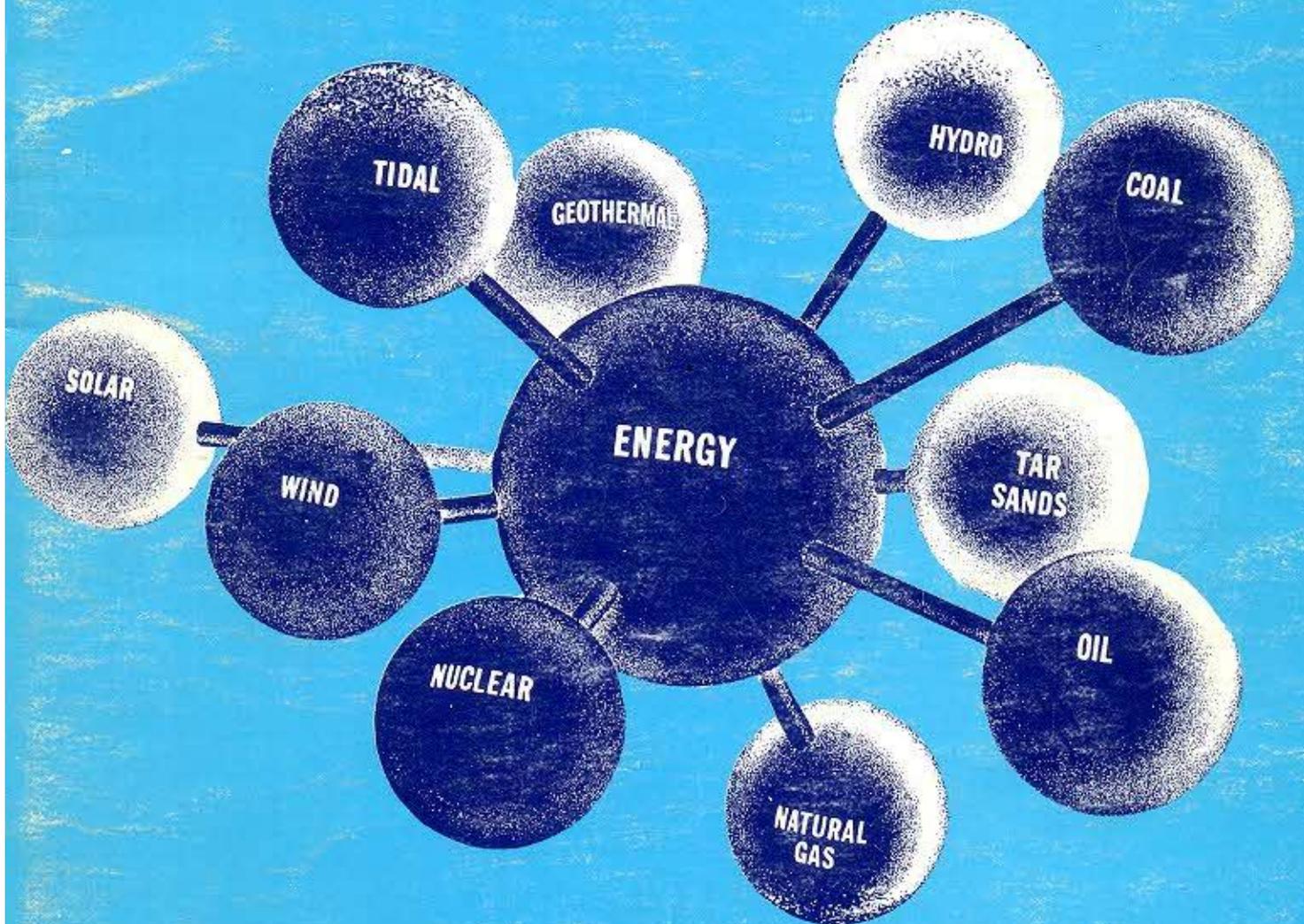


ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA

SECRETARIA PERMANENTE

BOLETIN ENERGETICO No. 9

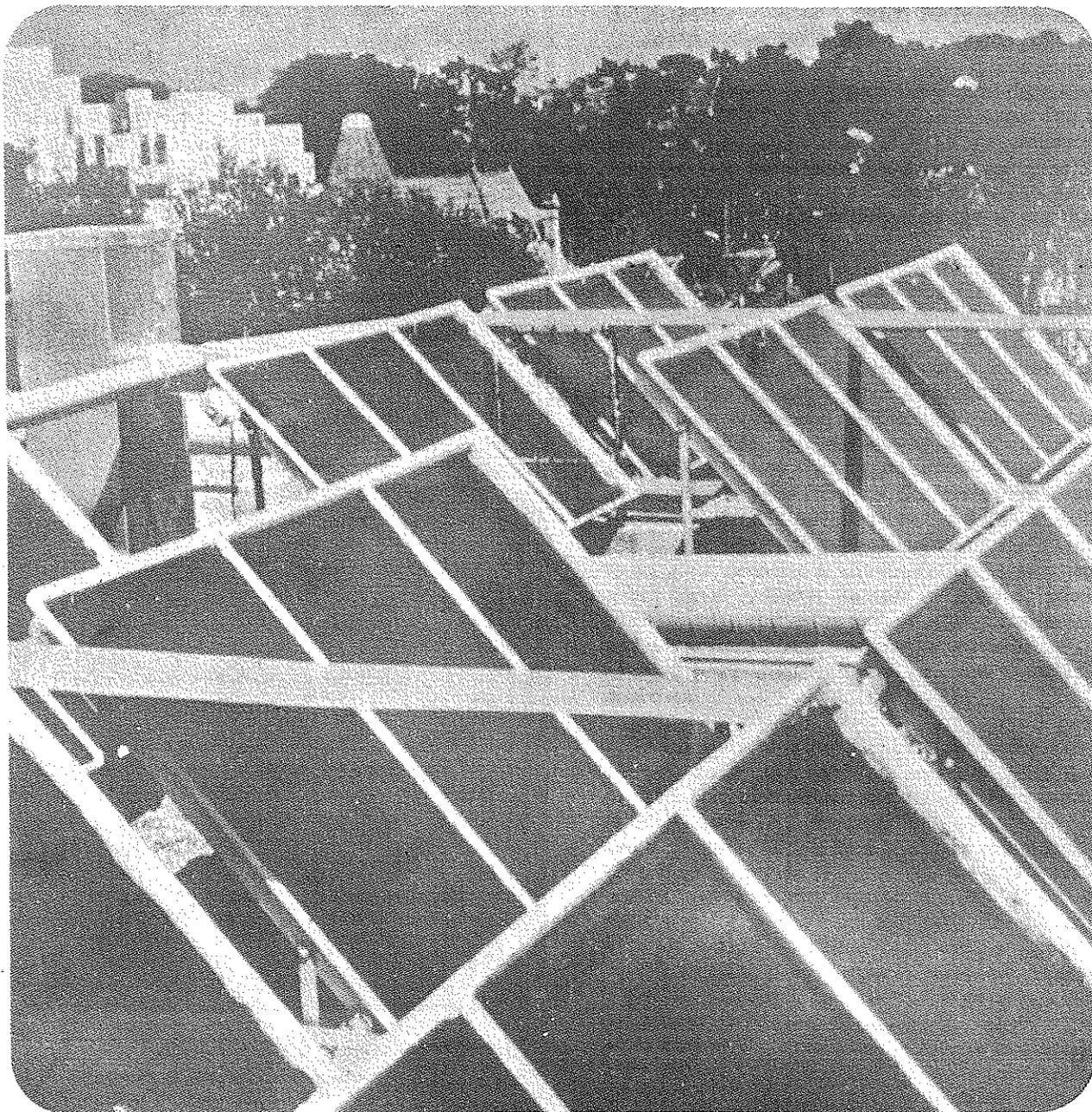
OCTUBRE/DICIEMBRE 1978



DEPARTAMENTO DE INFORMACION Y ESTADISTICA

México

Aplicaciones a Baja Temperatura de la Energía Solar



GUSTAVO BEST BROWN *
JOSE LUIS FERNANDEZ ZAYAS **

MEXICO: APPLICATIONS AT LOW
TEMPERATURE OF THE SOLAR ENERGY

The growing demand of low temperature solar systems has given as a result a great research activity and technical development in many Universities, polytechnics and research centers of Mexico. In the Research Center of Materials and in the Engineering Institute of the Autonomous National University of Mexico (UNAM) studies are being performed on this new energy source since a few years ago. Part of this work is related to the activities developed in the knowledge of flat plate collectors, for domestic use, over economic feasibility of the solar heating; selective surfaces; refrigeration and air conditioning solar and the solar sun-dried of grains.

* Centro de Investigación de Materiales, UNAM.
** Instituto de Ingeniería, UNAM.

La energía solar ha sido especialmente útil al hombre como forma alternativa de energía térmica para efectuar un proceso, en situaciones donde las temperaturas no suelen exceder 100°C. Ejemplos de aplicaciones son los calentadores solares de agua para uso doméstico, los refrigeradores operados por la energía del Sol, los secadores de granos y de productos industriales y los sistemas de acondicionamiento ambiental. La característica común de estos sistemas es que los aparatos usados para atrapar la energía del Sol, llamados captadores o colectores solares, son planos y tienen una posición invariante.

