

TABLA 2: Nomenclatura

Lista de variables del modelo analítico del regenerador solar.

Temperaturas ($^{\circ}\text{K}$)

- T: de la solución en un punto x
- t: del aire en un punto x
- T_v : del vidrio en un punto x
- T_a : temperatura ambiente

Coefficientes de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}}$)

- U_a : entre vidrio y ambiente
- U_v : vidrio y aire
- U_w : solución y aire
- U_b : solución y ambiente
- U: por radiación entre vidrio y solución

Gastos, masas y concentraciones

- G: gasto de solución (kg/sm)*
- g: gasto de aire (kg/sm)
- w: kg agua/kg aire seco en el aire de circulación
- w_a : kg agua/kg aire seco en aire ambiente
- m: cantidad de agua evaporada hasta la distancia x (kg/sm)*

Otras variables

- L: largo del colector (m)
- x: coordenada a lo largo del colector (m)
- I: radiación (W/m^2)
- α : coeficiente de absorción de la radiación en el vidrio
- λ : calor de vaporización del agua para la solución
- C_p : calor específico de la solución ($\text{W}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
- C_p : calor específico del aire
- P: presión parcial del agua de la solución (N/m^2)
- p: presión parcial del vapor del agua en el aire
- h_e : coeficiente de evaporación ($\text{kg}/(\text{N}/\text{m}^2)\text{m}^2$)

(*) Magnitudes referidas a la unidad de ancho del colector

ENSAYOS DE DESHUMIDIFICACION SOLAR DE SOLUCIONES DE CaCl₂

V. Passamai
Universidad Nacional de Salta
Departamento de Ciencias Exactas
Buenos Aires 177, 4400 Salta

y

L. Saravia
Universidad Nacional de Salta
Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales

Resumen

Las soluciones concentradas de CaCl₂ son utilizadas para la deshumidificación de aire húmedo. Este proceso puede ser de utilidad en dos tipos de aplicación de interés en las provincias del noroeste: el secado de productos agrícolas y la climatización ambiental en zonas calientes y húmedas.

En esta presentación se describe el trabajo realizado con el fin de adquirir la experiencia necesaria para el diseño de sistemas de este tipo. Se ha comenzado por encarar el diseño del dispositivo solar de concentración de las soluciones de CaCl₂.

Se ha construido un pequeño prototipo experimental de 1,20 m de longitud por 0,55 m de ancho, iluminando artificialmente, con el fin de recoger información sobre los parámetros que definen el proceso de evaporación y obtener experiencia sobre detalles constructivos y materiales a utilizar.

Se discuten los resultados obtenidos y un modelo destinado a interpretarlos, y se analiza el balance térmico del sistema.

Abstract

The concentrated solutions of CaCl₂ are used for the dehumidification of humid air. This process can be used for two purposes which are of interest in the northwest provinces: the drying of agrarian products and the air conditioning in humid regions. On this work, the experiments performed to obtain the knowledge needed for the design of the design of the solar system used to concentrate the CaCl₂ solutions are described.

A small prototype, 1.20 m long by 0.55 m wide was built with artificial illumination in order to obtain information about the parameters controlling the evaporation process as well as experience about design details and types of materials to be used. The measured results and a model interpreting them are described. The thermal balance of the system are discussed.

1. Introducción

La regeneración de disoluciones acuosas de varios tipos de sal está siendo estudiada como una posible solución solar a los problemas de climatización ambiental en verano, así como en el secado de productos agrícolas¹. Sus principales ventajas son las de sencillez tecnológica, tanto de los colectores como del ciclo mismo, la posibilidad de acumular a temperaturas bajas con un mínimo de pérdidas, y la de tener un rendimiento relativamente bueno. Este tema también está siendo estudiado en relación con el uso de desecantes sólidos².

La climatización ambiental puede ser resuelta por dos métodos. En uno de ellos, esquematizado en la Fig. 1, una solución desecante, por ejemplo de CaCl_2 , elimina la humedad del aire de la casa. Cuando el aire se humidifica nuevamente, baja su temperatura lográndose la climatización^{3,4}. El circuito solar regenera la solución en un colector al quitarle parte del agua. En el segundo método, esquematizado en la Fig. 2, se plantea la utilización de un ciclo de absorción abierto^{3,5}. Una solución acuosa de una sal higroscópica, por ejemplo LiBr , trabaja en un evaporador permitiendo la evaporación de agua para bajar la temperatura. Esta solución se regenera posteriormente por vía solar.

El secado de productos agrícolas se puede realizar por circulación directa de la solución desecante en el flujo de aire del secadero, según se muestra en la Fig. 3.

Los colectores-desorbedores utilizados con fines de regeneración son muy sencillos. Hollands⁶ propuso la utilización de los destiladores solares convencionales como los usados en la desalinización del agua. Más tarde⁷, se estudió el uso de destiladores con ranuras que permiten la circulación de aire por debajo del vidrio, eliminándose la humedad en forma más efectiva por la acción de arrastre ejercida por la convección natural del aire a lo largo del colector (denominada flujo por termosifón), lo que mejora el rendimiento global. Finalmente, se ha planteado el uso de superficies por las que corre la solución sin vidrio de protección⁵, evaporándose el agua directamente a la atmósfera, con las desventajas de mayores pérdidas de calor por convección (en caso de vientos) y la necesidad de contar con sensores automáticos que corten la circulación y que permitan el desagüe en caso de lluvia.

En las primeras secciones se describe la construcción y operación, junto con algunos resultados obtenidos, de un pequeño prototipo regenerador de soluciones acuosas diluidas de sales del tipo CaCl_2 . Este colector-desorbedor permite la cir

culación de aire por debajo del vidrio y tiene la particularidad de que las soluciones fueron coloreadas de negro, siguiendo una idea de Minardi⁸. El equipo fue construido con el fin de adquirir experiencia sobre los detalles constructivos y materiales a utilizar. Finalmente se modeliza el sistema, discutiéndose los resultados obtenidos.

2. Aspectos constructivos del colector-desorbedor

Para encarar el diseño del dispositivo solar de concentración se siguieron, en principio, las recomendaciones dadas por Mullick⁷, construyéndose un colector como el indicado en la Fig. 3a. Inmediatamente se observaron dificultades para lograr que el líquido fluyera formando una película uniforme, es decir que se producían corrientes separadas con la consiguiente aparición de zonas no mojadas y disminución del rendimiento por ser éstas últimas los lugares donde la radiación incidente no causaba evaporación.

Para lograr el efecto buscado, se construyó el dispositivo de la Fig. 4; realizado totalmente en vidrio. De esta manera la solución líquida fluye formando una capa uniforme, tanto mejor cuanto mayor es la concentración de la sal.

Se aisló térmicamente al sistema tanto en la base como lateralmente. Para evitar el pintado del vidrio por el cual fluye la solución y teniendo en cuenta las recomendaciones hechas por Minardi⁸ y Landstrom⁹, se usó anilina comercial para colorear la solución y disponer, de esta forma, del líquido negro como receptor directo de la radiación, sin necesidad de calentar ninguna otra estructura en el colector.

Para simular la acción solar, se usó iluminación artificial y para permitir el movimiento del líquido se empleó una bomba dosificadora. El esquema general se ilustra en la Fig. 5.

