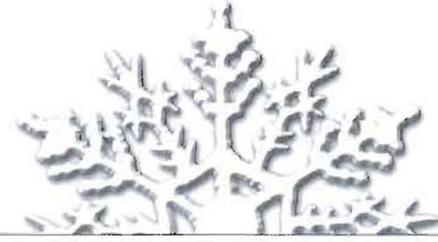


Las máquinas de producción de frío por adsorción con la mezcla sílica gel-agua

| POR E. TORRELLA | UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
| POR D. SÁNCHEZ, R. CABELLO, J. PATIÑO Y R. LLOPIS | UNIVERSIDAD JAUME I DE CASTELLÓN

El objetivo del trabajo es presentar una revisión de las máquinas frigoríficas tritéricas de adsorción, con mención especial en las que trabajan con la mezcla silicagel (o gel de sílice) - agua. La estructura seguida se inicia con los conceptos básicos termodinámicos en este tipo de máquinas y su presentación sobre un diagrama de Clapeyron. A continuación se presentan los distintos ciclos utilizados por las máquinas de adsorción, y las máquinas disponibles en el mercado, tanto para el sector doméstico como para grandes instalaciones de acondicionamiento de aire, finalizando con una comparación entre las máquinas tritéricas de absorción y adsorción.



DESDE HACE MUCHO TIEMPO el principio de la adsorción ha sido empleado en diferentes campos, pero apenas en técnicas de refrigeración o climatización. No es hasta 1925 en el que aparece la primera patente de una máquina de producción de frío con la mezcla sílica gel-SO₂. Entre los años veinte y treinta del siglo XX se desarrolló la máquina de refrigeración por adsorción. En 1927 la firma Copeland y la corporación americana Silica-Gel Corp. presentaron una máquina de refrigeración por adsorción con silicagel, desplazada rápidamente por la aplicación en los sistemas de refrigeración por compresión de los compuestos CFC descubiertos en aquella época. Una de las razones más notables para su sustitución fue el carácter intermitente de su funcionamiento. Algunas de las primeras patentes, con la mezcla sílica gel-SO₂, se muestran en la figura nº 1.

Esta tecnología fue posteriormente introducida por la firmas Safety Car Heating y Lighting Co. en el enfriamiento de vagones ferroviarios. Después de numerosas pruebas, el sistema desarrollado convenció tanto que se comenzó a realizar su producción en serie y se construyeron 50 vagones ferroviarios con dicha tecnología de enfriamiento para el transporte de pescado. En este sistema fue utilizado SO₂ (dióxido de azufre) como refrigerante. Este tipo de equipo no pudo mantenerse por mucho tiempo en operación, debido a que la sílica gel disminuía su capacidad de adsorción con el tiempo, lo cual repercutía directamente en la disminución del rendimiento.

Tchernev fue el primero en introducir el par de trabajo zeolita-agua en sistemas cerrados de refrigeración por adsorción. Este sistema tenía la peculiaridad de ser funcionalmente discontinuo, porque de día se utilizaban las radiaciones solares para el secado de la zeolita y de noche se producía el deseado efecto frigorífico, condicionado por la adsorción de los vapores de agua por la zeolita.

En 1980 Jaques Chiral desarrolló un sistema experimental donde obtuvo alentadores resultados prácticos con sistemas

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida), por eso se considera un fenómeno sub-superficial

de adsorción y colectores solares. A principios de 1990 Critoph y otros desarrollaron un refrigerador alimentado por energía solar, el cual fue recomendado por las Naciones Unidas para el almacenamiento bajo régimen de frío de vacunas en áreas subdesarrolladas.

En cuanto al sílica gel, fue Walter A. Patrick, de la Universidad Johns Hopkins de Baltimore, quien en 1919 lo sintetizó y patentó, utilizándose en la I Guerra Mundial en las máscaras anti-gas. A partir de 1920, Davison inició su comercialización en diversos campos, incluyendo la producción de frío por adsorción.

