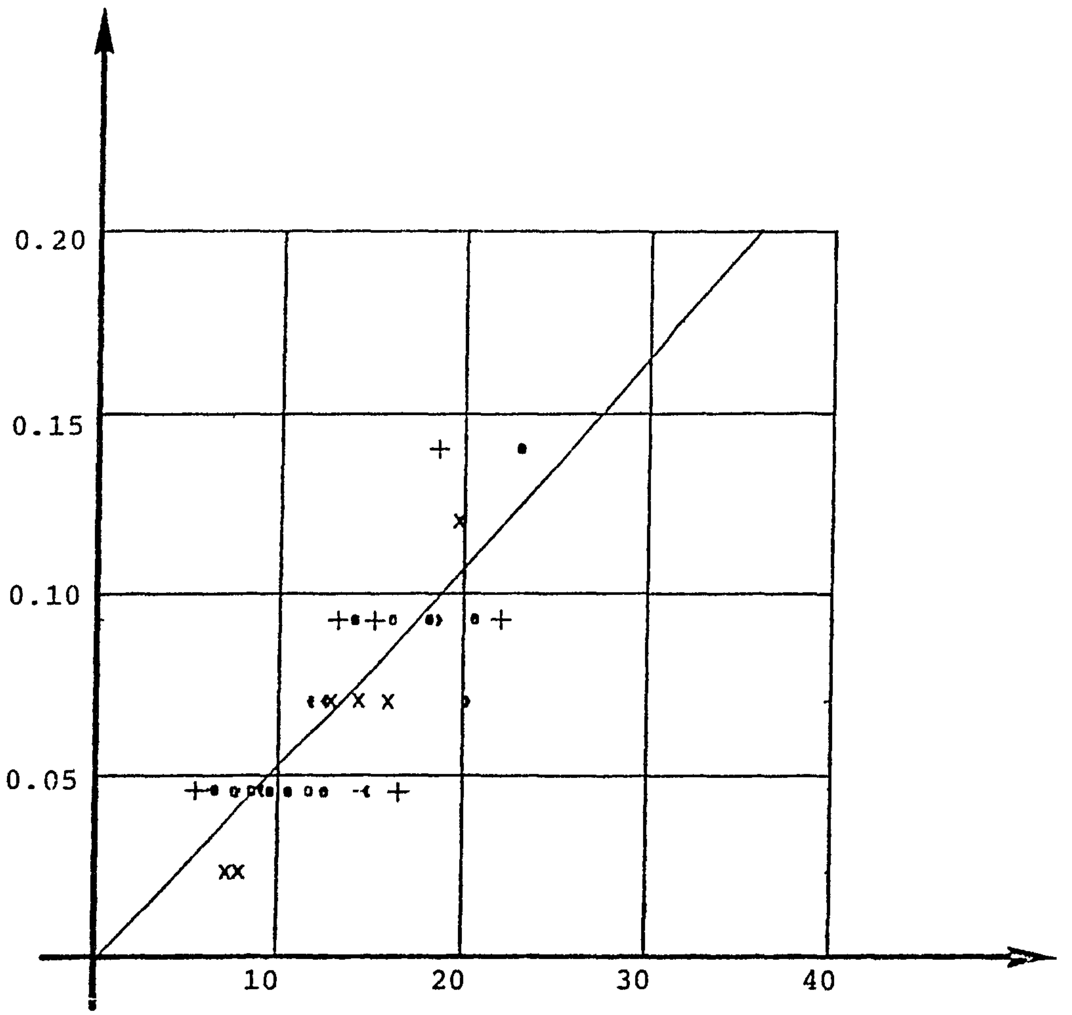


Fig. 15 Gráfica para el prototipo de una cubierta de vidrio

o - Prueba realizada el 17 de junio, tabla 5

+ - Prueba realizada el 18 de junio, tabla 6

x - Prueba realizada el 22 de junio, tabla 7

⟨⟩ - Prueba realizada el 23 de junio, tabla 8

La curva teórica corresponde a una velocidad del aire nula

HORA	T1	T5	ΔT	Δt	$\overline{T1-T5}$	Q_T
9:00	48.0	23.0		1.0		
10:00	45.0	23.5	3.0	1.0	23.0	$1.4x10^{-1}$
11:00	43.0	23.5	2.0	1.0	20.5	$9.3x10^{-2}$
12:00	41.0	24.0	2.0	1.0	18.0	$9.3x10^{-2}$
13:00	39.0	24.0	2.0	1.0	16.0	$9.3x10^{-2}$
14:00	37.0	24.0	2.0	1.0	14.0	$9.3x10^{-2}$
15:00	36.0	24.0	1.0	1.0	12.5	$4.6x10^{-2}$
16:00	35.0	24.0	1.0	1.0	11.5	$4.6x10^{-2}$
17:00	34.0	24.0	1.0	1.0	10.5	$4.6x10^{-2}$
18:00	33.0	24.0	1.0	1.0	9.5	$4.6x10^{-2}$
19:00	32.0	24.0	1.0	1.0	8.5	$4.6x10^{-2}$
20:00	31.0	24.0	1.0	1.0	7.5	$4.6x10^{-2}$
21:00	30.0	24.0	1.0	1.0	6.5	$4.6x10^{-2}$

Tabla 5. Prueba realizada el 17 de junio de 1982 con una tapa de vidrio. Unidades de la ec 24.

HORA	T1	T5	ΔT	Δt	$\overline{T1}-T5$	Q_T
9:00	46.0	23.0				
10:00	44.0	23.0	2.0	1.0	22.0	$9.3x10^{-2}$
11:00	41.0	24.0	3.0	1.0	18.5	$1.4x10^{-1}$
12:00	40.0	24.0	1.0	1.0	16.5	$4.6x10^{-2}$
13:00	38.0	24.0	2.0	1.0	15.0	$9.3x10^{-2}$
14:00	36.0	24.0	2.0	1.0	13.0	$9.3x10^{-2}$
15:00	35.0	24.0	1.0	1.0	11.5	$4.6x10^{-2}$
16:00	34.0	24.0	1.0	1.0	10.5	$4.6x10^{-2}$
17:00	33.0	24.0	1.0	1.0	9.5	$4.6x10^{-2}$
18:00	32.0	24.0	1.0	1.0	8.5	$4.6x10^{-2}$
19:00	31.0	24.0	1.0	1.0	7.5	$4.6x10^{-2}$
20:00	30.0	24.0	1.0	1.0	6.5	$4.6x10^{-2}$
21:00	29.0	24.0	1.0	1.0	5.5	$4.6x10^{-2}$

Tabla 6. Prueba realizada el 18 de junio de 1982 con una tapa de vidrio. Unidades de la ec 24.

