

EL CICLO DE ABSORCIÓN TIOCIANATO-AMONÍACO
COMO REFRIGERADOR SOLAR (*)

por

Alfio Crivelli, Luis Saravia y Roberto Ovejero

Departamento de Ciencias Exactas
 Universidad Nacional de Salta
 Buenos Aires 177
 4400 Salta
 Argentina

SUBVENCIONADO PARCIALMENTE POR EL CONICET

RESUMEN

El ciclo de absorción intermitente que utiliza una solución / de tiocianato de sodio en amoníaco presenta varias ventajas para su uso como refrigerador en combinación con una fuente solar de energía térmica. El ciclo funciona con rendimientos aceptables, a temperaturas bajas, del orden de 85°C, permitiendo encarar la colección de energía solar con colectores planos o concentrado- / res fijos. Las presiones que se desarrollan son bajas, la mezcla es de bajo costo, no es corrosiva para el hierro, acero o cobre, es estable y tiene viscosidades, conductividades térmicas y calores específicos adecuados.

El ciclo también puede trabajar como bomba de calor y genera / do cantidades de calor del orden de 1,7 veces las recibidas y // con la ventaja adicional de hacerlo en forma distribuida a lo // largo de las 24 horas, debido a su carácter intermitente.

Por último, se presenta la posibilidad de acumulación de calor a temperatura ambiente en forma indirecta mediante el almacena- / miento como líquido del amoníaco liberado.

En este trabajo se analiza el ciclo de funcionamiento y se // describe un ciclo intermitente construido con la parrilla de co- / lección solar incorporada al tanque de solución, dándose los pri- / meros resultados obtenidos.

(*) Comunicación a ser presentada en la 2da. Reunión de Trabajo de Energía Solar. Julio de 1976 - Salta - República Argentina.

1.- Introducción.

La producción de bajas temperaturas mediante la energía solar puede llegar a ser de importancia tanto en la conservación / de producción agropecuaria durante todo el año, como en el acondicionamiento ambiental durante los meses de verano. Frente a otros usos de la energía solar, éste presenta la ventaja de que / los picos de demanda coinciden con los de disponibilidad energética.

El hecho de que la fuente de energía solar sea cíclica, con un periodo diario, hace pensar que los ciclos de absorción intermitentes pueden llegar a tener ventajas en este tipo de aplicación. Otro aspecto a tener en cuenta deriva de la mayor simplicidad de estos ciclos frente a los continuos, lo que hace su construcción más factible en áreas de desarrollo industrial incipiente.

Varios tipos de soluciones con dos compuestos han sido propuestas como posibles fluidos para estos ciclos [1 - 6]. Entre ellas, la solución de tiocianato de sodio (NaSCN) en amoníaco // (NH_3) luce como una de las que tiene mayor potencial de desarrollo en relación con los sistemas solares, debido a que trabaja / con buen rendimiento a bajas temperaturas, a que las presiones / que se desarrollan no son altas, a que la mezcla es barata, no / corrosiva para el hierro, acero y cobre, y tiene viscosidades, / conductividades térmicas y calores de vaporización adecuados.

Ultimamente [7], se ha puesto en evidencia que este tipo de ciclo puede funcionar como bomba de calor durante los meses de / invierno. Ello llevaría al desarrollo de un sistema de acondicionamiento ambiental que puede trabajar tanto en verano como en / invierno, haciéndolo en el último caso con una eficiencia mayor // que los sistemas usuales de agua o aire. El sistema presenta la ventaja adicional de una acumulación de calor intrínseca mediante el almacenamiento de amoníaco a temperatura ambiente.

En el presente trabajo se discuten los resultados iniciales obtenidos en relación con un ciclo intermitente de tiocianato-amoníaco construido con el fin de obtener experiencia con el manejo de este tipo de soluciones y estudiar algunas posibles mejoras tendientes a elevar el coeficiente de performance del sistema.

En la sección 2 se describe someramente el ciclo de absorción y se dan las bases de cálculo del coeficiente de performance.