La creciente demanda de sistemas solares de baja temperatura ha dado por resultado una gran actividad de investigación y de desarrollo tecnológico en muchas universidades, politécnicos y centros de investigación de nuestro país. En el Centro de Investigación de Materiales y en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se iniciaron los estudios de esta nueva fuente energética hace ya varios años, pero varias otras dependencias muestran ahora gran interés en el tema. Con el propósito de proporcionar al lector un panorama del estado de entendimiento del tema, así como de la actividad de investigación del país, se han seleccionado algunos trabajos relevantes que se exponen.

LOS CAPTADORES SOLARES PLANOS

La energía radiante proveniente del Sol puede transformarse en energía térmica si se le hace incidir sobre una superficie capaz de absorber parte de ella. A mayor capacidad de absorción, o absorptividad, la transformación será más efectiva. De este modo, la superficie aumentará su temperatura en función de la cantidad de calor atrapado. Conforme la temperatura aumenta, la superficie empezará a perder calor por conducción, por convección al medio que la rodea y por radiación al ambiente. La capacidad para emitir calor radiante, llamada emisividad, puede inhibirse para que esa superficie alcance temperaturas más elevadas. A superficies cuya emisividad no es igual a su absorptividad se las llama superficies selectivas.

El calor atrapado por la superficie puede transferirse a un líquido o a un gas para calentarlos. Así, se puede calentar agua para uso doméstico empleando la misma fuerza de flotación del agua caliente con respecto al agua fría para hacerla circular por la superficie citada; también se puede calentar aire movido por un ventilador para efectuar procesos de secado de granos, e incluso pueden calentarse líquidos con propiedades especiales para accionar sistemas de refrigeración, plantas generadoras de electricidad y bombas para riego. La construcción de un captador solar plano consta también de una caja para evitar que el viento enfríe la superficie que absorbe la radiación solar. Esta caja tiene una tapa o cubierta transparente de plástico o vidrio, que forma el efecto de "inverna-

dero" al impedir la rerradiación de la superficie de calentamiento. Un captador plano típico se ilustra en la figura 1.

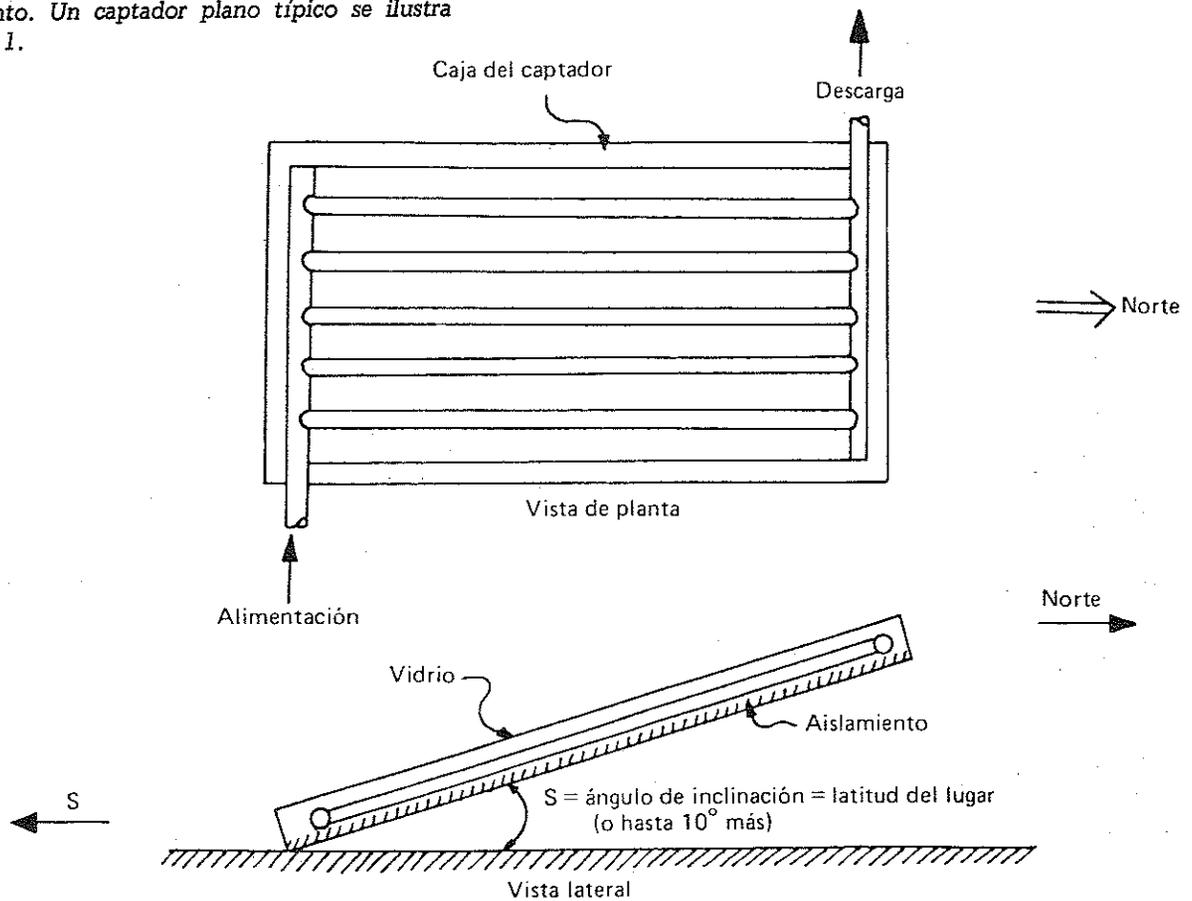


Figura 1. Esquema de un captador solar plano típico.

CALENTADORES SOLARES PARA USO DOMESTICO

La producción comercial de calentadores solares para agua de uso doméstico (CSAD) se inició en Guadalajara en 1942, y hacia finales de 1977 ya había más de 6.000 unidades instaladas y funcionando. Hay en el país no menos de 20 fabricantes registrados que abastecen un mercado rápidamente en crecimiento.

El calentador solar típico tiene una capacidad de 200 litros, suficiente para cinco personas, y tiene un precio promedio de \$ 8.600. La construcción más común de un CSAD con circulación por convección natural se muestra en el aparato de laboratorio de la figura 2, con un captador de aproximadamente 1 m de base por 2 m de largo. Este aparato puede producir el calentamiento de 100 litros de agua cada día, desde unos 15° C hasta unos 40° C como mínimo, por cada metro cuadrado de superficie del captador.

Los dos objetivos del proyecto de investigación que actualmente se lleva a cabo son: mejorar la eficiencia del CSAD con el fin de abatir el costo y el espacio utilizado y reducir las dimensiones generales del conjunto, reduciendo su exposición al viento y

mejorándolo estéticamente.

Para reducir la altura global del sistema se ensaya la "inversión" de la geometría del captador, haciéndolo de 2 m de ancho por 1 m de largo, como se muestra en la figura 3. La altura máxima del sistema se abate, así, de 2.00 m a 0.75 m, reduciéndose el área expuesta al viento. La limitante más importante de este diseño es la capacidad de estratificación del agua en el tanque, indispensable tanto para hacer que el agua circule sin necesidad de una bomba como para poder extraer agua caliente del tanque sin que se mezcle con el líquido frío de alimentación al sistema. Esta estratificación se estudia en tanques transparentes como el ilustrado en la figura 4.

Las propiedades de absorción y de emisión de energía radiante de la superficie del captador son importantes, como se menciona en la sección de superficies selectivas. Además de esos trabajos de investigación, se ensayan continuamente acabados comerciales (pinturas) en pruebas comparativas de absorción y emitancia. Se tiene así un conocimiento actualizado de los acabados disponibles comercialmente en el mercado mexicano (figura 5).

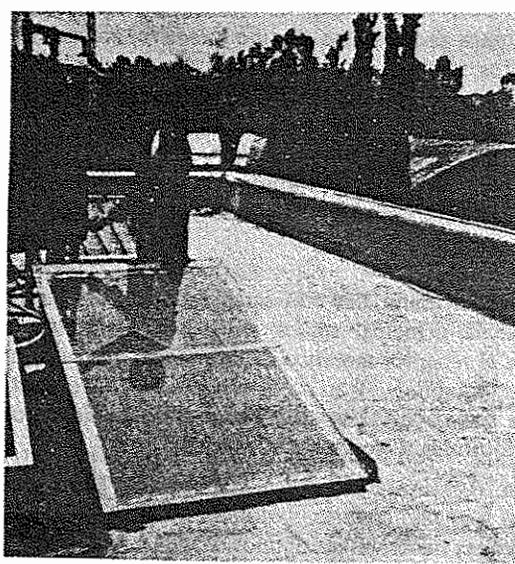


Figura 2. Calentador solar de agua por circulación de termosifón. El tanque térmico de almacenamiento se localiza en la parte superior izquierda de la figura. El tanque tiene una capacidad de 200 litros y el captador tiene 2 m² de área efectiva.