3. Resultados Experimentales. Eficiencia del colector.

Para conocer la velocidad de evaporación en el colector desorbedor de $0,6 \text{ m}^2$ de superficie se midió la variación del volumen total de solución que circulaba por el equipo, a la vez que se determinó la variación de la densidad (Fig. 6).

El flujo de aire a través del colector se fijó sin necesidad de usar placas deflectoras, variando para ello convenientemente la distancia entre la superficie colectora y el vidrio superior.

La longitud útil para el flujo del líquido negro fue de

1,24 m por 0,55 m de ancho. La temperatura de las placas de vidrio se midió con termocuplas y las de la solución, a lo largo del equipo, tanto con termocuplas como por medio de termómetros. Los resultados están en la figura 7. Las velocidades de flujo se encontraron midiendo volúmenes versus tiempos de recolección.

Se hace la hipótesis de que este tipo de colectores debe estar colocado en posición prácticamente horizontal para lograr con ello una máxima captación de energía en los meses de verano y permitir velocidades muy bajas del flujo de líquido para evitar la formación de corrientes separadas y la aparición de zonas no mojadas. Lo que hasta el momento no se pudo evitar fue la formación de estrías de partículas de colorante. Esta estratificación se observó a partir del momento en que la temperatura del líquido alcanzaba el valor de los 30°C. Aparentemente las partículas del colorante se aglomeran especialmente debido a que el espesor de película líquida es del orden del tamaño de las mismas y el fluido no puede entonces arrastrarlas, perdiéndose, consecuentemente, la homogeneidad.

Para hallar la radiación I (W/m^2) que incide, en promedio, sobre la superficie colectora, se siguió el procedimiento descrito a continuación: con un piranómetro de laboratorio se tomaron las medidas de la radiación sobre el vidrio superior, observándose variaciones puntuales de la misma. Para obtener un valor medio, se recorrió la superficie del colector determinándose 60 rectángulos con su respectiva radiación. I se calculó usando la fórmula:

$$I = \frac{\sum I_i S_i}{S_T}$$

donde S_i es la superficie rectangular en cuyo centro se tomó la medida I_i . S_T es la superficie colectora total.

Con el objeto de eliminar parte de la radiación correspondiente a la zona del infrarrojo, se interpuso entre las dos lámparas de 2 kW cada una, y la superficie del colector, piezas rectangulares de vidrio para lograr la filtración correspondiente.

Siendo la insolación promedio de 0,62 kW/m² y considerando que el calor de vaporización del agua de la solución salina, para el rango de concentraciones de trabajo (6 - 8 %), fue de 590 kcal/kg, la velocidad de evaporación específica media de 0,33 l/hm² y definiendo el efecto de refrigeración como el producto de la pérdida de agua por el calor latente de vaporización del agua de la solución, se tiene un rendimiento global del colector-desorbedor, en las condiciones menciona-

das, con un valor del 37 %.

Debe tenerse en cuenta que, en condiciones reales de trabajo, la eficiencia depende de la insolación, la concentración de la solución y, en mucho menor grado, de las condiciones ambientales. Es así que la eficiencia promedio diaria dependería también de los factores mencionados⁶

Hollands⁶ menciona un rendimiento promedio diario del 17% para una unidad destiladora de soluciones de LiCl con una concentración de sal del 37,5 %. Collier⁵, a su vez, especifica para una unidad convencional de LiBr un rendimiento diario del 18%, mientras que otro autor, Baum (mencionado en el trabajo de Collier) muestra un rendimiento del 50% para el funcionamiento diario de una "pequeña" unidad usada para enfriar dos cuartos para laboratorio.

Balance térmico macroscópico

Teniendo en cuenta los datos experimentales y de dimensionamiento de la Tabla 1, el balance térmico se discrimina de la siguiente manera:

- a) Para el aire, con un gasto de 0,0067 kg/s, la cantidad de calor, por unidad de tiempo, es de 67,38 W. Esto corresponde a un 15,94% de la energía total (422,8 W).
- b) La radiación del vidrio superior es de 73,06 W, o sea el 17,28 %.
- c) La pérdida convectiva es de 62,20 W, es decir del 14,71 %.
- d) Pérdidas por la base y costados: 21,82 W, 5,16 %.
- e) El calor de vaporización del agua, según lo anterior, correspondería al 46,91 % del total. Comparando con el valor del rendimiento dado más arriba, el ajuste del balance tiene un error del 27 %.

Modelización del ensayo

Con el fin de obtener los parámetros físicos necesarios para el diseño de un prototipo a plena escala, se ha modelizado el ensayo descrito en la sección anterior.

La experimentación bajo radiación artificial constante, y la longitud pequeña del colector, simplifica la modelización, permitiendo adoptar un conjunto de hipótesis que hace atacable al problema analíticamente.

Hipótesis que se adoptan:

- 1) El fenómeno es estacionario. Esta es aceptable si no se considera la entrada en régimen, debido a que la radiación incidente es constante. En realidad existe una variación de la concentración,

pero es lo suficientemente lenta como para adoptar la hipótesis cuasiestacionaria del colector. La variación de concentración en el tanque se considera despreciable.

2) El gasto de solución es constante a lo largo del colector. Esto es aceptable porque la velocidad de evaporación es muy pequeña.

3) Una hipótesis muy importante es que la temperatura de la solución en el colector, que se indica con T , es constante. Ello es verificable experimentalmente (véase Fig. 7), siempre dentro del estado estacionario, y se entiende teóricamente debido a que la masa térmica del líquido que circula es grande frente a las cantidades de calor que se intercambian.

Esta hipótesis permite calcular la temperatura del aire, la del vidrio y la cantidad de agua evaporada, directamente a partir de T , como se verá más adelante.

La Fig. 7 muestra la variación temporal de las temperaturas en distintos puntos del colector-desorbedor, observándose claramente la separación entre el estado transitorio y el estacionario. En la Tabla 1 se especifican las temperaturas de trabajo en el estado estacionario.

La Fig. 5 muestra, por otra parte, la variación de la densidad de la solución (relativa a la del agua), tomada como variable independiente, versus el tiempo de funcionamiento del aparato tomado como variable independiente. La zona lineal indica el estado estacionario. La expresión analítica de la variación se halló para dos corridas que arrojaron una diferencia del 0.5 % en los coeficientes de ajuste.

En la figura 8 se detalla el estado transitorio, para el cual se halló la correlación exponencial que ajusta la curva. Como es de suponer, el enfriamiento del sistema, cuando se interrumpe la iluminación, también es exponencial, pero decreciente y, además, debido a la rápida respuesta a tal cambio se deduce la baja inercia térmica del sistema.

Refiriéndonos a la Fig. 9 y a la Tabla 2 que da la nomenclatura usada, tenemos:

Balance de energía

a) Para el elemento de solución:

$$I\alpha - U(T - T_w) - U_b(T - T_a) - U_v(T - t) - GC_p \frac{dT}{dx} - \lambda \frac{dm}{dx} = 0 \quad (1)$$

b) Para el de aire:

$$U (T_V - t) + U_w (T - t) - g c_p \frac{dt}{dx} = 0 \quad (2)$$

c) Para el elemento de vidrio:

$$U_v (T_v - t) + U_a (T_v - T_a) + U (T_v - T) - (1 - \alpha) I = 0 \quad (3)$$

Balance de masa

$$\frac{dm}{dx} = b h_d (w_s - w) \quad (4)$$

donde b es el ancho del colector y w_s es la humedad en la interfase solución-aire.