En la sección 3 se discuten las posibilidades de trabajo del ciclo como bomba de calor y como acumulador. En la sección 4 se describe el sistema construido y en la 5 se dan los resultados / obtenidos hasta el momento.

2.- El ciclo de absorción.

Las propiedades térmicas de la solución NaSCN-NH₃, que permitieron el estudio teórico del ciclo, fueron medidas por Blytas y Farrington Daniels, y por Sargent y Beckman [1, 8].

En la Fig. 1 se esquematiza el funcionamiento del ciclo de absorción intermitente, mientras que en la Fig. 2 se dan los ciclos ideales correspondientes en los diagramas presión-temperatura-concentración de la solución y del amoníaco.

Al comienzo del día, la solución que se encuentra en el tanque I tiene en solución todo el amoníaco y sus condiciones están representadas por el punto 1. La presión p_e queda determinada // por la concentración de amoníaco elegida al cargar la solución y por la temperatura de la fuente fría intermedia que extrajo calor del tanque I durante la noche. Esta presión será la que define en el tanque II la temperatura más baja que se puede obtener, T_e. Cuando llega la radiación solar, la solución se calienta sin pérdida de amoníaco, y por tanto a concentración constante, hasta alcanzar en los tanques la presión p_g determinada por la condensación del amoníaco a la temperatura de la fuente fría intermedia. Toda entrega posterior de calor se traduce en un desprendimiento de NH₃ a presión constante hasta llegar a la temperatura máxima obtenible, T₃. Aquí finaliza la primer etapa, que se realiza durante el día.

Durante la noche, se pone el tanque I en contacto con el agua o aire de enfriamiento, y el II con el fluido a refrigerar. A medida que la solución desciende de temperatura y presión, se evapora el amoníaco hasta el punto 4 y luego a presión constante hasta volver a 1.

En lo que sigue daremos las expresiones para las cantidades de calor intercambiadas en las distintas etapas del ciclo, las que han sido obtenidas por diversos autores [2, 3]. Las propiedades de la solución se indicarán con una (s) y las del amoníaco con una (a). Dado que el amoníaco se puede generar en el tanque I o el II, ello se indicará con el índice respectivo.

El calor entregado durante el día al tanque I, Q₁₋₃^(I), está dado por:

$$Q_{1-3}^{(I)} = h_3^{(s)} m_3^{(s)} - h_1^{(s)} m_1^{(s)} + \int_1^3 h_{v_1}^{(a)} dm^{(a)} \quad (1)$$

donde las h indican entalpías específicas y las m las masas ya sea de solución o de amoníaco. Las condiciones en 1 y 3 son conocidas, por lo que Q₁₋₃^(I) se puede calcular sin problema, debiéndose evaluar la integral en forma numérica.

El calor extraído durante la noche en el tanque II, Q₄₋₁^(II), está dada por:

$$Q_{4-1}^{(II)} = h_{fg}^{(a)} \cdot m_4^{(a)} \quad (2)$$

donde h_{fg} indica el calor de cambio de fase y c₄ la concentración del amoníaco.

El punto 4, debido a la evaporación del amoníaco en 3-4, no está definido // por los datos. Se puede demostrar que, en la hipótesis de que el proceso de evaporación del amoníaco, 3-4, es adiabático, se cumple:

$$m_4^{(a)} = m_3^{(a)} \cdot e^{-\frac{h_{f_3}^{(a)} - h_{f_4}^{(a)}}{h_{fg}^{(a)}}} \quad (3)$$

donde h_f^(a) es el calor de vaporización promedio entre las temperaturas T_g y T_e y h_f la entalpía del líquido saturado.

El rendimiento del sistema, η_{COP}, como refrigerador, queda calculado como:

$$\eta_{COP} = \frac{Q_{4-1}^{(II)}}{Q_{1-3}^{(I)}} \quad (4)$$

Sargent y Beckman [8] han realizado el cálculo de η_{COP} para diversas condiciones de trabajo del ciclo. Algunos de los resultados se muestran en la figura 3 para una solución con una concentración inicial de 53,2 %, y una temperatura en el tanque I de 21°C. La temperatura de refrigeración es de 1,7°C y los resultados se dan para varias temperaturas de calentamiento solar y de enfriamiento en el tanque II. Se aprecia que aún en condiciones de enfriamiento adversas no se necesitan temperaturas mayores de 90°C para obtener rendimientos del orden del 50 %.