HORA	T1	T5	ΔT	Δt	$\overline{T1-T5}$	Q_T
9:00	43.0	23.0				
10:00	40.5	24.0	2.5	1.0	19.75	1.2×10^{-1}
11:00	39.0	24.0	1.5	1.0	15.75	7.0×10^{-2}
12:00	37.5	24.0	1.5	1.0	14.25	7.0×10^{-2}
13:00	36.0	24.0	1.5	1.0	12.75	7.0×10^{-2}
14:00	35.0	24.0	1.0	1.0	11.5	4.6×10^{-2}
15:00	34.0	24.0	1.0	1.0	10.5	4.6×10^{-2}
16:00	33.0	24.0	1.0	1.0	9.5	4.6×10^{-2}
17:00	32.0	24.0	1.0	1.0	8.5	4.6×10^{-2}
18:00	31.5	24.0	0.5	1.0	7.75	2.3×10^{-2}
19:00	31.0	24.0	0.5	1.0	7.25	2.3×10^{-2}
20:00	30.0	24.0	1.0	1.0	6.5	4.6×10^{-2}
21:00	29.0	24.0	1.0	1.0	5.5	4.6×10^{-2}

Tabla 7. Pruebas realizadas el 22 de junio de 1982 con una tapa de vidrio. Unidades de la ec 24.

HORA	T1	T2	ΔT	Δt	$\bar{T}1-T5$	Q_T
9:00	44.5	24.0				
10:00	43.0	24.0	1.5	1.0	20.25	$7.0x10^{-2}$
11:00	41.0	24.0	2.0	1.0	18.5	$9.3x10^{-2}$
12:00	39.0	24.0	2.0	1.0	16.0	$9.3x10^{-2}$
13:00	38.0	24.0	1.0	1.0	14.5	$4.6x10^{-2}$
14:00	36.5	24.0	1.5	1.0	12.5	$7.0x10^{-2}$
15:00	35.0	24.0	1.5	1.0	11.75	$7.0x10^{-2}$
16:00	34.0	24.0	1.0	1.0	10.5	$4.6x10^{-2}$
17:00	33.0	24.0	.1.0	1.0	9.0	$4.6x10^{-2}$
18:00	32.0	24.0	1.0	1.0	8.5	$4.6x10^{-2}$
19:00	31.5	24.0	0.5	1.0	7.75	$2.3x10^{-2}$
20:00	31.0	24.0	0.5	1.0	7.25	$2.3x10^{-2}$
21:00	30.0	24.0	1.0	1.0	6.5	$4.6x10^{-2}$

Tabla 8. Prueba realizada el 23 de junio de 1982 con una tapa de vidrio. Unidades de la ec 24.

Pruebas realizadas en el calentador con la tapa de fibra de vidrio.

El 28 de junio de 1982, con dos capas de vidrio y la tapa aislante

$T_{inicial\ del\ agua}$	48.0°C
$T_{ambiente}$	23.0°C
hora	9:30 am
$T_{final\ del\ agua}$	38.0°C
$T_{ambiente}$	23.0°C
hora	9:30 pm

El 29 de junio de 1982, con dos capas de vidrio y la tapa aislante

$T_{inicial\ del\ agua}$	50.0°C
$T_{ambiente}$	23.0°C
hora	9:00 am
$T_{final\ del\ agua}$	40.0°C
$T_{ambiente}$	23.0°C
hora	9:00 pm

El 30 de junio de 1982, con dos capas de vidrio y la tapa aislante

$T_{inicial\ del\ agua}$	46.0°C
$T_{ambiente}$	23.0°C
hora	8:00 pm
$T_{final\ del\ agua}$	36.0°C
$T_{ambiente}$	21.0°C
hora	8:00 am

El 1 de julio de 1982, con dos capas de vidrio y la tapa aislante

$T_{inicial\ del\ agua}$	54.0°C
$T_{ambiente}$	23.0°C
hora	9:00 pm
$T_{final\ del\ agua}$	42.0°C
$T_{ambiente}$	21.0°C
hora	9:00 am

El 5 de junio de 1982, con una capa de vidrio y la tapa aislante

$T_{inicial\ del\ agua}$	47.5°C
$T_{ambiente}$	23.0°C
hora	8:30 pm
$T_{final\ del\ agua}$	36.0°C
$T_{ambiente}$	22.0°C
hora	8:30 am