CONCEPTOS BÁSICOS

La base del método es similar al de las máquinas de absorción, es decir, nos encontramos ante un sistema tritérmico de producción de frío en el que el efecto útil es la evaporación de un líquido refrigerante a baja presión y temperatura. La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida); por ello se considera como un fenómeno sub-superficial. La sustancia que se concentra en la superficie –o se adsorbe– se llama “adsorbato”, y la fase donde se fija se llama

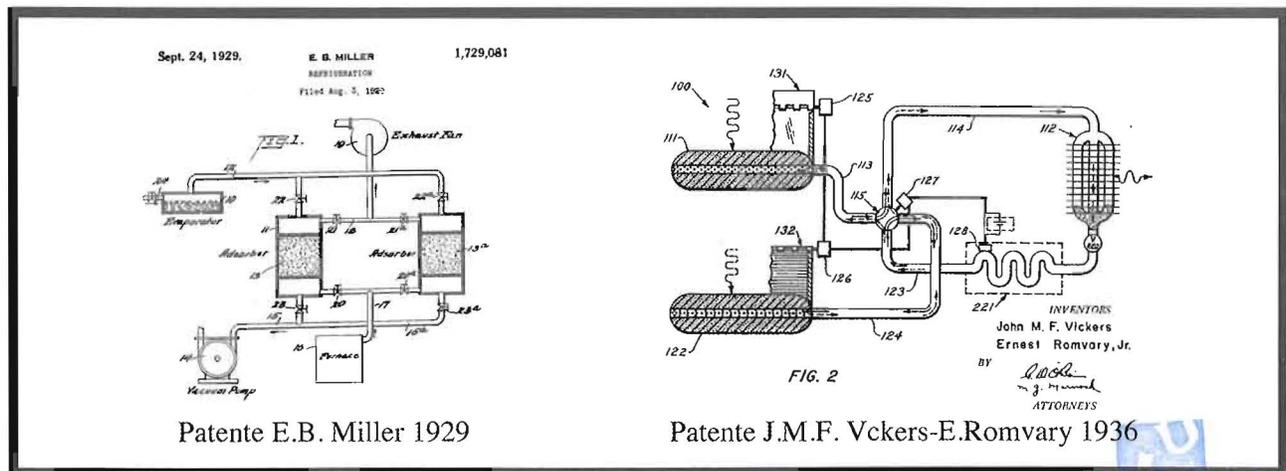
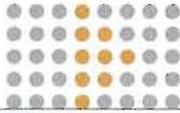


Figura 1. Primeras patentes





“adsorbente”. Por el contrario, la absorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase penetran casi uniformemente en los de otra fase, constituyéndose una “solución” con esta segunda.

Debemos hacer notar que la necesidad de introducir una potencia calorífica a nivel del generador de la instalación le confiere sentido al concepto de sistema tritérico, ya que la máquina interacciona básicamente con tres fuentes térmicas externas: por un lado, la fuente fría de utilización en caso de máquina frigorífica; en segundo lugar, el agente de condensación (el que vamos a considerar se utiliza también para extraer calor del adsorbedor), y, por último, la fuente de mayor nivel térmico utilizada en el generador. De forma esquemática estas interacciones térmicas se han mostrado en la figura 2.

Del esquema pueden deducirse las expresiones derivadas de la aplicación del primer y segundo principio de la Termodinámica en régimen permanente:

- Primer Principio. Conservación de la energía.

$$Q_o + Q_G \approx Q_m \quad (1)$$

- Segundo Principio. La variación de la entropía en el ciclo descrito por la máquina es nulo. Pero esto no es así en las fuentes externas; por lo que si suponemos que las temperaturas en estos focos permanecen constantes, el aumento de entropía en el universo pasa a ser de:

$$\Delta S_u = -\frac{Q_o}{T_o} - \frac{Q_G}{T_G} + \frac{Q_m}{T_m} \geq 0 \quad (2)$$