Para resolver el sistema se despeja T_v de (2) y sustituyendo en (3) se obtiene una ecuación diferencial ordinaria y lineal en t, si se supone conocido y constante al valor de T. Su solución, con la condición de que el aire entra a la temperatura ambiente, es:

$$t = T - (T_a - T - B/A) \exp A(x-L) + B/A \quad (5)$$

donde:

$$A = (U_w + U U_v / U_t + U_a U_v / U_t) / (g c_p)$$

$$B = U_v ((1 - \alpha) I - U_a (T - T_a)) / (g c_p U_t)$$

con $U_t = U + U_a + U_v$.

La ecuación para la variación de w se obtiene a partir de (4), con la condición de que la humedad inicial es la del aire ambiente:

$$w = w_s + (w_a - w_s) \exp(-h_d L/g) \quad (6)$$

Cálculos

Consultando la bibliografía especializada^{10, 11, 12}, los valores de los coeficientes de transferencia y demás constantes del modelo que se adoptaron fueron:

$$U_a = 5,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$U = 6,92 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$U_v = U_w = 6,27 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$\alpha = 0,74$$

$$g = 0,0067 \text{ kg/s}$$

$$h_d = 0,0068 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$w_s = 0,0345 \text{ kg/kg}$$

con los cuales:

- a) El valor de la temperatura del aire a la salida del colector es de 35,35 °C.
- b) El de la placa de vidrio (cubierta superior) en el mismo punto: 41,47 °C.
- c) La cantidad de agua evaporada: 0,43 l/hm².

Comparando estos resultados con los del ensayo, tenemos para los valores de temperatura un error del 7%, mientras que para la cantidad de agua evaporada el mismo es del 23 %.

4. Conclusiones

El funcionamiento del colector-desorbedor de líquido negro con fines a ser usado en el acondicionamiento de ambientes o el secado de productos agrícolas es de gran interés, especialmente cuando se lo compara con los usados para el enfriamiento por absorción convencional.

Entre las ventajas que encontramos, conviene señalar:

- 1) Se eliminan pérdidas de calor debido a que la energía es directamente absorbida por el líquido de trabajo sin necesidad de calentar ninguna estructura en el colector.
- 2) Como el sistema permite almacenar energía bajo la forma de solución absorbente concentrada, desaparecen las pérdidas térmicas debido al bombeo y almacenamiento.
- 3) La ausencia de partes metálicas tiene dos ventajas:
 - a) elimina los problemas de corrosión,
 - b) posibilita un menor costo de la instalación pues sólo se necesita vidrio y pegamento sintético (eventualmente se puede usar plástico).

5. Perspectivas futuras

Siguiendo la línea de los deshumidificadores líquidos (soluciones de CaCl₂), se aumentará la escala del prototipo presentado en este trabajo y se comenzará el estudio de los módulos necesarios para implementar el secado de aire (absorbedor, intercambiador de calor, etc.).

Paralelamente se estudiará la propuesta alternativa de los desecantes sólidos, tal como la sílica-gel, que trabajaría en forma similar a un acumulador de piedras en un circuito de aire caliente, produciendo el secado del aire en vez de calentarlo exclusivamente, o bien se incursionará en el estudio de los lechos fluidizados que permitirían, en forma muy sencilla, la regenera-

ción del agente desecante sólido, teniendo en cuenta el mejor contacto sólido-fluido causado por el movimiento de las partículas del lecho que se encuentran suspendidas por el mismo aire que se quiere secar.

6. Referencias

1. Saravia, L.; Fabris, A.; Guerrero, S.; Alanís, E.: "Secado de Tabaco con Energía Solar". 4ta. Reunión de Trabajo de ASADES, La Plata, 1978.
2. Lunde, P.: "Solar Dessicant Air Conditioning with Silica Gel", Proceedings of the Second Workshop on the Use of Solar Energy for the Cooling of Buildings. 1976.
3. Mullick; Gupta: "Solar Air Conditioning using absorbents". Proceedings of the Second Workshop on the Use of Solar Energy for the Cooling of Buildings, 1976.
4. Gupta, M.: "Solar Air Conditioning". Indian Institute of Technology, Madras, India. 1st. German Solar Energy Forum. 1977.
5. Collier, R. K.: "The Analysis and Simulation of an Open Cycle Absorption Refrigeration System". Los Alamos Scientific Laboratory.
6. Hollands, K. G. T.: "The Regeneration of Lithium Chloride Brine in a Solar Still, for Use in a Solar Air Conditioning System". Solar Energy 7, 39-43 (1963).
7. Mullick, S. C.; Gupta, M. C.: "Solar Desorption of Absorbent Solutions". Solar Energy 16, 19-24 (1974).
8. Minardi, J. E.; Chuang, H. N.: "Performance of a 'Black' Liquid Flat-Plate Collector", ISES Annual Meeting, Fort Collins, Colorado, 19-22 de Agosto, 1974.
9. Landstrom, D. K.: "Development of a Low-temperature, low-cost, Black-liquid Solar Collector", 3rd. Annual Solar Heating and Cooling R&D Contractor's Meeting, 1978.
10. Duffie, J.; Beckman, W.: "Solar Energy Thermal Processes", Wiley.
11. Isachenko, V.; Osipova, V.; Sukomel, A.: "Transmisión del Calor". Boixareu. 1973.
12. Hougen, O. A. et al., "Principios de los Procesos Químicos", Parre I, Reverté, 1976.

