

EVALUACION EXPERIMENTAL DE UN REFRIGERADOR POR ADSORCION

R. Miguel Ramos Chaya, Manfred Horn
rramosc@uni.edu.pe mhorn@uni.edu.pe

Centro de Energías Renovables, Universidad Nacional de Ingeniería

RESUMEN

El Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería, CER-UNI, viene desarrollando un proyecto con el objeto de desarrollar una refrigeradora para el medio rural, donde no existe disponibilidad de una red eléctrica. El funcionamiento de la refrigeradora se basa en un ciclo termodinámico de adsorción, utilizando como refrigerante agua y como adsorbente el mineral zeolita. El prototipo de la refrigeradora fue desarrollado por EG-Solar (Altötting, Alemania) y donado a la UNI.

Se presenta aquí los primeros resultados experimentales obtenidos con el prototipo. Esta evaluación conllevará luego a presentar modificaciones adecuadas para mejorar su operatividad, además de adaptarla a la realidad peruana.

ABSTRACT

At the Renewable Energy Center of the National Engineering University in Lima, Peru, CER-UNI, started a project to develop a refrigerator for rural areas where doesn't exist an electrical grid. This refrigerator is based on a thermodynamical cycle of adsorption, using water as refrigerant and zeolithe as adsorber. The prototype refrigerator was developed at EG-Solar (Altötting, Germany) and donated to UNI. First experimental results obtained with the prototype refrigerator are presented. These results are leading us to modifications and adaptations to the reality in Peruvian rural areas.

INTRODUCCION

La refrigeración es utilizada por el hombre desde mucho tiempo para la conservación de alimentos, medicinas, así como para la producción de hielo, etc. La mayoría de las refrigeradoras usan hoy un ciclo termodinámico que incluye la compresión de un vapor refrigerante, para lo cual usan un compresor con motor eléctrico. Esto limita el uso de esas refrigeradoras en regiones rurales sin red eléctrica, requiriendo una generación de electricidad local, sea con un grupo electrógeno o sea con paneles fotovoltaicos, lo que es sumamente costoso.

En el sistema de refrigeración por adsorción se requiere una cantidad pequeña de trabajo (o electricidad) en relación al sistema de compresión de vapor, sin embargo se requiere un suministro de calor muchas veces mayor que el trabajo requerido por el ciclo de compresión de vapor. Es decir si el calor es suficientemente barato, el ciclo de refrigeración por adsorción será atractivo económicamente [1].

FUNDAMENTO TEORICO

Adsorción

La adsorción es un fenómeno de adherencia superficial entre dos sustancias. Las moléculas de una y otra no llegan a interpenetrarse, tan solo quedan relacionadas al nivel de las capas exteriores. Se pueden distinguir la adsorción en la superficie de un líquido y en la superficie de un sólido (ya que solamente los líquidos y los sólidos presentan, en virtud de las características de sus estados, una superficie que delimita su volumen).

Adsorción en la superficie de un sólido

Es importante la naturaleza del gas y del sólido en la adsorción del primero sobre el segundo. Así, el grafito presenta una superficie apolar, mientras que la sal común presenta superficies polares. Ello justifica el uso del carbón activo para la adsorción de gases no polares (ejemplo bencol) y el uso de cristales iónicos para la adsorción de gases polares (vapor

de agua). Uno de esos minerales es la zeolita, apropiados como adsorbente de vapor de agua. Cabe señalar también que el proceso de adsorción es reversible.

Experimentalmente puede comprobarse que la masa de gas (vapor) adsorbido depende de la presión del gas y de la temperatura. Los diagramas correspondientes se llaman isotermas de sorción (sea adsorción o desorción). En el caso de un sistema de un sólido y vapor de agua en aire, se presenta usualmente las isotermas de sorción en función de la humedad relativa del aire $h_r = P / P_o$ (donde P es la presión parcial del vapor de agua; P_o es la presión de saturación) [2].

La adsorción de vapor de agua se hace necesaria en múltiples casos: para condicionar la humedad atmosférica, para prevenir efectos corrosivos, para evitar la formación de sedimentos, por ejemplo en tuberías para proteger superficies de materiales hidrosolubles, etc.

Para estos fines encuentra un amplio empleo el gel de sílice espeso acondicionado de indicadores que revelan, por la variación de color la cantidad de vapor de agua adsorbido y sugieren la oportunidad de sustituirlo o de regenerarlo.