Suponiendo procesos reversibles, la combinación de ambos

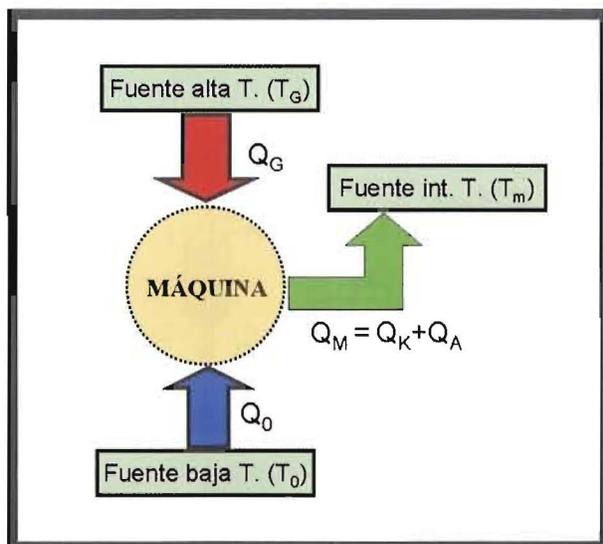


Figura 2. Interacción de la máquina tritérica con las fuentes

principios (5.1) y (5.2) conduce a la expresión del COP de la máquina como “productor de frío”, es decir:

$$\varepsilon_{MF} = \frac{Q_o}{Q_G} = \left[\frac{T_G - T_m}{T_G} \right] \left[\frac{T_o}{T_m - T_o} \right] \quad (3)$$

El COP se ha expresado como producto de dos factores, el primero de los cuales es el valor del rendimiento de una máquina generadora de Carnot que evoluciona entre las temperaturas “T_G” y “T_m”, por tanto inferior a la unidad. El segundo es el rendimiento propio de una máquina frigorífica ditérmica entre “T_m” y “T_o”.

De todo el análisis llevado a cabo se podría derivar, como conclusión, que la eficiencia de una máquina frigorífica de compresión siempre es superior a la de absorción que trabaje entre las mismas temperaturas de condensación y evaporación. Sin embargo, la validez de este razonamiento es discutible debido a dos razones fundamentales:

- En primer lugar, no se ha considerado en ningún momento de la discusión el camino seguido en la obtención de la energía de accionamiento del compresor de la máquina ditérmica. En este sentido, debemos recordar que, si la energía proviene de una central convencional, habría que considerar las pérdidas que en ella se producen, y que los rendimientos en estas plantas se mueven en el orden del 40% sobre el potencial del combustible utilizado en el proceso de transformación de la energía calorífica a eléctrica, amén de otras pérdidas en transporte, etc.
- En segundo lugar, cabe considerar la posibilidad de utilización de una fuente gratuita de calor a temperatura suficiente para alimentación de generador, con lo que la eficiencia económica de la máquina aumenta de forma considerable.

La adsorción es un fenómeno superficial que tiene lugar entre un sólido, el adsorbente, que debe presentar una gran superficie por unidad de masa, y un vapor con afinidad química con el sólido. Materiales porosos como el carbono activo, los silicagels y las zeolitas, pueden ser utilizadas como sólidos adsorbentes. La adsorción es exotérmica, es decir, se acompaña siempre de calor, cuya cantidad depende de la magnitud de las fuerzas de van der Waals presentes, de los cambios de fase y de los enlaces químicos. A bajas temperaturas las fuerzas moleculares hacen que los gases se adhieran a la superficie para, después, adentrarse en la estructura cristalina del sólido. Este fenómeno de adsorción crea un gradiente de presión y calor. El proceso puede invertirse adicionando calor, que provoca la desorción del vapor a alta presión y temperatura, el cual circula hacia el condensador, expansor y evaporador, en donde produce el efecto útil de enfriamiento.

Las máquinas de adsorción son, en principio, intermitentes: un sólido se está cargando con vapor refrigerante a baja presión y temperatura; pero cuando finaliza esta fase este material debe regenerarse (desorción) a alta presión y temperatura, por lo que, para conseguir un enfriamiento continuo, deben disponer-