El 6 de junio de 1982, con una capa de vidrio y la tapa aislante

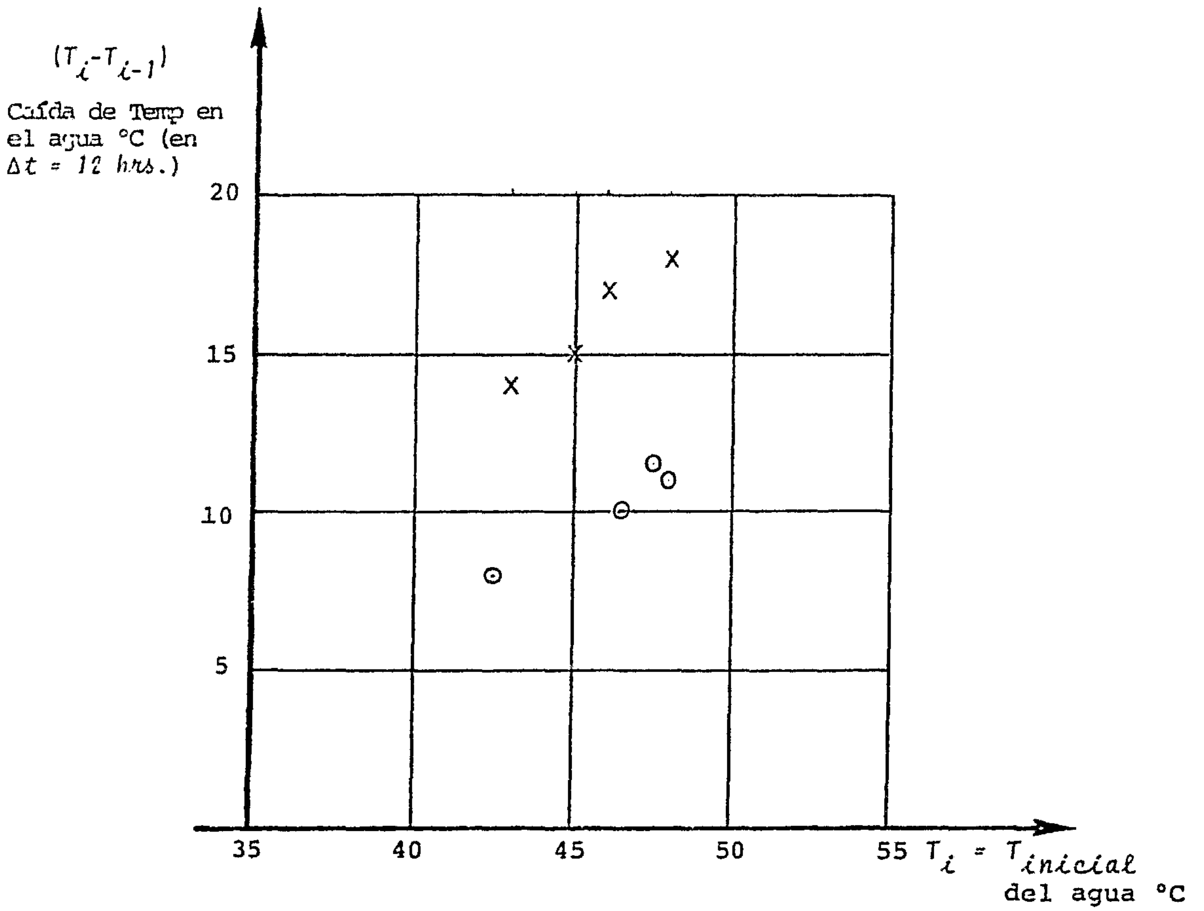
$T_{inicial\ del\ agua}$	42.5°C
$T_{ambiente}$	22.5°C
hora	11:15 am
$T_{final\ del\ agua}$	34.5°C
$T_{ambiente}$	22.0°C
hora	11:15 pm

El 7 de julio de 1982, con una capa de vidrio y la tapa aislante

$T_{inicial\ del\ agua}$	48.0°C
$T_{ambiente}$	23.0°C
hora	12:00 pm
$T_{final\ del\ agua}$	37.0°C
$T_{ambiente}$	22.0°C
hora	12:00 am

El 8 de julio de 1982, con una capa de vidrio y la tapa aislante

$T_{inicial\ del\ agua}$	47.0°C
$T_{ambiente}$	21.0°C
hora	7:45 pm
$T_{final\ del\ agua}$	36.5°C
$T_{ambiente}$	23.0°C
hora	7:45 am



SIMBOLOS O - una cubierta de vidrio con tapa
X - una cubierta de vidrio sin tapa

Fig. 16 Variación de la caída de temperatura del agua en el calentador solar después de un período de 12 hrs para varias temperaturas al inicio con tapa (O) y sin tapa (X). Una sola cubierta de vidrio.

3.3 *Correlación de resultados teóricos y experimentales*

En los ejercicios anteriores se plantean los factores de ajuste C y υ como herramientas para "ajustar" el modelo matemático a los resultados del experimento. Esta práctica es útil cuando, como en las páginas precedentes, se desea emplear el modelo como herramienta auxiliar para el diseño.

Para efectos de simulación de la operación del calentador solar bajo diversas condiciones de insolación, como suele hacerse cuando se desean conocer las áreas de captación requeridas para abastecer una demanda dada de agua caliente en un sitio geográfico en particular, conviene simplificar el modelo matemático en lo tocante al cálculo de las pérdidas térmicas. Esta simplificación, como las gráficas sugieren, puede hacerse linealizando las pérdidas térmicas totales, Q_T, con respecto a $(T_{agua} - T_{amb})$, donde la forma de la ecuación se reduce a una línea recta:

$$Q_T = J\ (T_{agua} - T_{amb})$$

En esa expresión, la pendiente J representa la conductancia térmica global del sistema de cubiertas.

Con los resultados discutidos anteriormente, las curvas que proporcionan un "mejor ajuste" pueden así aproximarse con los valores de J siguientes:

Para el caso de una sola cubierta de vidrio, sin tapa,	$J = 5.4 \times 10^{-3}$ kW/°C
Para doble cubierta, sin tapa	$J = 4.17 \times 10^{-3}$ kW/°C
Para una o dos cubiertas, con tapa aislante	$J = 3.9 \times 10^{-3}$ kW/°C

Con estos valores de J en la ecuación precedente se tienen expresiones sencillas para describir las pérdidas térmicas, con la confianza que proporciona la validación experimental. En el capítulo siguiente se hace uso de estas expresiones para "predecir" la operación del calentador bajo condiciones prescritas de insolación y temperatura ambiente.

4. COMPARACION ENTRE LOS DISEÑOS ALTERNATIVOS

4.1 General

En los capítulos precedentes se elaboraron modelos matemáticos descriptivos de las pérdidas térmicas del calentador solar. Estos modelos se apoyan tanto en las consideraciones teóricas del capítulo 2 como en los resultados de experimentos del capítulo 3.

Como se apuntó en el capítulo 2, la dificultad esencial en el modelado matemático de estos aparatos estriba en reproducir adecuadamente las pérdidas de calor. Como discuten otros autores (refs 1 y 2), el modelado de las ganancias de calor debidas a la radiación solar y el de la variación de energía interna, como aparecen en el balance térmico de la ec 1, son más sencillos. En este capítulo se recuerdan sucintamente estos principios del modelado y se comparan los diseños alternativos bajo condiciones específicas de radiación solar y del microclima.

Resolviendo la ecuación 2, que permite resolver el balance térmico por diferencias de tiempo,

$$T_i = T_{i-1} + \frac{Q_{sol} - Q_t}{M\ C_p}\ \Delta t \qquad (2)$$

donde

T_i es la temperatura del agua en el calentador solar después de un intervalo de tiempo Δt

T_{i-1} es la temperatura del agua al inicio del intervalo

Q_{sol} es la cantidad de energía solar absorbida por el calentador

Q_T es la pérdida térmica total en el intervalo Δt

M es la masa del agua en el calentador

C_p es el calor específico del agua

Δt es el intervalo de tiempo

Las unidades de estas variables son todas del sistema internacional.