Si se quieren estudiar las posibilidades del ciclo como bomba de calor, se necesitan las cantidades de calor extraídas por las fuentes frías intermedias.

Se tiene:

$$Q_{1-3}^{(II)} = h_{f,II}^{(a)} (m_3^{(a)} - m_2^{(a)}) - \int_2^3 h_{v,I}^{(a)} dm^{(a)} \quad (5)$$

$$y \quad Q_{3-1}^{(I)} = Q_{1-3}^{(I)} + Q_{4-1}^{(II)} - Q_{1-3}^{(II)} \quad (6)$$

El ciclo discutido es ideal, separándose del real a causa de varios factores. En primer lugar debe tenerse en cuenta el calentamiento de la masa de hierro del sistema, que no es despreciable debido a que tiene que fabricarse para soportar presiones del orden de los 20 kg/cm². En segundo lugar, deben tenerse en cuenta todos los gradientes de temperatura necesarios para lograr los intercambios de calor, y las caídas de presión necesarias para lograr los movimientos de fluido.

Los ciclos intermitentes no se prestan en general para la introducción de mejoras en el rendimiento debido a los desfases temporales entre las distintas partes del ciclo. No obstante, existe una posibilidad de mejora importante si se aprovecha el calor de cambio de fase del vapor de amoníaco que se desprende del tanque I durante el día, parece hacer funcionar un segundo ciclo en condiciones similares al primero. La relación de calor entre esa cantidad de calor y $Q_{1-3}^{(I)}$ es del orden de 0,9, y aunque deben tenerse en cuenta diversas pérdidas, el rendimiento podría llegar a valores cercanos a 1.

3.- El ciclo como bomba de calor.

El cálculo de la cantidad de calor extraída de la fuente fría intermedia en el ciclo de la figura 3, muestra que la suma de estas cantidades es del orden de 1,7 veces la cantidad de calor extraída al ciclo por la fuente caliente. Ello significa que el ciclo podría utilizarse en forma eficaz como bomba de calor. Posee además la ventaja adicional de que su carácter intermitente hace que el 60 % de esa cantidad de calor sea entregada en forma diferida, durante la noche, y no simultáneamente con la colección de calor. Ello significa que el sistema posee en forma intrínseca propiedades de acumulación que permiten la distribución de calor a lo largo de las 24 horas de funcionamiento.

Debe hacerse notar que las condiciones de funcionamiento del ciclo durante el invierno debe cambiarse a efectos de entregar las cantidades de calor $Q_{1-3}^{(II)}$ y $Q_{3-1}^{(I)}$ a temperaturas convenientes para su uso en calefacción ambiental. Ante todo conviene que la temperatura T_g a la que se extrae el calor durante el día sea conveniente para la calefacción, del orden de los 35°C. Lo mismo debe suceder con la

extracción nocturna. Este último se cumple naturalmente durante la mayor parte de la extracción, salvo en el tramo final en que la temperatura llega a T_1 . De cualquier manera, se puede diseñar el ciclo para que T_1 varíe alrededor de 30°C. Con esto se logra durante la noche en el tanque II una temperatura de 5°C, obtenible a partir del aire externo. Este ciclo se detalla en la figura 4.

En el nuevo ciclo la relación entre el calor generado y el colectado sigue siendo la misma que en el anterior, pero la cantidad absoluta de calor es menor en alrededor de 30 %, para la misma cantidad de solución. Algo similar pasa con el colector al pasar del verano al invierno, por lo que tenderá a mantenerse la temperatura máxima T_3 .

Otro aspecto a considerar es que el funcionamiento a una temperatura T_g igual a 35°C exige que la presión máxima suba de 9,4 a 14,0 kg/cm², por lo cual será necesario reforzar adecuadamente el sistema.