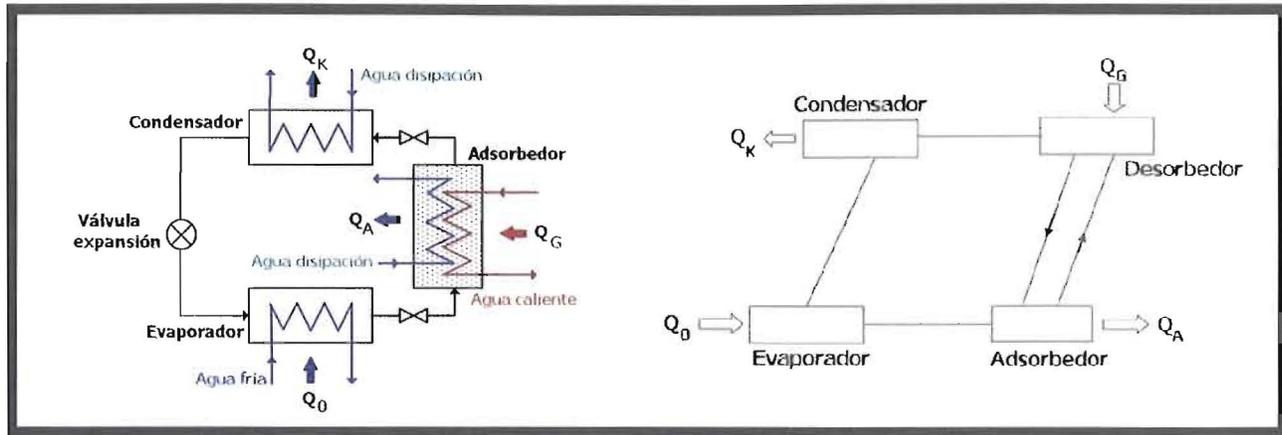
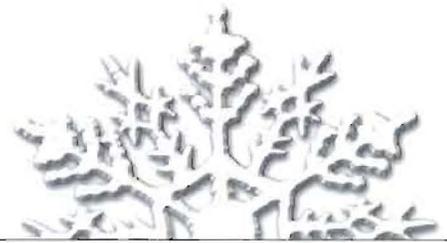


Figura 3. Esquema básico de una máquina de adsorción

se un par de conjuntos materiales, con fases desfasadas en el tiempo, de modo que, mientras uno está produciendo el efecto útil, el otro está en proceso de regeneración.

El sílica gel ($\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) tiene como base la sílice pura, en la cual se conservan trazas de agua (del orden del 5%). Si es sobrecalentado y pierde esa agua, su capacidad de adsorción se resiente. Esto le permite ser válido para trabajar en aplicaciones por debajo de los 200°C . Se encuentra disponible con diferentes tamaños de sus poros: cuanto menor es ese tamaño, mayor es la superficie por unidad de masa. El sílica gel posee una gran capacidad de adsorción del vapor de agua –sobre todo a altas presiones de vapor–, por lo que es utilizado en procesos de deshumectación. El calor generado en la adsorción del vapor de agua se debe principalmente al calor de condensación del agua. Una máquina frigorífica de adsorción en circuito cerrado utiliza como fluido refrigerante un líquido que cambia de fase, el cual, a baja temperatura y presión, se evapora en el evaporador del dispositivo, produciendo el efecto útil: los vapores producidos son adsorbidos por el adsorbente sólido. Dado que el proceso de adsorción es una reacción exotérmica, se libera una cantidad de calor que debe ser disipada al exterior. La eficiencia de este proceso depende de la temperatura y de la presión: cuanto mayor sea la temperatura del adsorbente, menor será la relación entre la masa de vapor adsorbida y la masa del adsorbente, o, en otras palabras, a mayor temperatura menor captación de vapor. Posteriormente, y con aporte de potencia térmica externa, el adsorbente será regenerado, es decir, el vapor será extraído del sólido. Los vapores extraídos pueden ser enviados al condensador para su licuación y pasar de nuevo al evaporador previa laminación. Desde condensador a evaporador, los procesos son similares a los de una máquina de compresión mecánica. Estas máquinas precisan una serie de factores esenciales, tales como:

- El adsorbente debe ser capaz de adsorber los vapores fácilmente, sin cambios estructurales ni variaciones significativas de volumen.

