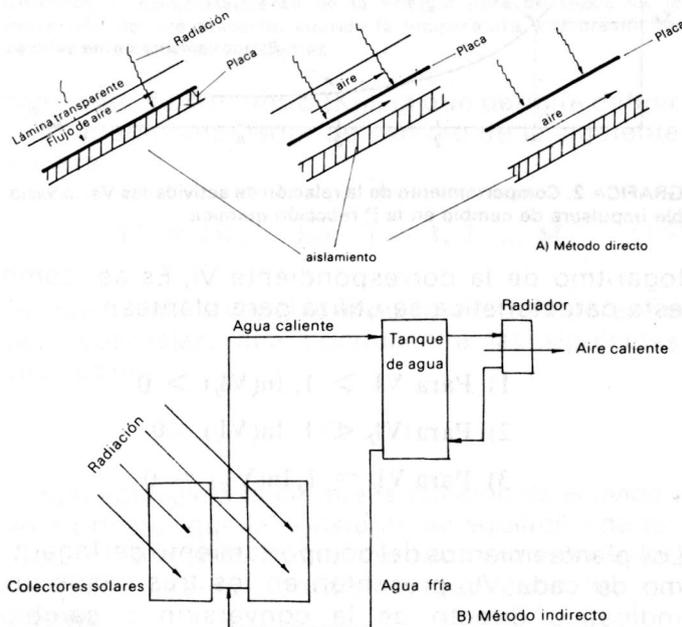


# Procedimiento para el Diseño de un Sistema de Calentamiento Solar-mixto de Aire que Utiliza Agua como Fluido de Trabajo

En este artículo se describe un sistema solar-mixto de calefacción de aire que incorpora colectores planos calentadores del agua, un tanque acumulador de calor y un dispositivo para el intercambio de calor agua-aire. Se presentan los ensayos que determinaron la disposición óptima del equipo para el intercambio de calor con flujo de agua por termosifón y el comportamiento térmico para diferentes flujos de aire, así como los ensayos para conocer el comportamiento del sistema de calentamiento solar de agua. Finalmente, el diseño se efectúa mediante un programa de computador adaptado para tal fin.

**LUIS FRANCISCO BOADA E.**  
Ingeniero Químico  
Instructor Asociado de Termodinámica  
Coordinador del Laboratorio de Termodinámica  
Departamento de Ingeniería Química,  
Universidad Nacional.  
**CARLOS ALFONSO RODRIGUEZ A.**  
**LUZ MARINA SALAZAR L.**



**FIGURA 1. Calentamiento directo e indirecto del aire.**

El calentamiento solar de aire puede llevarse a cabo de dos formas: calentamiento directo utilizando colectores para aire y calentamiento indirecto utilizando un fluido de trabajo que reciba energía y posteriormente la ceda al aire en algún tipo de intercambiador especial (Figura 1). Se escogió el segundo método por las siguientes razones: si se utiliza el aire como fluido de captación (calentamiento directo) y no un líquido como el agua (calentamiento indirecto), será necesario primero, un régimen de flujo volumétrico mucho mayor, puesto que la capacidad calorífica de  $1.0 \text{ m}^3$  de aire es aproximadamente  $0,36 \text{ wh}/^\circ\text{C}$ , mientras que el de  $1,0 \text{ m}^3$  de agua es  $1160,0 \text{ wh}/^\circ\text{C}$ ; segundo, el coeficiente de transferencia de calor desde una superficie hacia el aire es muy inferior que a un líquido, por lo tanto, el colector para aire tendrá que incorporar un área de transferencia de calor grande; tercero, el consumo de potencia y tamaño de los equipos para transportar la misma masa de fluido es mucho menor para el agua; cuarto, los sistemas de calentamiento de agua ofrecen mayor flexibilidad en el diseño y en el funcionamiento. La selección del fluido de trabajo demanda un cuidadoso análisis de comportamiento térmico,

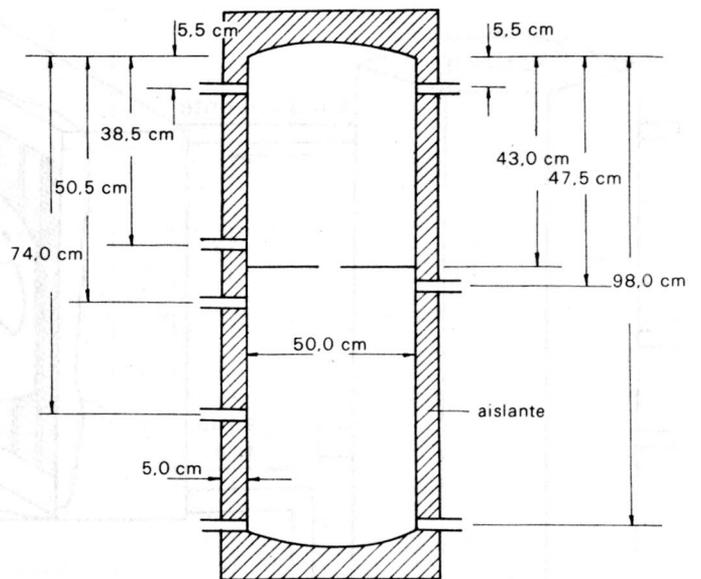
condiciones de operación y parámetros económicos, conjuntamente con el medio de almacenamiento de energía.

Por comodidad, sencillez y economía se utilizó un dispositivo de almacenamiento de calor sensible en agua; por su alta conductividad térmica, alta capacidad calórica, bajo costo, fácil consecución, el agua utilizada como medio de almacenamiento puede ser la misma que circula a través de los colectores y a su vez utilizarse para transferir el calor al aire actuando así como fluido de trabajo.

**CALENTAMIENTO DE AIRE**

La transferencia de calor en la mayoría de los equipos industriales se realiza a través de superficies metálicas. Siendo el objetivo lograr esta transferencia de calor, se optó por escoger un radiador de tipo comercial (utilizado para el enfriamiento de agua en los motores de combustión interna), puesto que la calidad y eficiencia en la transferencia de calor agua-aire de estos equipos compactos de tubos con aletas, se ha confirmado experimentalmente.

Para reducir los costos, tanto de equipo como de funcionamiento, es preferible que la circulación del agua a través del intercambiador de calor y del sistema de almacenamiento se dé por termosifón, evitando el empleo de una bomba.



**FIGURA 3. Tanque de almacenamiento de agua caliente.**

La conformación del sistema tanque de almacenamiento-radiador que proporciona los mejores resultados en la transferencia de calor agua-aire y en el flujo de agua por termosifón, se estableció con base en una serie de ensayos en los cuales se varió la posición del radiador y los puntos de entrada y salida del agua del tanque de almacenamiento.

Las disposiciones ensayadas se representan esquemáticamente en la Figura 2.

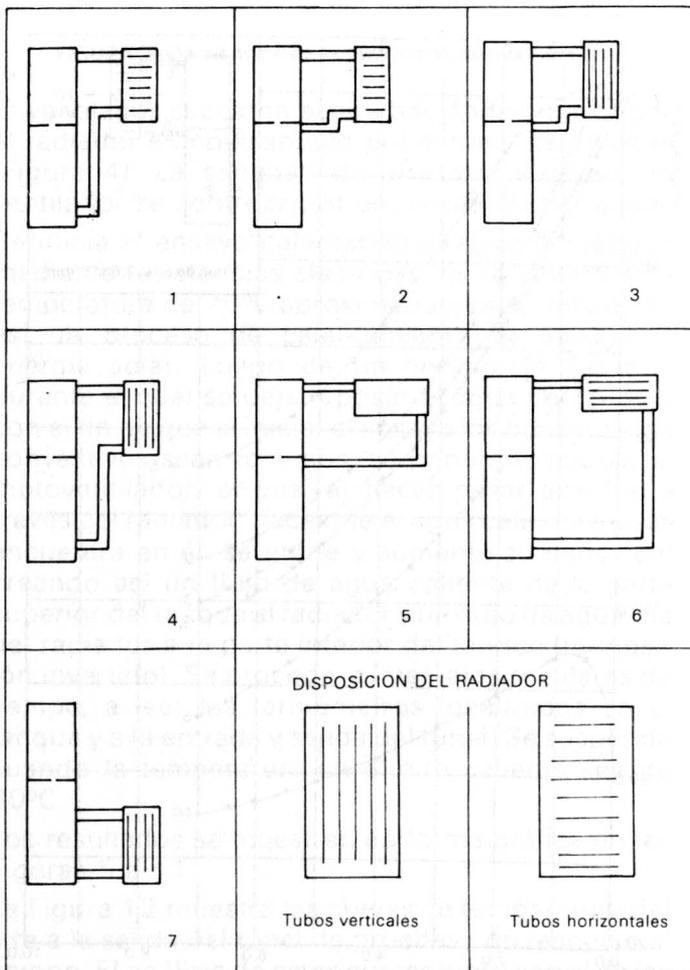
**Aparatos y técnica experimental**

El sistema ensayado consta básicamente de: un tanque de almacenamiento de agua, un radiador, un motoventilador, una fuente de corriente continua, un túnel de pruebas, un anemómetro de rueda alada, mangueras de 2,5 cm. de diámetro para conducir el agua del tanque de almacenamiento al radiador y de éste al tanque, termómetros de inmersión y ambientales, además de los accesorios necesarios para realizar los acoples.

El tanque de almacenamiento está construido en lámina de acero de 3 mm. de espesor; tiene forma cilíndrica, diámetro de 0,5 m, altura de 1,0 m, capacidad de 200 lt. y se encuentra aislado térmicamente con 2,5 cm. de PU. Además cuenta con una lámina divisora interna, con un orificio circular centrado de 5,0 cm. de diámetro. Esta lámina se colocó con el objeto de mantener una zona de temperatura alta y constante en la parte superior del tanque; al aislar esta zona de los movimientos convectivos que se puedan presentar en la zona inferior, donde por densidad mayor se acomoda el agua fría. (Figura 3).

El radiador utilizado es del tipo de tubo y aletas, es el que actualmente utilizan los vehículos Renault 6.

El motoventilador utilizado es del tipo centrífugo, comercialmente es el que acompaña al radiador en los vehículos Renault 6; trabaja con 12 V (corriente continua), y puede accionarse con un termocontrol o independientemente de él.



**FIGURA 2. Disposiciones estudiadas del sistema tanque-radiador.**

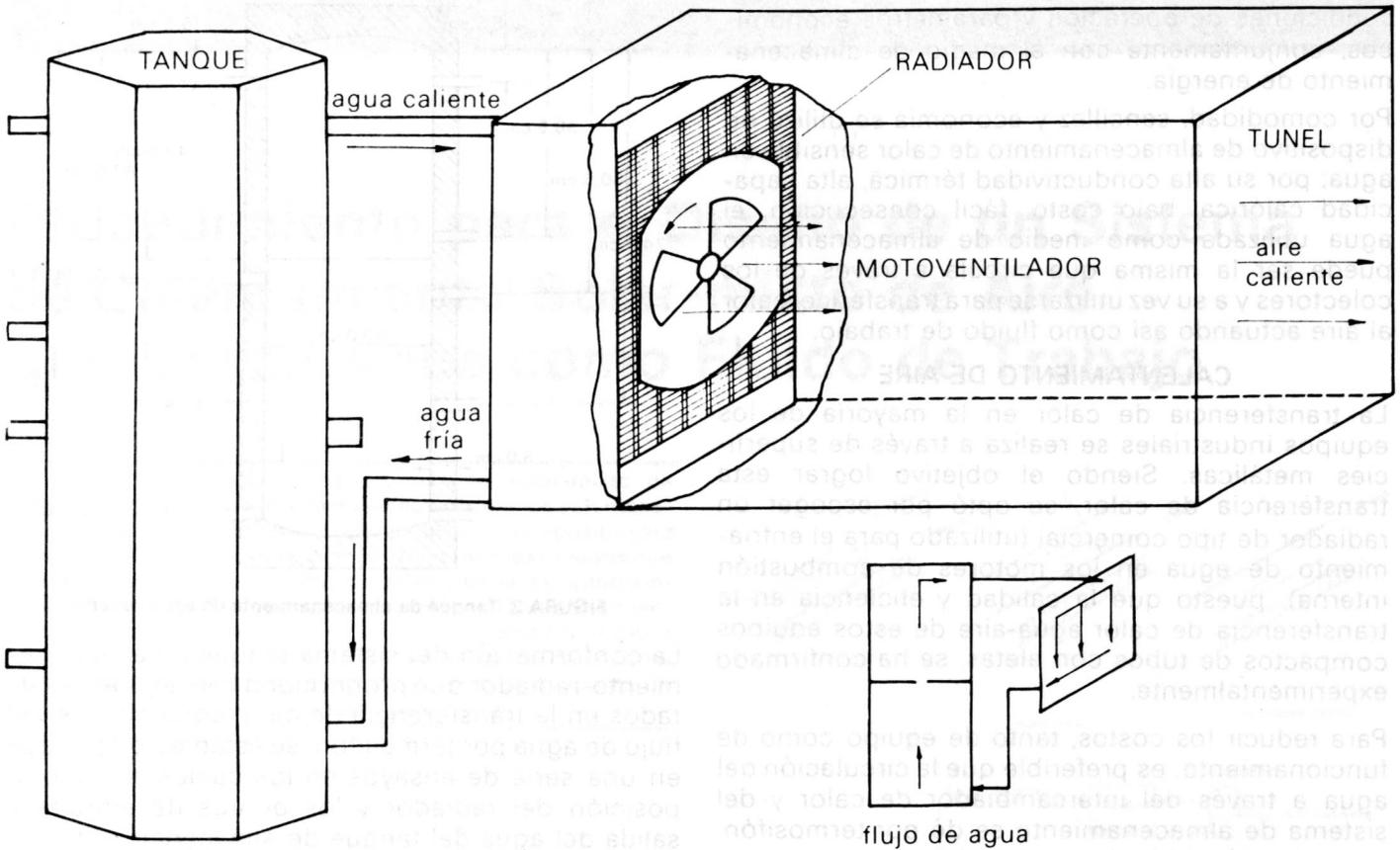


FIGURA 4. Túnel de pruebas de flujo y calentamiento de aire.