Un último punto a discutir son las posibilidades intrínsecas de acumulación. Si el sistema se diseñase para trabajar en los días soleados por encima de las necesidades diarias, se puede generar un exceso de amoníaco líquido que se acumulará para ser evaporado durante los días nublados. En este modo de funcionamiento no se trabajará como bomba de calor, ya que el calor generado durante el día no se utilizará. La acumulación se realiza a temperatura ambiente, por lo que se puede mantener por tiempos largos. Debe observarse que se logran acumulaciones del orden de 200 kcal/litro de volumen, lo que es inclusive mayor que los valores que se obtienen para acumulación con cambio de fase.

4.- Descripción del sistema construido.

El ciclo práctico construido incluye al colector solar como parte integrante del tanque I, que contiene la solución. Un esquema de este tipo fue originalmente utilizado por Chinnappa [9] en relación con ciclos de amoníaco-agua, y por Swartmann et al. [10] para ciclos de tiocianato-amoníaco.

La construcción está esquematizada en la figura 5. El tanque I, conteniendo la solución, hace las veces de cabezal superior en la parrilla de recolección solar, la que está construida con cuatro caños de hierro de 1/2" en los que se recoge el calor y un caño de 1" de retorno, permite una circulación de la solución por termosifón. El cabezal inferior también tiene una pulgada de diámetro. El amoníaco producido en forma de vapor es conducido al tanque de condensación II, en el que se colocó un serpentín interior de circulación de agua de enfriamiento. Durante la noche la llave A es cerrada y la B abierta, logrando que el vapor generado en el tanque II vuelva a la solución a través de la línea de retorno, lo que

aumenta la velocidad de absorción del vapor. En esta etapa se puede lograr el enfriamiento de la solución por circulación del aire sobre el colector, o por circulación de agua en una camisa que rodea al caño de retorno.

La colección de energía solar se realiza en forma plana mediante chapas de cobre soldadas a los caños y recubiertas con una capa selectiva de óxido de cobre. Dos capas de vidrio cubren la chapa. Se han tomado estas precauciones con el fin de lograr temperaturas del orden de los 85°C con un rendimiento aceptable.

Los primeros ensayos se realizaron con calentamiento eléctrico. Se presentaron dificultades iniciales de circulación de la solución por haber colocado los calentadores eléctricos en la parte inferior de los caños. Ello produjo un exceso de calentamiento local, dando lugar a un aumento excesivo de la presión durante el día. Cuando se corrigió la circulación, la presión se mantuvo, llegando a valores que no sobrepasaron el 20 % de la presión teórica. Durante estas pruebas iniciales se lograron temperaturas nocturnas de -2°C. La reabsorción de amoníaco fue buena, aunque en el proceso no se llegó a producir todo el amoníaco posible.

5.- Agradecimientos.

Los autores agradecen a los técnicos del Área de Física del Departamento de Ciencias Exactas de la Universidad, Sres. González y Meyer, la labor realizada, gracias a la cual fué posible poner en marcha el dispositivo descrito.

Referencias

- 1.- Blytas, G.C. y Daniels F., Concentrated solutions of NH_3 in H_2O , solubility, density, vapor pressure, viscosity, thermal conductance, heat of solution and heat capacity. J. of Am. Chem. Soc., 84, 1075, Ap./1962.
- 2.- Williams, D.A., Chung, P., LoE, G.O.G., Fester, D.A., y Duffie, J.A., Cooling systems based on solar refrigeration, Refrig. Eng., 33, Nov./1958.
- 3.- Chinnappa, J.V., Experimental study of the intermittent vapor absorption refrigeration cycle employing refrigerant-absorbant of ammonia-water and ammonia-lithium nitrate, Solar Energy, 5, 1, 1961.
- 4.- Eisenstadt, F.M., Flammigan and Farber, E.A., Solar air conditioning with a $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ absorption refrigeration system.
- 5.- Andrews, H.I., Solid absorption machine for use on trains, Modern Refrigeration, 330, Sept./1955.
- 6.- Tronbe, F. y Foex, M., The production of cold by means of solar radiation, Solar Energy, 1, 1, p. 51, 1957.
- 7.- Swartman, R.K., A combined solar heating/cooling system, 44/8 Extended Abstract International Solar Energy Society Congress, Los Angeles, 1975.
- 8.- Sargent, S.L. y Beckman, W.A., Theoretical performance of an ammonia - water of an ammonia-thiocyanate intermittent absorption refrigeration cycle, Solar Energy, 12, 137, 1968.
- 9.- Chinnappa, J.C.V., Performance of an intermittent refrigerator operated by a flat - plate collector, Solar Energy, 6, 4, 143, 1962.
- 10.- Swartmann, R.K., Ha, V. y Swaminathan, C., Comparison of ammonia - water and ammonia - thiocyanate solutions in a solar refrigeration system, Congress, 1974.