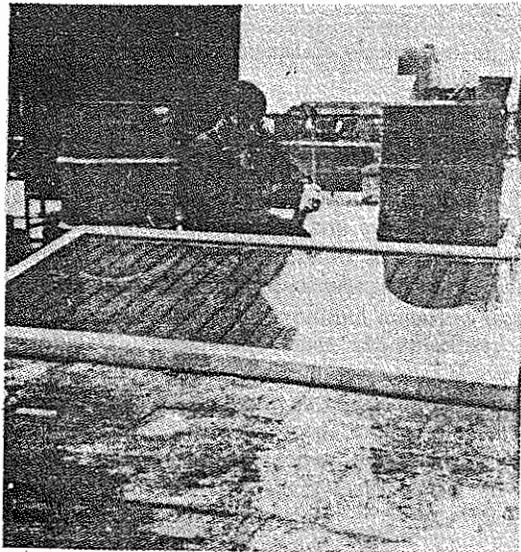


Figura 3. Captador solar plano para bajas temperaturas, donde la geometría se ha invertido respecto de la disposición del captador de la figura anterior.

FACTIBILIDAD ECONOMICA DEL CALENTAMIENTO SOLAR

Aunque se ha demostrado repetidamente la factibilidad técnica del calentamiento solar de agua, así como de aire para usos industriales y para calefacción, son consideraciones de índole económica las que gobiernan la decisión de adoptarlo o rechazarlo. Dadas sus características técnicas y su alto costo inicial, las comparaciones económicas suelen hacerse entre el costo inicial del sistema solar y el del combustible, más el mantenimiento de un sistema convencional.

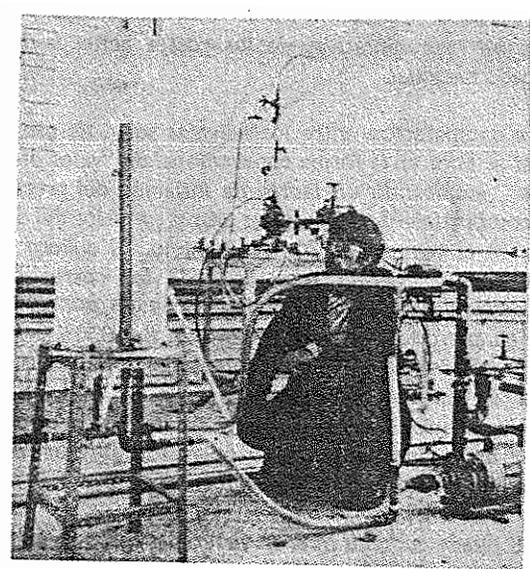


Figura 4. El tanque transparente de la figura permite estudiar la estratificación del agua en tanques térmicos. Variando el gasto de la bomba se simula el flujo real en un calentador solar.

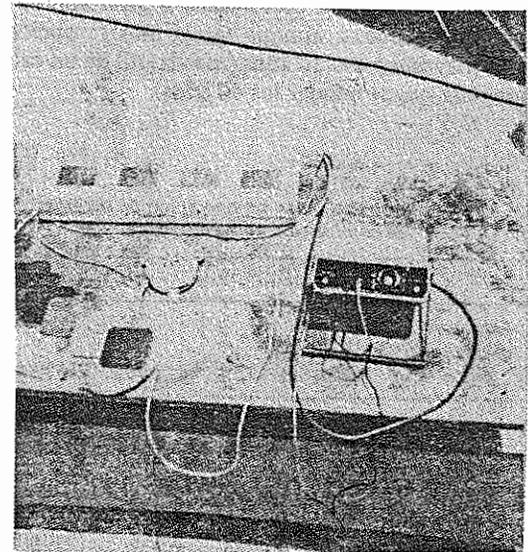


Figura 5. La caja blanca con compartimientos de la parte superior izquierda permite probar cuatro muestras a la vez. Estas muestras se presentan como se advierte en la parte central izquierda de la fotografía. Los instrumentos de medición se pueden apreciar en la misma ilustración.

Con los costos actuales del diesel (650 pesos/m³) y del gas LP (2.20 pesos/kg), se calcula el costo de kW-h térmico en 8 centavos para el diesel y en 18 centavos para el gas LP. Dado que el servicio mínimo que se espera de un calentador solar de agua es de 40°C, en 200 litros de capacidad cada día (aprox. 6 kW-h/día), entonces debe compararse el costo inicial de un calentador solar, de unos \$8.600, con el costo del combustible anterior más el de mantenimiento, que se ha calculado en \$3.320 por año en un calentador de diesel y en \$770/año en calentadores de gas. Estas cifras no son aplicables a todos los casos, pero pa-

recen ser representativas de los costos actuales del mercado nacional.

La comparación entre los sistemas solar, de gas y diesel se hace en la forma convencional de "valor presente", empleando un factor de inflación del precio del combustible de 10 % por año y un valor del dinero en el tiempo de 20 % por año. El cuadro 1 muestra los "valores presentes" de los costos de operación de los sistemas de diesel y de gas, comparables en periodos de pago de 2, 4, 6, 8, 10, 15 y 20 años, con los \$8.600 de un calentador solar. La eficacia de un sistema diesel no suele ser inferior a 75 %, mientras que se ha encontrado que un calentador de gas de depósito, de operación automática, suele tener eficacia de 40 % o menores.

Se puede concluir que, en virtud del costo de mantenimiento, la opción del sistema de gas es mejor que la de diesel. Además, un calentador solar se paga a sí mismo en no menos de ocho años, comparado con el de gas. Esto es, las condiciones económicas por sí mismas no justifican a corto plazo la selección de los calentadores solares, aunque sea la mejor opción a plazos mayores a 8 o 10 años (la vida útil de un calentador solar puede rebasar los 40 años).

CUADRO 1

Valor presente del costo de operación de sistemas de combustión convencionales

n (años)	Factor de valor pre- sente	Diesel		Gas		
		$\eta = 100\%$	$\eta = 75\%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 75\%$	$\eta = 40\%$
2	1.5972	5 579	5 672	1 853	2 060	2 787
4	2.9393	10 267	10 437	3 410	3 792	5 129
6	4.0671	14 206	14 442	4 718	5 247	7 097
8	5.0147	17 516	17 807	5 817	6 469	8 751
10	5.8109	20 297	20 635	6 741	7 496	10 140
15	7.2887	25 459	25 882	8 455	9 402	12 719
20	8.2452	28 800	29 279	8 564	10 636	14 388

Por otro lado, las consideraciones técnicas, termodinámicas, ecológicas y de interés general por el ahorro energético favorecen la creciente implantación de estos calentadores. Es de esperar que la actualización del precio de los combustibles, junto con la depuración de los diseños solares, den por resultado la aceptación creciente de los calentadores solares de agua, ya que en otras partes del mundo han sido los primeros sistemas de utilización de la energía solar que han ganado la preferencia de la sociedad.

SUPERFICIES SELECTIVAS

La eficiencia de los captadores solares depende, entre otros parámetros, de las propiedades ópticas de la placa o tubo absorbedor de la radiación solar. Por lo tanto, es deseable que la superficie de absor-

ción tenga propiedades de tipo selectivo, consistentes en altos valores de absorptividad en el rango visible (0.3 - 3u) y baja emisividad en el infrarrojo. Uno de los medios de lograr este tipo de selectividad es recubrir la placa o tubo metálico con una película de elevado coeficiente de absorción para el intervalo de longitudes de onda del visible y con transparencia en el infrarrojo.

Existen materiales con estas propiedades, pero el problema principal radica en lograr su deposición sobre el receptor metálico de tal manera que se garantice su estabilidad y su costeabilidad. Para este efecto, se ha trabajado varios años sobre métodos de deposición química y electroquímica de CrO_3 sobre cobre y hierro. Asimismo, se ha depositado Cu O y Cu S sobre cobre y se han tratado el aluminio y el hierro para lograr capas selectivas de algunos óxidos.

El desarrollo experimental se ha enfocado en la preparación de muestras bajo un estricto control de diversos procedimientos de deposición y en la medición de las propiedades ópticas resultantes mediante

el uso de un equipo construido expresamente para este propósito.

En la figura 8 se muestra un esquema del aparato desarrollado, el cual se ilustra en la fotografía de la figura 9. La muestra, ubicada en un recipiente al vacío, se calienta mediante una lámpara de xenón; el termopar colocado en la muestra permite medir tanto el régimen de calentamiento como el de enfriamiento, al apagar la fuente luminosa. La figura 10 muestra la curva resultante de estas operaciones. Debido al vacío y a la falta de contacto físico de la muestra con materiales conductores, la curva representa la ganancia neta de calor por absorción y la pérdida de calor por emisión. Valores clásicos de absorptividad y emisividad de las muestras preparadas son $a = 0.79$ y $e = 0.2$.

Con base en estos resultados se ha procedido a la deposición de CrO_3 sobre placas de cobre de dimensiones adecuadas para captadores de interés práctico. Es obvio que la utilidad de este tipo de superficies selectivas es mayor cuando la temperatura de operación de los captadores es elevada, o sea, de 80°C en adelante.