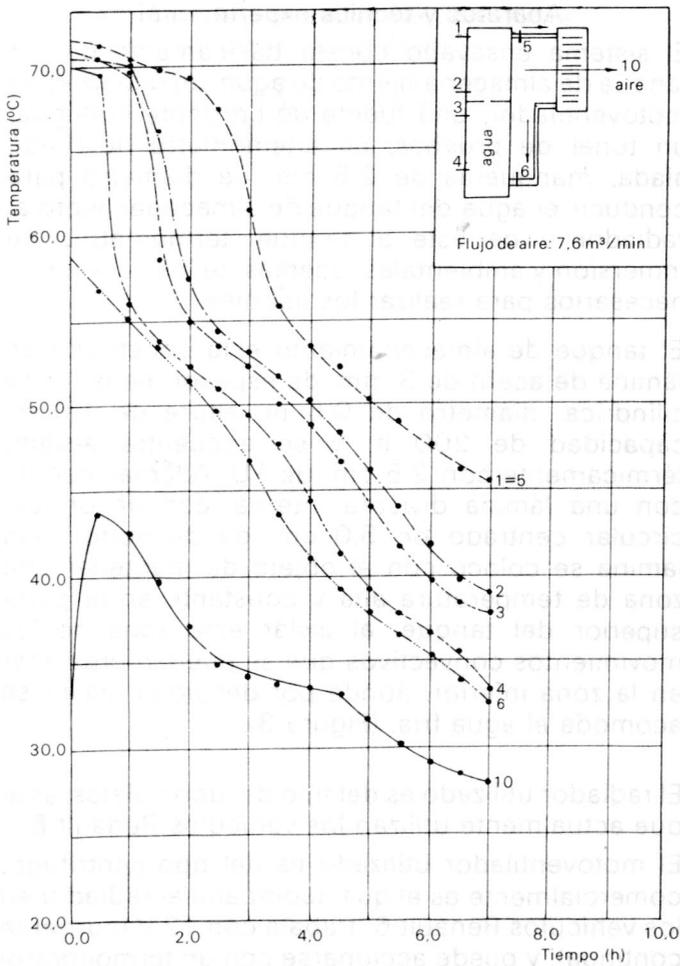


FIGURA 5. Distribución de temperaturas, disposición 1.

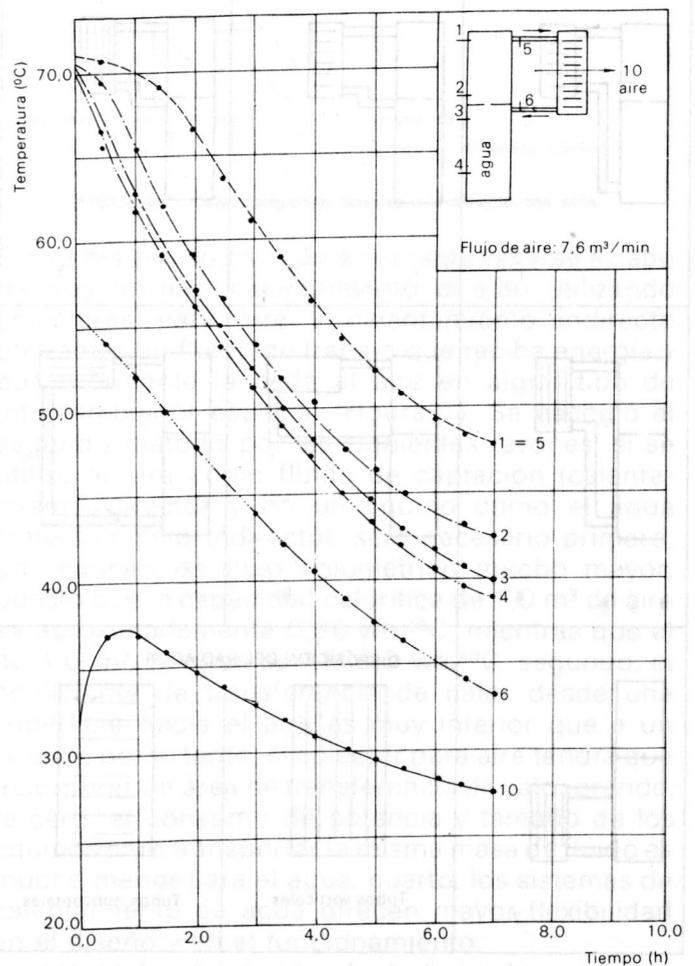


FIGURA 6. Distribución de temperaturas, disposición 2.

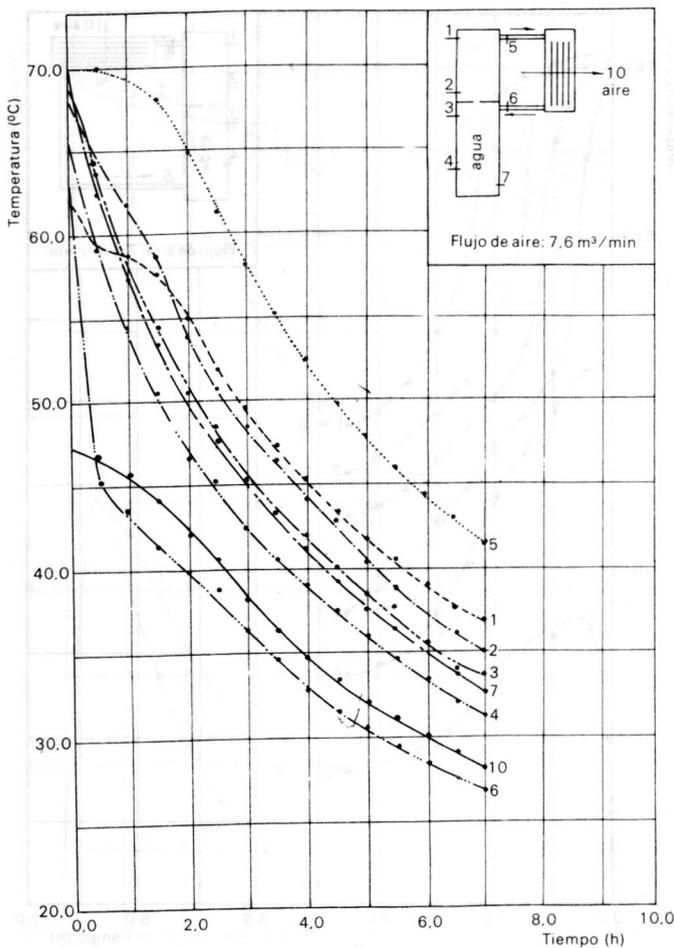


FIGURA 7. Distribución de temperaturas, disposición 3.

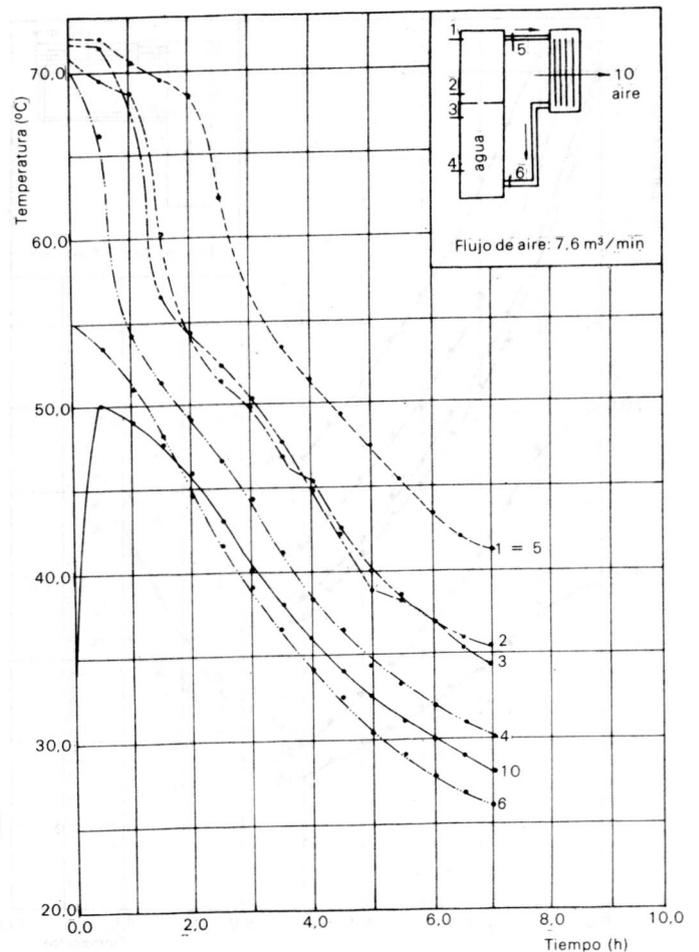


FIGURA 8. Distribución de temperaturas, disposición 4.

El ventilador succiona el aire haciéndolo pasar por el radiador e impulsándolo por el túnel de pruebas (Figura 4). La cantidad de aire que succiona el ventilador se controla con un regulador de voltaje.

Se inicia el ensayo calentando el agua del tanque mediante resistencias eléctricas hasta obtener una temperatura de 70°C aproximadamente, simulando así un proceso de calentamiento de agua con energía solar. Luego de un tiempo de 10 min. durante el cual se deja reposar el agua del tanque, con el fin de que al iniciar el ensayo los movimientos convectivos sean mínimos, se pone a funcionar el motoventilador, el cual al hacer pasar aire frío a través del radiador, hace que el agua caliente que se encuentra en él, se enfríe y aumente su densidad, creando así un flujo de agua caliente de la parte superior del tanque al radiador y un flujo de agua fría del radiador a la parte inferior del tanque (termosifón invertido). Se procede, a intervalos regulares de tiempo, a leer los termómetros localizados en el tanque y a la entrada y salida del túnel. Se suspende cuando la temperatura en el aire caliente sea de 30°C.

Los resultados se muestran en forma gráfica en las Figuras 5 a 11.

La Figura 12 muestra las curvas de temperatura del aire a la salida del túnel de pruebas con respecto al tiempo. El análisis de estas curvas junto con el de las Figuras 5 a 11, proporciona el criterio para selec-

cionar la disposición óptima. En estas figuras, la disposición que presenta la temperatura más alta del aire a la salida del túnel de pruebas y aparte de eso durante la mayor cantidad de tiempo es la disposición 4, la cual se ve también favorecida porque la entrada del agua fría al tanque está en la parte inferior y la disposición de los tubos del radiador es vertical, contribuyendo ésto a que el grado de estratificación en el tanque y la cabeza del termosifón sean mayores.

#### Disposición óptima tanque de almacenamiento-radiador

Debido a que la disposición 4 fue la óptima, es necesario ampliar más el conocimiento de su comportamiento térmico con el fin de determinar qué flujos de calor están involucrados en el proceso, qué estados de estratificación térmica en el tanque se presentan para cada uno de estos flujos y qué temperaturas del aire se logran. Estos resultados darán la pauta para determinar qué área óptima de colectores será necesaria para suplir ese calor, que en sí constituye la base del diseño del calentador solar.

Los resultados se muestran en las Figuras 13 a 17.. En la Figura 18 se muestran las curvas de temperatura del aire caliente vs. tiempo para cada uno de los flujos estudiados.

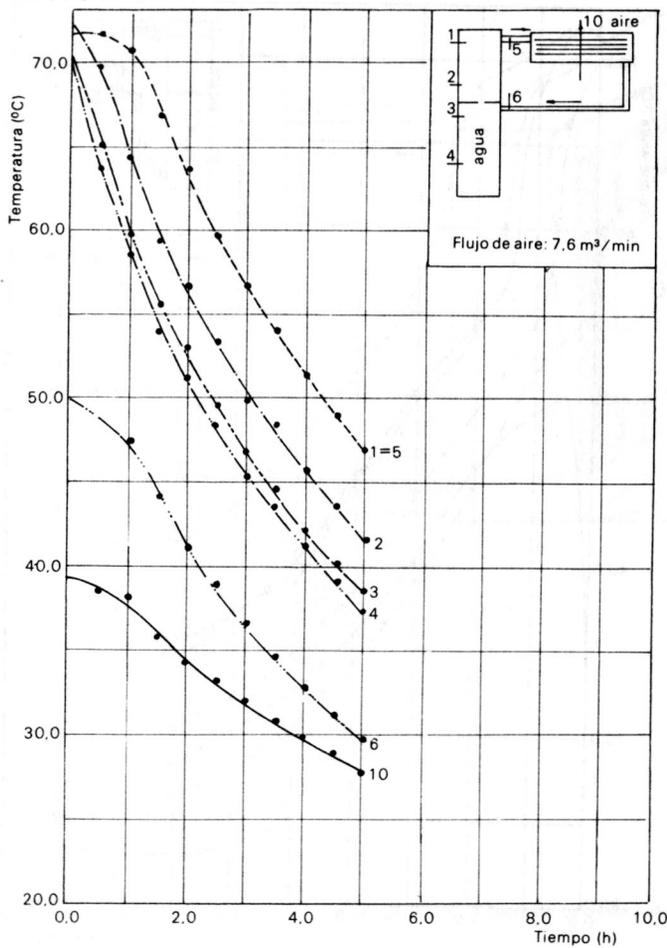


FIGURA 9. Distribución de temperaturas, disposición 5.

**CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA**

Con el propósito de conocer el comportamiento del sistema conformado por el tanque de almacenamiento y los colectores bajo condiciones de operación reales, se llevó a cabo un conjunto de ensayos, para lo cual se ejecutó el montaje mostrado en la Foto 1.

Otro objetivo de estos ensayos consistía en fijar unas pautas que permitieran obtener de una forma aproximada y global la eficiencia del sistema de

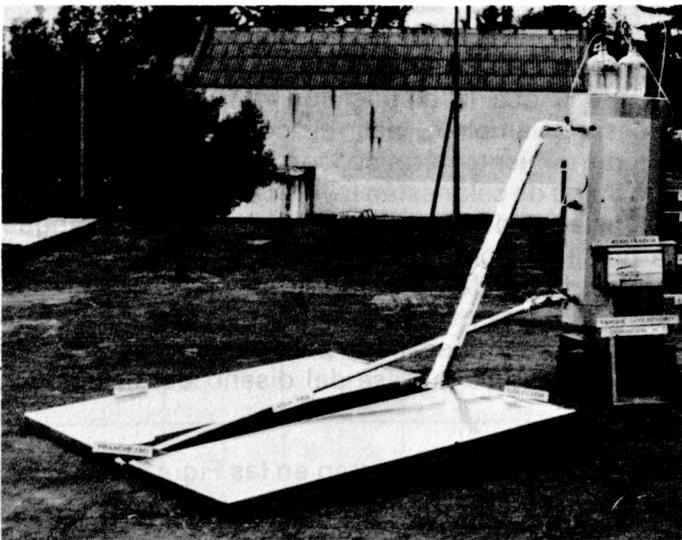


FOTO 1. Sistema tanque de almacenamiento-colectores.

