

EVALUACIÓN Y DISEÑO PRELIMINAR DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN

Miguel Ramos, Manfred Horn, Rafael Espinoza
Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía
E-mail: mramos@uni.edu.pe / cer@uni.edu.pe

RESUMEN

El presente trabajo muestra algunas evaluaciones experimentales de un prototipo de refrigerador solar de ciclo intermitente, el cual basa su funcionamiento en un ciclo termodinámico de adsorción, utilizando como refrigerante agua y como adsorbente el mineral zeolita, con el objetivo de conocer su comportamiento así como analizar ventajas y desventajas de su posible utilización en zonas rurales en el Perú. Sobre la base de los resultados obtenidos, se está diseñando un nuevo prototipo experimental de refrigerador para el medio rural, basándose en el mismo proceso termodinámico, pero incluyendo ventajas de operación y desempeño.

ABSTRACT

This paper presents some of the experimental evaluations of a prototype solar refrigerator, based on an intermittent thermodynamic cycle of adsorption, using water as refrigerant and the mineral zeolithe as adsorber. The objective is to analyse the advantages and disadvantages of the eventual use in rural regions of Peru. On the bases of the results obtained, a new prototype of refrigerator for rural regions is designed, based on the same thermodynamic cycle, but including changes in design and operation.

INTRODUCCIÓN

El proceso de refrigeración por adsorción se diferencia básicamente de la refrigeración por compresión mecánica de un gas, usada en las refrigeradoras comunes, cuando el compresor, que requiere energía eléctrica, es reemplazado por el conjunto adsorbedor – adsorbente. Este tipo de sistemas adsorptivos resultará apropiado cuando exista disponibilidad técnica y económica de una fuente de calor, necesaria para su funcionamiento. Es por ello que esta alternativa de refrigeración podrá ser utilizada en poblaciones rurales con deficiencia de energía eléctrica convencional, pero disponibilidad de una fuente de calor (por ejemplo: leña o radiación solar).

El ciclo que realiza este tipo de equipos de refrigeración es conocido como ciclo intermitente, debido a que los dos procesos fundamentales para su funcionamiento, el de enfriamiento y el de regeneración, se efectúan en tiempos diferentes.

El fenómeno de adsorción de gases es un fenómeno de adherencia de un gas en la superficie de un sólido, este proceso se realiza en forma exotérmica. Pasemos ahora a mencionar algunos conceptos básicos de la termodinámica de adsorción.

FUNDAMENTO TEÓRICO

Termodinámica de adsorción

Un aspecto importante en la adsorción es la variación de las propiedades termodinámicas del sistema durante el proceso [1, 2, 3 y 4].

Varios parámetros influyen en el desprendimiento de energía, como la presión del gas, la temperatura, el grado de recubrimiento, etc.

Por tanto, es posible obtener distintas expresiones del

calor de adsorción según la forma en que se defina el sistema o las condiciones experimentales usadas. Hill [5], entre otros, ha definido diferentes tipos de calores de adsorción. En su análisis, se distinguen tres formas importantes:

Calor integral.- el que se define como la diferencia de energía de las moléculas gaseosas antes y después de adsorberse:

$$Q_{\text{int}} = E'_b - E_b = n_\sigma (e_g - e_\sigma) \quad (1)$$

donde: E_b , es la energía inicial del baño, e_g , la energía media por molécula gaseosa, E'_b , es la energía interna del baño al final del proceso, n_σ , el número de moléculas adsorbidas en el equilibrio, e_σ , la energía media por molécula adsorbida. El sólido se supone inerte respecto a la adsorción, es decir, los átomos superficiales no son afectados energéticamente después del asentamiento de las moléculas gaseosas. Además, e_g , es función sólo de la temperatura y e_σ , función de la temperatura, la presión y el número de moléculas adsorbidas por unidad de superficie: $\Gamma = n_\sigma / A$. Γ también es función de la presión y la temperatura.

Calor diferencial.- Relaciona el calor integral por unidad de moles y número de moléculas y se define como:

$$Q_{\text{dif}} = \left(\frac{\partial Q_{\text{int}}}{\partial n} \right)_{A,T} = e_g - e_\sigma - n_\sigma \left(\frac{\partial e_\sigma}{\partial n_\sigma} \right)_{A,T} \quad (2)$$

El último término del segundo miembro expresa la variación de e_σ , con el número de moléculas adsorbidas, producida por la heterogeneidad de los sitios y las interacciones laterales.

Calor isostérico.- Para definir el calor isostérico es preciso recurrir a algunas relaciones termodinámicas tradicionales, recordando que la variación de energía libre de Gibbs de un sistema termodinámico, formado por sólo un gas, puede expresarse por:

$$dG = -SdT + VdP - \pi dA + \mu d\eta \quad (3)$$

con:

$$G = -\pi A + \mu \eta \quad (4)$$

donde: G es la energía libre de Gibbs, π es la "presión bidimensional", A es la "superficie bidimensional" del adsorbente, μ es el potencial químico, η es el número de moles de la fase adsorbido, S es la entropía y V es el volumen adsorbido.