Los carbones activos encuentran empleo en las carretas antigás, en la extracción de sustancias tóxicas en muchas instalaciones industriales (entre otras decoloración de líquidos, recuperación de disolventes, desbenzolado del gas coque), en medicina, etc. La adsorción juega un papel fundamental en el análisis cromatográfico.

Zeolitas

Son un grupo de minerales de una clase de aluminosilicatos cristalinos basados en un esqueleto estructural aniónico rígido, con canales y cavidades bien definidas (Na^+ , K^+ , etc.) y pueden también retener moléculas huéspedes removibles y reemplazables (agua en las zeolitas naturales). Su nombre proviene de su capacidad para perder agua por calentamiento, de las palabras griegas *zeo* que significa hervir y *lithos* que significa piedra.

La fórmula general de la composición de las zeolitas es $Mx/n[(AlO_2)_x(SiO_2)_y].mH_2O$, donde los cationes M de valencia n neutralizan las cargas negativas del esqueleto estructural del aluminosilicato y m coeficiente molar de agua presente en la zeolita. Existen muchas zeolitas naturales como también artificiales[3].

Entre las aplicaciones que se le da a las zeolitas tenemos:

- a) Como agentes deshidratantes
- b) Como intercambiadores de iones
- c) Como adsorbentes

La herramienta básica que nos sirve para el estudio de la adsorción de gases en sólidos es la isoterma de adsorción, la cuál mide la cantidad de sustancia adsorbida como una función de la humedad relativa (P/P_o)

CONCEPTOS BASICOS DE TERMODINAMICA

Efecto de la temperatura sobre la presión de saturación

La presión de saturación de un vapor depende de la temperatura del vapor. Al aumentar la temperatura se eleva exponencialmente el valor de la presión de saturación.

Vaporización

La vaporización de un líquido puede ocurrir de dos maneras diferentes: (1) por evaporación y (2) por hervor o ebullición. La vaporización de un líquido por el proceso de evaporación ocurre únicamente en la superficie libre del líquido y ocurre a cualquier presión inferior a la presión de saturación. La evaporación ocurre sin ningún disturbio visible del líquido.

Sin embargo, la ebullición sólo ocurre si la presión de vapor es igual a la presión de saturación. Si la presión de vapor es igual a la presión ejercida sobre el líquido, este tipo de vaporización ocurre en todo el líquido por completo así como también en la superficie libre y es acompañada por una agitación considerable del líquido y una formación muy rápida de burbujas que se expanden, subiendo y reventándose en la parte superior del líquido [4].

Evaporación

La evaporación toma lugar en forma continua, de hecho el agua se evapora en los lagos, ríos, charcas, ropa, etc. lo cual constituye una evidencia de que la evaporación puede ocurrir a temperaturas menores a la temperatura de saturación. Cualquier líquido expuesto a la atmósfera, se evaporará en forma gradual y se difundirá en el aire, independientemente de su temperatura [4].

Calor latente de vaporización

Cualquier cantidad de energía suministrada a un líquido después que el líquido llega a la temperatura de saturación es utilizada para aumentar el grado de separación molecular (aumentándose la energía potencial interna) y el fluido pasará de la fase líquida a la de vapor. Debido que no hay un aumento en la energía cinética interna (velocidad molecular), la temperatura del fluido permanece constante durante el cambio de fase y, el vapor resultante está a la temperatura de vaporización (saturación) [4].

La cantidad de energía necesaria para vaporizar o condensar una masa dada de un fluido a la temperatura de saturación, puede calcularse a partir de la siguiente relación:

$$Q_L = m h_{fg}$$

donde:

Q_L : cantidad de energía térmica

m : masa

h_{fg} : calor latente de vaporización

Contenido de humedad en un producto

El contenido de humedad, es decir la cantidad de agua evaporable existente en un producto, se expresa en relación a su masa total ("humedad en base húmeda") o a su masa seca (esto es la masa que se obtiene descontando la masa de agua evaporable que lo contiene): "humedad en base seca".

$$X = (m - m_s) / m_s$$

donde:

m : masa total del producto

m_s : masa seca del producto

X : contenido de humedad del producto (en base seca)

DESCRIPCION DEL SISTEMA DE REFRIGERACION

Refrigerador

El prototipo de refrigerador fue construido por EG-Solar de Altötting en Alemania y donado a la Universidad Nacional de Ingeniería. El refrigerador está compuesto de una caja térmica de poliuretano de una capacidad de 44 litros (usado por la Organización Mundial de la Salud - OMS, para mantener vacunas en frío) y en su tapa se encuentra integrado el evaporador, consistente de un recipiente de acero inoxidable con una capacidad de 1 litro de agua.