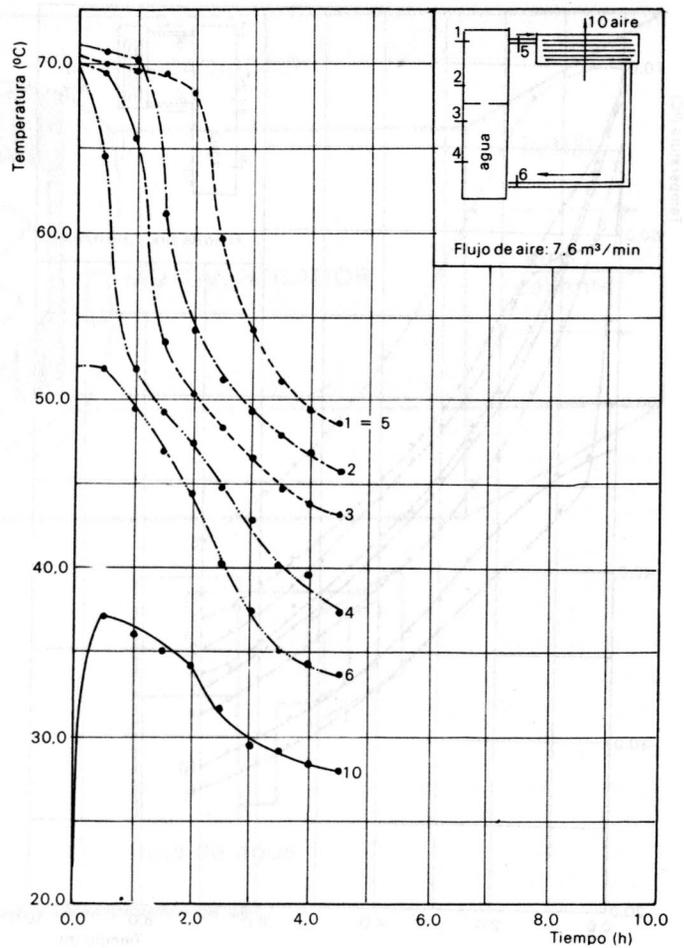


FIGURA 10. Distribución de temperaturas, disposición 6.

recolección y almacenamiento en conjunto, de tal forma que una vez conocida la eficiencia para las condiciones ambientales presentadas se tuviera una base real para predecir su comportamiento.

Las disposiciones tanque de almacenamiento-colectores son las que se muestran en la Figura 19. Debido a que los colectores utilizados para los ensayos tienen características similares de construcción y eficiencia, se escogió la disposición 1b la cual, proporciona condiciones iguales de funcionamiento para ambos colectores.

**Aparatos y técnica experimental**

El sistema utilizado está conformado básicamente por el tanque de almacenamiento de agua, dos colectores de placa y tubos y tubería para conducción de agua desde el tanque a los colectores y viceversa.

La radiación que incide sobre los colectores se mide con un piranómetro, el cual envía una señal al registrador. El piranómetro se encuentra colocado en el plano de los colectores y con la misma inclinación, midiendo así directamente la radiación que incide sobre ellos. La constante del piranómetro es:  $10,2 \times 10^6 \text{ vol/w m}^2$ . (Foto 2).

Los colectores tienen un área de  $1,44 \text{ m}^2$  cada uno; se encuentran colocados con una inclinación de siete grados levantados hacia el norte y orientados en la dirección norte-sur.

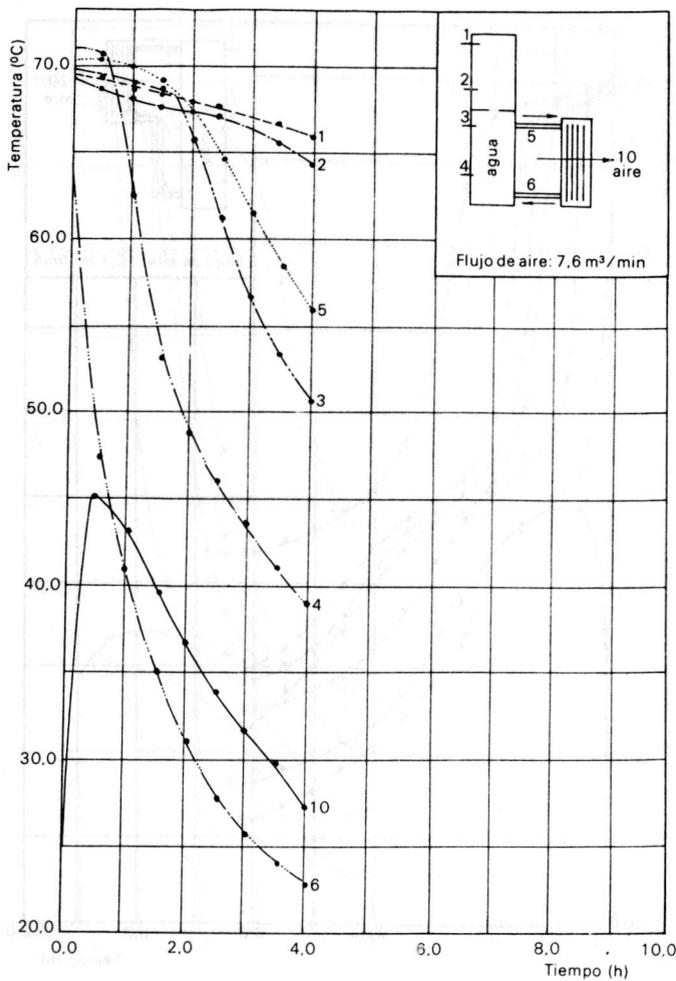


FIGURA 11. Distribución de temperaturas, disposición 7.

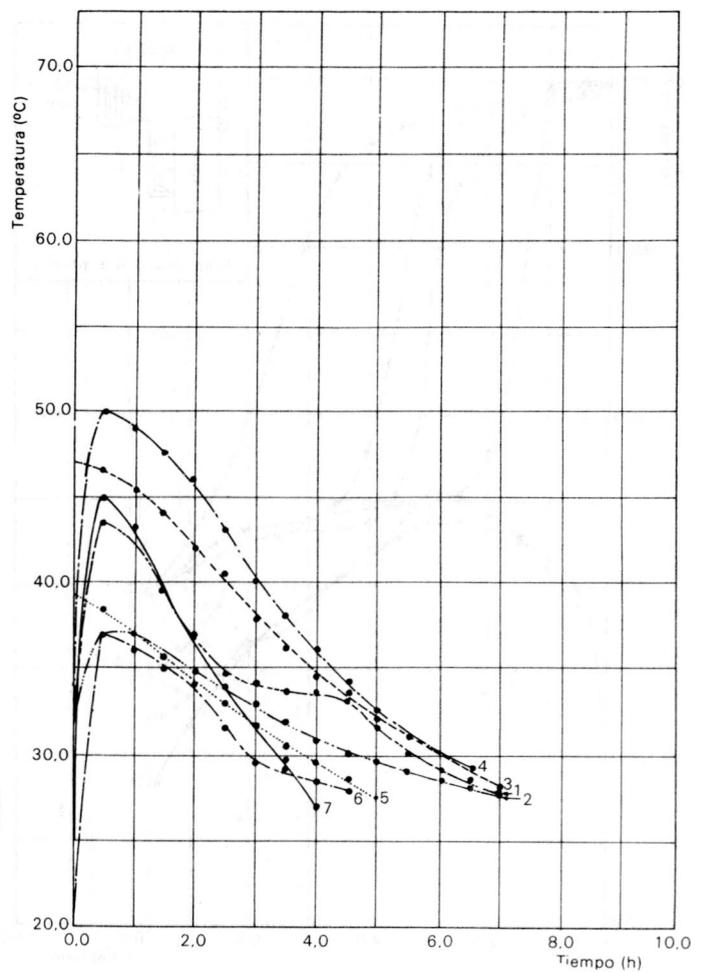


FIGURA 12. Temperaturas de aire caliente para las disposiciones estudiadas.

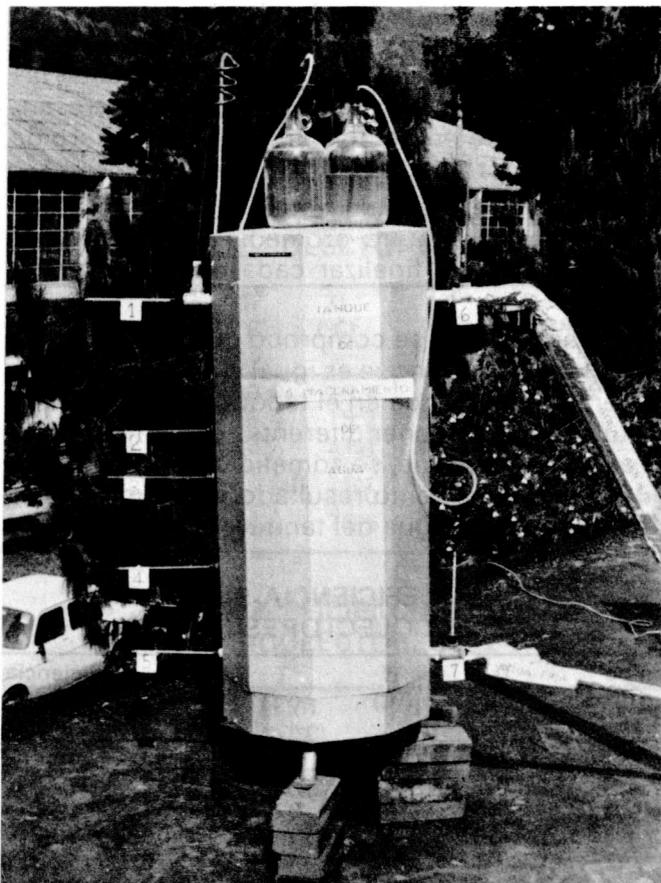


FOTO 2. Medición de la radiación solar incidente.

El tanque de almacenamiento de agua se encuentra colocado a una altura de 30 cm. sobre la parte superior de los colectores. La temperatura del agua se mide con termómetros colocados en diferentes puntos del tanque (dimensión vertical) así como también en las tuberías que conducen el agua desde y hacia los colectores. (Foto 3).

El tanque tiene una capacidad de 200 lts. aproximadamente y es el mismo que se utilizó en los ensayos

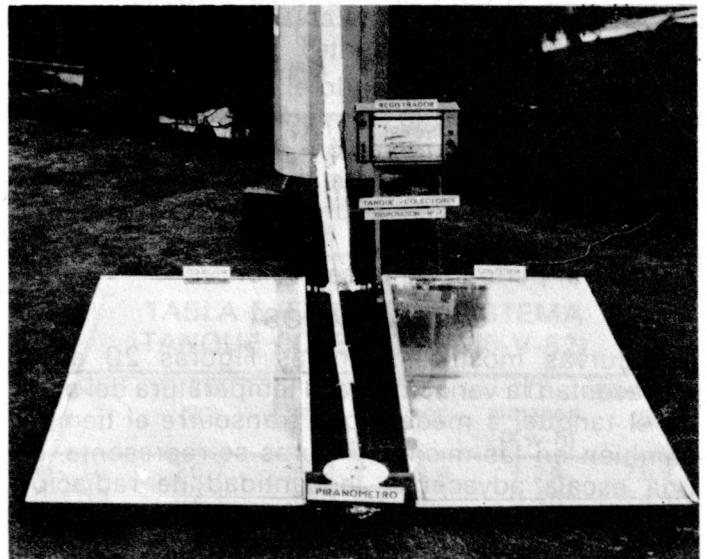


FOTO 3. Medida de temperaturas en el sistema tanque colectores.

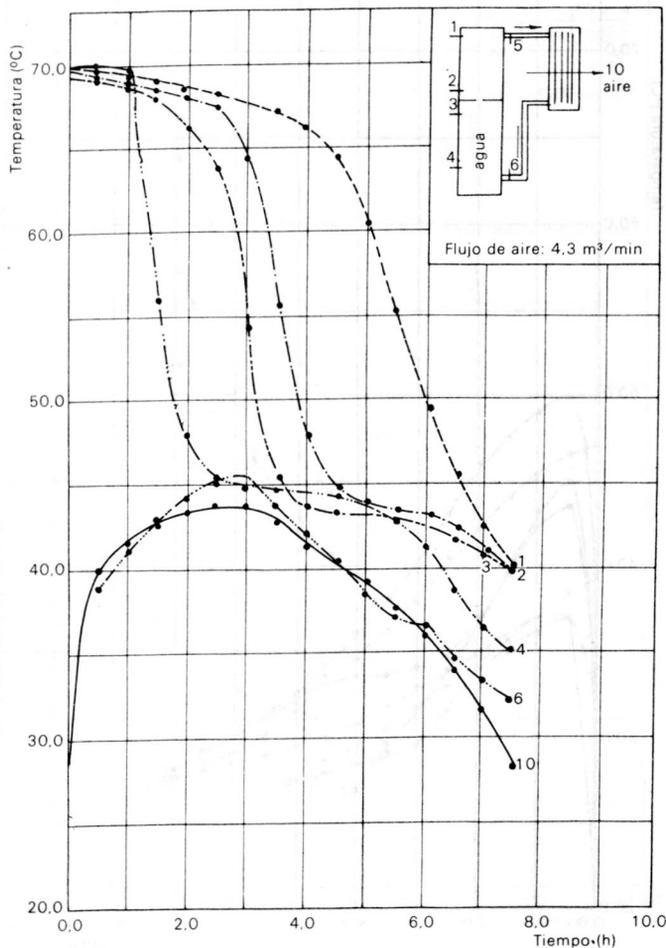


FIGURA 13. Distribución de temperaturas, disposición óptima.