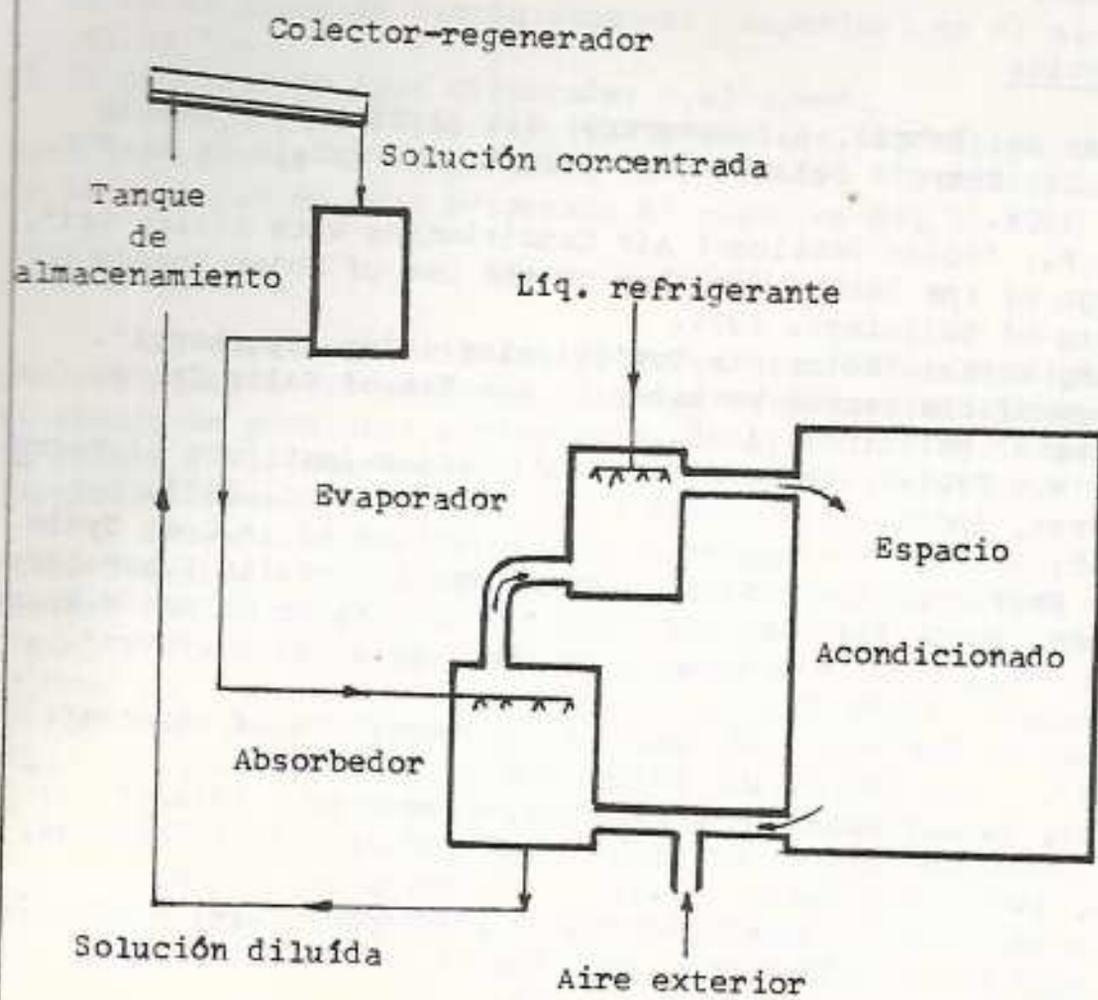


FIG. 1: Sistema solar para el acondicionamiento de ambientes.

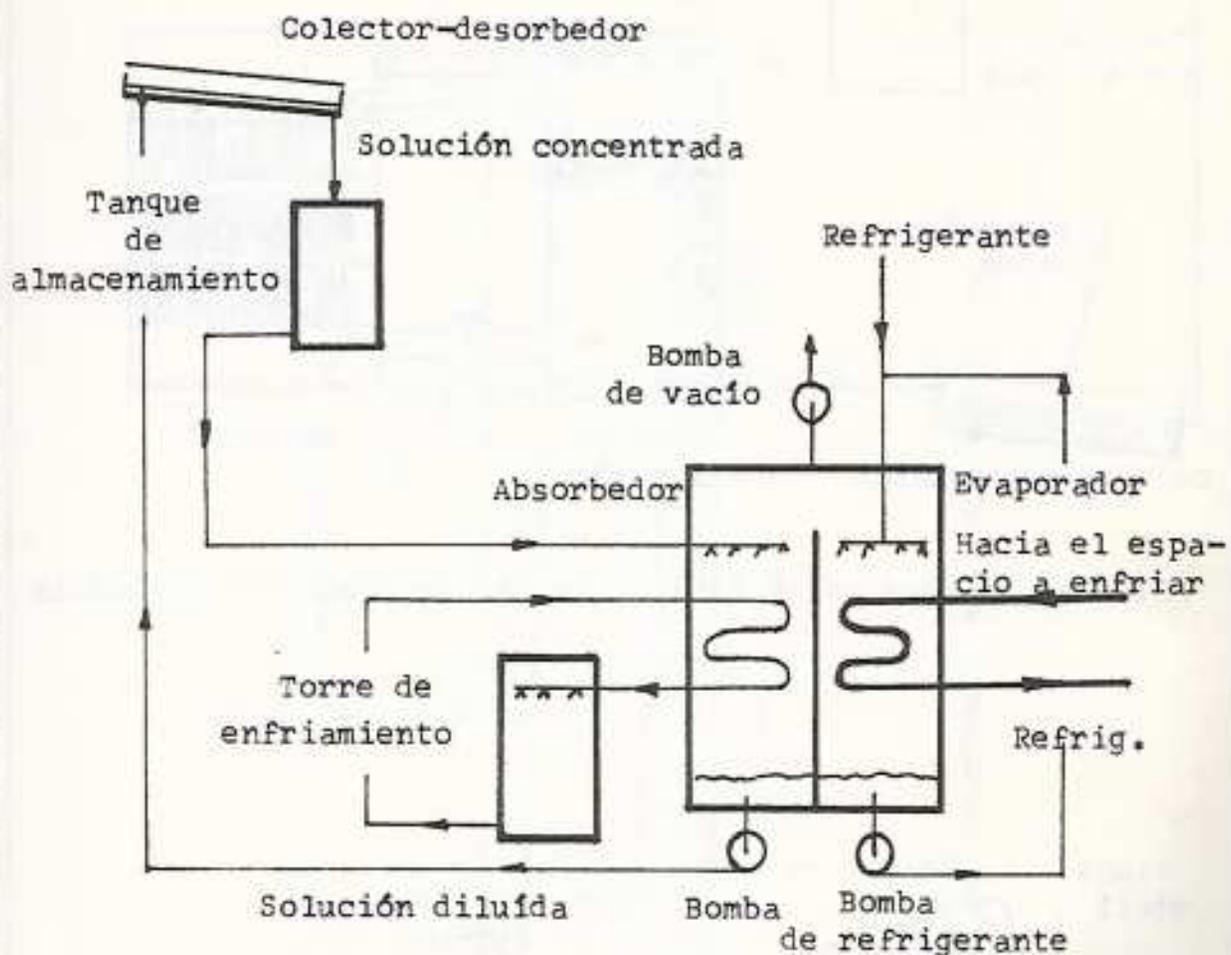


FIG. 2: Sistema alternativo para acondicionar-enfriar ambientes.