4.2 *Calor recibido del sol*

El valor de Q_{sol} depende del diseño del aparato, del día del año, de la hora del día y de las características de radiación asociadas con la localidad geográfica donde se opera el aparato.

Interesa conocer la longitud del día solar, Ld, que se definió por la ec 9:

$$Ld = \frac{2}{15} \cos^{-1} ((-\tan \phi \tan 23.45 \, sen(\frac{360}{365} (284 + n))))$$

donde n es el día del año y ϕ es la latitud. Resolviendo, por ejemplo, para el 17 de junio de 1982 ($n = 168$), cuando se realizó una prueba experimental en la ciudad de México ($\phi = 19.45°$), se tiene $Ld = 13.2$ horas. Esto es, en la escala de tiempo solar verdadero, donde $t = 0$ para el mediodía solar, el instante en que ocurre la salida del sol es $t = Ld/2 = 6.6$ horas y cuando el sol se oculta corresponde a $t = -Ld/2 = -6.6$ horas.

La magnitud de la radiación solar global que recibe un plano horizontal puede aproximarse por la ec 8

$$H_T = H_{T_M} \cos^{1.2} (180 \frac{t}{Ld}) \qquad (8)$$

De la ref 3, para el mes de junio y en el lugar en cuestión, $H_{T_M} = 0.632\ kW/m^2$. Con este valor y el de Ld en 8,

$$H_T = 0.632 \cos^{1.2} \left(180 \frac{t}{13.2}\right)$$

$$= 0.632 \cos^{1.2} (13.64\ t)$$

donde t está en horas solares verdaderas.

La ecuación 3 describe la fracción de la radiación solar que absorbe el calentador como

$$Q_{sol} = (\tau\alpha)\ (H_T A_C) \qquad (3)$$

donde los valores del grupo transmitancia absortancia, en los casos de interés, así como las áreas de captación respectivas, son

	$(\tau\alpha)$	A_c, m^2
Una cubierta	0.87	0.5376
Dos cubiertas	0.80	0.5943

La ecuación 3 puede, así, escribirse para cada caso en estudio, para la fecha y localidad citadas, como

$$Q_{sol} = 0.87 \times 0.5376 \times 0.632 \cos^{1.2} (13.64\ t)$$

$$= 0.2953 \cos^{1.2} (13.64\ t) \qquad (3')$$

para una cubierta transparente, y como

$$Q_{sol} = 0.80 \times 0.5943 \times 0.632 \cos^{1.2} (13.64\ t)$$

$$= 0.3005 \cos^{1.2} (13.64\ t) \qquad (3'')$$

para dos cubiertas. Nótese que el aumento del área de captación casi compensa la disminución de ($\tau\alpha$) en 3" y que, por lo tanto, las diferencias en los comportamientos de ambas versiones del aparato serán casi exclusivamente debidas a la variación en las pérdidas térmicas. Las ecuaciones 3' y 3", como se observa, en un día y una localidad fijas, son exclusivamente función del tiempo. La validez de esta aproximación fue comprobada previamente (ref 1).

4.3 *Calor perdido al ambiente*

Los resultados del capítulo precedente permiten describir las pérdidas de calor de los aparatos estudiados (con o sin tapa) con las expresiones simplificadas

$$Q_T = J\ (\bar{T} - T_{amb})$$

con los valores de

$$J = 5.4 \times 10^{-3} \ kW/°C \qquad \text{(una cubierta)}$$

$$J = 4.17 \times 10^{-3} \ kW/°C \qquad \text{(dos cubiertas)}$$

$$J = 3.9 \times 10^{-3} \ kW/°C \qquad \text{(con tapa)}$$

donde $\bar{T}$, o T_{agua}, es la temperatura media del agua del calentador en el periodo estudiado. La solución de Q_T es posible, entonces, mediante un proceso iterativo que permita evaluar T_i, suponiendo valores de esta temperatura para determinar $\bar{T} = (T_i + T_{i-1})/2$ y de aquí calcular un valor de Q_T que a su vez corrija la suposición de T_i. Este procedimiento implica el conocimiento de T_{amb}, que a su vez depende del tiempo.

La inspección de valores medidos de T_{amb} revela que ésta tiene un valor mínimo por ahí de una hora antes del alba y máximo dos o tres horas después del mediodía solar. La forma de la variación de T_{amb} sugiere una senoide de periodo $-\pi/2$ a $\pi/2$ entre el valor mínimo y el máximo, que coincide con las horas de mayor radiación solar, y un decrecimiento de la misma forma pero en el periodo $\pi/2$ a $-\pi/2$ para el lapso complementario a las 24 horas. Si se adopta la nomenclatura siguiente

T_M = temperatura ambiente máxima, °C

T_m = temperatura ambiente mínima, °C

t_M = instante en que ocurre T_M, horas

t_m = instante en que ocurre T_m, horas

$t_s = t_M - t_m$

$t_c = 24 - t_s$

$A = (T_M - T_m)/2$

$B = (T_M + T_m)/2$

y si el instante de interés, en horas solares verdaderas, t, se representa por la variable θ tal que

$$\theta = t - t_m \qquad \text{si} \qquad t_m \leq t \leq t_M$$

$$\theta = t - t_M \qquad \text{si} \qquad t_M \leq t \leq 24$$

$$\theta = t + (24 - t_m) \qquad \text{si} \qquad 0 \leq t \leq t_m$$

entonces

$$T_{amb} = A \operatorname{sen} (3/2 + \theta/t_s)\ 180 + B$$

cuando $t_m \leq t \leq t_M$ y

$$T_{amb} = A \cos (180\ \theta/t_c) + B$$

para cualquier otro instante.

Para el ejemplo del día en cuestión se midieron las siguientes temperaturas del ambiente:

$$T_M = 30°C \quad \text{cuando} \quad t_M = -3.0 \; horas$$

y $$T_m = 8.5°C \quad \text{cuando} \quad t_m = 5.0 \; horas$$

Con estos resultados se ilustrará el método para calcular T_{amb} más adelante. Cabe aquí destacar que las experiencias anteriores para $T_{amb}(t)$ permiten determinar valores de Q_T que indirectamente, son función del tiempo.