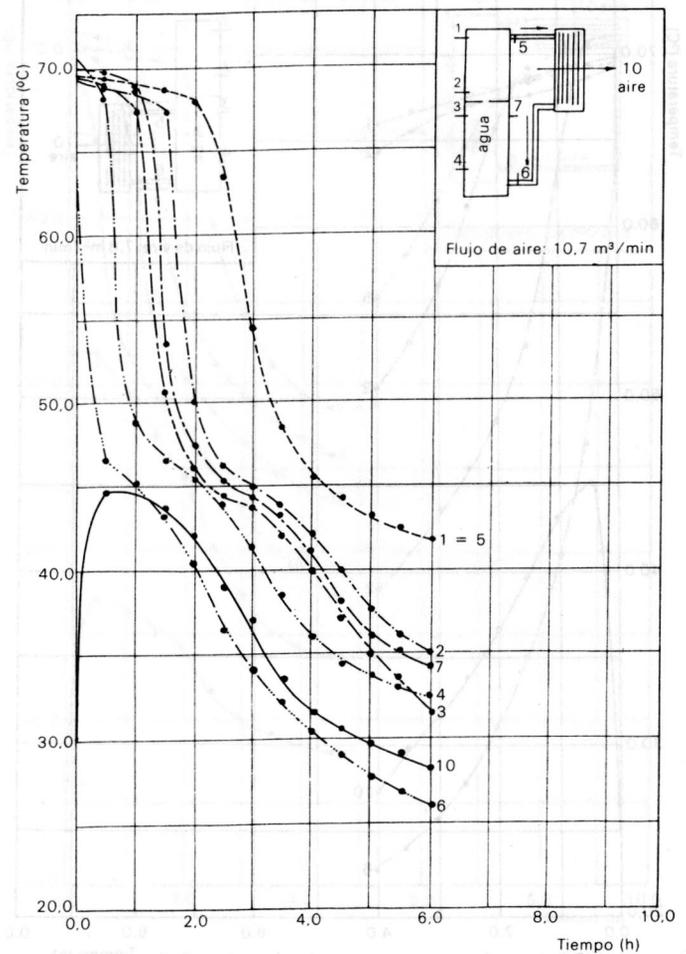


FIGURA 14. Distribución de temperaturas, disposición óptima.

de calentamiento de aire.

Las tuberías para conducir el agua desde el tanque a los colectores y de estos al tanque, son de hierro galvanizado de 2,54 cm. de diámetro y están recubiertos con 5,0 cm. de fibra de vidrio forrada con aluminio para proporcionarles aislamiento térmico.

La técnica experimental aplicada para determinar la eficiencia del sistema se seleccionó con base en buenas condiciones ambientales y en las horas de mayor radiación incidente en Bogotá (9:00 a.m. — 2:00 p.m. aproximadamente).

El ensayo se inicia llenando el sistema con agua a temperatura ambiente e inmediatamente se empieza a registrar la radiación incidente sobre los colectores. Posteriormente, a intervalos regulares de tiempo se toma lectura de los termómetros colocados en el tanque, continuando así hasta finalizar el período de observación.

**RESULTADOS**

Las curvas mostradas en las Figuras 20 a 24 representan la variación de la temperatura del agua en el tanque, a medida que transcurre el tiempo. También en las mismas Figuras se representa, en una escala adyacente, la cantidad de radiación recibida por los colectores para cada intervalo de tiempo durante el período de observación.

El cambio de entalpía causado por el aumento de

temperatura en el medio de almacenamiento, se constituye en el calor que ha sido transferido de los colectores a dicho medio y a su vez, incluyendo las pérdidas térmicas del sistema en general, representa la fracción de energía solar incidente absorbida por los colectores.

El cálculo del cambio de entalpía se efectúa con base en la temperatura promedio del agua en el tanque al iniciar y finalizar cada intervalo de 1,0 hora.

Experimentalmente se comprobó que la temperatura promedio en el tanque es igual al promedio de las temperaturas del agua en el tanque. Este ensayo se efectuó cuando al tener diferentes estratificaciones del agua en el tanque, se sometió ésta a una fuerte agitación, dando como resultado una temperatura homogénea en el agua del tanque, la que coincidió

**TABLA 1. EFICIENCIA SISTEMA TANQUE-COLECTORES (20-I-82)**

Tiempo (h)	Ti (°C)	Tf (°C)	T (°C)	Q almacen. (Kw-h)	Eficiencia (%)
9 - 10	21,7	26,2	23,9	1,03	46,4
10 - 11	26,2	30,6	28,5	0,99	43,6
11 - 12	30,6	34,4	32,5	0,87	42,6
12 - 1	34,4	39,1	36,7	0,86	30,2
1 - 2	39,1	44,2	41,6	1,16	42,8
2 - 3	44,2	46,1	41,5	0,43	23,8

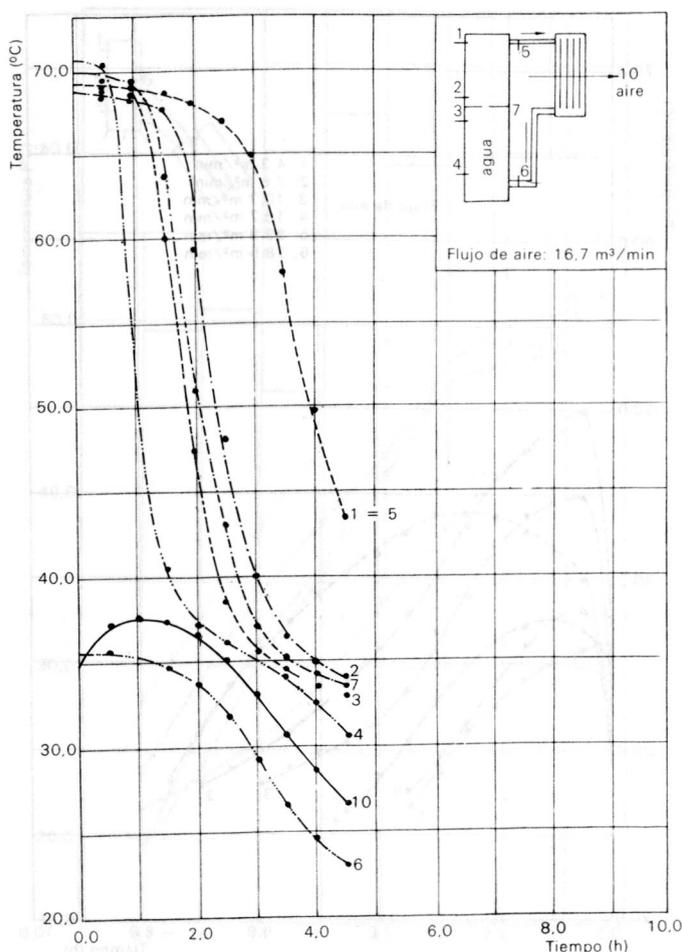


FIGURA 15. Distribución de temperaturas, disposición óptima.

con el promedio aritmético de las temperaturas leídas antes de ocurrir la agitación.

La eficiencia del sistema se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Calor absorbido por el agua} \times 100}{\text{Energía incidente}}$$

TABLA 2. EFICIENCIA SISTEMA TANQUE-COLECTORES (21-I-82)

Tiempo (h)	Ti (°C)	Tf (°C)	T (°C)	Q almacen. (Kw-h)	Eficiencia (%)
11:00 - 11:10	19.0	19.4	19.2	0.092	19.6
11:10 - 11:20	19.4	19.7	19.5	0.069	15.3
11:20 - 11:30	19.7	21.1	20.4	0.322	65.7
11:30 - 11:40	21.1	22.5	21.8	0.322	54.4
11:40 - 11:50	22.5	24.0	23.2	0.345	73.4
11:50 - 12:00	24.0	25.5	24.7	0.322	67.1

TABLA 3. EFICIENCIA SISTEMA TANQUE-COLECTORES (22-IV-82)

Tiempo (h)	Ti (°C)	Tf (°C)	T (°C)	Q almacen. (Kw-h)	Eficiencia (%)
9 - 10	32.0	34.7	33.4	0.620	39.2
10 - 11	34.7	38.0	36.4	0.759	47.1
11 - 12	38.0	43.2	40.6	0.861	34.71
12 - 1	43.2	43.6	43.4	0.092	13.3
1 - 2	43.6	46.7	45.2	0.713	65.4

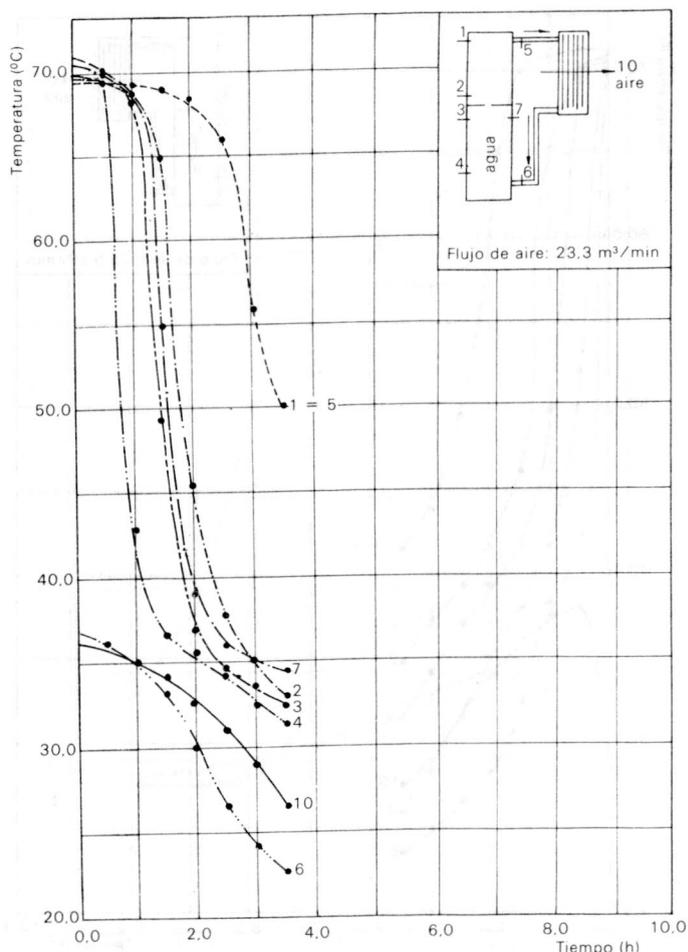


FIGURA 16. Distribución de temperaturas, disposición óptima.

Los resultados se muestran en las Tablas 1 a 5.

CONCLUSIONES

El sistema tanque de almacenamiento-colectores, presenta valores de eficiencia desde 10 hasta 70%. El intervalo donde se presenta la mayor frecuencia está comprendido entre el 30 y el 50%.

La eficiencia determinada mediante este método

TABLA 4. EFICIENCIA SISTEMA TANQUE-COLECTORES (26-IV-82)

Tiempo (h)	Ti (°C)	Tf (°C)	T (°C)	Q almacen. (Kw-h)	Eficiencia (%)
9 - 10	36.2	37.1	36.7	0.184	13.3
10 - 11	37.1	39.5	38.3	0.552	32.5
11 - 12	39.5	42.3	40.9	0.664	48.8
12 - 1	42.3	44.7	43.5	0.552	22.0
1 - 2	44.7	44.8	44.7	0.023	1.42

TABLA 5. EFICIENCIA SISTEMA TANQUE-COLECTORES (6-V-82)

Tiempo (h)	Ti (°C)	Tf (°C)	T (°C)	Q almacen. (Kw-h)	Eficiencia (%)
9 - 10	26.7	32.1	29.4	1.24	75.7
10 - 11	32.1	34.1	33.1	0.46	24.1
11 - 12	34.1	37.3	35.7	0.69	36.3
12 - 1	37.3	39.6	38.5	0.53	34.0
1 - 2	39.6	40.5	40.1	0.21	28.7

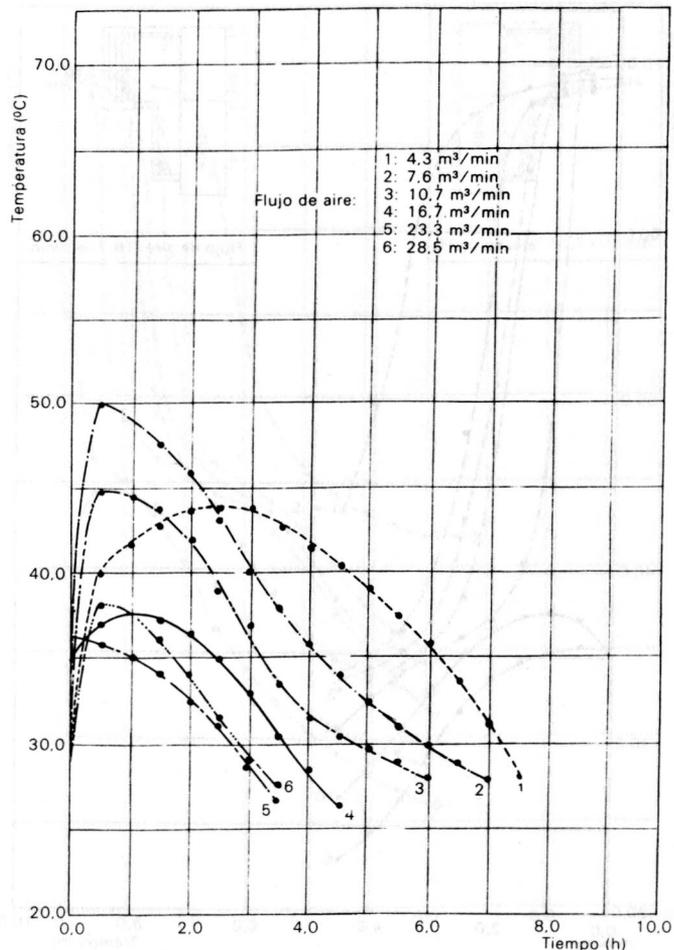
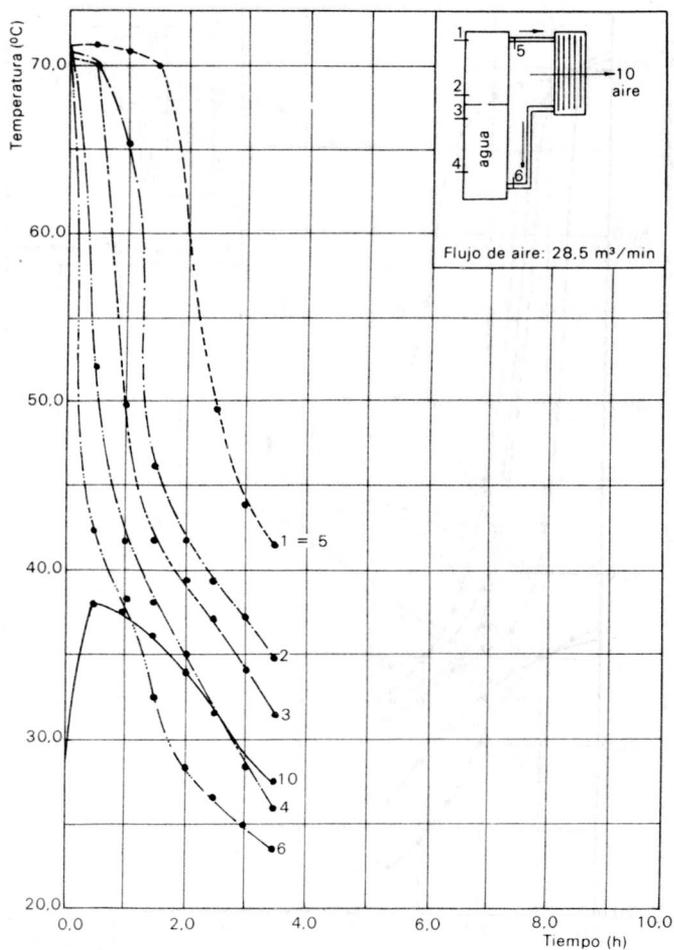


FIGURA 17. Distribución de temperaturas, disposición óptima.