FIBRAS NATURALES EN CAPTADORES SOLARES

Una manera de abatir los costos de los captadores solares es encontrar materiales de construcción de bajo precio. Con este objetivo se está trabajando en el desarrollo de materiales que utilizan fibras naturales de desechos agrícolas (bagazo de caña, fibra de coco, fibras cortas del henequén, cacao, etc). El aglutinamiento de estos desperdicios celulósicos mediante el uso de polietileno de desecho permite obtener mate-

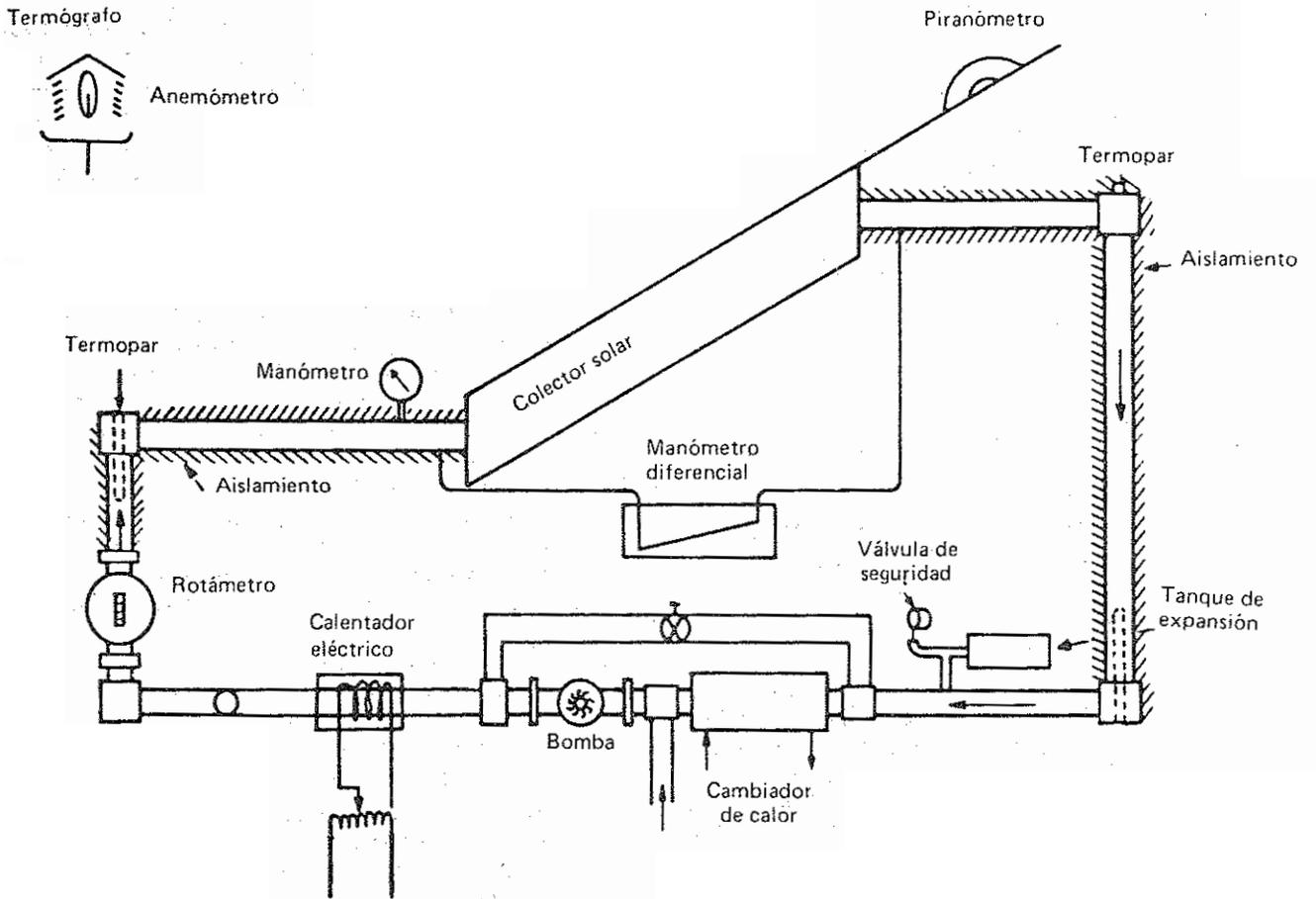


Figura 6. Diagrama del equipo de prueba para colectores solares.

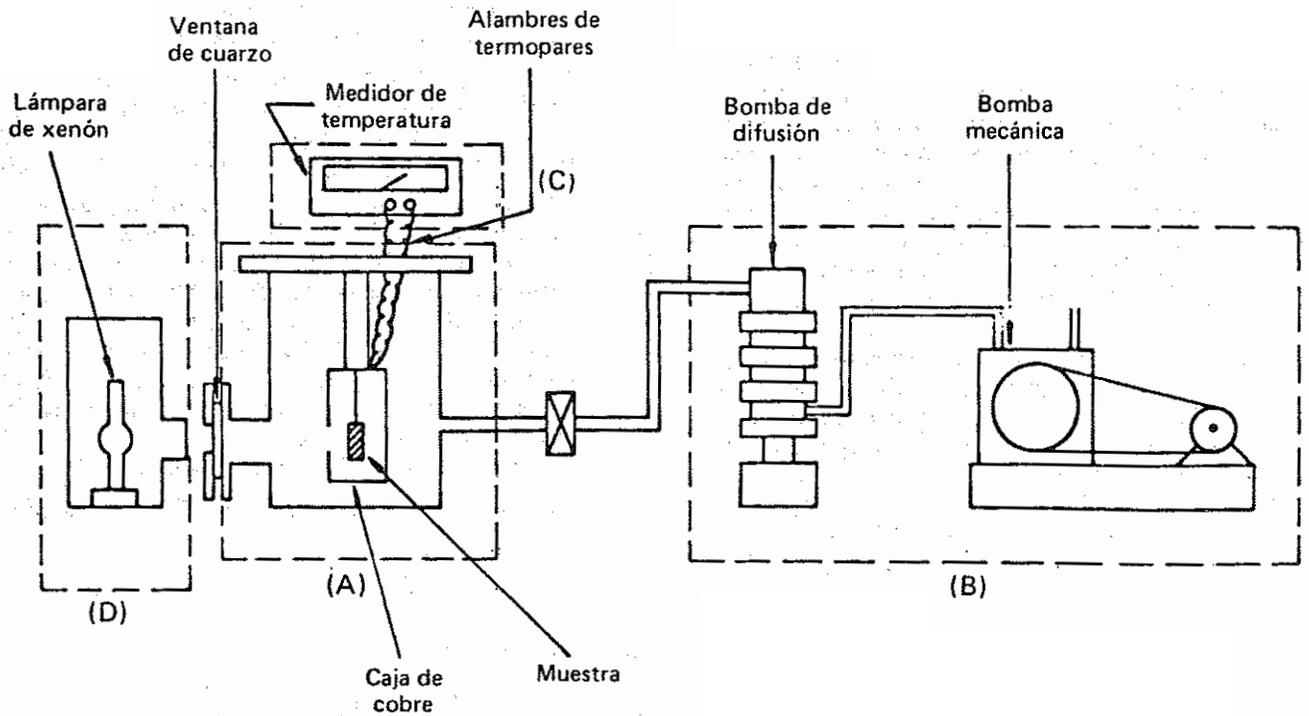


Figura 8. Esquema del aparato de medición.

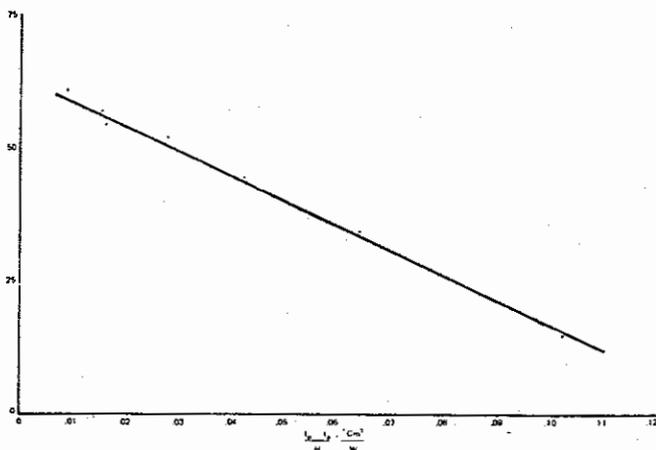


Figura 7. Curva de eficiencia de un captador solar típico.

riales de alta resistencia a efectos de intemperismo, contar con un material a un tiempo estructural y aislante y eliminar la caja, usualmente metálica, que conforma al captador solar.

La investigación en curso está dirigida hacia el establecimiento de las proporciones adecuadas de los componentes fibra-resina y hacia la caracterización mecánica y térmica del material final. La tecnología de fabricación en serie y en forma modular se está desarrollando. La figura 11 muestra una fotografía de este tipo de sistema.