4.4 Generación de valores teóricos

Puede observarse que las expresiones apuntadas en los dos incisos anteriores permiten conocer los flujos de calor (solar y perdido) como función del tiempo, como parece ser más conveniente para resolver el balance térmico por diferencias finitas en el tiempo. En cada caso, se han elaborado expresiones para $Q_{sol}(t)$ y $Q_T(T,t)$ para el día 17 de junio. Con éstas se elaboran soluciones para $T_{agua}(t)$, en un ciclo de 24 horas, como se muestra en las siguientes tablas.

Estas tablas corresponden a valores extremos de T_{amb} medidos el día en cuestión. Para facilitar la presentación de los resultados se consideró que el calentador operaba de las 7 am

(t = 7) a las 7 pm (t = -7). Después de las 7 pm, en su caso, se colocaba la tapa. Los resultados de las cuatro combinaciones (1 ó 2 vidrios, con o sin tapa) se grafican juntos en la fig 17.

Las cinco gráficas de la fig 17 ilustran:

1. Temperatura del ambiente
2. Temperatura del agua. 1 cubierta, no se usa tapa
3. Temperatura del agua. 1 cubierta, se pone la tapa a las 19:00 horas
4. Temperatura del agua. 2 cubiertas, sin tapa
5. Temperatura del agua. 2 cubiertas, se pone la tapa a las 19:00 horas

Puede observarse que el empleo de la tapa sobre el calentador de 1 vidrio resulta en temperaturas del agua de 4 a 5°C superiores, al final del ciclo de calentamiento, a cuando no se usa esa tapa. También debe anotarse que, de las 20:00 horas en adelante, el calentador con tapa, ya sea de uno o dos vidrios, y el de dos vidrios sin tapa, acusan temperaturas apenas 1 a 2°C superiores a las del calentador solar de 1 vidrio con tapa.

En cuanto al ciclo de calentamiento, se observa que el calentador de doble cubierta se comporta de manera ligeramente superior (T_{agua} es 2 a 3°C superior después de las 12:00 horas) al calentador de una sola cubierta.

Obsérvese asimismo que la forma de las curvas 2-5 es muy similar a la de la temperatura ambiente.

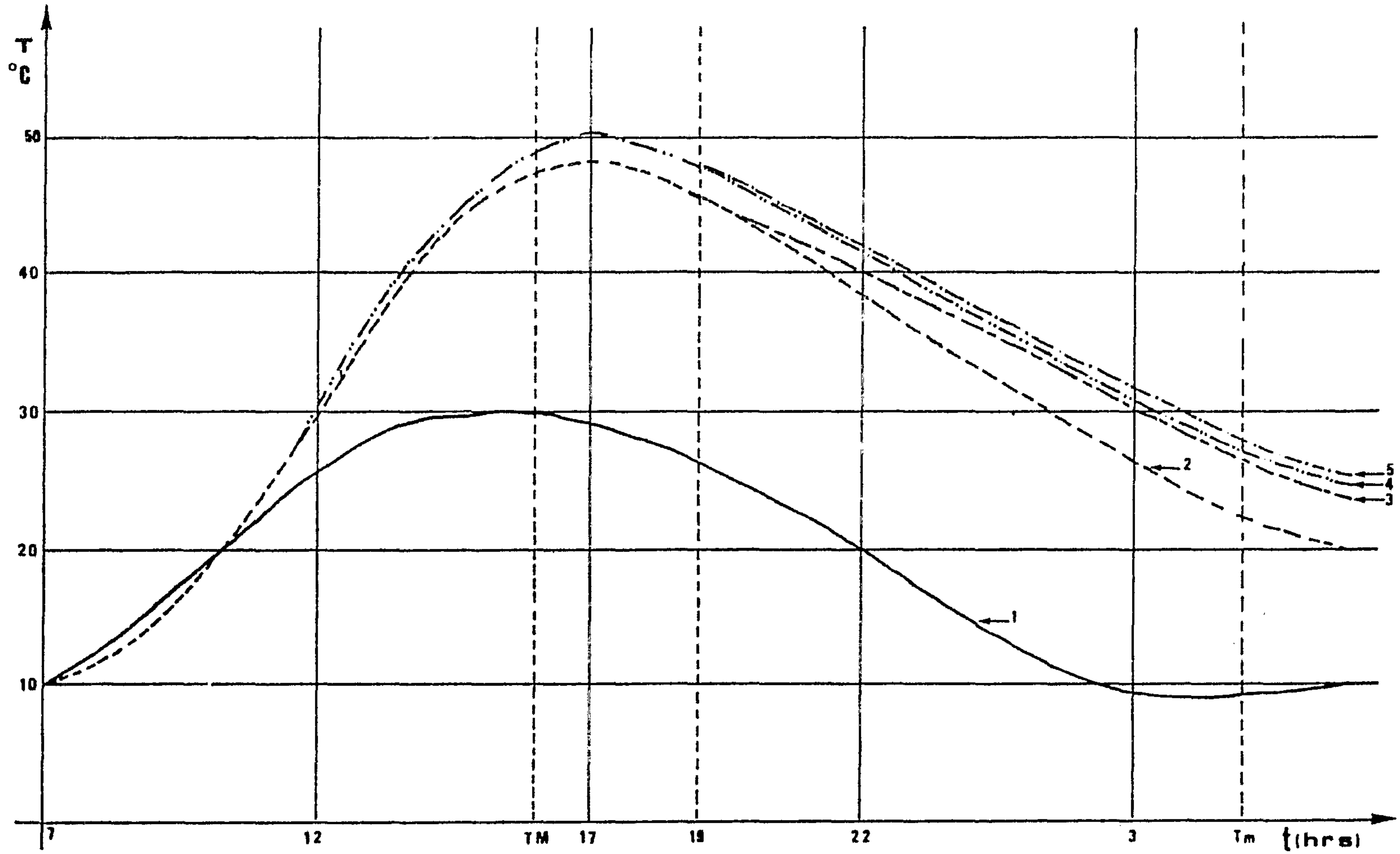


Fig. 17 Variación de las temperaturas a lo largo del tiempo. Las curvas son: 1. Ambiente; 2. Agua con una cubierta, sin tapa; 3. Idem. una cubierta, con tapa desde las 19:00 hrs.; 4. Idem dos cubiertas, sin tapa; 5. Idem. dos cubiertas y tapa.