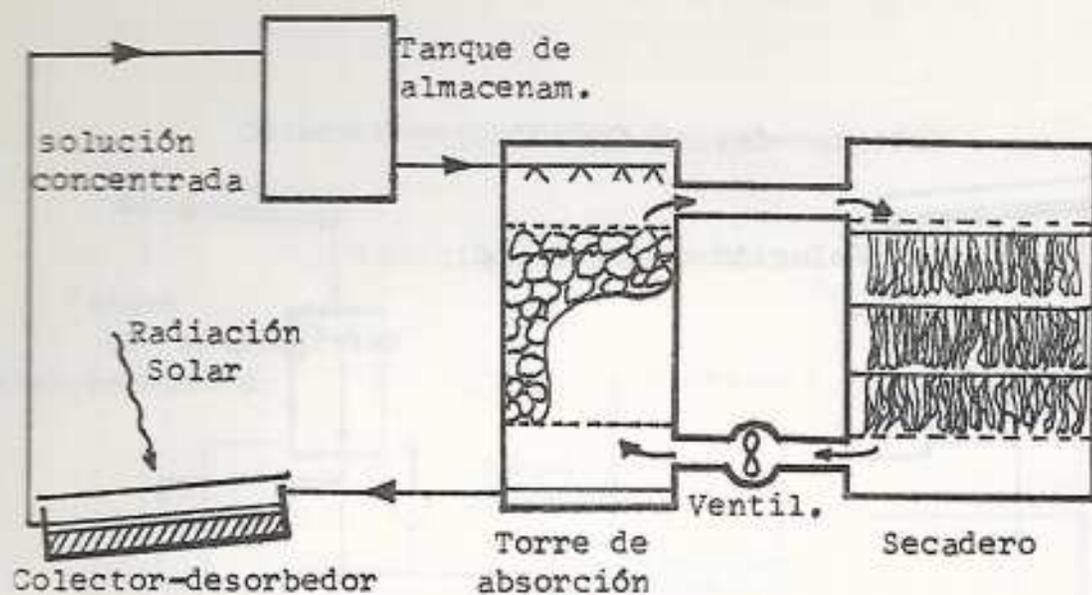


FIG. 3: Sistema solar para el secado de productos agrícolas

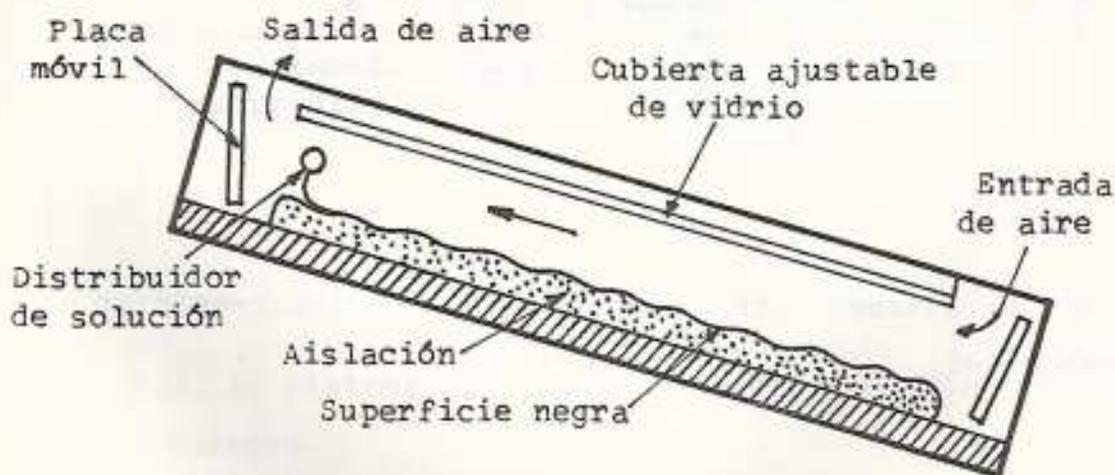


FIG. 3a: Colector-desorbedor de placa corrugada

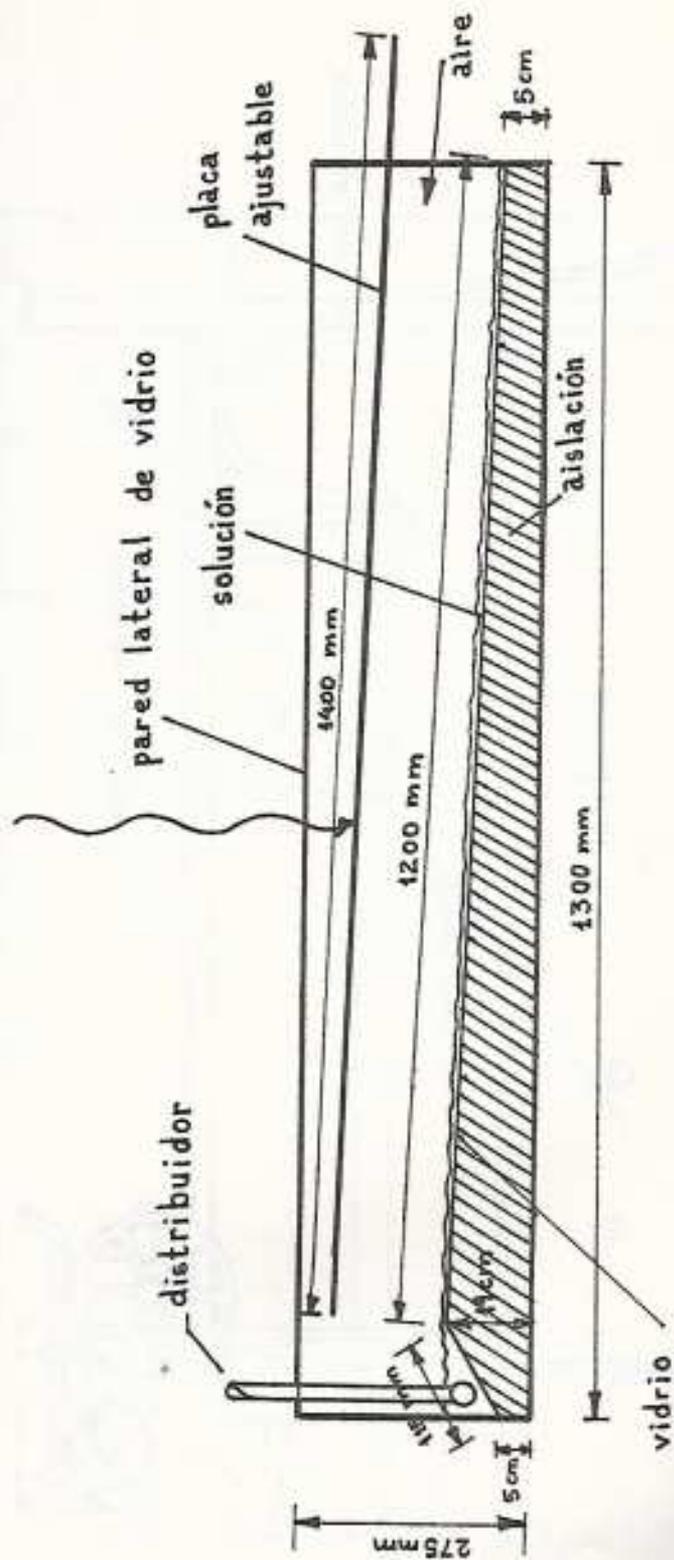


FIG. 4: Esquema del colector-desorbedor a escala reducida.