REFRIGERACION Y AIRE ACONDICIONADO SOLARES

La conservación de productos perecederos es una necesidad primordial para el desarrollo de cualquier sociedad. En el caso de México, el hecho de que existan más de 90.000 poblaciones pesqueras o agrícolas con menos de 2.500 habitantes, hace que la "cadena del frío" (preservación y conservación de un producto desde su origen hasta el consumidor) sea muy difícil de implantar por falta de locales adecuados, ya sea en el lugar de origen o en algún centro distribuidor urbano o semiurbano. Esta situación trae como grave consecuencia una pérdida enorme tanto en la calidad como en la cantidad de producto útil,

lo que afecta fuertemente a la economía y salud de cientos de miles de personas. Los sistemas comerciales tradicionales empleados para obtener refrigeración involucran procesos mecánicos operados mediante fuentes convencionales de energía (electricidad, diesel, etc.). El costo, mantenimiento y operación de estos equipos caen normalmente fuera de las posibilidades tanto económicas como técnicas de muchas poblaciones rurales. Es necesario desarrollar equipos de bajo costo, de operación y mantenimiento sencillos y, especialmente, de áreas alejadas de recursos energéticos convencionales, que utilicen otras formas de energía.

El ciclo de absorción

La obtención de frío a partir de la energía solar es una de las aplicaciones más prometedoras de esta fuente energética. El proceso utilizado es el de refrigeración por absorción, el cual ha sido conocido y empleado desde principios de este siglo mediante fuentes convencionales de calor, tales como combustibles líquidos y gaseosos, resistencias eléctricas y aún fuentes térmicas industriales residuales (vapor de baja calidad, gases de combustión, etc.).

En la figura 12 se muestran en forma esquemática el ciclo de absorción empleado para obtener enfriamiento a partir de una fuente térmica. El esquema representa un sistema de absorción de operación continua, es decir, en el cual la producción de frío es simultánea a la utilización de la fuente térmica. Existen sistemas de operación intermitentes, los cuales no se discutirán en este trabajo. Es obvio que en ambos sistemas, a menos de que se provean sistemas de almacenamiento, su operación será periódica, es decir, sólo operarán los sistemas durante el día solar.

Existen varias docenas de mezclas que pueden emplearse en los ciclos de absorción. Para describir el ciclo mostrado en la figura 12 se supondrá que el sistema opera con una mezcla absorbente-refrigerante de H_2O-NH_3 . El ciclo consta de cinco componentes principales: generador (G), condensador (C), absorbedor (A), evaporador (E) e intercambiador de calor (I). Al sujetar la mezcla rica en amoníaco que se encuentra en el generador, G, a una fuente térmica Q_G , de temperatura se producen vapores de amoníaco, los cuales son de temperatura T_G , condensados en C a una temperatura T_C ; este proceso se lleva a cabo a una presión relativamente alta (la presión será función de T_C , ya que el amoníaco debe condensarse a P_C y T_C). El amoníaco líquido es conducido a través de un válvula reductora de presión (V_1), al evaporador E, en donde, a baja presión absorbe calor del medio que lo rodea, Q_E , a una temperatura T_E , siendo esto el efecto de refrigeración. El amoníaco evaporado es conducido al absorbedor A, en donde se pone en contacto con la solución débil proveniente del generador y que ha sido preenfriada en el intercambiador I, mediante la solución fuerte que se forma en el absorbedor. La válvula V_2 reduce la presión de la solución débil y la bomba P eleva la presión de la solución fuerte. La absorción del amoníaco en la solución débil, ávida de éste, es un proceso exotérmico, por lo que es necesario extraer de A un calor Q_A mediante una fuente de enfriamiento a T_A debe cumplirse que:

$$T_G > T_C \approx T_A > T_E$$

así como que:

$$(P_G = P_C) > K (P_E = P_A)$$

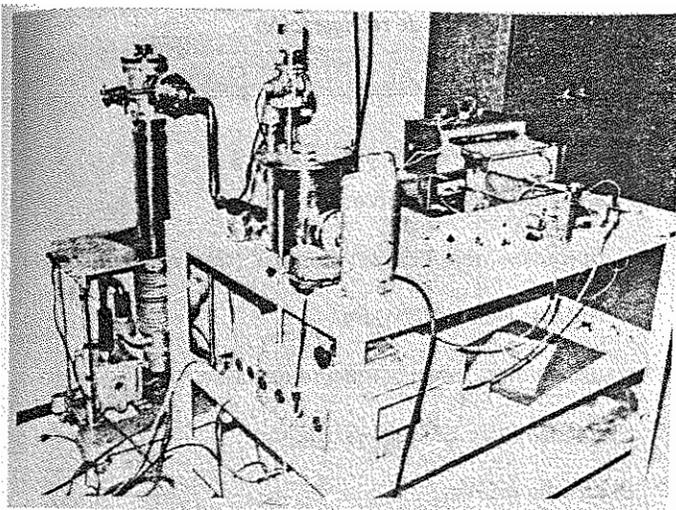


Figura 9. La fotografía ilustra el sistema de prueba de superficies selectivas, con la fuente de radiación en primer plano, el sistema de vacío en la parte izquierda y diversos instrumentos de medición y control de las pruebas.

Comparando este sistema con un refrigerador por compresión se puede ver que la compresora ha sido sustituida por un sistema generador-absorbedor que entrega refrigerante gaseoso a alta presión al condensador y lo acepta a baja presión del evaporador, proceso que llevaría a cabo el compresor.

La energía solar en el ciclo de absorción

La energía solar será la fuente térmica para el gene-

rador en ciclos de absorción y para ello es necesario adaptar este proceso al nivel térmico y a las características propias de la radiación solar.

La figura 13 representa los pasos en el diseño de un sistema de absorción y la figura 14 el proceso de diseño del sistema de colección solar a usar este tipo de ciclo de enfriamiento.

Entre los problemas de investigación específicos al desarrollo de los sistemas de refrigeración por absorción utilizando la energía solar se encuentran los siguientes:

Relativamente baja temperatura en el generador (80-100°C son captadores planos) en comparación con sistemas de absorción operados con flama (180-200° C).

Baja eficiencia termodinámica de este tipo de ciclos.

Alta temperatura ambiente en zonas áridas calientes, lo cual plantea un problema en la fuente de enfriamiento (sumidero de calor).

Presiones de operación relativamente altas (alrededor de 13 atm si T_C es de 32° C).

Poca experiencia sobre el comportamiento del sistema bajo condiciones de arranque y paros o variaciones de insolación.

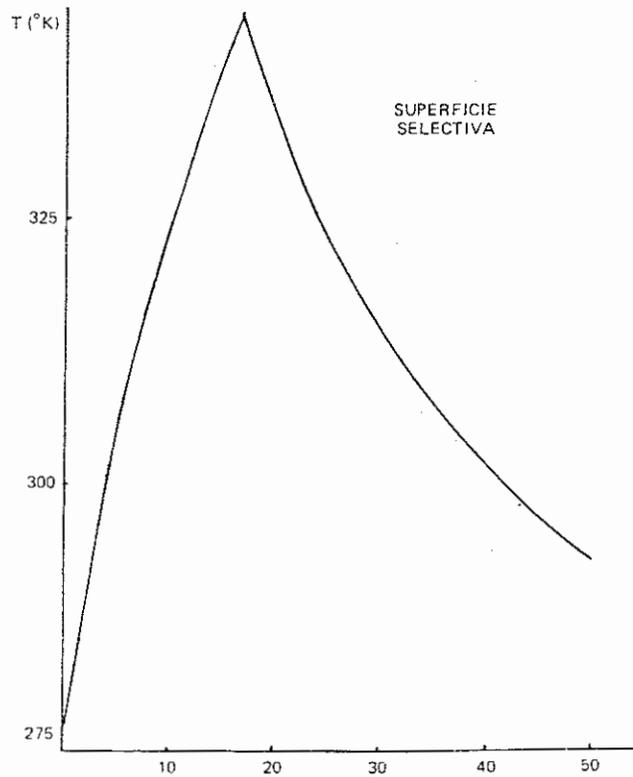
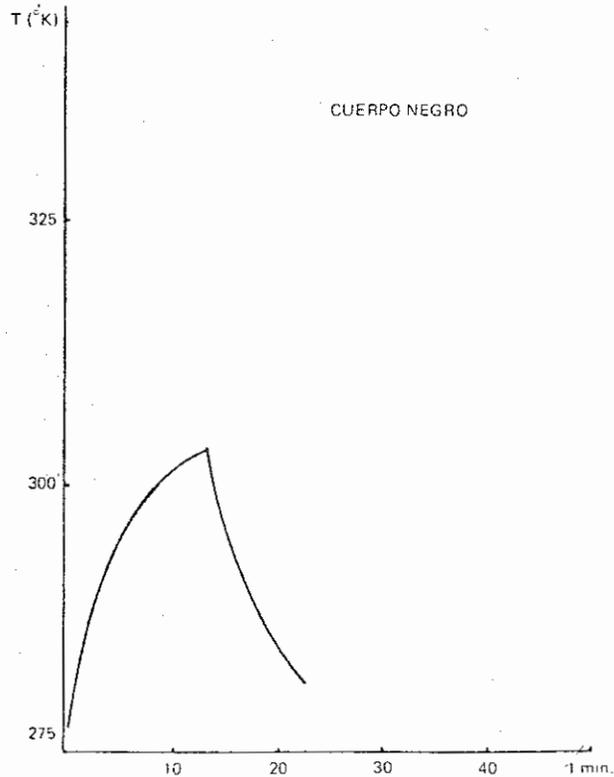


Figura 10. Variación de la temperatura con el tiempo durante el calentamiento y el enfriamiento de un cuerpo negro y una superficie selectiva.