Considerando que el volumen de la fase adsorbido V es despreciable, en relación al volumen del adsorbente, y la temperatura constante ($dT=0$), obtenemos, a partir de las ecuaciones dG y G , lo siguiente:

$$d\mu = \frac{A}{\eta} d\pi \quad (5)$$

Para el equilibrio entre la fase adsorbida y la fase gaseosa se obtiene la "isoterma de Gibbs":

$$\frac{A}{\eta RT} d\pi = \frac{d\mu}{RT} = \frac{dP}{P}$$

ó

$$\ln P = \frac{\mu - \mu_0}{RT} \quad (6)$$

Esta isoterma, basada en la ecuación de gases perfectos, es una relación genérica. Puede ser adaptada para condiciones de concentración más elevadas, a partir de otras ecuaciones de estado. Su limitación cae justamente en la hipótesis implícita de considerar que las propiedades termodinámicas de la fase adsorbida móvil pueden ser representadas por una ecuación de estado típica de gases.

La derivación parcial de esta isoterma en la forma integrada, en relación a la temperatura, conduce a una función denominada isótera (masa adsorbida constante), expresada por la siguiente relación, conocida como la *fórmula de Clausius-Clapeyron*, donde q_{st} es el llamado *calor isostérico*, liberado en el proceso de adsorción:

$$\left(\frac{\partial \ln P}{\partial T} \right)_a = \frac{q_{st}}{RT^2} \quad (7)$$

Aplicando esta ecuación a la condición de saturación ($P = P_s$), se obtiene el calor latente de cambio de fase L .

$$L = -RT^2 \left(\frac{\partial \ln P_s}{\partial T} \right)_a \quad (8)$$

La derivación de la ecuación de Dubinin-Astakhov resulta:

$$\frac{\partial \ln P}{\partial T} = \frac{\partial \ln P_s}{\partial T} + \ln \left(\frac{P_s}{P} \right) \left\{ T^{-1} + \frac{\alpha}{nD} \left[T \ln \left(\frac{P_s}{P} \right) \right]^{-n} \right\} \quad (9)$$

con:

$$\alpha = W_o \frac{\partial \ln(\rho_l / a)}{\partial T} \quad (10)$$

donde: α representa el coeficiente de expansión térmica del sorbato líquido.

Multiplicando cada término de la ecuación diferencial por RT^2 , se obtiene finalmente la representación del calor isostérico.

$$q_{st} = L + RT \ln(P_s / P) + \left[\frac{\alpha RT}{nD} \right] \left[T \ln(P_s / P) \right]^{(1-n)} \quad (11)$$

Una relación importante y que finalmente se traduce en el conocido diagrama isostérico de adsorción es la denominada ecuación de Dubinin – Astakhov:

$$a = W_o \rho_l(T) \exp \left\{ -D \left[T \ln \left(\frac{P_s}{P} \right) \right]^n \right\} \quad (12)$$

donde: a es la masa adsorbida por unidad de masa de adsorbente, W_o es la capacidad máxima de adsorción (volumen de adsorbato / masa de adsorbente), ρ_l es la masa específica de adsorbato líquido, D es el “coeficiente de afinidad” y n es un parámetro característico del par adsortivo.

Esta relación se cumple para procesos de adsorción en materiales microporosos, con distribución de

dimensiones de poro del tipo polimodal, como por ejemplo zeolitas, carbones activos, sílica, entre otros.

Par Adsortivo Agua - Zeolita

Zeolitas.- Grupo de minerales de una clase de aluminosilicatos cristalinos, basados en un esqueleto estructural aniónico rígido, con canales y cavidades bien definidas, que pueden retener moléculas huéspedes removibles y reemplazables. La fórmula general de la composición de las zeolita es $M_x/n [AlO_2]_x (SiO_2)_y \cdot mH_2O$, donde los cationes M (Na^+ , K^+ , etc.) de valencia n neutralizan las cargas negativas del esqueleto estructural del aluminosilicato. Existen más de 40 zeolitas naturales y alrededor de 150 artificiales [6]. Las zeolitas pueden utilizarse como agentes deshidratantes, como intercambiadores de iones, como adsorbentes; su densidad es de alrededor de 800 kg/m^3 y su costo varía de entre 0,50 y 4,00 \$/kg.

Adsorbato Agua.- Compuesto químico cuya fórmula es H_2O , a temperatura entre $0 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ($P = 1000 \text{ mbar}$) es un líquido insípido, inodoro e incoloro en cantidades pequeñas; en grandes cantidades retiene las radiaciones del rojo, por lo que a nuestro ojos adquiere un color azul.