Tabla 9. Simulación del calentador con 1 vidrio, sin tapa

HORA	T_{amb}	Q_{sol}	$Q_{pérdida}$	T_{agua}
7:0	10.0	1.59×10^{-2}	0	10.00
8:0	12.0	6.70×10^{-2}	0	11.44
9:0	15.5	1.31×10^{-1}	0	14.26
10:0	19.0	1.94×10^{-1}	0	18.44
11:0	22.5	2.48×10^{-1}	0	23.78
12:0	25.75	2.83×10^{-1}	0	29.88
13:0	27.75	2.96×10^{-1}	1.15×10^{-2}	36.00
14:0	29.25	2.83×10^{-1}	3.65×10^{-2}	41.31
15:0	30.0	2.48×10^{-1}	6.11×10^{-2}	45.34
16:0	30.0	1.94×10^{-1}	8.28×10^{-2}	47.73
17:0	29.0	1.31×10^{-1}	1.01×10^{-1}	48.37
18:0	27.75	6.70×10^{-2}	1.11×10^{-1}	47.42
19:0	26.25	1.59×10^{-2}	1.14×10^{-1}	45.30
20:0	24.25	0	1.14×10^{-1}	42.85
21:0	22.50	0	1.10×10^{-1}	40.49
22:0	20.25	0	1.10×10^{-1}	38.13
23:0	17.75	0	1.10×10^{-1}	35.76
24:0	15.25	0	1.10×10^{-1}	33.34
1:0	12.0	0	1.15×10^{-1}	30.89
2:0	10.50	0	1.10×10^{-1}	28.52
3:0	9.50	0	1.03×10^{-1}	26.31
4:0	9.0	0	9.35×10^{-2}	24.30
5:0	8.5	0	8.53×10^{-2}	22.46
6:0	9.0	0	7.27×10^{-2}	20.89
7:0	10.0	0	5.88×10^{-2}	19.97

Tabla 10. Simulación del calentador con 2 vidrios, sin tapa

HORA	T_{amb}	Q_{sol}	$Q_{pérdida}$	T_{agua}
7:0	10.0	1.613×10^{-2}	0	10.00
8:0	12.0	6.808×10^{-2}	0	11.47
9:0	15.5	1.326×10^{-1}	0	14.32
10:0	19.0	1.974×10^{-1}	0	18.57
11:0	22.5	2.518×10^{-1}	0	23.97
12:0	25.75	2.879×10^{-1}	0	30.20
13:0	27.75	3.005×10^{-1}	1.019×10^{-2}	36.45
14:0	29.25	2.879×10^{-1}	3.000×10^{-2}	42.00
15:0	30.0	2.518×10^{-1}	5.000×10^{-2}	46.35
16:0	30.0	1.974×10^{-1}	6.811×10^{-2}	49.13
17:0	29.0	1.327×10^{-1}	8.388×10^{-2}	50.18
18:0	27.75	6.808×10^{-2}	9.345×10^{-2}	49.63
19:0	26.25	1.613×10^{-2}	9.744×10^{-2}	47.88
20:0	24.25	0	9.848×10^{-2}	45.76
21:0	22.50	0	9.694×10^{-2}	43.68
22:0	20.25	0	9.761×10^{-2}	41.57
23:0	17.75	0	9.927×10^{-2}	39.44
24:0	15.25	0	1.007×10^{-1}	37.27
1:0	12.0	0	1.053×10^{-1}	34.99
2:0	10.50	0	1.021×10^{-1}	32.80
3:0	9.50	0	9.709×10^{-2}	30.71
4:0	9.0	0	9.046×10^{-2}	28.76
5:0	8.50	0	8.443×10^{-2}	26.94
6:0	9.0	0	7.477×10^{-2}	25.33
7:0	10.0	1.613×10^{-2}	6.389×10^{-2}	24.30

Tabla 11. Simulación del calentador con 1 vidrio; la tapa se coloca después de las 19:00 horas

HORA	T_{amb}	Q_{sol}	$Q_{pérdida}$	T_{agua}
7:0	10.0	1.59×10^{-2}	0	10.00
8:0	12.0	6.70×10^{-2}	0	11.44
9:0	15.5	1.31×10^{-1}	0	14.26
10:0	19.0	1.94×10^{-1}	0	18.44
11:0	22.5	2.48×10^{-1}	0	23.78
12:0	25.75	2.83×10^{-1}	0	29.88
13:0	27.75	2.96×10^{-1}	1.15×10^{-2}	36.00
14:0	29.25	2.83×10^{-1}	3.65×10^{-2}	41.31
15:0	30.0	2.48×10^{-1}	6.11×10^{-2}	45.34
16:0	30.0	1.94×10^{-1}	8.28×10^{-2}	47.73
17:0	29.0	1.31×10^{-1}	1.01×10^{-1}	48.37
18:0	27.75	6.70×10^{-2}	1.11×10^{-1}	47.42
19:0	26.25	1.59×10^{-2}	1.14×10^{-1}	45.30
20:0	24.25	0	8.21×10^{-2}	43.53
21:0	22.50	0	8.20×10^{-2}	41.76
22:0	20.25	0	8.40×10^{-2}	39.96
23:0	17.75	0	8.66×10^{-2}	38.09
24:0	15.25	0	8.90×10^{-2}	36.18
1:0	12.0	0	9.43×10^{-2}	34.14
2:0	10.50	0	9.22×10^{-2}	32.16
3:0	9.50	0	8.84×10^{-2}	30.26
4:0	9.0	0	8.29×10^{-2}	28.47
5:0	8.5	0	7.75×10^{-2}	26.80
6:0	9.0	0	6.94×10^{-2}	25.31
7:0	10.0	1.59×10^{-2}	8.26×10^{-2}	23.87

Tabla 12. Simulación del calentador solar con 2 vidrios; la tapa se coloca a las 19:00 horas