Bajo desarrollo de colectores solares con cambios de fase.

Desarrollo experimental

Los sistemas en estudio, así como sus características principales, son las siguientes:

Producción de hielo (en construcción):

capacidad: 100 kg de hielo por día

$$T_G = 85^\circ C$$

$$T_E = -10^\circ C$$

área de colectores: 25 m²

operación: continua con bomba de circulación de solución fuerte (1/10 HP)-periódico

fluidos: H₂O-NH₃ en el ciclo

uso del frío: enfriamiento de una tina de salmuera.

Enfriamiento de una bodega frigorífica (diseñado)

capacidad: 10 m³

$$T_G = 85^\circ C$$

$$T_E = -10^\circ C$$

área de colectores: 25 m²

operación: semicontinua (generación periódica, evaporación continua durante las 24 horas)

fluidos: H₂O-NH₃

uso del frío: enfriamiento de aire para inyección a una bodega de 10 m³.

Producción de hielo (construido)

capacidad: 15 kg hielo por día

$$T_G = 90^\circ C$$

$$T_E = 8^\circ C$$

área de colectores: 9 m²

operación intermitente - periódica

fluidos: NH₃ - H₂O

uso del frío-producción directa de hielo

Aire acondicionado doméstico (diseñado)

capacidad: 2 ton. de refrigeración

$$T_G = 85^\circ C$$

$$T_E = 14^\circ C$$

área de colectores: 16 m²

operación continua sin bombas (tipo electrolux)

fluidos: H₂O - NH₃ - H₂

uso del frío: en enfriamiento de aire

Enfriamiento de leche (en diseño)

Desarrollo teórico

La eficiencia teórica termodinámica de los refrigeradores por absorción puede obtenerse de la siguiente manera:

Balance de calor total:

$$Q_c + Q_a = Q_g + Q_e$$

Balance de entropía total:

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_a}{T_a} \geq \frac{Q_g}{T_g} + \frac{Q_e}{T_e}$$

si suponemos que: $T_c = T_a = T_o$,

entonces:

si COP = coeficiente de operación termodinámica

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g} \leq \left(\frac{T_g - T_o}{T_o - T_e} \right) \frac{T_e}{T_g}$$

A partir de este breve análisis del comportamiento termodinámico de los refrigeradores por absorción, puede observarse el efecto que tienen los niveles térmicos de operación sobre la eficiencia. Como ejemplo se presenta la gráfica 16 en la cual pueden verse los efectos individuales de las temperaturas de generación y condensación. A partir de este tipo de análisis pueden preverse problemas de operación particulares.

El diseño y construcción de este tipo de sistemas se complica en cuanto es necesario tomar en cuenta procesos de cambio de fase de soluciones binarias, lo que requiere una metodología y tecnología específicas. Paralelamente a los trabajos experimentales en curso, se están llevando a cabo estudios teóricos dirigidos hacia el desarrollo de criterios de diseño más adecuados. Aunque la mayoría de los sistemas en estudio están basados en el uso de la mezcla NH₃ - H₂O, se han iniciado trabajos hacia el análisis del

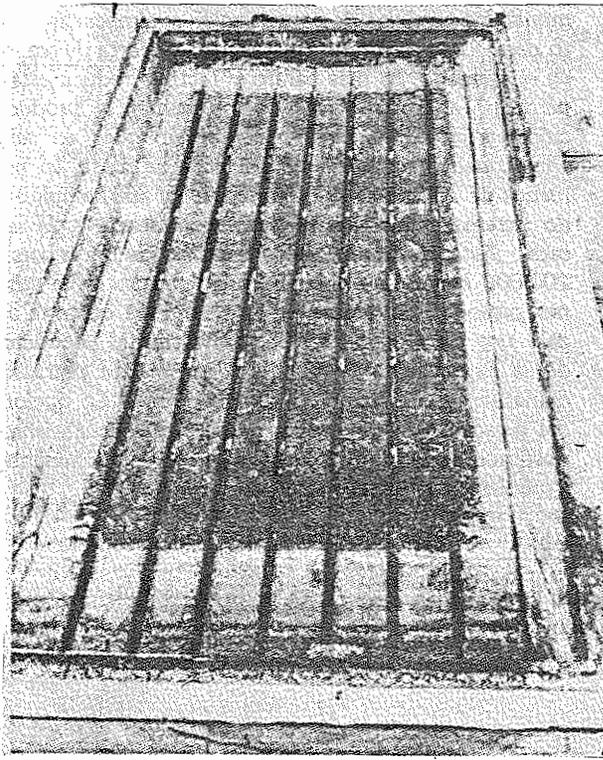


Figura 11. Este captador solar está construido con una caja de fibra natural. Puede observarse que esta fibra integra estructuralmente el conjunto y proporciona al mismo tiempo aislamiento térmico.

comportamiento de este ciclo con otras mezclas, tales como $\text{NaSCN}-\text{NH}_3$, $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$.etcétera.

Como todo proceso, pero principalmente ciclos termodinámicos, es fundamental el llevar a cabo análisis termo-económicos sobre diferentes diseños. Este tipo de análisis involucra tanto una optimización puramente termodinámica (irreversibilidades) como del costo atado a esa optimización. Para ello, se están llevando a cabo estudios basados en el concepto de Exergía, la cual es una medida de esas pérdidas irreversibles.

Se prevé que el nivel tecnológico adecuado para hacer factible la implantación de este tipo de sistemas será alcanzado en los próximos dos años.

En resumen, la refrigeración y el aire acondicionado utilizando la energía solar como fuente térmica de un sistema de absorción es primordialmente un problema de adaptación tecnológica. Las dificultades principales que deberán resolverse y que harán práctica y económicamente factible este proceso radican en el avance de la tecnología solar y en un mejor entendimiento de los aspectos termodinámicos de estos ciclos. Es obvio que para este tipo de desarrollos es necesario contar con la participación de varias disciplinas: ingeniería química, ingeniería mecánica, física y química.

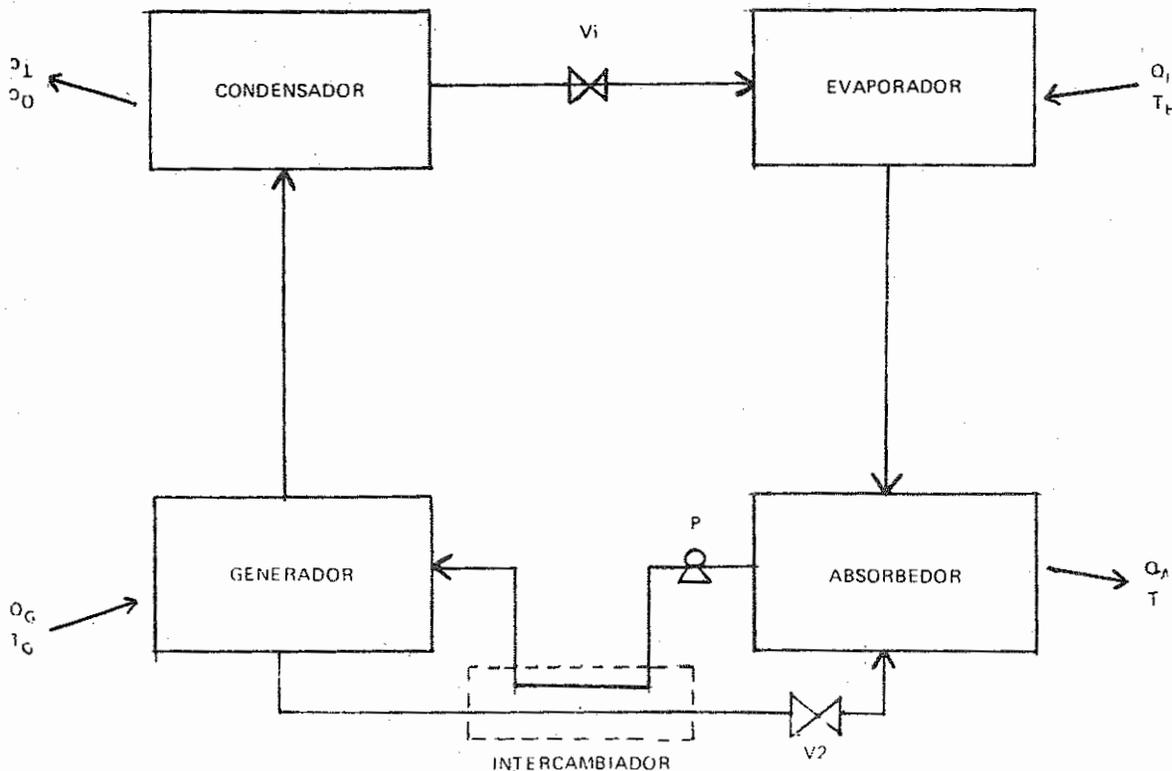


Figura 12. Ciclo de refrigeración por absorción.