FIGURA 18. Temperatua aire caliente vs. flujo de aire para la disposición óptima.

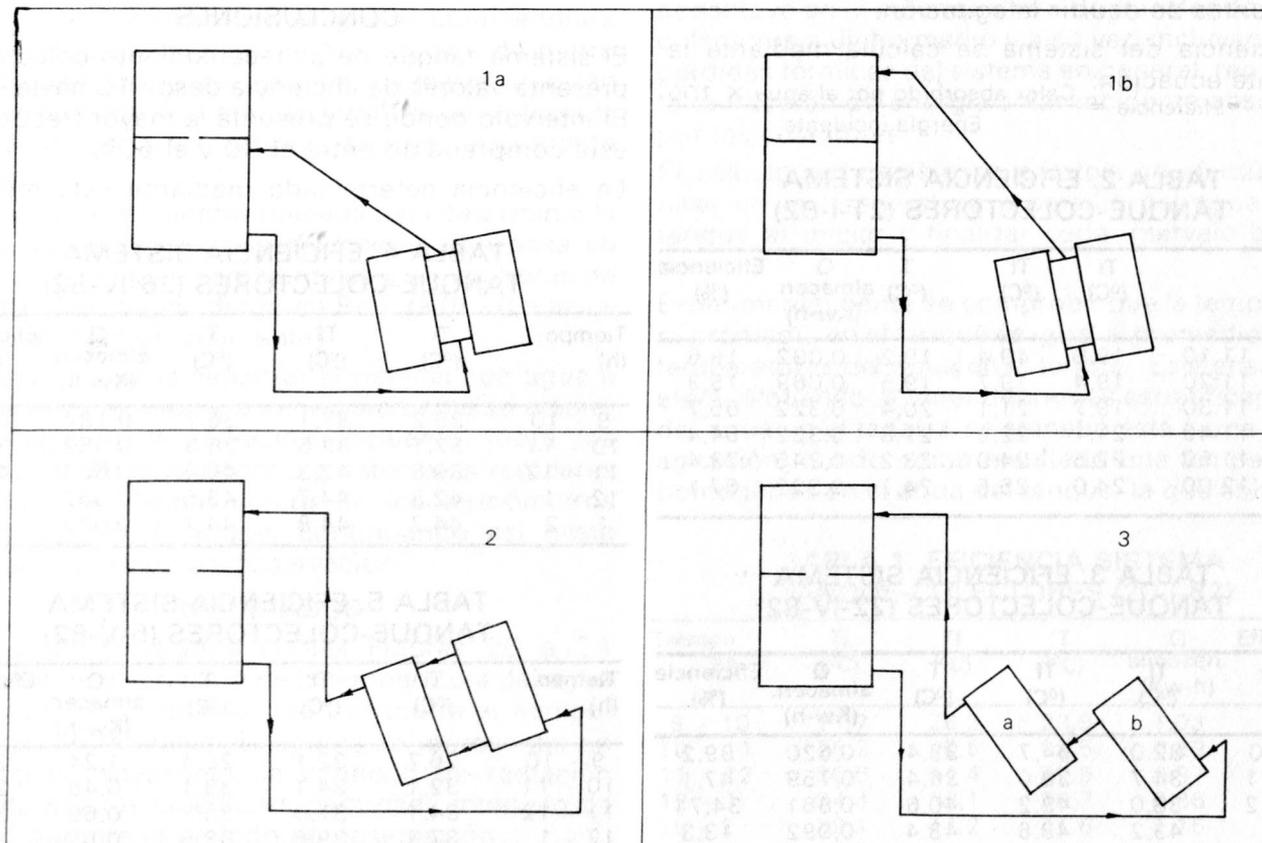


FIGURA 19. Disposiciones del sistema tanque de almacenamiento- colectores.

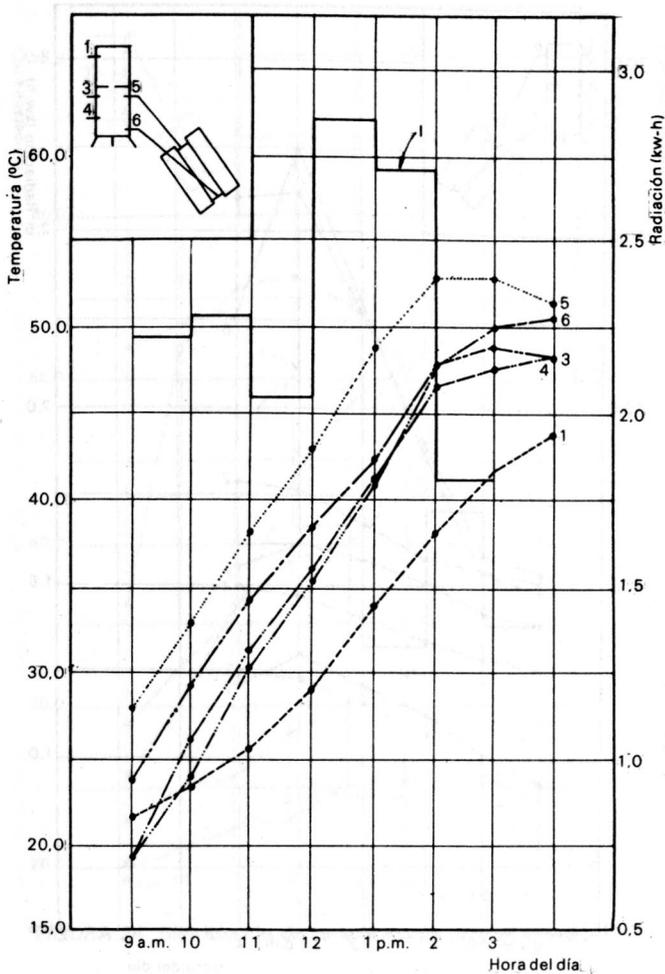


FIGURA 20. Distribución de temperaturas para el 20-1-82

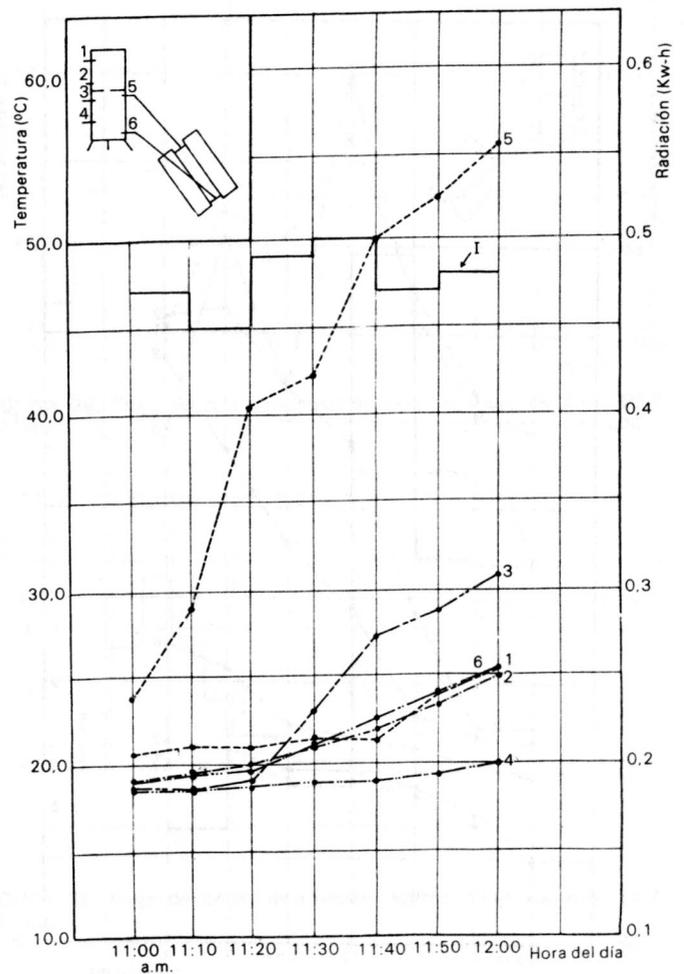


FIGURA 21. Distribución de temperaturas para el 20-1-82.

no incluye el análisis de las pérdidas térmicas del sistema, por cuanto no se dispone de aparatos de medida para la eficiencia de los colectores.

Para determinar con precisión la eficiencia de los colectores y del sistema, se debe proceder a hacer una simulación, donde la temperatura del agua que entra a los colectores, el flujo de agua a través de ellos y la radiación incidente se pueden controlar perfectamente de tal forma que el sistema opere en condiciones estables.

Debido a la lámina divisora que tiene el tanque en su interior, la zona de agua que se encuentra en la parte superior de ésta, aumenta su temperatura más rápidamente que la del resto del tanque, manteniendo una temperatura relativamente superior durante el transcurso del día.

DIMENSIONAMIENTO DEL CALENTADOR SOLAR DE AIRE

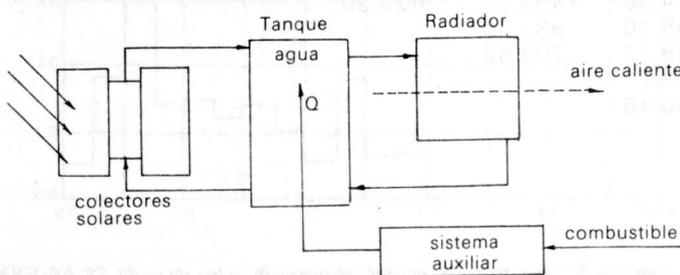


FIGURA 25.

Para dimensionar el calentador solar indirecto de aire, se debe tener en cuenta cada uno de los componentes del mismo y los factores que los relacionan entre sí. La Figura 25 muestra el diagrama de flujo del equipo y cómo éste integra dos sistemas de flujo de agua y transferencia de calor:

Sistema tanque de almacenamiento-colectores solares, y sistema tanque de almacenamiento-radiador. Un tercer sistema de transferencia de calor es el equipo convertidor de energía auxiliar; éste, como puede verse, es común para los dos sistemas mencionados anteriormente y depende de cuál sea la clase de combustible o energía convencional por utilizar.

Los tres sistemas se relacionan entre sí mediante la carga de calor que se debe suministrar al aire para obtener unas condiciones fijadas por el consumidor (flujo de aire a una temperatura escogida). Esta carga demandada por el flujo de aire al atravesar el radiador, debe satisfacerse mediante los colectores solares y el sistema de energía auxiliar.

Debido a que para la determinación de la fracción suplida por los colectores solares se tienen en cuenta factores tales como cantidad de agua por calentar durante el día, temperatura inicial y temperatura deseada en el agua caliente, es necesario que los flujos de calor que ocasiona el sistema, se hagan equivalentes a un flujo de agua que se calienta

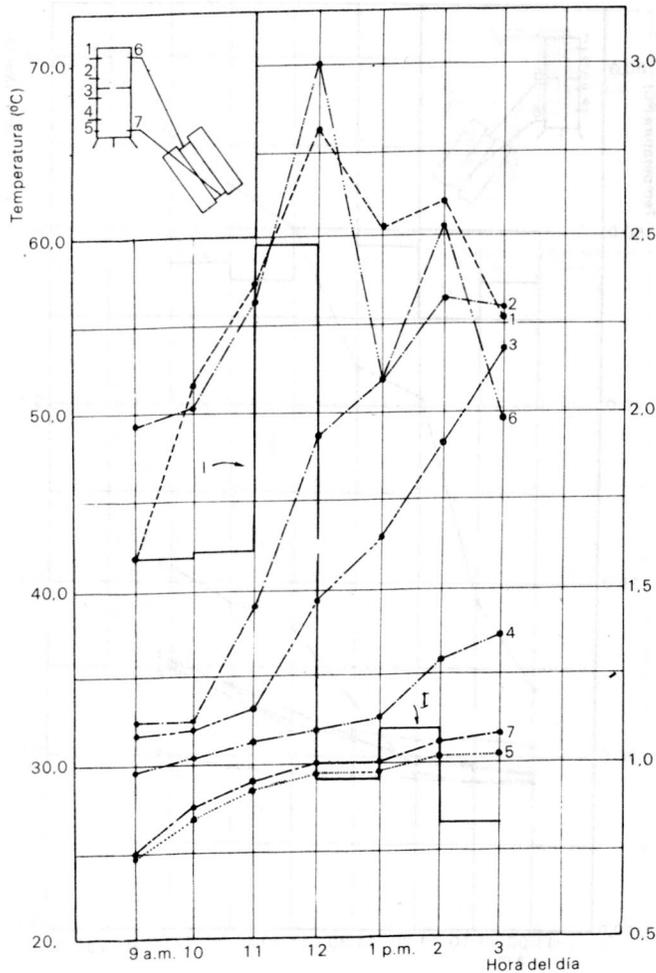


FIGURA 22. Distribución de temperaturas para el 22-IV-82.