HORA	T_{amb}	Q_{sol}	$Q_{pérdida}$	T_{agua}
7:0	10.0	1.613×10^{-2}	0	10.00
8:0	12.0	6.808×10^{-2}	0	11.47
9:0	15.5	1.327×10^{-2}	0	14.32
10:0	19.0	1.974×10^{-1}	0	18.57
11:0	22.50	2.518×10^{-1}	0	23.99
12:0	25.75	2.879×10^{-1}	0	30.20
13:0	27.75	3.005×10^{-1}	1.019×10^{-2}	36.45
14:0	29.25	2.879×10^{-1}	3.000×10^{-2}	42.00
15:0	30.0	2.518×10^{-1}	5.000×10^{-2}	46.35
16:0	30.0	1.974×10^{-1}	6.811×10^{-2}	49.13
17:0	29.0	1.327×10^{-1}	8.388×10^{-2}	50.18
18:0	27.75	6.808×10^{-2}	9.345×10^{-2}	49.63
19:0	26.25	1.613×10^{-2}	9.744×10^{-2}	47.88
20:0	24.25	0	9.216×10^{-2}	45.90
21:0	22.50	0	9.124×10^{-2}	43.93
22:0	20.25	0	9.236×10^{-2}	41.94
23:0	17.75	0	9.435×10^{-2}	39.91
24:0	15.25	0	9.618×10^{-2}	37.84
1:0	12.0	0	1.007×10^{-1}	35.67
2:0	10.50	0	9.816×10^{-2}	33.56
3:0	9.50	0	9.381×10^{-2}	31.54
4:0	9.0	0	8.789×10^{-2}	29.64
5:0	8.50	0	8.246×10^{-2}	27.87
6:0	9.0	0	7.358×10^{-2}	26.28
7:0	10.0	1.613×10^{-2}	6.784×10^{-2}	25.17

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se han explorado, teórica y experimentalmente, dos formas de mejorar el comportamiento de un calentador solar compacto (captador y tanque forman una sola unidad): colocando doble cubierta de vidrio y/o usando una tapa aislada térmicamente sobre el vidrio para inhibir las pérdidas de calor después del ciclo de calentamiento. Las principales conclusiones se anotan en seguida.

5.1 *Conclusiones*

i) La máxima reducción en las pérdidas de calor ocurre cuando se emplean dos vidrios y la tapa aislada después del ciclo de calentamiento

ii) Las diferencias en temperatura del agua cuando se usa una sola cubierta y tapa, o dos cubiertas con o sin tapa, son de 1 a 3°C, poco significativas

iii) Sólo en el caso en que se tiene una sola cubierta y no se usa tapa, pareciera que las pérdidas por la cubierta son dominantes. En los otros tres casos (curvas 3 a 5), la escasa disminución en las pérdidas de calor sugiere que éstas ocurren igualmente por la cubierta superior y por el resto del área del calentador

iv) En todos los casos, las caídas de temperatura en la noche son muy importantes (de las 17:00 horas a las 3:00 am del día siguiente son del orden de 20°C o más), representando al menos un 50% del total del calor ganado durante el día.

Con base en estas conclusiones pueden apuntarse algunas recomendaciones.

5.2 *Recomendaciones*

i) Cuando se desee usar el agua caliente durante la tarde, de las 13:00 horas a las 19:00 horas, debe adoptarse la solución más económica, que resulta ser el calentador solar original de una cubierta, operado sin tapa. En este periodo, el uso de la tapa representa una ganancia total de 2 a 4°C en la temperatura final del agua

ii) Cuando se desee usar el agua caliente después de las primeras horas de la noche, o bien en las primeras horas de la mañana siguiente, debe usarse no sólo una tapa con mejor aislamiento que la estudiada sino un mejor aislamiento en todo el calentador. Los resultados de la fig 17 sugieren que ese aislamiento debe reducir las pérdidas a un 25% o menos de las implícitas en las curvas 3-5. Algunos cálculos indican que ese aislamiento, a todo el derredor y en la tapa y base del aparato, debe ser del orden de 10 cm (vs 2.5 cm del usado en el estudio presente), lo cual no se ha verificado experimentalmente en este trabajo

iii) Aunque en este estudio no se determinó una forma simple de modificar el calentador solar compacto para extender su utilidad hasta el día siguiente, los resultados son alentadores para mejorar el diseño básico, tal vez aumentando la resistencia térmica global del aparato sin tapa, y se sugiere proseguir el estudio en esa dirección.

APENDICE FOTOGRAFICO

En las siguientes siete figuras se ilustran vistas generales y detalles del calentador solar estudiado mediante fotografías.

Fig 18 Vista del conjunto de charolas sin vidrios

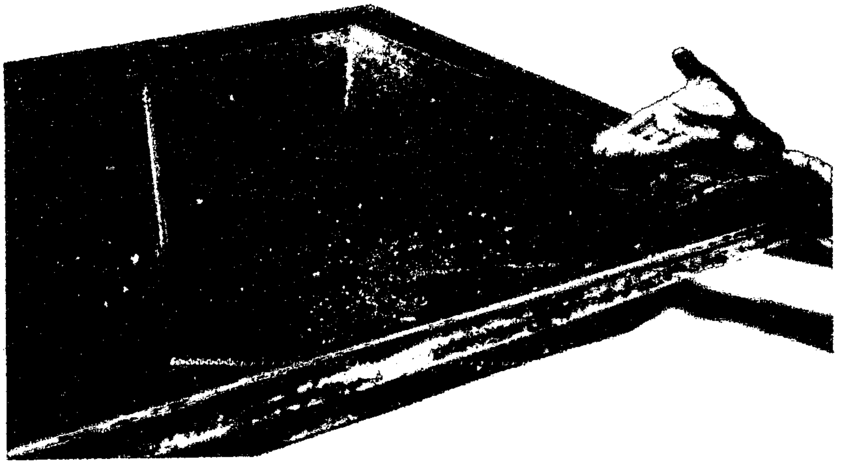


Fig 19 Como la fig 18 durante la colocación del primer vidrio.

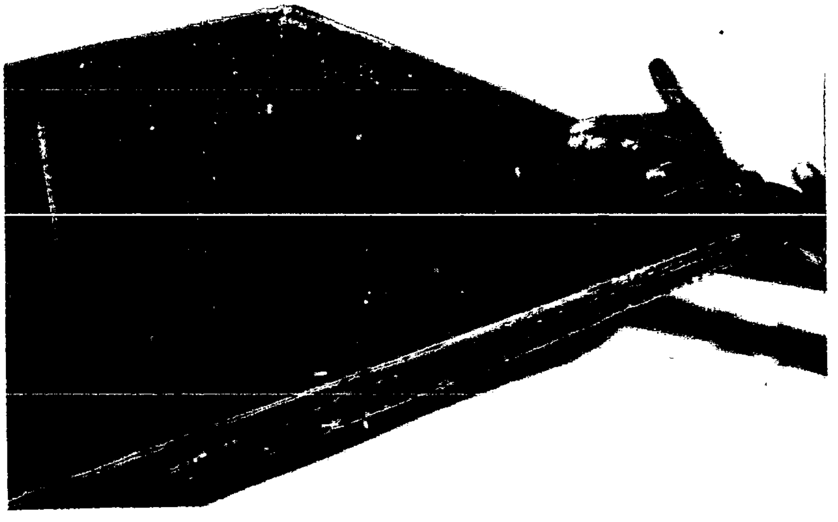


Fig 20 Ahora se muestra la colocación del segundo vidrio en las charolas.