EL SECADO SOLAR DE GRANOS

El problema del consumo de alimento en México es posiblemente el más grave y el peor estudiado, por su insospechada complejidad. Generalmente este tema se asocia con los problemas políticos del campo y con el atraso tecnológico de nuestra agricultura. Pero si se establece como objetivo global incrementar la disponibilidad de alimento por parte del consumidor final, el panorama se simplifica y se identifican las componentes técnicas del problema.

En granos como el maíz, el sorgo, la soya y el trigo reside la mayor parte de la dieta de las clases desposeídas. Se puede afirmar que las pérdidas entre la cosecha y la distribución final de granos es de 10 a 40 por ciento de la producción bruta nacional; así, dis-

minuir las pérdidas de conservación y almacenamiento dará como resultado neto la mayor oferta de grano en el mercado. Es más barato y factible reducir estas pérdidas, a corto plazo, que aumentar la producción agrícola. Se puede comprobar que, en seis años, pueden reducirse las pérdidas de maíz, en no menos de 1.5 millones de toneladas al año, empleando sistemas racionales de almacenamiento y de secado. Este resultado sería igual al de incorporar 200.000 hectáreas nuevas de riego anuales en el mismo período; sin embargo, esta empresa costaría al país una cifra inalcanzable, equivalente al producto de la exportación de 200.000 barriles de petróleo diariamente a lo largo de esos seis años. La opción del secado solar de granos, para su almacenamiento posterior, es más atractiva técnica y económicamente a mediano y largo plazos.

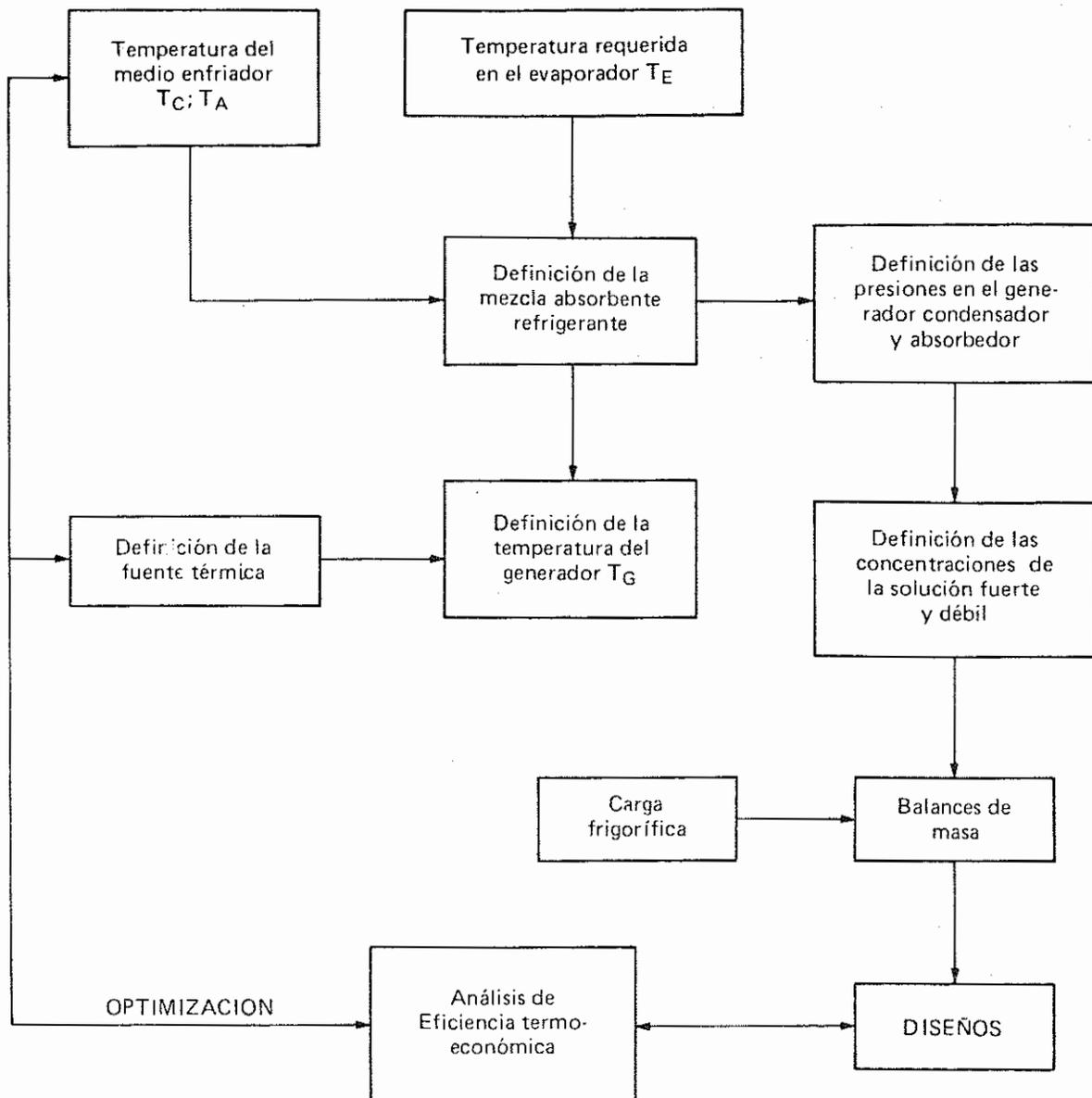


Figura 13. Pasos de diseño para un sistema de refrigeración por absorción.

Análisis del secado de grano

La remoción de humedad del grano como el maíz es esencial para poderlo almacenar, empacar y distribuir sin que se deteriore por su propio metabolismo o por microorganismos y plagas. La capacidad del grano de entregar humedad al ambiente está gobernada por la difusividad del agua en el grano según la expresión.

$$\frac{\partial X}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 X}{\partial y^2}$$

donde X es la humedad en porcentaje del peso total, Y es el tiempo, D es la difusividad y Y es una longitud característica del grano. Si el ambiente tiene una humedad constante, eventualmente la humedad del grano se estabiliza en un valor final X_e en un tiempo infinito. Si este grano tiene una humedad inicial X_o en $\theta = 0$, la ecuación anterior puede integrarse así que

$$\frac{\bar{X}_\theta - X_e}{\bar{X}_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 D \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \theta\right]$$

la cual permite calcular con buena precisión la humedad X_e a cualquier tiempo θ , usando únicamente los valores de $n = 1, 2 \dots 6$ en la expansión de Fourier y haciendo l igual a la mitad del espesor medio del grano.

El proceso de secado consiste entonces en hacer X_e tan bajo como sea posible para reducir el valor de

θ , tal que la humedad final del grano, usualmente de 8 a 10 por ciento, cuando la humedad inicial varía de 20 a 30 por ciento, se alcance rápidamente sin exceder la temperatura de 42° C en ningún momento. La forma más económica de secar grano es utilizando aire caliente con valores de $X_e \ll 8$ o/o.

Esto puede hacerse en cualquier parte del país, en cualquier época del año, con aire que se calienta desde la temperatura ambiente hasta unos 40-42° C mediante la combustión de gas, diesel, o mediante energía solar. El uso de calentadores de combustible es caro, técnicamente complejo y puede contaminar el grano.

El secado con energía solar

La figura 17 muestra en esquema el sistema de calefacción solar del aire que ha sido probado exitosamente en México y en varios otros países. El aire es succionado por un ventilador a través de un calentador solar, donde se aumenta su temperatura de unos 10 a 15° C y se abate su humedad relativa aproximadamente a la mitad. Este aire caliente se convierte así en un excelente medio para secar el grano, y el mismo ventilador hace pasar el aire a través del grano secándolo. Este fenómeno puede estudiarse con las ecuaciones anteriores haciendo que X_e tome valores como una función de la radiación solar del momento, del diseño del calentador solar de aire y de la velocidad del aire. La figura 18 muestra la correlación entre las predicciones teóricas de la variación de la humedad del grano con el tiempo y algunos resultados experimentales.