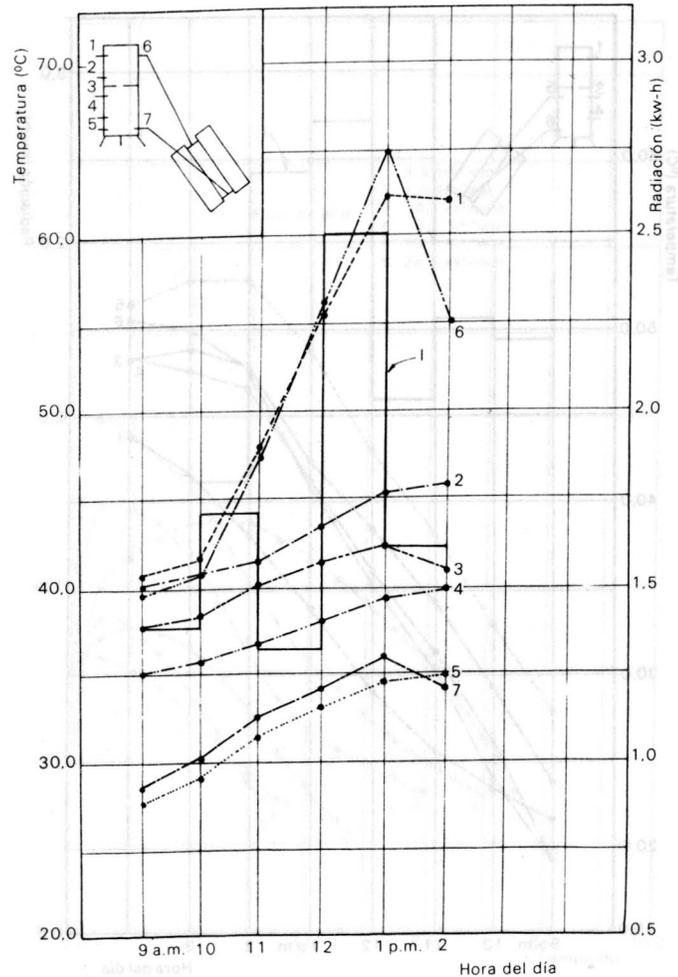


FIGURA 23. Distribución de temperaturas para el 26-IV-82.

desde una temperatura  $t_1$  a una temperatura  $t_2$ . Esta equivalencia se efectúa mediante la ecuación de transferencia de calor:

$Q = mC_p(t_2 - t_1)$  donde,  $m$ : masa de agua por calentar;  $C_p$ : capacidad calorífica del agua a la temperatura promedio.

Los flujos de calor que ocasiona el sistema en

función del tiempo, se muestran gráficamente en las Figuras 26 a 31. Los flujos de agua que corresponden a dichos flujos de calor se muestran en la Tabla 6.

**PROCEDIMIENTO POR COMPUTADOR**

Después de determinar la carga anual de calentamiento, se selecciona un tamaño de área de

**TABLA 6. FLUJOS DE AGUA CORRESPONDIENTES A LOS FLUJOS DE CALOR DEL SISTEMA TANQUE DE ALMACENAMIENTO-RADIADOR**

Tiempo (h)	Flujo 1 (lt/día)	Flujo 2 (lt/día)	Flujo 3 (lt/día)	Flujo 4 (lt/día)	Flujo 5 (lt/día)	Flujo 6 (lt/día)
0.0 - 0.5	25.12	265.59	200.73	100.36	100.55	1227.1
0.5 - 1.0	97.64	945.59	1097.00	875.64	1499.67	2219.6
1.0 - 1.5	403.64	1803.45	2054.15	1401.15	2178.00	2047.3
1.5 - 2.0	943.33	735.27	1247.36	1928.30	2450.52	1052.9
2.0 - 2.5	402.30	763.00	674.58	1483.97	829.30	
2.5 - 3.0	1123.70	648.91	685.70	981.70		
3.0 - 3.5	1345.64	727.91	668.12	703.52		
3.5 - 4.0	744.48	546.45	542.21			
4.0 - 4.5	302.06	299.67	540.46			
4.5 - 5.0	301.42	935.33				
5.0 - 5.5	368.85	323.75				
5.5 - 6.0	391.18	350.38				
6.0 - 6.5	458.21					
Flujo de aire (m <sup>3</sup> /min):	4.3	7.6	10.71	16.76	23.33	28.51

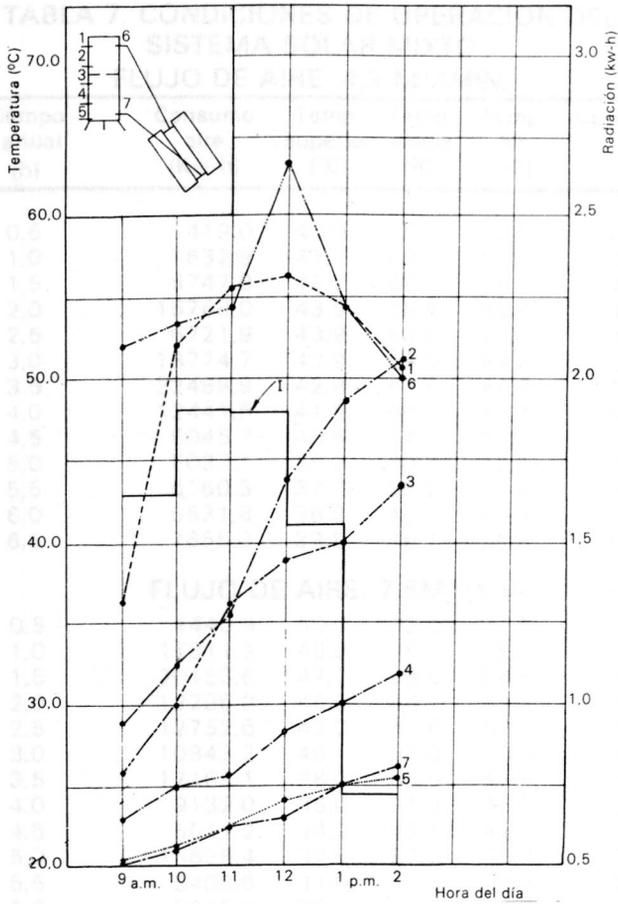


FIGURA 24. Distribución de temperaturas para el 6-V-82.

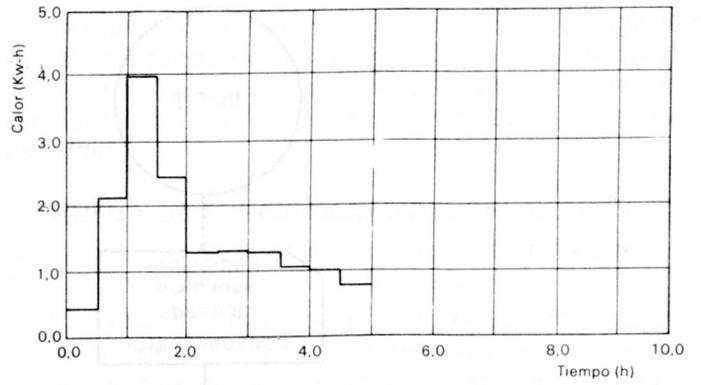


FIGURA 28. Flujo de calor, disposición óptima. Flujo de aire: 10,7 m<sup>3</sup>/min.

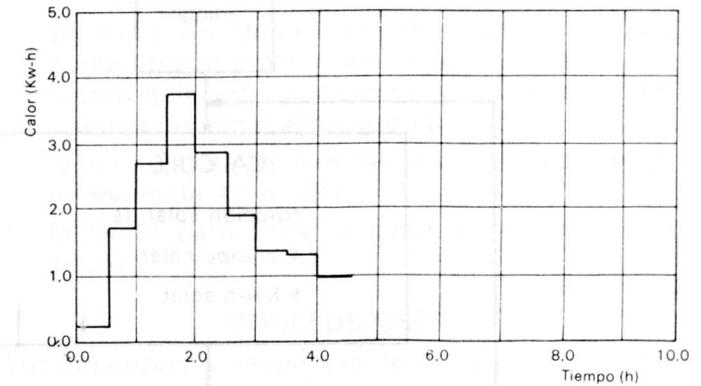


FIGURA 29. Flujo de calor, disposición óptima. Flujo de aire: 16,7 m<sup>3</sup>/min.

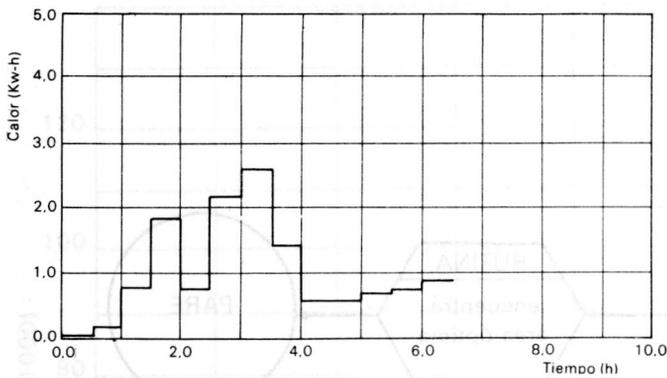


FIGURA 26. Flujo de calor, disposición óptima. Flujo de aire: 4,3 m<sup>3</sup>/min.

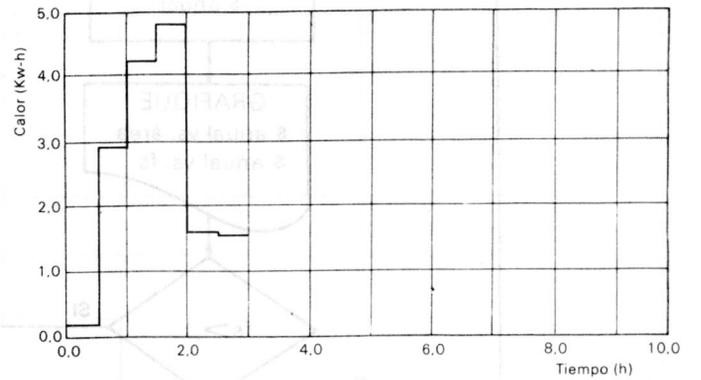


FIGURA 30. Flujo de calor, disposición óptima. Flujo de aire: 23,3 m<sup>3</sup>/min.

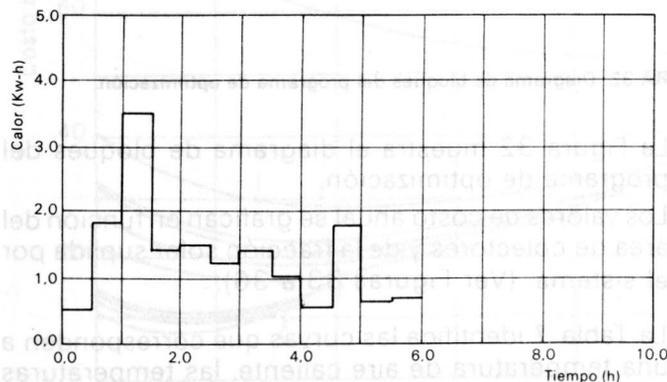


FIGURA 27. Flujo de calor, disposición óptima. Flujo de aire: 7,6 m<sup>3</sup>/min.

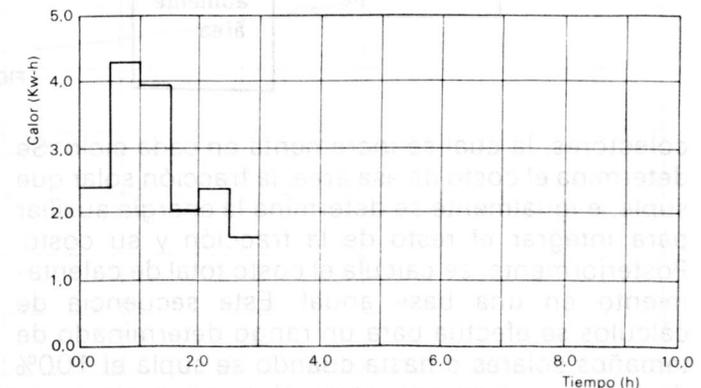


FIGURA 31. Flujo de calor, disposición óptima. Flujo de aire: 28,5 m<sup>3</sup>/min.