El evaporador está conectado herméticamente por una manguera con un comportamiento que contiene a un recipiente con la zeolita.

Medidas externas de la caja térmica = 71 x 56 x 49 cm

Volumen interno de la cámara de frío = 44 litros

Peso total = 18 kg

Contamos con dos recipientes de zeolita con un peso total (recipiente más zeolita) de 6,320 kg y 6,520 kg respectivamente.

En el sistema se puede hacer vacío con una bomba manual que presentó dificultades. Hemos podido contar con dos pequeñas bombas de vacío eléctricas, permitiendo llegar a una presión final menor de 2 mbar. Las características son las siguientes:

Marca: Zeo-Tech.

93 W, 12 VDC, 10,8 A, 3300 litros/min.

Presión de vacío: 1 mbar

Operación y funcionamiento

Se coloca agua en el evaporador (max 1 litro), luego se baja la presión a aproximadamente 2 mbar (extrayendo así todo el aire). Esto hará que el agua se evapore rápidamente, absorbiendo calor latente de los alrededores. La zeolita comienza a adsorber el vapor de agua lo que impide que la presión parcial del vapor de agua se incremente, este proceso continúa ocasionando un descenso en la temperatura del evaporador hasta que la zeolita se sature y deje de adsorber el vapor de agua o hasta que ya no haya agua.

En pruebas experimentales la temperatura en el evaporador llegó hasta los -7°C , obteniéndose en el interior del refrigerador (caja térmica) una temperatura de -3°C .

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Lugar de ensayo: Universidad Nacional de Ingeniería, ciudad de Lima

Condiciones ambientales:

$T_{amb} = 22^{\circ}\text{C}$;

$P_{atm} = 1026 \text{ mbar}$

Masa de agua en el evaporador = 400 gr.

Peso de la zeolita seca + recipiente = 6,250 kg.

Peso de la zeolita saturada + recipiente = 6,650 kg.

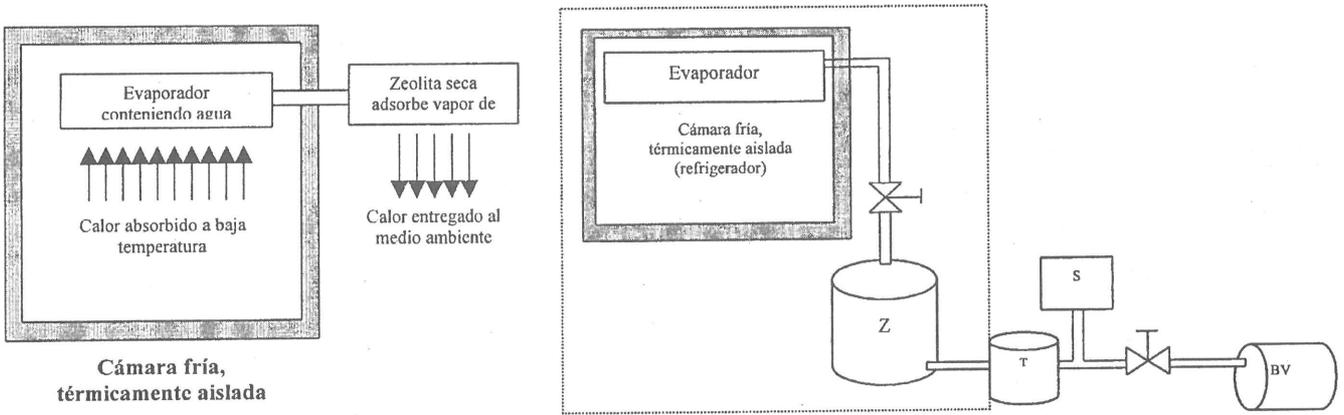


Fig. 1 Proceso de enfriamiento

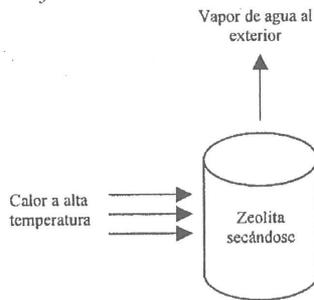


Fig. 2 Proceso de regeneración

Z: Recipiente de Zeolita
 T: Trampa de vapor de agua
 S: Sensor del medidor de presión
 BV: Bomba de vacío