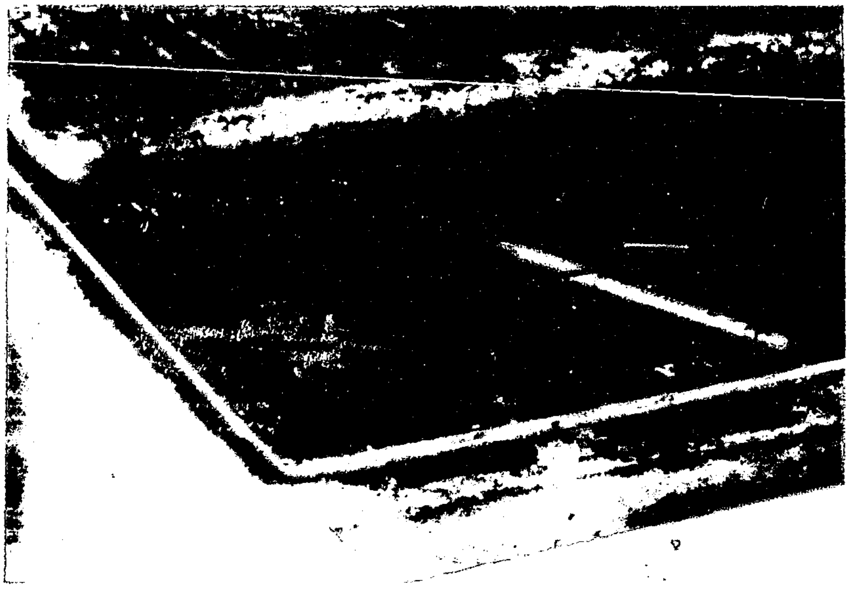


Fig 21 Detalle del conjunto, armado con la tapa superior, parcialmente explotado.

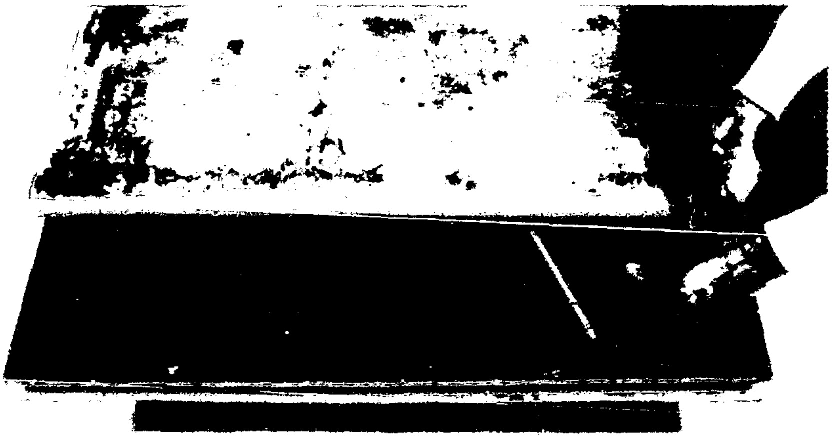


Fig 22 Otro detalle del conjunto armado

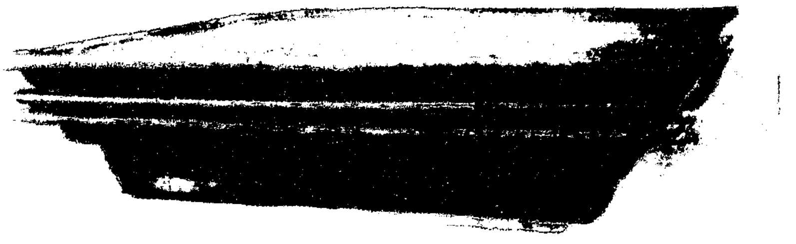


Fig 23 Vista general del conjunto armado,
con tapa.

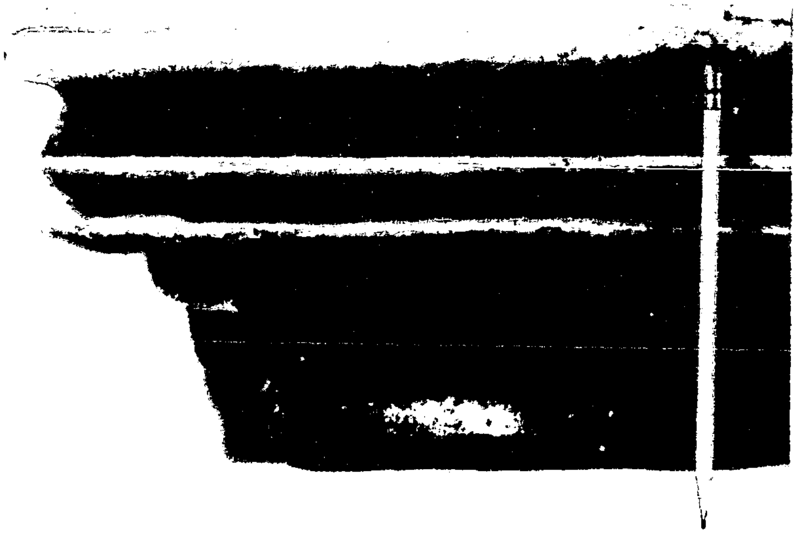


Fig 24 Detalle del conjunto armado con tapa

REFERENCIAS

1. Fernández, J.L., "Captadores solares planos para calentar agua - estudio comparativo", Memoria del 3er. Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, p 143, Oactepec, Mor., sept 1977, México

2. Duffie, J.A. y Beckman, W.A., "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Sons, Nueva York, 2a Edición, 762 pp, 1980, EUA

3. Fernández, J.L y Estrada-Cajigal, V., "Predicción de la radiación solar instantánea en la República Mexicana", Informe de las series del Instituto de Ingeniería, UNAM, 43 pp, enero 1983 (en prensa), México

4. San Román, O. y Fernández, J.L., "Natural convection modeling for the experimental determination of radiative emissivity", IASTED-AMS '82, Memorias, pp 143-146, junio 29 a julio 2 de 1982, (en prensa), Paris, Francia.