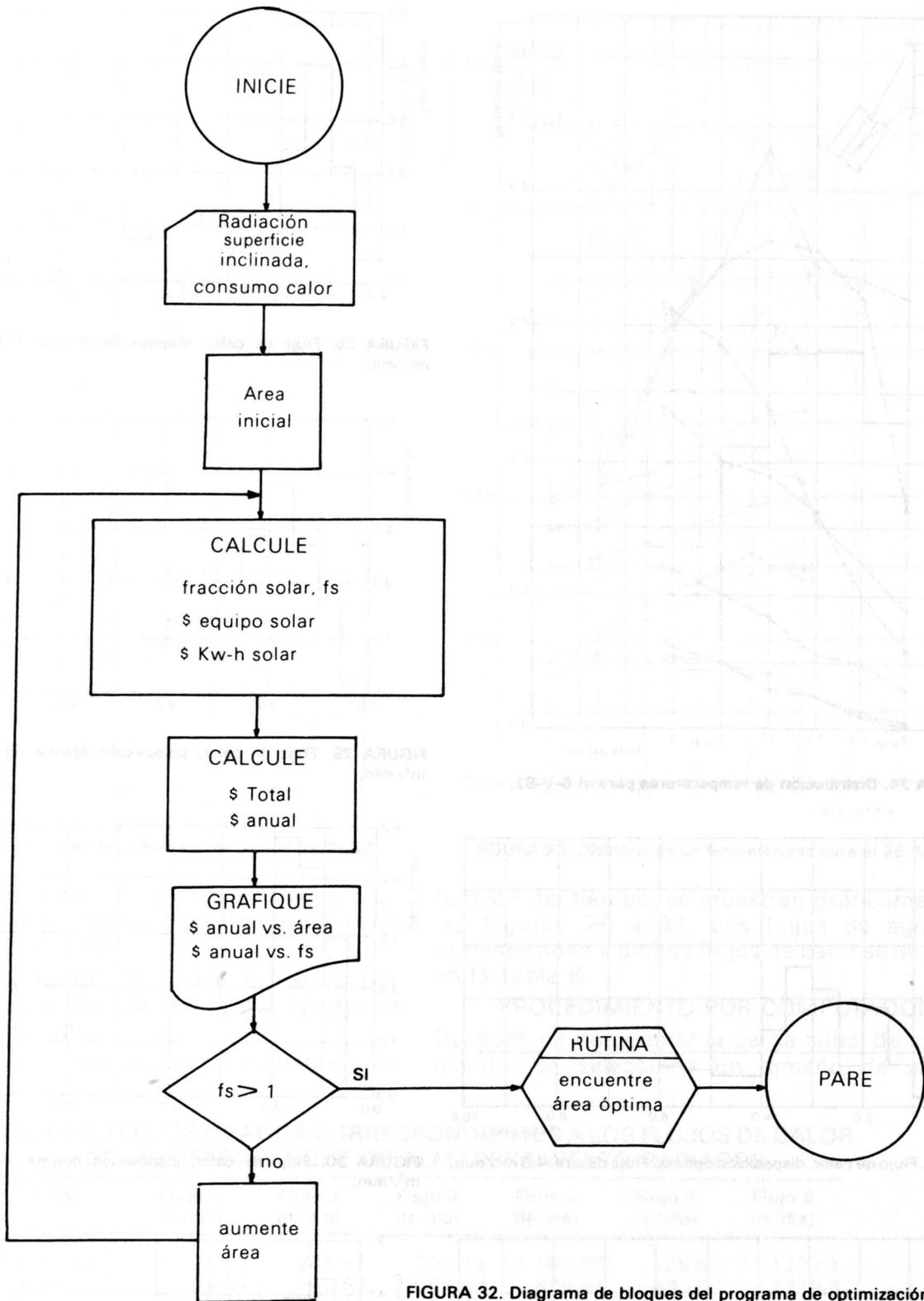


FIGURA 32. Diagrama de bloques del programa de optimización.

colectores, la cual se incrementa en cada ciclo. Se determina el costo de esa área, la fracción solar que suple, e igualmente se determina la energía auxiliar para integrar el resto de la fracción y su costo. Posteriormente, se calcula el costo total de calentamiento en una base anual. Esta secuencia de cálculos se efectúa para un rango determinado de tamaños solares o hasta cuando se supla el 100% de la carga y se encuentra el costo mínimo por medio de una rutina en el programa de computador o por el método gráfico.

La Figura 32 muestra el diagrama de bloques del programa de optimización.

Los valores de costo anual se grafican en función del área de colectores y de la fracción solar suplida por el sistema. (Ver Figuras 33 a 36).

La Tabla 7 identifica las curvas que corresponden a una temperatura de aire caliente, las temperaturas del agua en la parte superior y media del tanque y la carga anual de calor que causa mantener esa condición. En la Figura 37 se representa el área

**TABLA 7. CONDICIONES DE OPERACION DEL SISTEMA SOLAR MIXTO**  
**FLUJO DE AIRE: 4,3 M<sup>3</sup>/MIN.**

Tiempo anual (h)	Consumo aire (Kw-h)	Temp. superior (°C)	Temp. media (°C)	Temp. N° (°C)	Curva
0,5	419,0	40,0	70,0	70,0	—
1,0	1632,9	41,7	69,5	69,5	1
1,5	6747,8	42,7	69,1	56,0	4
2,0	15768,0	43,5	68,8	48,0	7
2,5	6721,9	43,9	68,5	45,0	4
3,0	18774,7	43,9	68,0	44,8	8
3,5	22489,9	42,8	67,5	44,9	9
4,0	12441,6	41,5	66,5	44,4	6
4,5	5045,7	40,4	64,7	44,2	2
5,0	5037,1	39,2	60,8	43,5	2
5,5	6160,3	37,7	55,2	42,8	3
6,0	6531,8	36,0	49,7	41,4	3
6,5	7655,0	33,8	45,7	38,6	5

**FLUJO DE AIRE: 7.6M<sup>3</sup>/MIN**

0,5	4440,9	50,0	72,0	71,6	1
1,0	15811,2	49,0	70,5	68,3	7
1,5	30153,6	47,7	69,5	56,6	8
2,0	12286,0	46,0	68,7	54,2	6
2,5	12752,6	43,0	62,6	52,6	6
3,0	10843,2	40,1	57,0	50,3	4
3,5	12165,1	38,0	53,5	47,8	5
4,0	9132,0	36,0	51,5	45,0	3
4,5	5011,2	34,0	49,5	42,2	1
5,0	15638,4	32,5	47,5	38,8	7
5,5	5408,6	31,0	45,5	38,3	2
6,0	5875,0	30,0	43,5	37,0	2

óptima para satisfacer los flujos de calor que origina el sistema tanque-radiador durante cada intervalo de media hora en función del tiempo y de la temperatura del aire caliente, para cada flujo de aire estudiado.

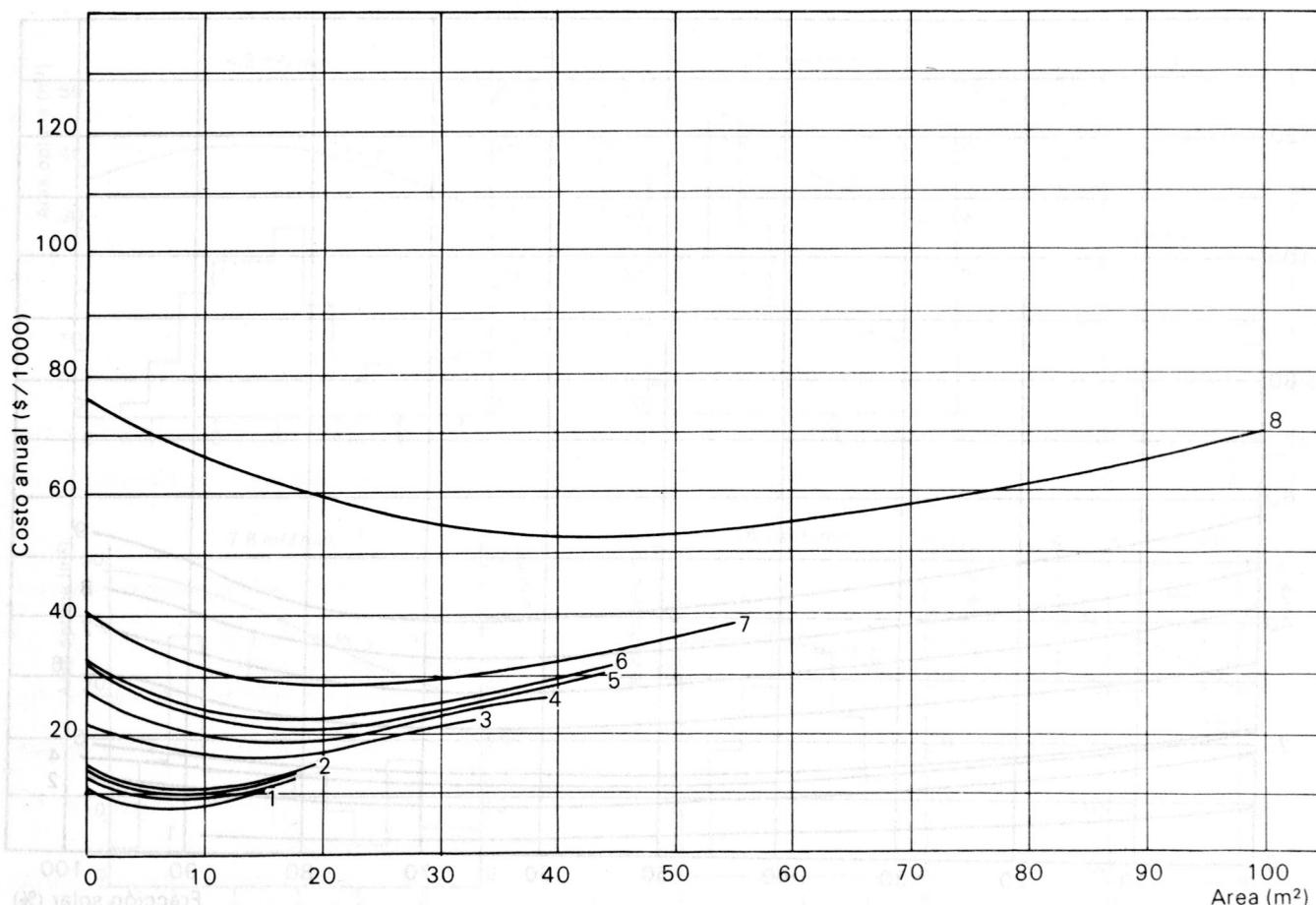
**PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO**

La operación del sistema mixto solar-eléctrico, mostró las siguientes características:

- facilidad de control de los parámetros de secado tales como flujo de aire, temperatura del aire, porcentaje de recirculación y sistema de almacenamiento térmico;
- operación continua durante todo el ciclo de secado;
- producto aislado de los cambios climáticos y de contacto con polvo, insectos o animales;
- auto-regulación en la temperatura del agua del sistema de almacenamiento térmico;
- la temperatura del aire caliente permanece en el intervalo de 40 a 55°C;
- facilidad para llevar a cabo un programa de secado.

**CONCLUSIONES**

Los conceptos y secuencia de cálculos planteados para el modelo de diseño, pueden aplicarse para el diseño de calentadores que utilicen agua como fluido de trabajo, conociendo previamente las



**FIGURA 33. Sistema mixto solar-eléctrico, costo anual vs. área colectores. (Bogotá). Flujo de aire: 7,6 m<sup>3</sup>/min.**

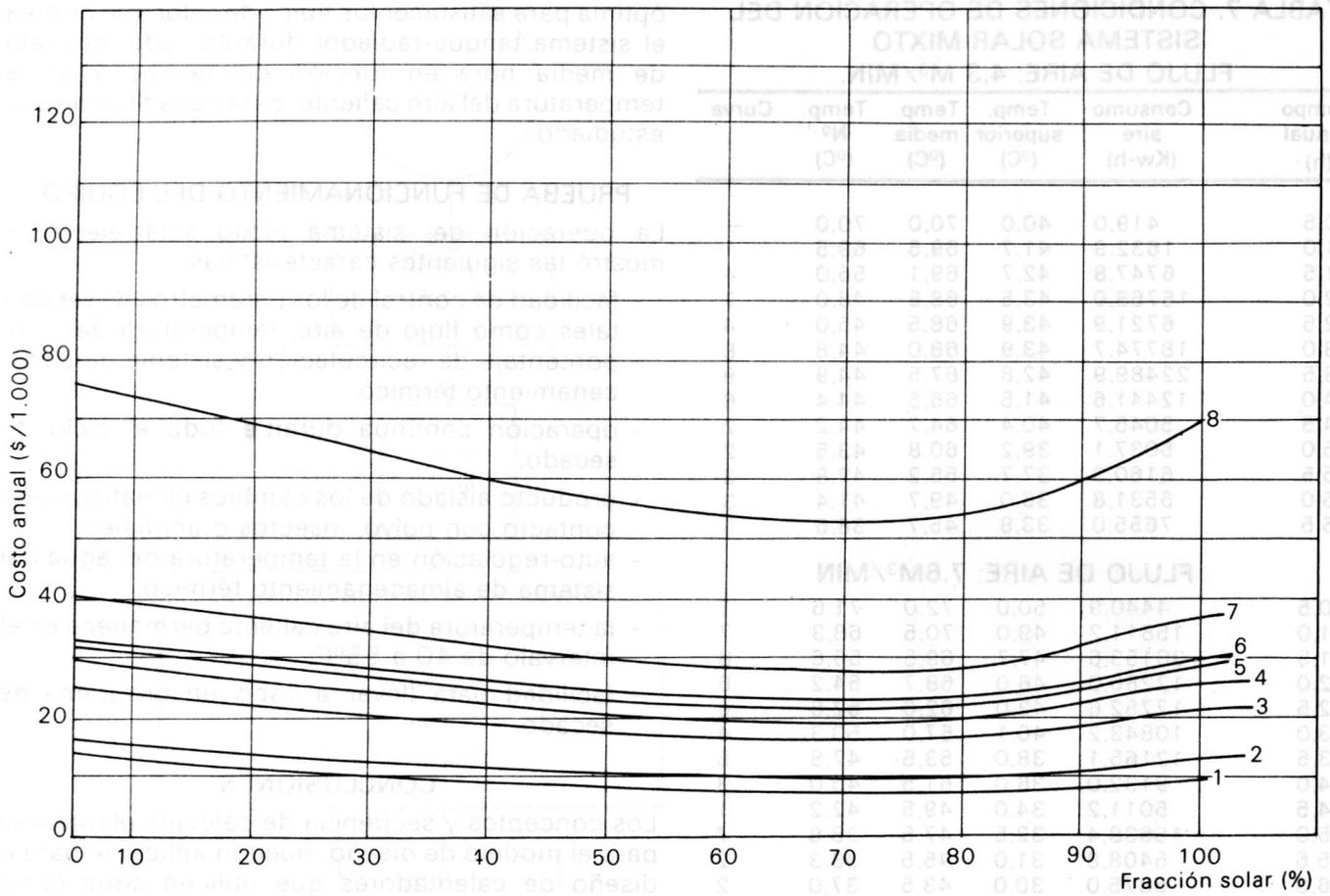


FIGURA 34. Sistema mixto solar-eléctrico, costo anual vs. % solar (Bogotá). Flujo de aire 7,6 m<sup>3</sup>/min.