Fig. 3 Esquema de instalación para pruebas

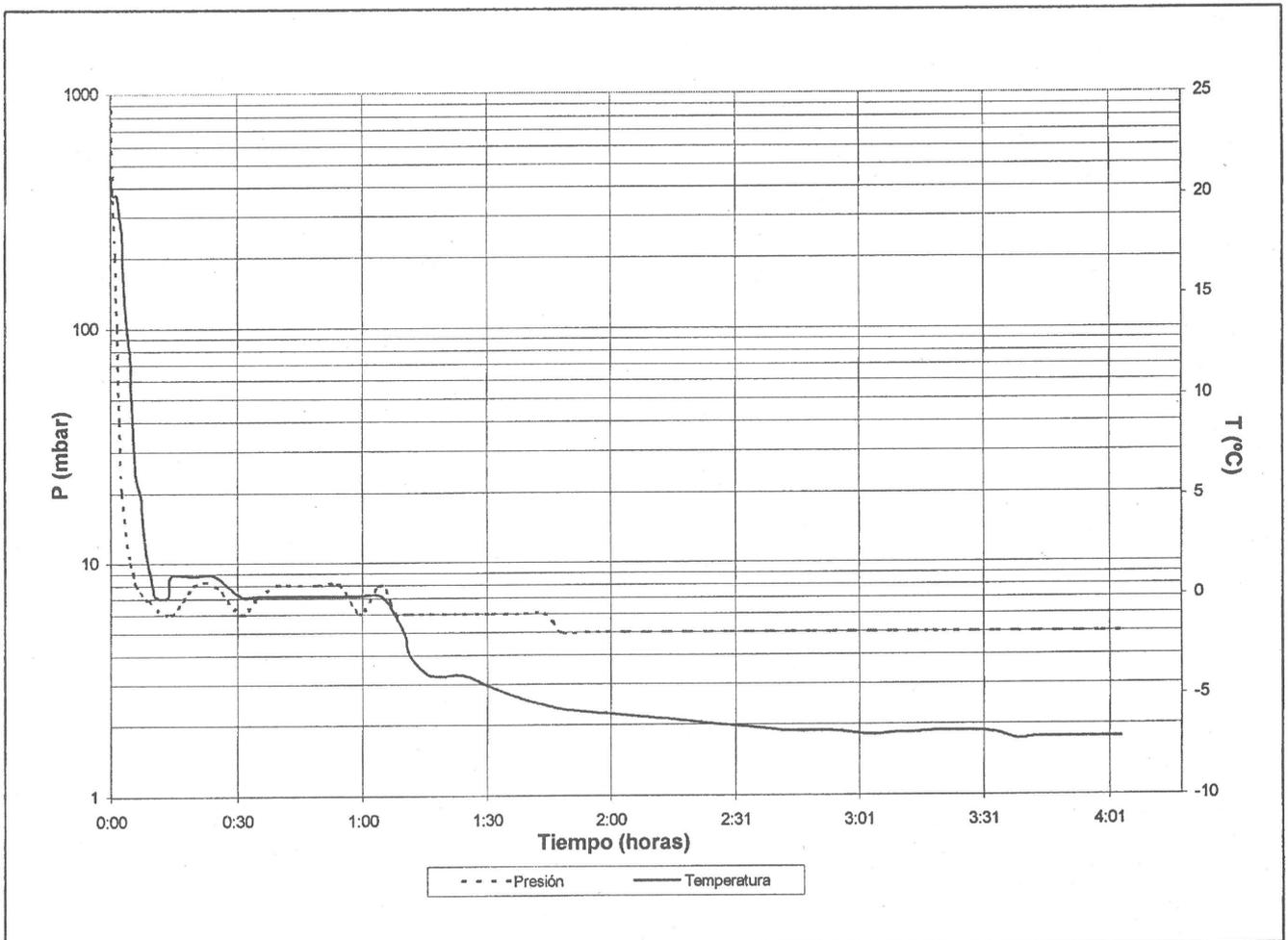


Fig. 4 Proceso de enfriamiento, variación de presión y temperatura en función del tiempo