- El adsorbente debe ser capaz de desorber el vapor almacenado con los cambios de temperatura, pudiéndose repetir este proceso repetidamente.
- En caso de trabajar con agua como refrigerante, casos de agua-sílica gel y agua-zeolita:
 - El proceso de evaporación puede desarrollarse a baja temperatura, manteniendo una presión por debajo de la atmosférica. Es necesario conseguir vacíos del orden de 13 a 26 mbar.
 - El proceso de evaporación mejora si el agua es enviada en forma de ducha.

La máquina frigorífica de adsorción se compone fundamentalmente de un adsorbedor, el cual se conecta, para trasiego de fase vapor, alternativamente a un condensador y a un evaporador (Fig. 3), así como, energéticamente, a una fuente de calor a alta temperatura, a otra de disipación a temperatura intermedia y, por último, a la fuente de baja temperatura, donde produce el efecto útil como máquina de producción de frío.

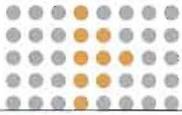
Los ciclos de una máquina de adsorción suelen reflejarse sobre el denominado diagrama de Clapeyron o Dühring, el cual se obtiene en base a una ecuación modificada de Dubinin-Astakhov [1], según la cual:

$$x = x_0 \exp \left[-D \left(T \ln \left(\frac{p_{sat}}{p} \right) \right)^n \right] \quad (4)$$

En la que " $x_0 \approx 0.301$ ", " $D \approx 2.26 \cdot 10^{-2}$ " y " $n \approx 1.08$ " son constantes para el par adsorptivo, y " p_{sat} " la presión de saturación, mientras que " p " es la presión del adsorbente.

Otro modelo, utilizado por Afonso [2] y Zai [3] para el sílica gel-agua, es el denominado de Freundlich, definido como:

$$q = q^\infty \left[\frac{p}{p_{sat}} \right]^{1/k} \quad (5)$$



Siendo ahora "q" la relación de masas adsorbato/adsorbente [kg/kg] y "q^z ≈ 0.355" la máxima cantidad de adsorbato por adsorbente [kg/kg] y "k ≈ 0.79".

La ecuación de Freundlich ha sido modificada por Saha, a partir de datos reales, obteniendo:

$$q^* = A(T_S) \cdot [p_S(T_W) / p_S(T_S)]^{B(T_S)}$$

$$A(T_S) = A_0 + A_1 \cdot T_S + A_2 \cdot T_S^2 + A_3 \cdot T_S^3$$

$$B(T_S) = B_0 + B_1 \cdot T_S + B_2 \cdot T_S^2 + B_3 \cdot T_S^3$$
(6)

Siendo "q*" la cantidad de refrigerante adsorbido en el equilibrio, "p_S(T_W)" y "p_S(T_S)" las presiones a saturación correspondientes a las temperaturas del agua "T_W" y del silicagel "T_S". Los parámetros de la expresión (3) se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1
CONSTANTES DE LA EXPRESIÓN 3 |

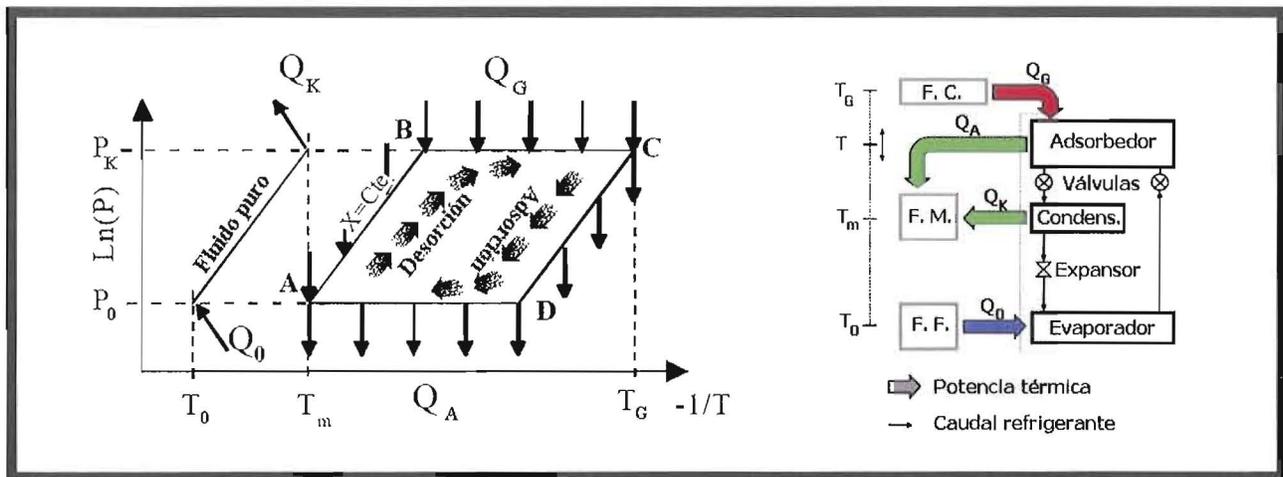
i	A	B
0	31.198	41.581
1	-0.26650	0.35435
2	0.769 10 ³	0.10199 10 ⁻²
3	-0.73898 10 ⁻⁴	-0.97034 10 ⁻⁴