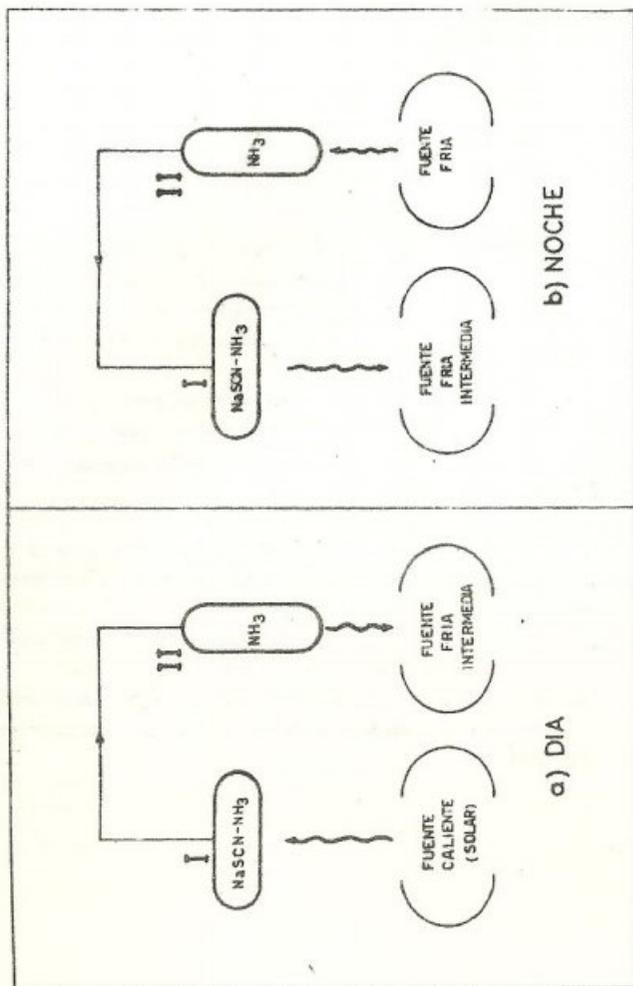


FIG. 1

Esquema de funcionamiento del sistema entérmico NaSCN-NH_3 durante el día y la noche.