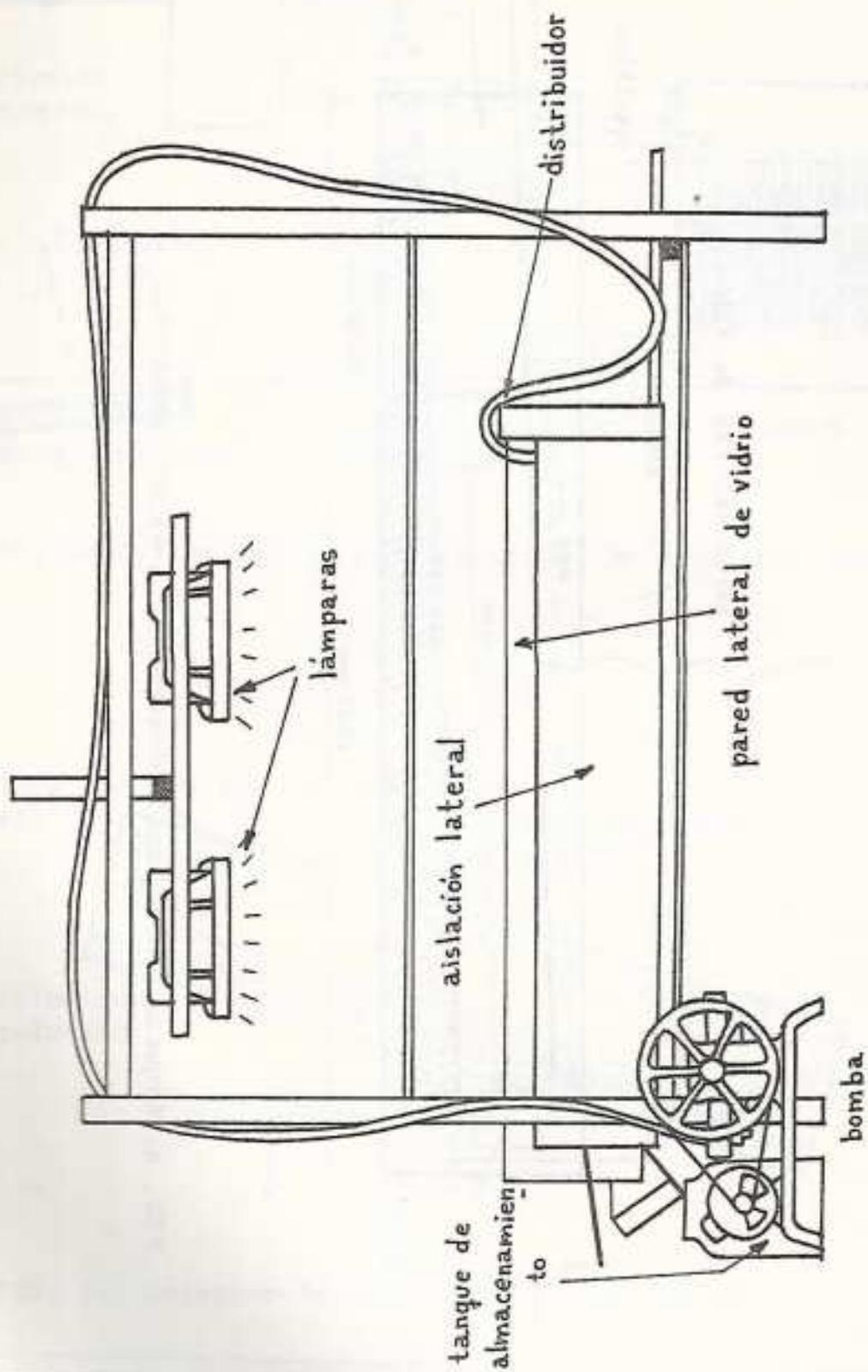


FIG.5: Dispositivo experimental

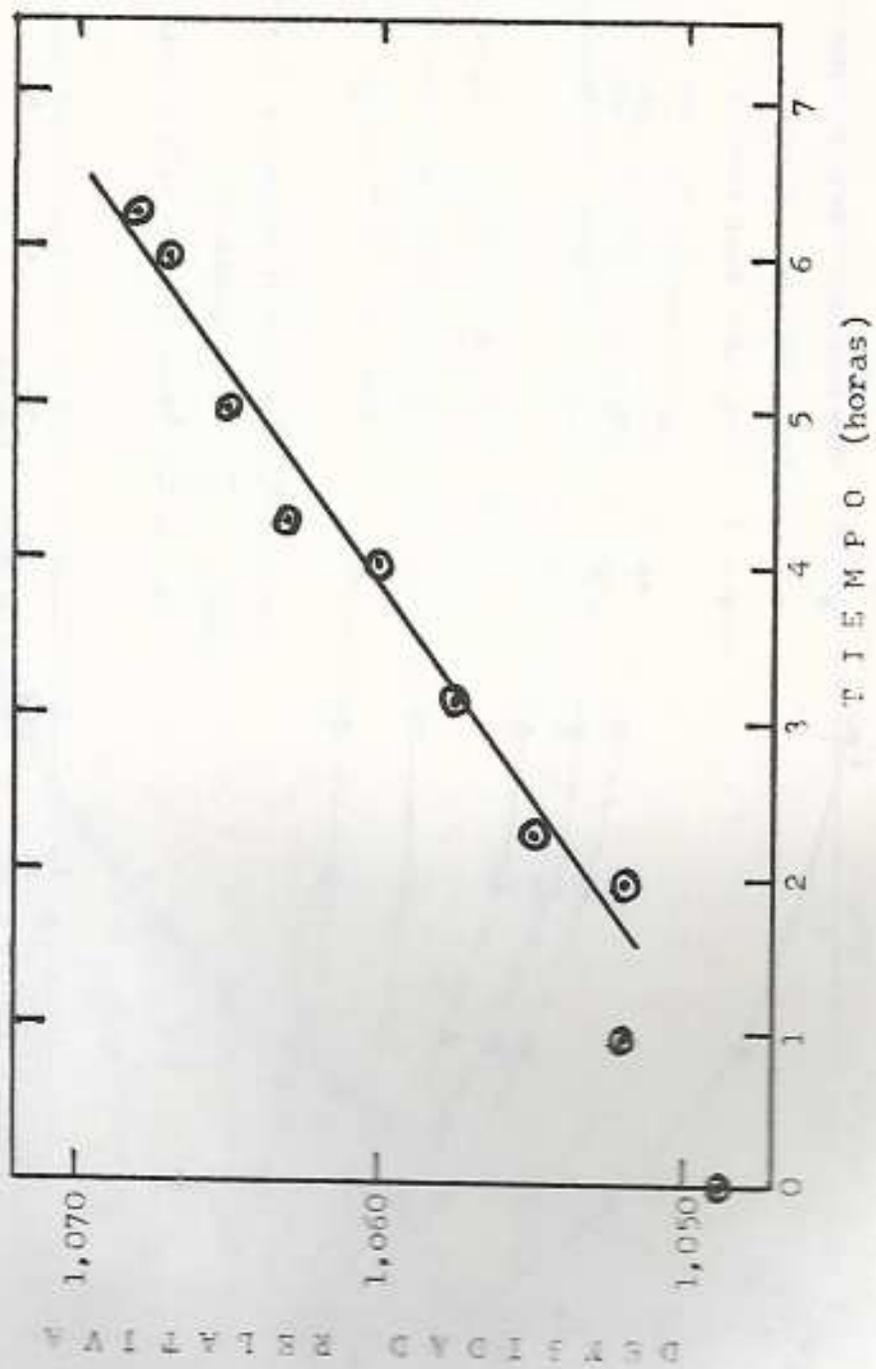


FIG. 5: Curva experimental densidad versus tiempo de evaporación.