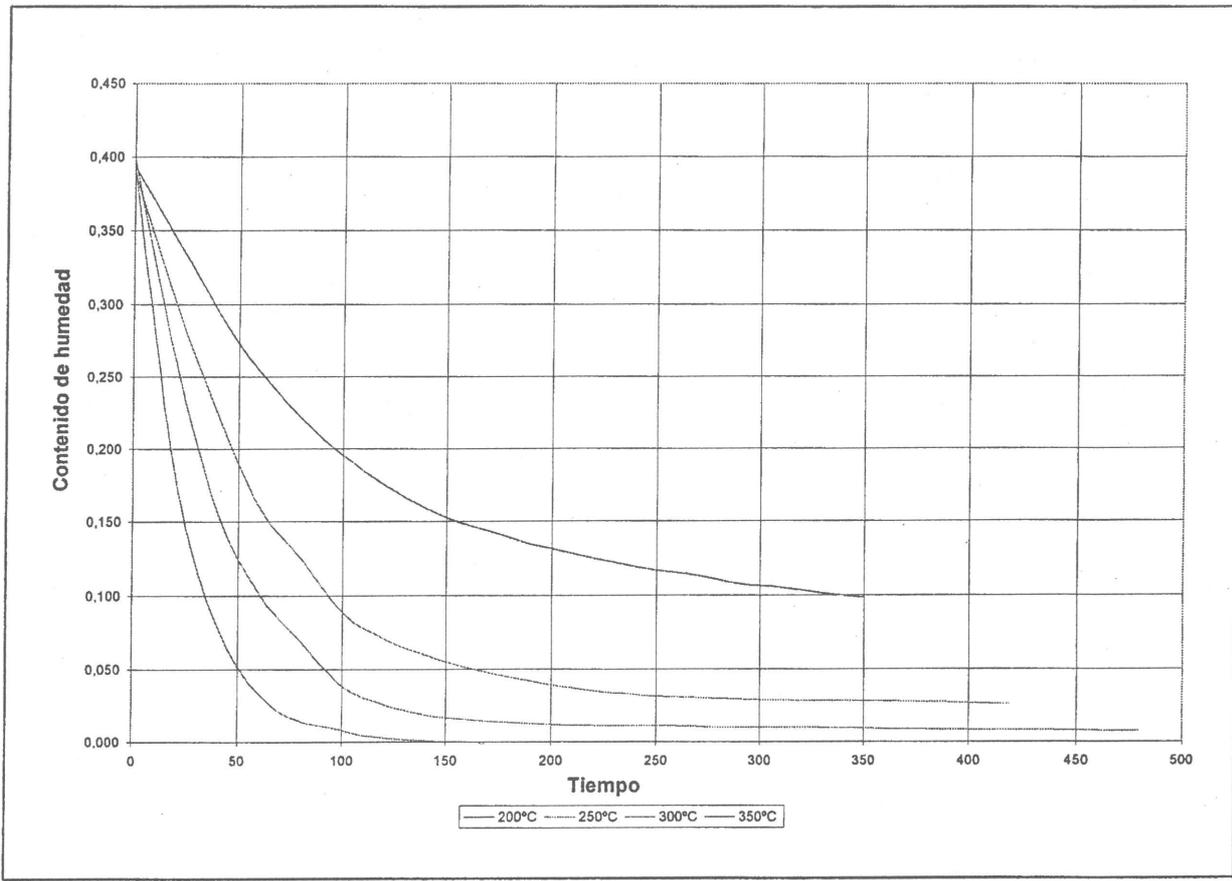


Fig. 5 Proceso de regeneración, secado de la zeolita, contenido de humedad en función del tiempo