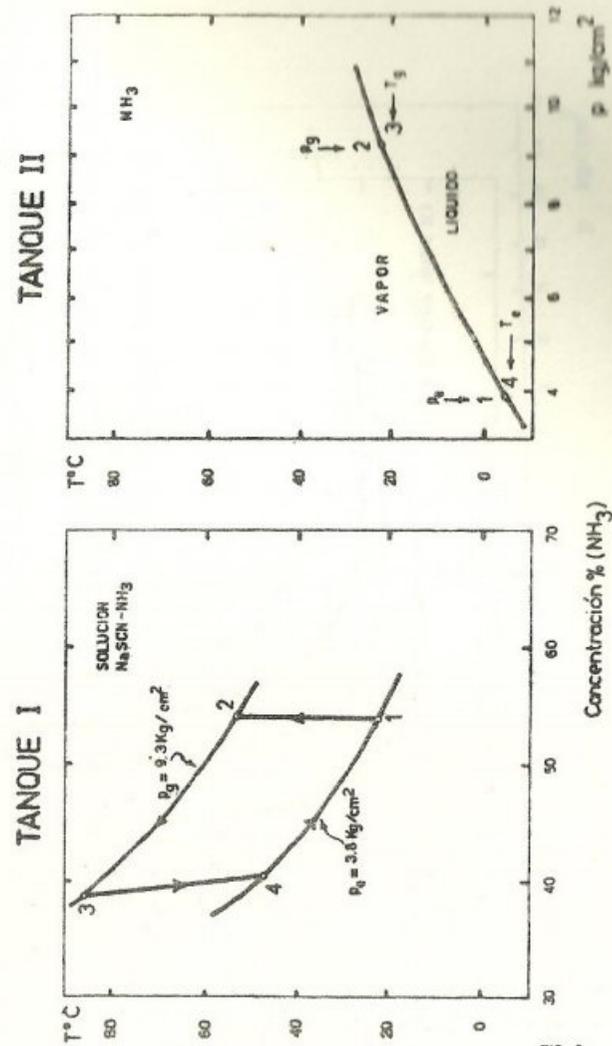


FIG. 2

Ciclo ideal de funcionamiento del refrigerador en el diagrama temperatura - concentración de la solución y en el diagrama presión - temperatura del amoníaco.

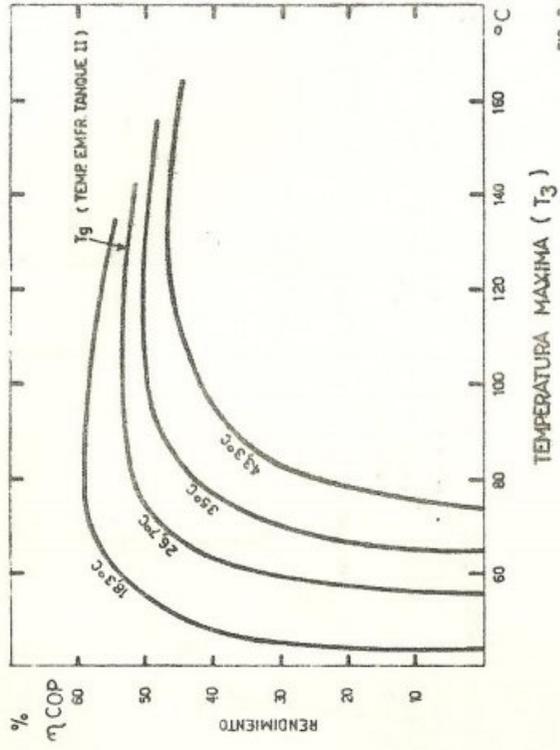


FIG. 3

Curvas de rendimiento del sistema ideal como función de la temperatura / máxima obtenible T_3 para varias temperaturas de enfriamiento del tanque II, T_g . Se ha tomado $T_1 = 21^\circ\text{C}$ y $T_e = 1,7^\circ\text{C}$.