A continuación mostramos algunas propiedades termodinámicas del agua.

Tabla 1. Presión de saturación de agua en función de la temperatura.

Líquido - Vapor					
	T (°C)	P (mbar)		T (°C)	P (mbar)
1	100	1003.50	12	45	95.93
2	95	845.54	13	40	73.84
3	90	701.39	14	35	56.28
4	85	578.34	15	30	42.46
5	80	473.90	16	25	31.17
6	75	385.78	17	20	23.39
7	70	311.88	18	15	17.05
8	65	250.33	19	10	12.28
9	60	199.41	20	5	8.72
10	55	157.58	21	0	6.11
11	50	123.50			

Sólido - Vapor					
	T (°C)	P (mbar)		T (°C)	P (mbar)
1	0.01	6.113	12	-20	1.036
2	0	6.108	13	-22	0.854
3	-2	5.177	14	-24	0.701
4	-4	4.376	15	-26	0.574
5	-6	3.639	16	-28	0.468
6	-8	3.102	17	-30	0.381
7	-10	2.601	18	-32	0.309
8	-12	2.176	19	-34	0.249
9	-14	1.815	20	-36	0.202
10	-16	1.510	21	-38	0.161
11	-18	1.252			

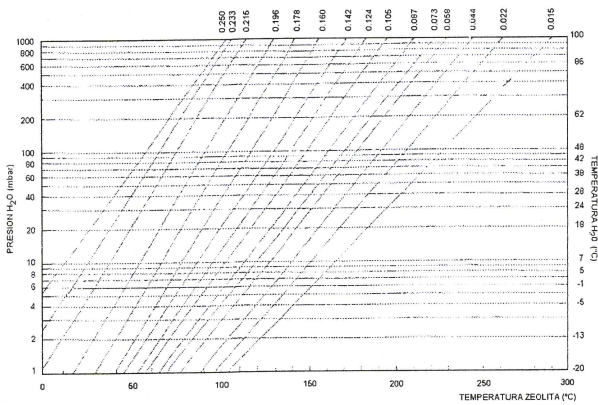


Fig 1. Isothermas del par adsorbtivo Zeolita 13x – H₂O.

En la Figura 1, se muestra las isósteras del par adsorbtivo Zeolita 13x – H₂O, el tipo de zeolita que estamos usando. Como se observa en la figura la capacidad máxima de adsorción es aproximadamente 30% de su masa. (figura de Zeo-Tech, Alemania, proveedor de la zeolita artificial utilizada).

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO

En nuestro caso el proceso de enfriamiento es conocido por enfriamiento evaporativo, el cual consiste en evaporar dentro de un espacio (evaporador) un líquido refrigerante (agua): este líquido absorberá calor de los alrededores para realizar el cambio de fase [7, 8] produciendo un enfriamiento.

1. En el evaporador se encuentra una masa “m” de agua, (en nuestro caso ≤ 1 kg) cuyas condiciones

iniciales de presión y temperatura son: 1000 mbar y 25°C respectivamente.

2. Se realiza la succión extrayendo el aire con una bomba de vacío; la presión final en el evaporador es, en nuestro caso, P = 2 mbar (esta presión depende de la capacidad de la bomba de vacío).
3. Como se observa en la Tabla 1, la temperatura de saturación a la presión de 2 mbar, está muy por debajo de 25°C, lo que origina una evaporación brusca.
4. Esta evaporación brusca se realiza con una extracción de calor de los alrededores para el cambio de fase, y, por consiguiente, una disminución de temperatura. Sin embargo, la presión parcial del vapor de agua comienza a incrementarse: supongamos entonces que la temperatura dentro del evaporador ahora sea de 10°C, el proceso de evaporación continuará hasta que la presión total en el evaporador alcance un valor aproximado de 12 mbar (que es la presión de saturación correspondiente a esta temperatura).
5. Existirá entonces un equilibrio termodinámico dentro del evaporador. Claro que la temperatura final en él aún no es muy baja como queremos. Entonces añadimos al sistema un adsorbente, zeolita, cuya función es hacer que el valor de la presión parcial del vapor de agua no se incremente (adsorbiendo los vapores de agua), ocasionando un desequilibrio termodinámico dentro del evaporador. La evaporación continuará con la disminución de la temperatura. Este proceso continuará hasta que se evapore la totalidad del agua o hasta que la zeolita esté completamente saturada. En resumen, el añadir el adsorbente al sistema ocasionará que una mayor cantidad de masa de agua evapore y que la presión del sistema sea baja, por consiguiente se obtiene una mayor caída de temperatura.
6. Con la caída de temperatura, una parte del refrigerante se congela, teniendo una mezcla de sólido y vapor. La presión total dentro del evaporador es prácticamente igual a la presión del aire restante que quedó en el sistema (ya que el vapor ha sido casi totalmente adsorbido). Es decir, si por ejemplo el evaporador está a una presión de 2 mbar, el sólido tendrá una temperatura

de saturación comprendida entre -12 y -14 °C.