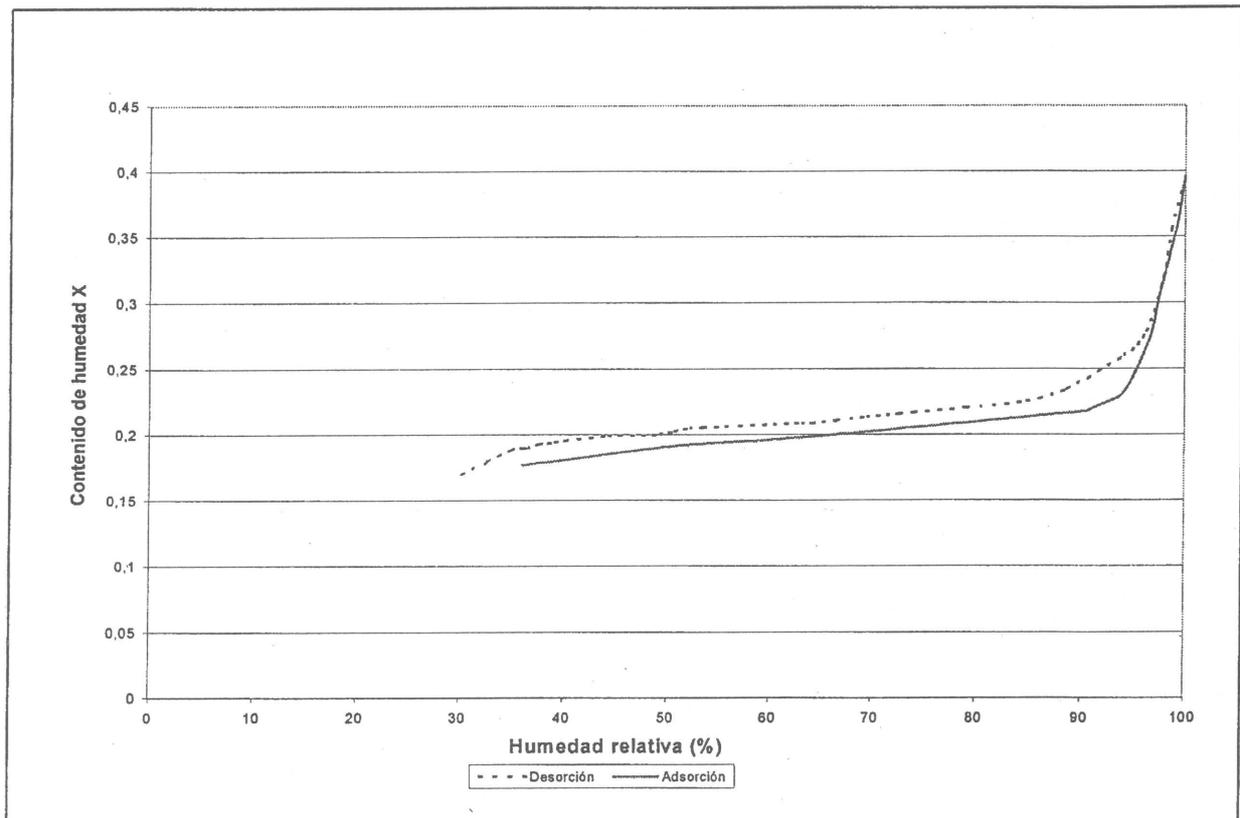


Fig. 6 Proceso de regeneración, curvas de adsorción y desorción, contenido de humedad vs. Humedad relativa