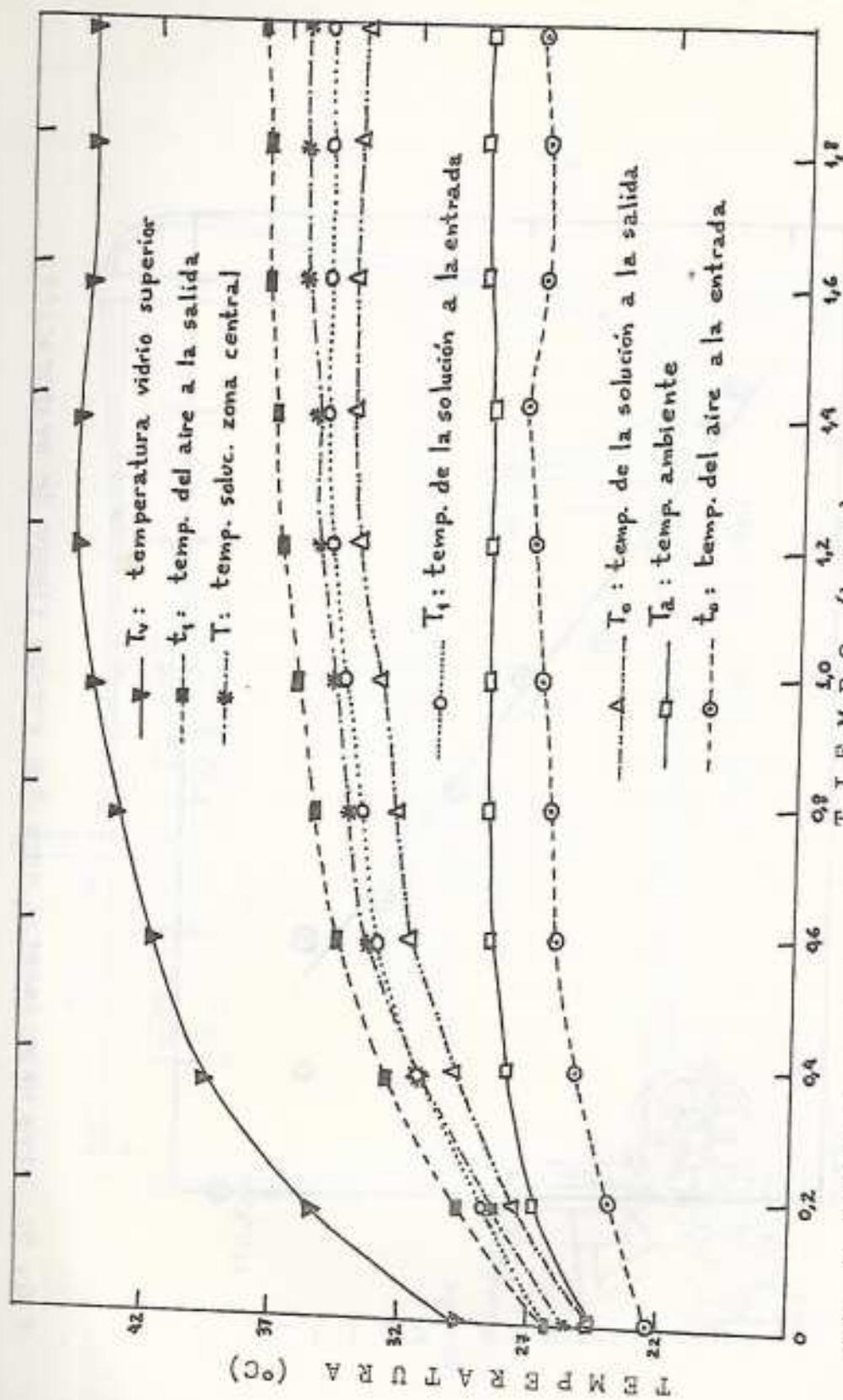


FIG. 7: Curvas experimentales que muestran la variación temporal de las temperaturas del líquido, aire y placa del colector

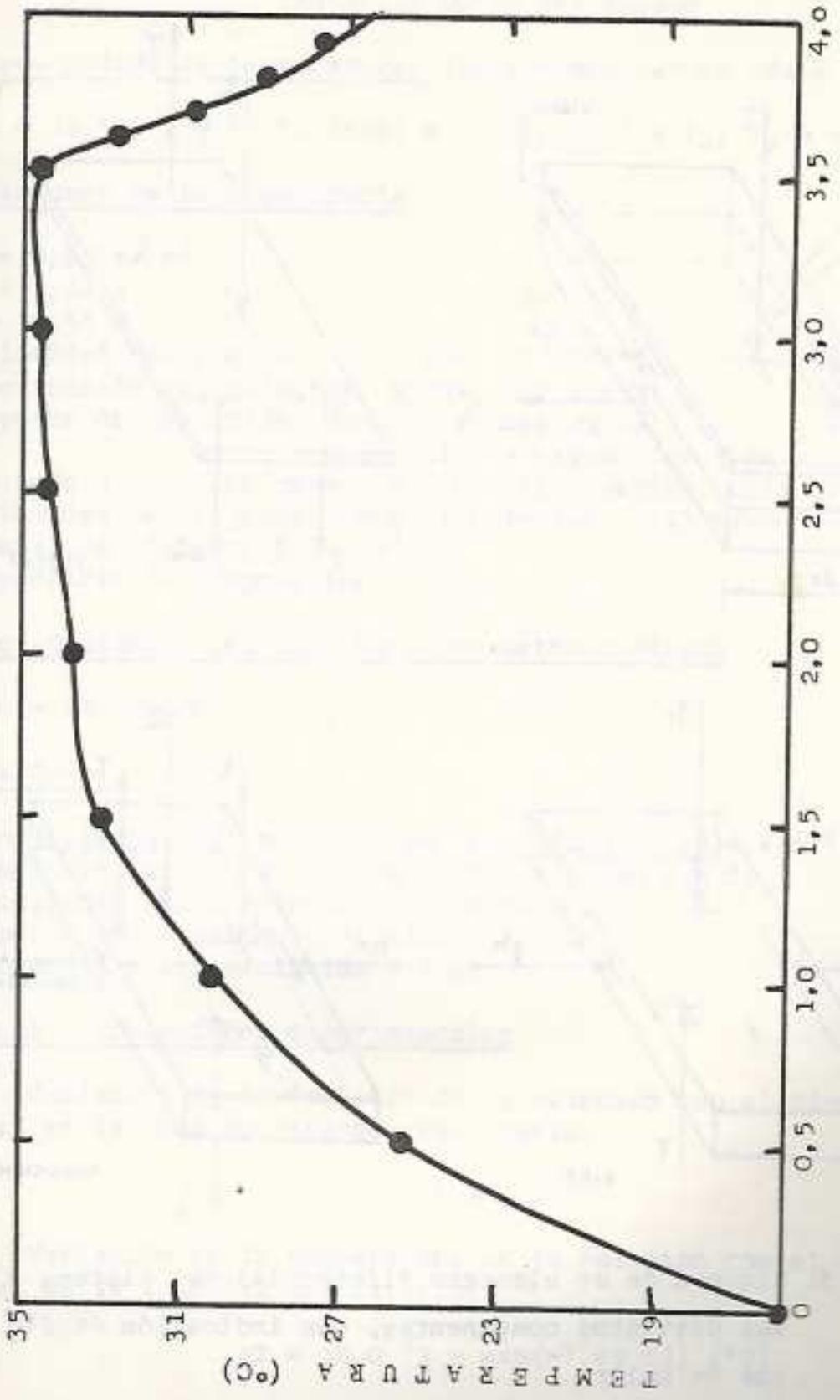


FIG. 8: Estado transitorio de la temperatura del líquido colector y respuesta del sistema a la interrupción de iluminación.