7. Otra etapa del proceso, y como se verá más adelante con los resultados experimentales, es que luego que la temperatura del evaporador cae a su punto mínimo, por pérdidas de calor con el exterior, esta comienza a incrementarse. Este incremento origina, luego de un intervalo de tiempo, la descongelación del hielo; el proceso comienza a incrementar presión y temperatura, Todo el agua contenida es finalmente vaporizada (debido a la baja presión) y adsorbida en la zeolita (siempre que el adsorbedor no se sature).
8. En el refrigerador se cumple que la capacidad máxima de adsorción de la zeolita, (30% de 4,2 kg de zeolita, es 1,26 kg de agua aproximadamente) es mayor que la cantidad de masa dentro del evaporador (debido a que la capacidad máxima del evaporador es de 1 kg de agua). Con esto se garantizará que la masa total de agua en el evaporador pueda ser adsorbida por la zeolita.
9. En pruebas experimentales se ha registrado temperaturas en el evaporador de alrededor de -14 °C, obteniéndose en el interior del refrigerador (caja térmica) una temperatura de -7 °C (prueba realizada en el laboratorio de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería el 23 de junio del 2001, con 0,5 kg de agua en el evaporador).

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE REGENERACIÓN

El proceso de regeneración o separación del vapor de agua de la zeolita es una etapa posterior al proceso de enfriamiento. Esta se debe realizar para poder utilizar nuevamente el adsorbente. En la Figura 2 se presentan los resultados de este proceso de una muestra de zeolita sometida a diferentes temperaturas de regeneración. Estas pruebas son realizadas en una estufa eléctrica a la presión atmosférica (1000 mbar). En cuanto al proceso de regeneración mostrado en esta figura, se observa que es recomendable extraer de 30% a 12% de humedad ya que continuar el secado resultaría un gasto de energía alto, teniendo como consideración que la humedad relativa es baja (menos del 20%) [7, 8].

Por ello la temperatura apropiada de regeneración de la zeolita es de 250 °C. Con esta temperatura se obtiene zeolita con 5% de humedad (extracción de 84% de masa de agua contenida) en aproximadamente 2,5 horas; si trabajamos a una menor temperatura 200°C se obtiene zeolita con 10 % de humedad (extracción de 66 % de masa de agua contenida) en 6 horas, lo que resulta inapropiado para nuestro fin; de la misma forma para una temperatura de 300°C obtenemos un producto casi seco de 0,01% (con extracción de 97% de masa de agua contenida) en aproximadamente 3,5 horas y, finalmente a una temperatura de 350 °C obtenemos un producto seco en 2,5 horas. Claro que los dos últimos escenarios se producen a un costo de energía cada vez mayor.

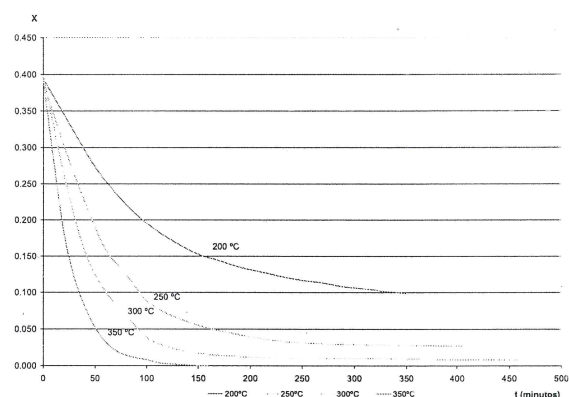


Fig. 2 Contenido de Humedad vs. Tiempo (Diferentes Temperaturas).

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO EG-SOLAR

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 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 compartimiento que contiene al recipiente con el adsorbedor zeolita.

Las medidas externas de la caja térmica son 71 x 56

x 49 cm, el volumen interno de la cámara de frío = 44 litros, peso total = 18 kg.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

La evaluación se realizó en laboratorios de la Universidad Nacional de Ingeniería. Las condiciones ambientales fueron: $P_{atm} = 1000$ mbar, $T_{ambiente} = 22^\circ\text{C}$. y la masa de zeolita = 4,2 kg. El interior del refrigerador (caja térmica) no contenía ningún producto [7, 8].

En la Figura 3, se muestra una prueba de enfriamiento realizada con 0,5 kg. de agua en el evaporador.