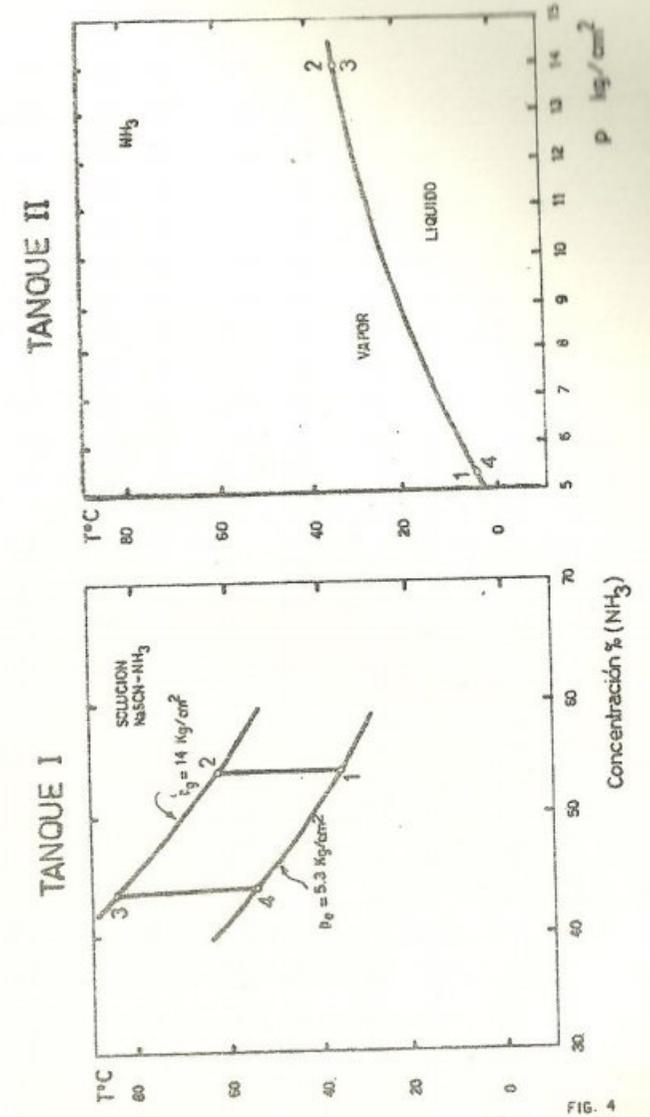


FIG. 4

Ciclo ideal de funcionamiento de la bomba de calor en el diagrama temperatura-concentración de la solución y el diagrama presión-temperatura // del amoníaco.

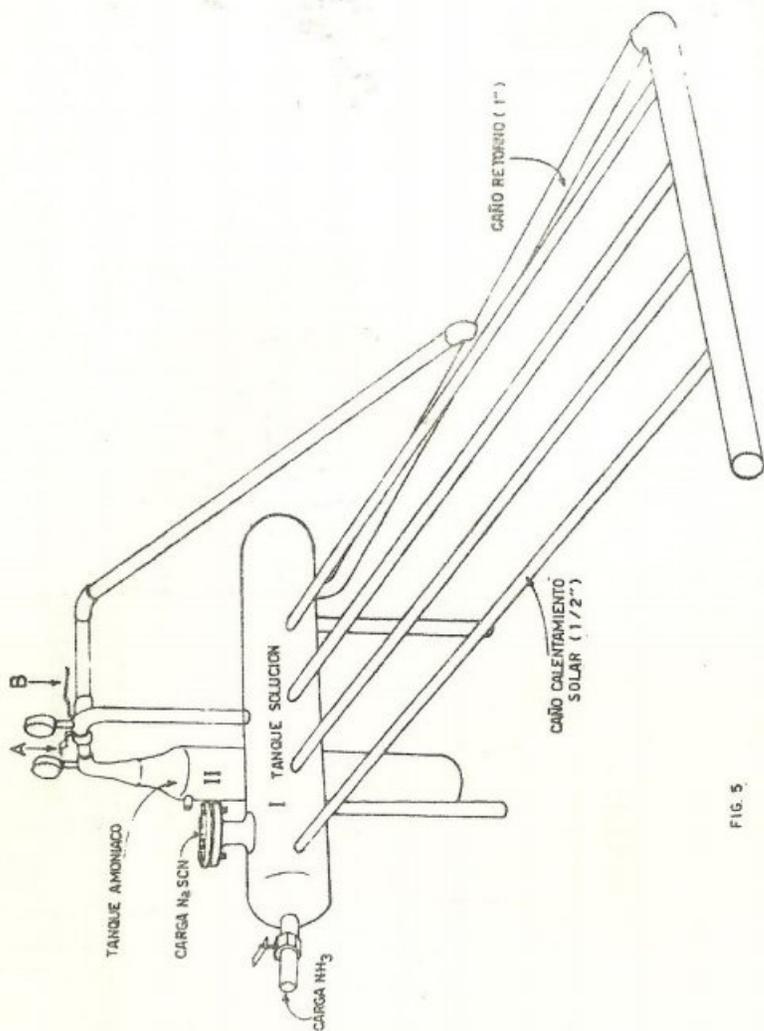


FIG. 5

Esquema del sistema de refrigeración construido. No se han incluido las/ aletas de colección de radiación solar y la caja con cubiertas de vi- / drio.