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

1. Como se puede observar en la figura N°4 la temperatura mínima obtenida en el evaporador es de $-7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, después de aproximadamente 2,5 horas de iniciarse el proceso extrayendo con la bomba de vacío el aire del sistema. A 0°C se llega en 30 minutos. Asimismo las pérdidas por conducción y convección a través de las paredes de la cámara de frío hacen de que en aproximadamente 2 días se eleve la temperatura en la cámara a $17,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura medida teniendo como temperatura ambiente $21\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. La presión de trabajo obtenida en las pruebas experimentales ha sido de 2 mbar. Esperamos mejorar la caída de presión y verificar pérdidas en el sistema, esto conllevará a una mejora en el proceso de enfriamiento.
3. Aún no calculamos valores de eficiencia térmica debido a que la regeneración de la zeolita para las pruebas experimentales la estamos realizando en un horno eléctrico, y el calor utilizado para el proceso de regeneración es lógicamente alto con relación al necesario, es decir estamos utilizando una energía elevada para esta regeneración lo que por supuesto altera el cálculo del rendimiento térmico. La regeneración se lleva a cabo durante 3 horas a una temperatura de 350°C .
4. En la figura N°5 (las mediciones presentadas en las figuras 5 y 6 fueron realizados en el Laboratorio de Física de la) se observa que la regeneración de la zeolita debe realizarse a una temperatura de 350°C obteniéndose un contenido de humedad de 0% en aproximadamente 150 min. Si la regeneración se realiza a una temperatura inferior a 350°C no se obtiene zeolita completamente seca. Sin embargo, falta determinar la temperatura mínima necesaria para obtener zeolita suficientemente seca para el proceso. Una menor temperatura de regeneración simplificará este parte del proceso, permitiendo, eventualmente, el uso de cocinas solares para el secado de la zeolita.
5. La zeolita utilizada es artificial y de la firma Zeo - Tech. Las curvas de equilibrio de adsorción y desorción de una muestra de zeolita, medidas a temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) son presentadas en la figura N°6. Esta zeolita permite una adsorción máxima de agua de $X = 0,3$, es decir la zeolita puede adsorber agua hasta el 30% de su peso seco.
6. Según información de EG-Solar de Alemania, el costo aproximado de este prototipo de refrigerador por adsorción es de US\$ 3 000.00, incluyendo un concentrador parabólico solar (cocina solar SK14)
7. La cocina solar SK14 está previsto para el proceso de regeneración de la zeolita. Sin embargo, experimentos preliminares con esta cocina solar no permitieron llegar a la temperatura necesaria para regenerar a la zeolita, por lo cuál, por el momento, se descarta el uso del concentrador parabólico solar. Queda pendiente el diseño de un sistema de regeneración, apto para el uso en regiones rurales.
8. La bomba de vacío usada es de 12 VDC y consume una potencia de 92 W, es decir la corriente es aproximadamente 7,6 A. El tiempo de uso de esta bomba, para obtener el vacío requerido en el sistema, y con los valores experimentales obtenidos a la fecha no excede de los 15 minutos, es decir se requiere 1,9 Ah. Además podemos mencionar que la bomba utilizando el refrigerador en forma continua trabajaría cada dos o tres días, es decir un sistema fotovoltaico de pequeña potencia (5Wp) sería suficiente para abastecer de energía eléctrica a la bomba de vacío.

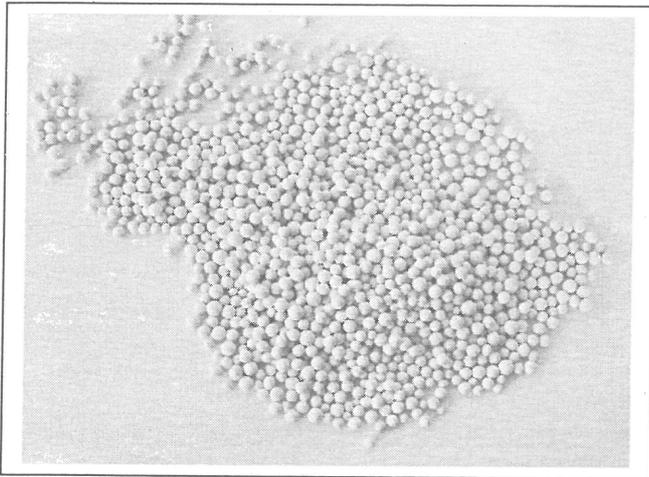
AGRADECIMIENTOS

1. Agradecemos al Sr. Nicolaus Himmelstoss (de Altötting de Alemania), quien nos donó dos bombas de vacío 92 W, además de zeolita artificial.
2. A los Srs. Manuel Chunga y Saúl Torres de quienes tomamos los valores experimentales para la construcción de las figuras 5 y 6.

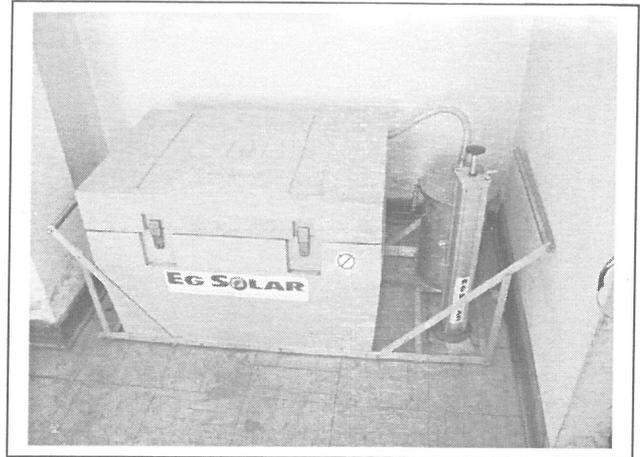
REFERENCIAS

1. Threlkeld J.L, "Ingeniería del Ambito Térmico", editorial Prentice Hall internacional (1973).
2. Van Wylen G. J. Sonntag R. E, Fundamentos de la Termodinámica, editorial Limusa (1980).
3. Smart L, Moore E. "Química del estado sólido", Addison Wesley Iberoamericana (1995).
4. Dossat R.J, "Principios de Refrigeración", decimaquinta reimpresión, compañía editorial continental, S.A. de CV - México (1995).