En los primeros 40 minutos, la temperatura cae de 25 a 0°C , esta caída de temperatura es originada por la evaporación violenta de una parte de la masa de agua en el evaporador, la presión en este lapso ha descendido desde 1000 mbar hasta $1,9$ mbar, luego de ello la presión parcial del vapor de agua comienza a incrementarse obteniéndose valores de presión de $4,6$ mbar, fluctuando en este valor aproximadamente 100 minutos más, esto es debido a que la velocidad de evaporación supera la velocidad de adsorción. El adsorbente comienza a realizar su función lentamente, ocasionando nuevamente en $4,5$ horas que la presión caiga a un valor de $1,8$ mbar, por consiguiente la temperatura cae desde los 0°C hasta $-8,7^\circ\text{C}$ (la presión de saturación del sólido a esta temperatura es de $P = 3$ mbar) que es el valor mínimo conseguido en esta experiencia; además, tiempo antes, la temperatura del recipiente que contiene la zeolita llega a su valor máximo (45°C). Este valor se mantendrá unas 3 horas más como se puede observar en la Figura 3. A partir de este punto la cámara comienza a perder calor debido a las pérdidas por las paredes del refrigerador, esta pérdida continua lentamente. La temperatura se incrementa, el sólido formado dentro del evaporador comienza a evaporarse en pequeñas cantidades, originándose la adsorción de este vapor y una disminución de la temperatura, esto ayuda a que el aumento de la temperatura del evaporador sea aún más lento. Finalmente, el equilibrio en temperaturas con la temperatura ambiente se realiza aproximadamente luego de $3,5$ días de iniciado el proceso de enfriamiento, la presión del sistema queda en 6 mbar.

Las curvas que a continuación se muestran se han

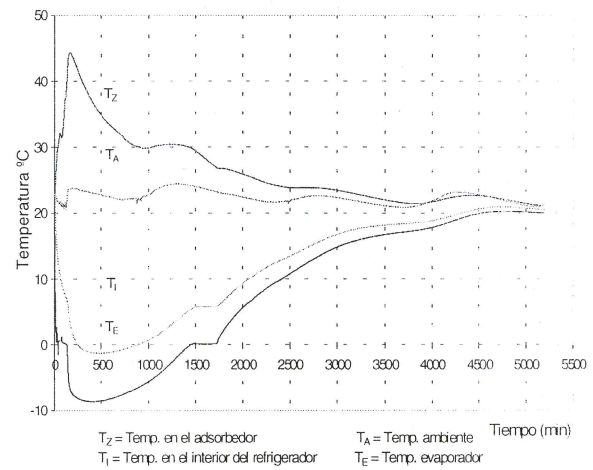


Fig. 3 Proceso de enfriamiento, Temperatura vs. Tiempo.

desarrollado en febrero del 2002. La característica importante es que se desarrollaron a una temperatura ambiente de 28°C , todas comenzaron a las $5:00$ pm. y se evaluaron durante 2 a 3 días cada una.

En la Figura 4 se muestran diferentes procesos de enfriamiento variando la masa de agua en el evaporador. En las curvas se puede observar, como se mencionó antes, un pequeño proceso de enfriamiento luego de varias horas, esto se interpreta como el resultado del desprendimiento de hielo dentro del evaporador y su cambio de fase. En la curva que corresponde a $0,3$ kg. de agua no se formó este sólido debido a que la masa es pequeña y por ello la temperatura no descendió de los 2°C . Pretendemos añadir curvas con masas de $0,6$ hasta 1 kg., las cuales se encuentran siendo procesadas. Se realizó una prueba con 1 kg. de agua, lamentablemente sin resultados satisfactorios debido a que el evaporador se encontraba en su capacidad máxima. La Figura 5 representa las presiones correspondientes a estos procesos.

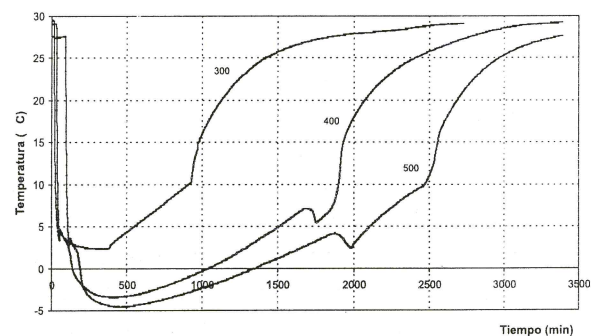


Fig. 4 Temperatura Evaporador vs. Tiempo.

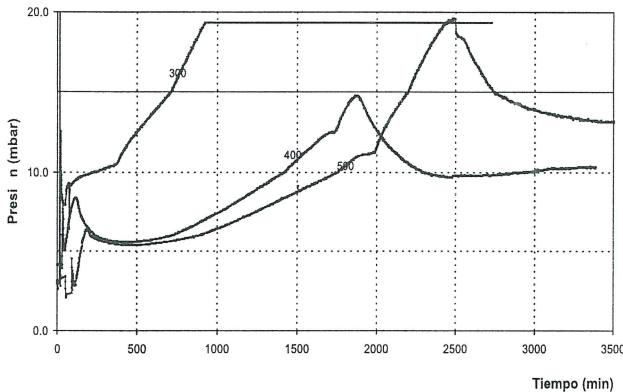


Fig. 5 Presión vs. Tiempo.