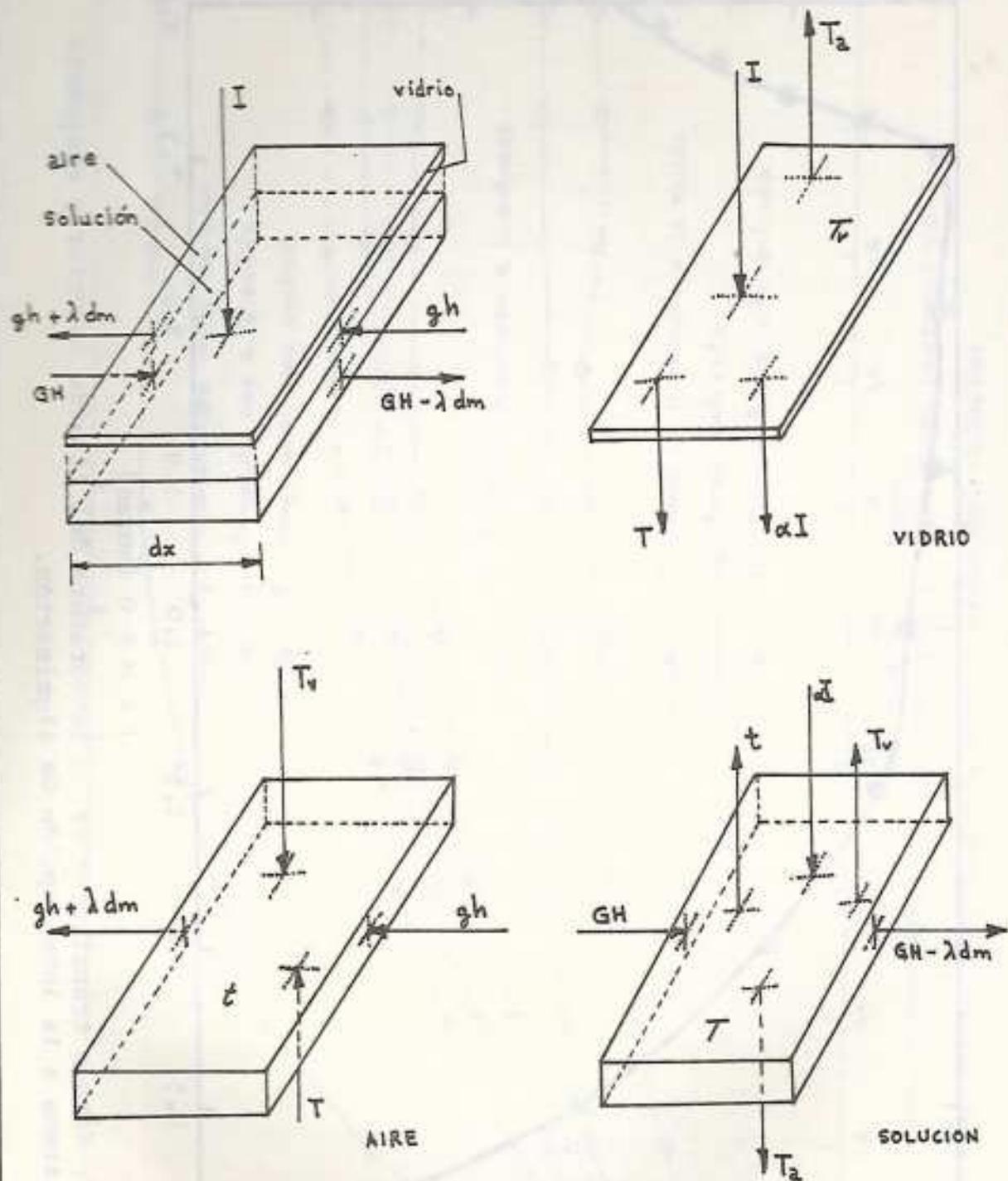


FIG.9: Esquema de un elemento diferencial del sistema y sus distintos componentes, con indicación de flujos de calor

TABLA 1 : Datos del Ensayo

Valores medios de temperaturas (para nomenclatura véase tabla 2)

$$T_a = 28 \text{ }^\circ\text{C}, T = 35 \text{ }^\circ\text{C}, t(0) = 38 \text{ }^\circ\text{C}, t(L) = T_a, T_v = 44 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Condiciones de la experiencia

$$I = 0,62 \text{ kW/m}^2$$

$$L = 1,24 \text{ m}$$

$$b = 0,55 \text{ m}$$

Velocidad del viento: $v = 0 \text{ m/s}$

Inclinación del colector: aprox. horizontal

Espesor de aislación: lana de vidrio: 2 cm

poliestireno expandido: 5 cm

Velocidad del aire húmedo dentro del colector: 0,15 m/s

Velocidad del líquido sobre el colector: 0,13 m/s

Caudal de líquido: 35,4 cm³/s

Superficie de evaporación: 0,68 m²

Costo aproximado del colector, por metro cuadrado

$$110 - 140 \text{ U\$S/m}^2$$

Otros datos

Conductividad del poliestireno expandido = 0,034 W/m °C

Conductividad de la lana de vidrio = 0,040 W/m °C

Emisividad de la solución coloreada = 0,94

Espesor de la película líquida = 1,5 mm

Distancia vidrio-solución = 7 cm

Algunas correlaciones experimentales

Variación de la densidad de la solución con el tiempo (en horas) en la zona de estado estacionario:

$$D = 0,003 t + 1,049$$

Variación de la temperatura de la solución con el tiempo en horas, en la zona del transitorio:

$$\Delta T = 19,0 (1 - \exp(-1,49 t)) \text{ (}^\circ\text{C)}$$

TABLA 2: Nomenclatura

Lista de variables del modelo analítico del regenerador solar.

Temperaturas ($^{\circ}\text{K}$)

T: de la solución en un punto x
 t: del aire en un punto x
 T_v : del vidrio en un punto x
 T_a : temperatura ambiente

Coefficientes de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)

U_a : entre vidrio y ambiente
 U_v : vidrio y aire
 U_w : solución y aire
 U_b : solución y ambiente
 U: por radiación entre vidrio y solución

Gastos, masas y concentraciones

G: gasto de solución (kg/sm)*
 g: gasto de aire (kg/sm)
 w: kg agua/kg aire seco en el aire de circulación
 w_a : kg agua/kg aire seco en aire ambiente
 m: cantidad de agua evaporada hasta la distancia x (kg/sm)*

Otras variables

L: largo del colector (m)
 x: coordenada a lo largo del colector (m)
 I: radiación (W/m^2)
 α : coeficiente de absorción de la radiación en el vidrio
 λ : calor de vaporización del agua para la solución
 C_p : calor específico de la solución ($\text{W}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
 C_p : calor específico del aire
 P: presión parcial del agua de la solución (N/m^2)
 p: presión parcial del vapor del agua en el aire
 h_e : coeficiente de evaporación ($\text{kg}/(\text{N}/\text{m}^2)\text{m}^2$)

(*) Magnitudes referidas a la unidad de ancho del colector