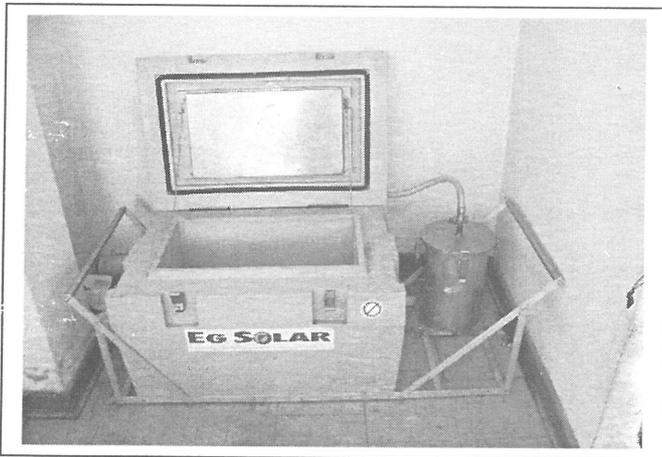
ANEXO FOTOGRAFICO



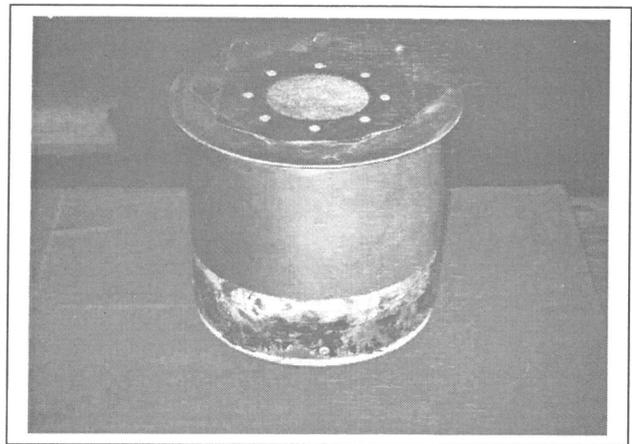
A1. Zeolita artificial, posee como porcentaje máximo de adsorción 30 %



A4. Refrigeradora, inicialmente la refrigeradora funcionaba con una bom manual la que se observa frente al recipiente de zeolita.



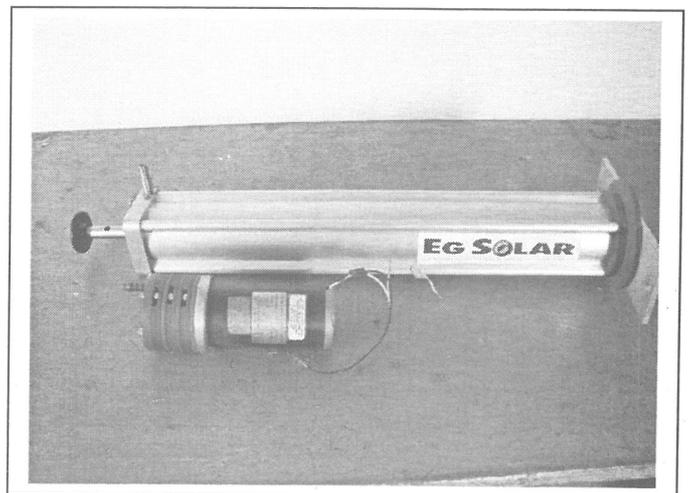
A2. Vista de la refrigeradora, se observa el compartimiento hermético, el evaporador en la cubierta y el recipiente de zeolita al lado derecho.



A5. Depósito metálico, contiene 6,250 kg. de zeolita



A3. Vista de la refrigeradora, observese la tapa del recipiente donde va ubicada la zeolita, la tapa se cierra herméticamente para evitar pérdidas de presión



A6. En la vista se observa la bomba manual y la eléctrica utilizada en su reemplazo.