DESCRIPCIÓN DEL NUEVO PROTOTIPO - UNI

La evaluación del prototipo de refrigerador ha demostrado que su uso en áreas rurales por usuarios con poco entrenamiento técnico tendrá diversas inconveniencias y dificultades, por lo cual se propone algunas cambios en su diseño, como es indicado a continuación.

Características

1. Utilizará un sistema evaporador - adsorbedor permanentemente cerrado, reduciendo fuertemente la posibilidad de fuga del vacío y del refrigerante.
2. El ciclo seguirá siendo intermitente.
3. El nuevo prototipo trabajará a presiones bajas, se eliminará el uso de una bomba eléctrica de vacío; además se evitará cambiar el refrigerante (agua) cada vez que se requiera realizar el proceso de enfriamiento.
4. Se agregará un condensador tubular sumergido en agua.
5. El equipo que debe añadir calor para la regeneración (reactor) se definirá entre un colector solar parabólico compuesto (CPC) o el de un pequeño horno a leña.
- 6 La masa de agua en el evaporador será de 1 kg y

la masa de zeolita 5 kg. Por consiguiente, el valor máximo de $a = 0.2$, valor apropiado para el ciclo adsorbtivo, según se muestra en la Figura 7.

ESQUEMA TERMODINÁMICO

Prototipo EG - Solar

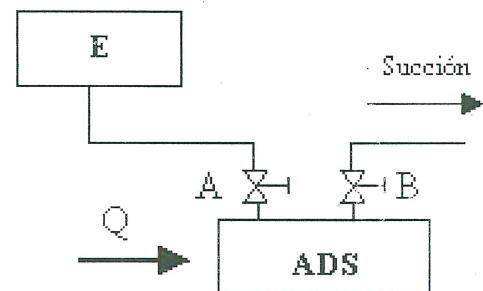


Fig. 6 Esquema Termodinámico prototipo EG-Solar; E: Evaporador; ADS : Adsorbedor; A, B: Válvulas; Q : Calor de regeneración.

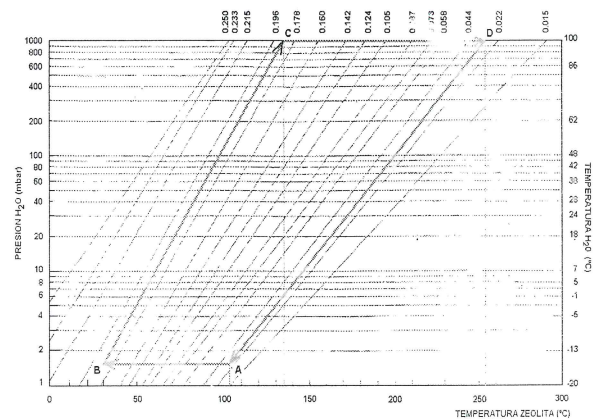


Fig. 7 Diagrama isotérmico del prototipo EG-SOLAR (Teórico); masa de zeolita : 5 kg; masa de agua: 1 kg; AB: adsorción isobárica CD: desorción isobárica DA: Succión, proceso de enfriamiento.

Al final del proceso en el punto "B", se abre el sistema para poder retirar la zeolita para su regeneración (calentándola para eliminar al refrigerante), perdiendo así el vacío, el que debe ser restituido más tarde, en cada ciclo, usando una bomba de vacío.

Prototipo UNI

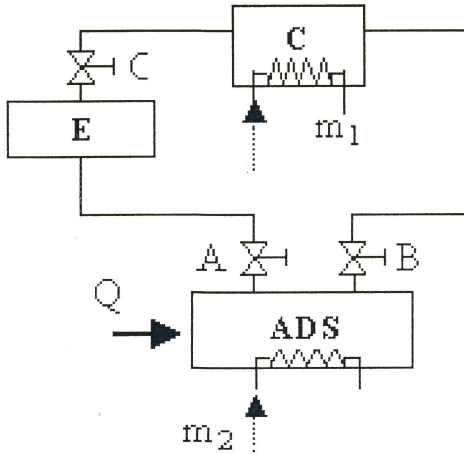


Fig.8 Esquema Termodinámico prototipo UNI; C:Condensador; E:Evaporador;ADS: Adsorbente; A, B y C: Válvulas; Q: Calor de regeneración; m₁, m₂: flujos de agua.