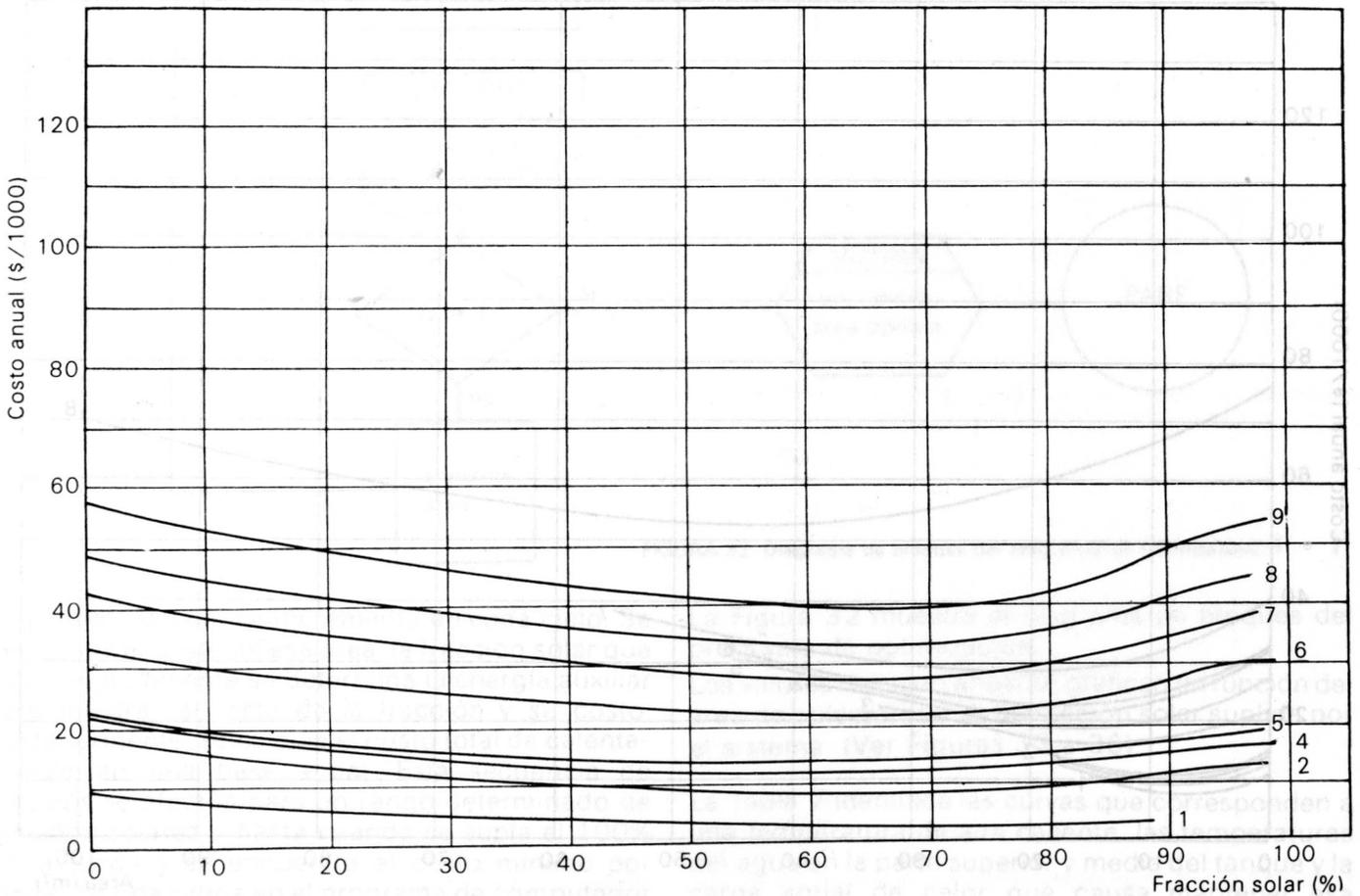


FIGURA 35. Sistema mixto solar-eléctrico, costo anual vs. % solar (Bogotá). Flujo de aire: 4,3 m<sup>3</sup>/min.

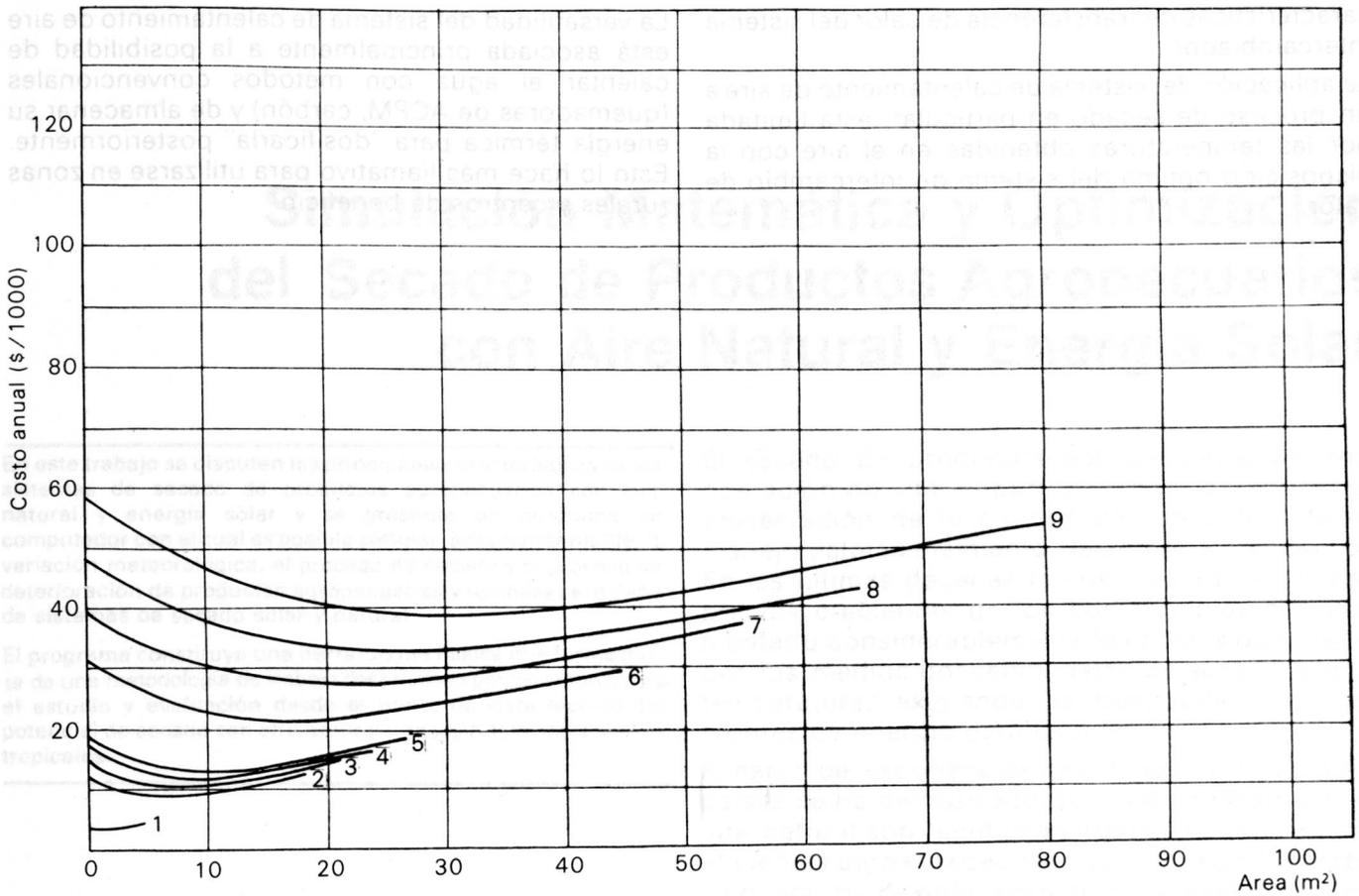


FIGURA 36. Sistema mixto solar-eléctrico, costo anual vs. área colectores. (Bogotá). Flujo de aire: 4,3 m<sup>3</sup>/min.

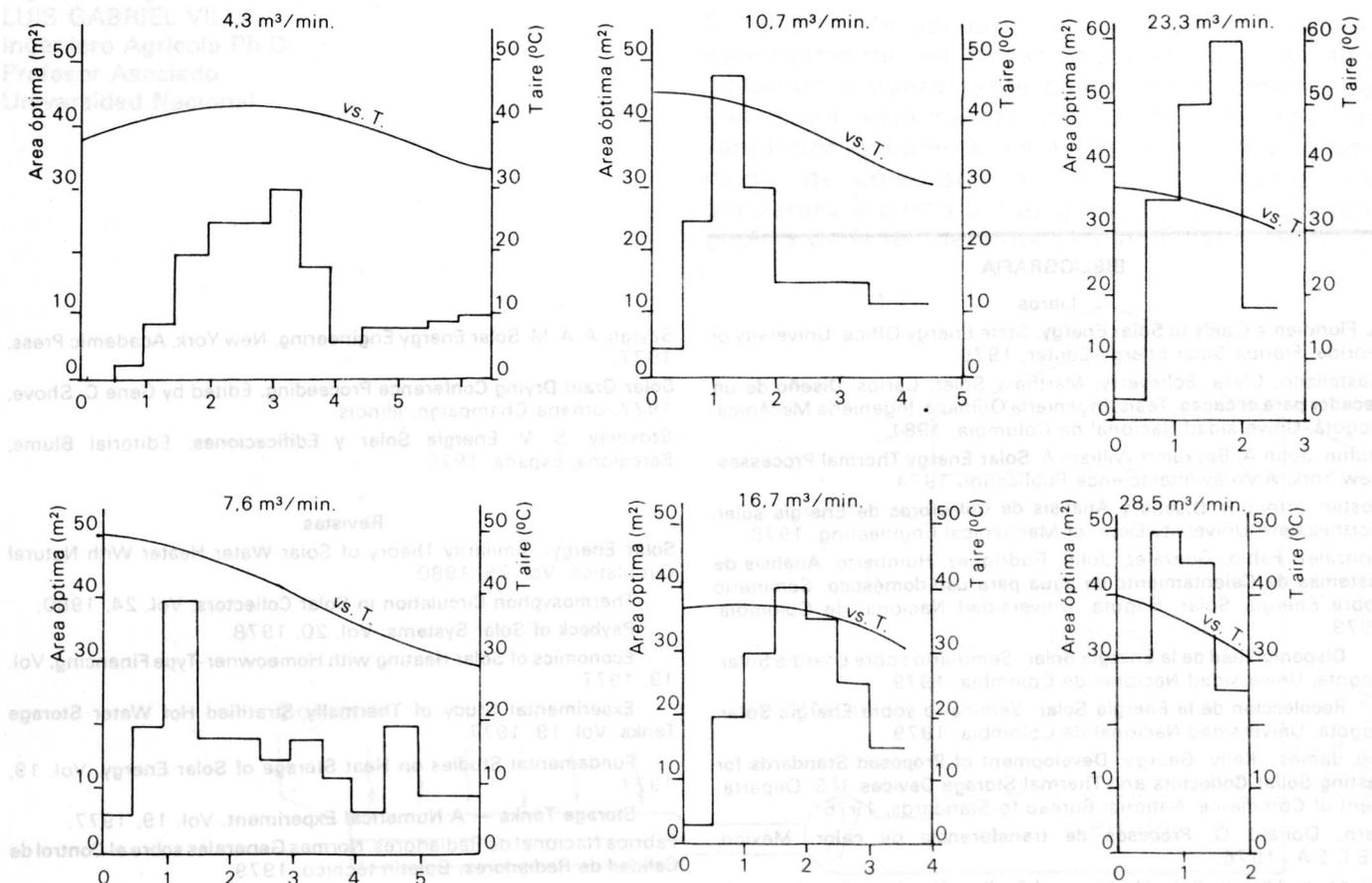


FIGURA 37. Sistema mixto solar-eléctrico. Área óptima para obtener una temperatura en el aire.

características de transferencia de calor del sistema intercambiador.

La aplicación del sistema de calentamiento de aire a un proceso de secado en particular, está limitada por las temperaturas obtenidas en el aire con la disposición óptima del sistema de intercambio de calor.

La versatilidad del sistema de calentamiento de aire está asociada principalmente a la posibilidad de calentar el agua con métodos convencionales (quemadores de ACPM, carbón) y de almacenar su energía térmica para "dosificarla" posteriormente. Esto lo hace más llamativo para utilizarse en zonas rurales y centros de beneficio.

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros

A. **Floridian's Guide to Solar Energy**. State Energy Office, University of Florida. Florida Solar Energy Center, 1976.

Castellano, Clara; Echeverry, Martha y Soler, Carlos. **Diseño de un secador para el cacao**. Tesis, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1981.

Duffie, John A; Beckman William A. **Solar Energy Thermal Processes**. New York, A Wiley Interscience Publication 1974.

Foster, Arthur R. **Diseño y Análisis de Colectores de Energía solar**. Northeastern University Dept. of Mechanical Engineering, 1979.

González, Fabio; González, Julio; Rodríguez, Humberto. **Análisis de Sistemas de Calentamiento de agua para uso doméstico**. Seminario sobre Energía Solar. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1979.

**Disponibilidad de la Energía Solar**. Seminario sobre Energía Solar. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1979.

**Recolección de la Energía Solar**. Seminario sobre Energía Solar. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1979.

Hill, James., Kelly, George. **Development of Proposed Standards for Testing Solar Collectors and Thermal Storage Devices**. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1976.

Kern, Donald Q. **Procesos de transferencia de calor**. México, C.E.C.S.A., 1976.

Kreider and Kreith. **Solar Heating and Cooling**. New York, Mc. Graw Hill, 1975.

Sayigh, A. A. M. **Solar Energy Engineering**. New York, Academic Press, 1977.

**Solar Grain Drying Conference Proceeding**. Edited by Gene C. Shove, 1977, Urbana-Champaign, Illinois.

Szokolay, S. V. **Energía Solar y Edificaciones**. Editorial Blume, Barcelona, España, 1979.

### Revistas

**Solar Energy**. Similarity Theory of Solar Water Heater With Natural Circulation. Vol. 25, 1980.

**Thermosyphon Circulation in Solar Collectors**. Vol. 24, 1980.

**Payback of Solar Systems**. Vol. 20, 1978.

**Economics of Solar Heating with Homeowner-Type Financing**. Vol. 19, 1977.

**Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks**. Vol. 19, 1977.

**Fundamental Studies on Heat Storage of Solar Energy**. Vol. 19, 1977.

**Storage Tanks — A Numerical Experiment**. Vol. 19, 1977.

Fábrica Nacional de Radiadores. **Normas Generales sobre el Control de Calidad de Radiadores**. Boletín técnico, 1979.

Fonade. **Mapa de intensidad de brillo solar para la determinación de la energía solar sobre el territorio colombiano**, 1979.