Puede concluirse que el secado de granos por me-

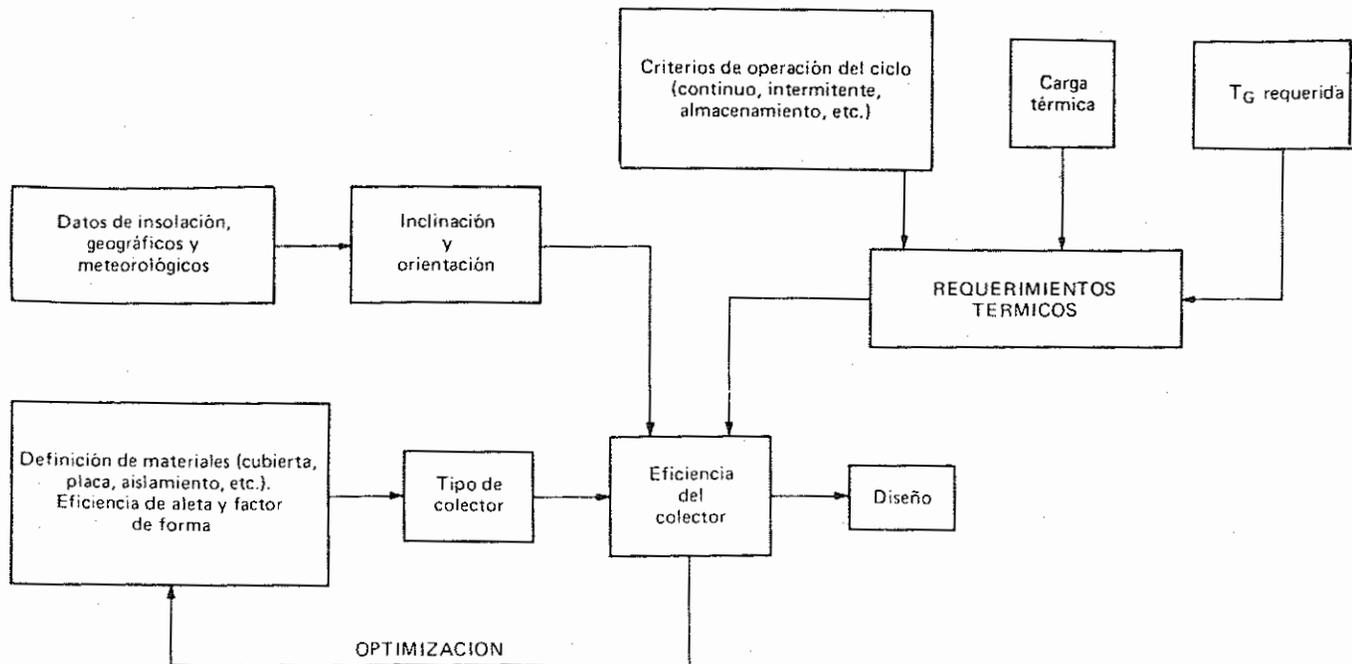


Figura 14. Proceso de diseño de un sistema colector de energía solar para un refrigerador por absorción.

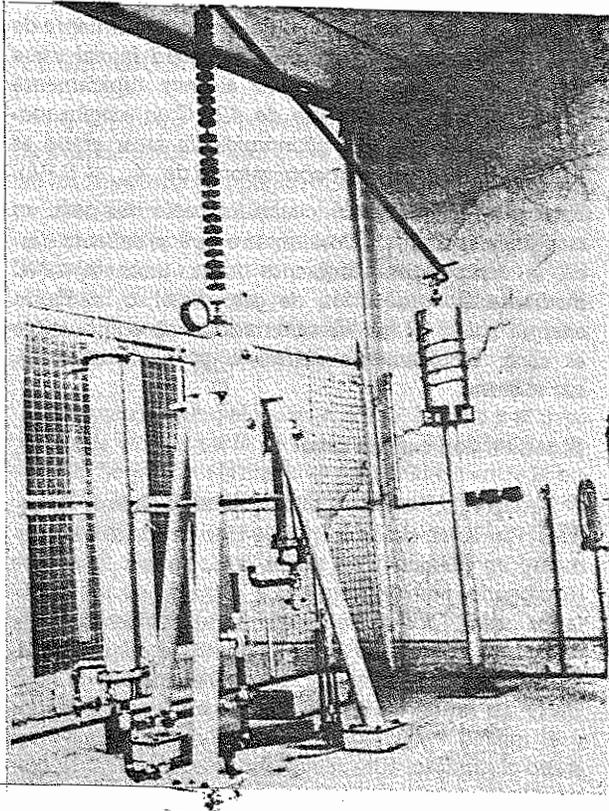


Figura 15. La fotografía muestra el sistema de absorción del refrigerador accionado por energía solar.

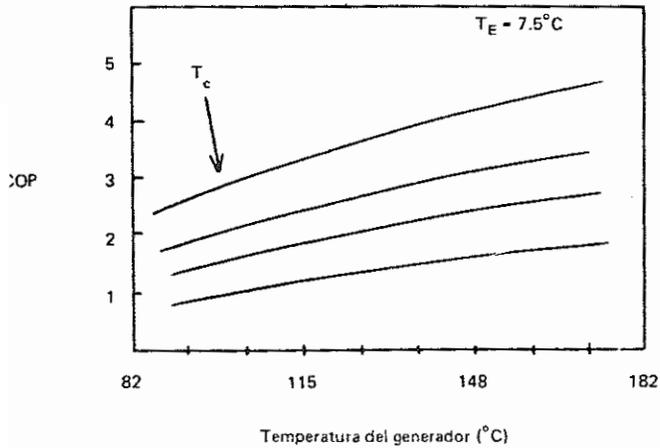


Figura 16. COP teóricos.

El uso de la energía solar es económicamente atractivo y que tecnológicamente está desarrollado, al punto en que falta tan sólo despertar el interés de los posibles usuarios para implantar su utilización masiva.

BIBLIOGRAFIA

John Duffie y Willian Beckman, *Solar Energy Thermal Processes*, Wiley-Interscience, 1974.

A. B. Meinel y M. P. Meinel, *Applied Solar Energy: an Introduction*, Addison-Wesley, 1976.

B. J. Brinkworth, *Solar Energy for Man*, Compton Press, Londres y Halstead Press, 1972.

A. A. M. Sayight, *Solar Energy Engineering*, Academic Press, 1977.

S. V. Szokolay, *Solar Energy and Building*, Architectural Press, Londres, 1975.

James L. Threlkeld, *Thermal Environmental Engineering*, Pretice Hall 1962.

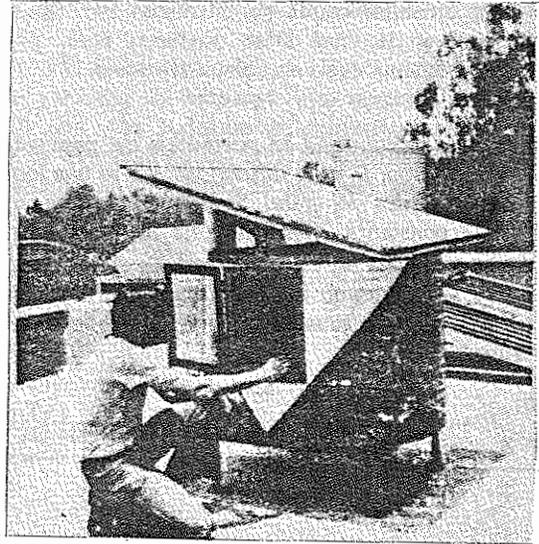


Figura 17. Este sencillo secador solar de grano, de 250 kg de capacidad, tiene el calentador solar de aire en la parte superior, el ducto de bajada de aire caliente en la parte posterior (oculto) y el depósito de lámina donde el grano se seca en un proceso intermitente.

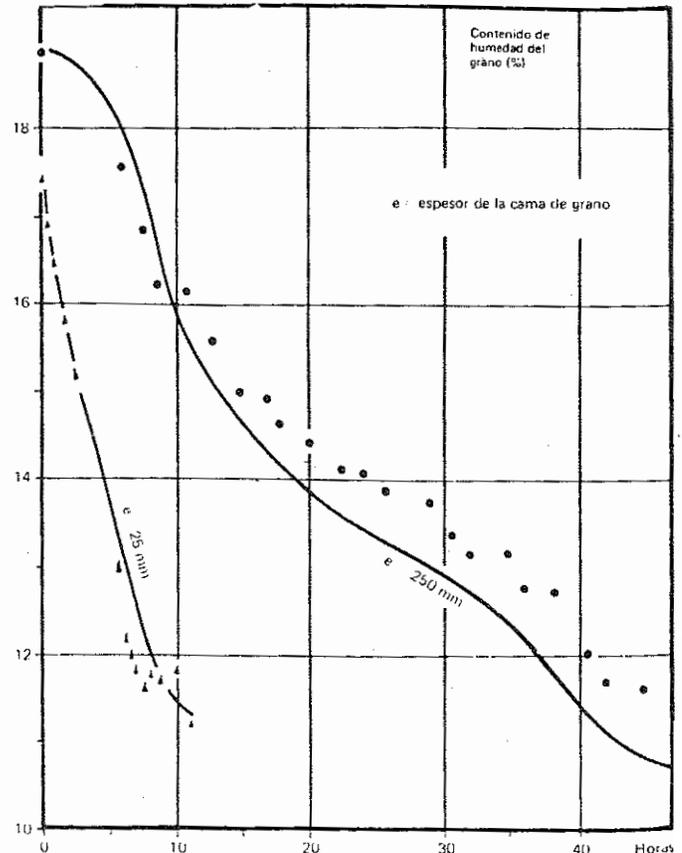


Figura 18. Correlación de los resultados experimentales y teóricos del tiempo de secado del grano, con espesores de cama de 25 y 250 mm.