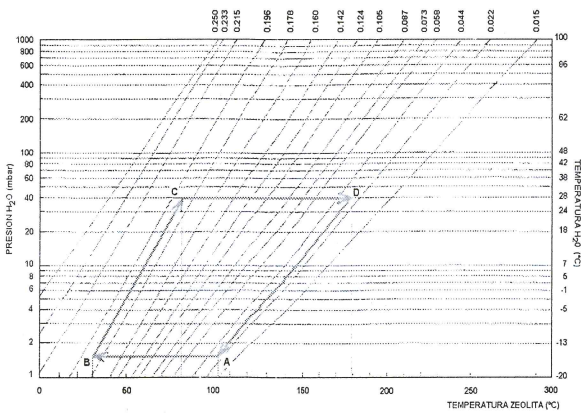


Fig. 9 Diagrama isostérico del prototipo UNI(Teórico); masa de zeolita : 5 kg; masa de agua : 1 kg; AB: Adsorción isobárica; BC: Calentamiento isostérico; CD: Regeneración isobárica; DA: Enfriamiento isostérico.

Parámetros a determinar

Calor necesario para la regeneración.- Mediante la siguiente relación, la cual es una aproximación de la curva descrita por Dubinin, podemos aproximar el calor requerido para la regeneración, el cual es numéricamente igual al calor integral de adsorción. [9]

$$Q = \lambda + \Delta F - \alpha T W \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W} \right)_T \tag{13}$$

donde: λ es el calor de condensación del adsorbato y α es el coeficiente de expansión térmica del agua. Una buena aproximación que simplifica la expresión anterior es considerar al tercer término del lado derecho despreciable. Por consiguiente, el calor integral de adsorción es la suma aritmética del calor de condensación del adsorbato y la energía libre representada por ΔF .

Tenemos la siguiente relación que involucra el calor latente de evaporación/condensación con la temperatura del fluido [10]:

$$L(T) = 3408.8736 - 5.20995T + 0.01011T^2 - 11.94644E - 6T^3 \tag{14}$$

donde: T en K y L(T) en kJ/kg.

Reemplazando para T = 298 K L(T) = 2437,97 kJ/kg para 1 kg de agua tenemos 2437,97 kJ.

De la Figura 10 se obtiene que la energía libre, correspondiente para una desorción de 0,3 hasta 0.05 es de 1800 kJ/kg de zeolita (aproximadamente). Considerando una masa de zeolita de 5 kg, se tiene entonces 7200 kJ, lo que corresponde a la denominada energía libre. Finalmente se tiene como calor integral de adsorción 9637,7 kJ (2,7 kWh). Este valor es el valor mínimo necesario para la desorción.

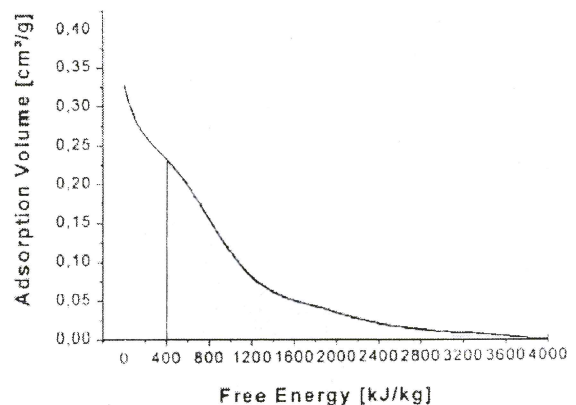


Fig 10 Curva característica de la energía libre para zeolita 13X.

Reactor.- El reactor está compuesto de un tubo de acero inoxidable de 4" de diámetro, en su interior se encuentra una malla metálica de 2" de diámetro, en el espacio interior a ambos cilindros se tienen 5 kg de zeolita 13X, cuya densidad aproximada es de 900 kg/m^3 .

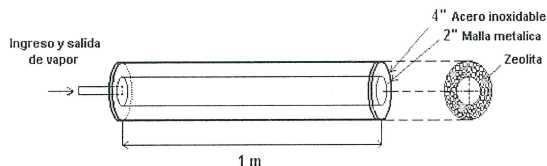


Fig. 11 Esquema del reactor.

El ingreso de vapor se realiza por una de las tapas del cilindro. La posición de este cilindro es horizontal, para pruebas experimentales y de funcionamiento se colocarán quemadores a gas. Este dispositivo se utilizará posteriormente con un concentrador parabólico compuesto.

Condensador.- El condensador será tubular, sumergido en agua, y su diseño garantiza la evacuación del calor requerido para el cambio de fase vapor líquido de un 1 kg de agua, el cual se determina mediante la relación (14). El condensador estará compuesto de 4 tubos paralelos de $1 \frac{3}{4}$ " pulgada de diámetro, y dos tubos largueros de 2" de diámetro tal como se indica en la Figura 12, la red tubular se encontrará sumergida en un depósito de agua.

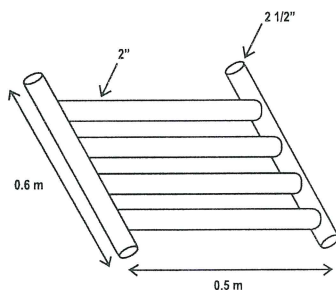


Fig. 12 Esquema del condensador.

Evaporador.- El evaporador es un paralelepípedo de acero inoxidable (Figura 13), cuyo ingreso y salida de vapor es por su parte superior. De esta forma se garantizará que se forme una película de hielo en su parte inferior.

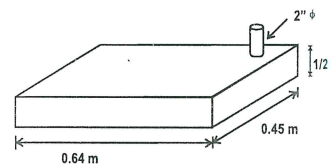


Fig. 13 Esquema del evaporador.

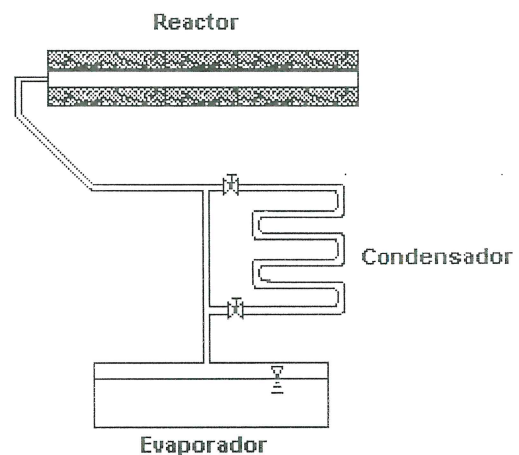


Fig. 14 Esquema del prototipo UNI.

COMENTARIOS FINALES

Como ya se mencionó, el prototipo UNI será cerrado, de ciclo intermitente, superando así los problemas actuales: necesidad de generar en cada ciclo nuevamente vacío; pérdida del vacío por fugas; conseguir, cada vez, agua sin impurezas.

Una fuente alternativa que cumple con nuestros requerimientos energéticos es la leña: un horno a leña cuya eficiencia sea del 50%, por ejemplo, requerirá la quema de 8,6 kg de leña en cada ciclo (considerando una biomasa de poder calorífico 2240 kJ/kg).

Las presiones de trabajos serán: presión mínima de 2 mbar (proceso de enfriamiento) y presión máxima de 96 mbar (proceso de regeneración).

En el gráfico 6 y 7 se muestran los diagramas isostéricos de ambos prototipos, cuya diferencia básicamente es que el prototipo UNI es cerrado y no se perderá el vacío ni el refrigerante.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Sr. Klaus Himmelstoss (de Altötting de Alemania), quien nos donó dos bombas de vacío 92 W, además de zeolita artificial y al Dr. Antonio Pralon F.L. por su asesoría en el diseño del prototipo UNI.

REFERENCIAS

1. **Antonio Pralon Ferreira Leite** “Sistema Frigorífico a Adsorcao Utilizando Carvao Ativado Metanol com Regeneracao por Energía Solar” Tesis presentada en concurso público para profesor titular.
Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB, Brasi, 1996.
2. **Sergio E. Droguett**, Elementos de la Catálisis Heterogénea, Secretariat of the Organization of American States Washington, D. C. , (1983)
3. **Isaac Pilatowsky Figueroa** “Notas del curso de Refrigeración Solar”, “VII Simposio Peruano de Energía Solar”, Piura, Perú, (1998).
4. **Antonio Pralon Ferreira Leite, Michel Daguén** “Performance of a new solid adsorption ice maker with solar energy regeneration”, “Energy Conversion & Management”, 41, 1625-1647 (2000).
5. **Torresman M. A.** “Etude expérimentale de la cinétique d’adsorption dans les zeólithes”, Thèse de Doctorat en Energétique.
Université Pierre et Marie Curie. Paris 6, 1991.
6. **Luiz Simao de Andrade Filho** “Contribucao ao Estudo Experimental da Difusao de Calor e Massa em Sílica Gel”, Tese de doutorado Universidade Federal da Paraíba, Joao Pessoa, PB, Brasil (2001).
7. **Miguel Ramos, Manfred Horn** “Comportamiento experimental de un refrigerador por adsorción” “Memorias del I Encuentro Iberoamericano de Refrigeración y Aire Acondicionado Solar”, memorias, Sevilla, España (2001).
8. **Miguel Ramos, Manfred Horn**, “Diseño preliminar de un prototipo experimental de refrigeradora por adsorción”, “IX Simposio Peruano de Energía Solar”, memorias, Arequipa, Perú (2001).
9. **Francis Meunier**, “Fundamentals of Adsorption 6”, Sixth International Conference of Fundamentals of Adsorption, 1998.
10. **Zanife Tahn-neissay**. “Etude d’une pompe a chaleur de 230 kW et d’une machine frigorifique a adsorption solide” These docteur. Université de París 6, 1999.