Las transformaciones que componen el ciclo básico de adsorción, sobre un diagrama de Clapeyron o Dühring, se han representado en las figuras 4 y 5:

- Compresión y calentamiento a volumen constante (A-B), durante la cual el adsorbedor se aísla del resto de la instala-

ción y se pone en comunicación con la fuente a mayor nivel térmico T_G. La desorción del gas que se produce en el volumen libre del adsorbedor se traduce en un aumento de presión. Esta fase de presurización finaliza cuando la presión llega a ser al menos igual a la del condensador (punto B).

- Desorción a presión constante (B-C), con el adsorbedor conectado al condensador a "T_m". Esta fase es llamada generalmente regeneración, pues deja al adsorbedor listo para una nueva fase de producción de frío. Finaliza cuando la temperatura del adsorbedor alcanza la T_G (punto C). Por otro lado, se alimenta el condensador con una masa de vapor destinada a su condensación por cesión de calor al medio de disipación.
 - Despresurización a volumen constante (C-D). El adsorbedor se aísla del resto de la instalación y se enfría con el medio de disipación a T_m. Debido a que se encuentra aislado del resto de la instalación, la adsorción que tiene lugar en el volumen libre se acompaña con una caída de presión. Esta etapa finaliza cuando la presión llega a ser la de evaporador (punto D).
 - Adsorción a presión constante (D-A) de los vapores producidos en evaporador durante el efecto útil del ciclo (etapa de producción de frío a "T₀"), lo que provoca un aumento de la concentración en vapor.
 - Las fases a volumen constante (A-B y C-D) son con composición constante y siguen, por lo tanto, una línea isotérmica (x = constante).
 - La potencia (Q_G) a suministrar al sistema es la necesaria en el generador. La potencia frigorífica (Q₀) es debida a la vaporización del fluido.
 - Además de las potencias enumeradas, existe la disipación a nivel intermedio, debido a la condensación (Q_K) por un lado y a la eliminación del calor de adsorción (Q_A) por otro.
- Por último, sobre el diagrama de Clapeyron de la figura 6 se han representado los tipos de interacciones térmicas del adsorbedor con el exterior.



Figuras 4 y 5. Diagrama y esquema de interacción de la máquina con las fuentes externas

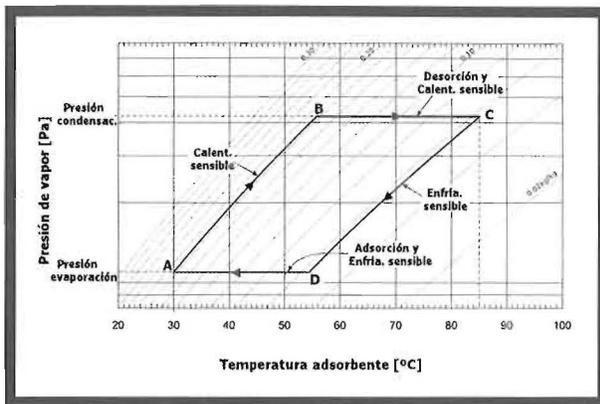
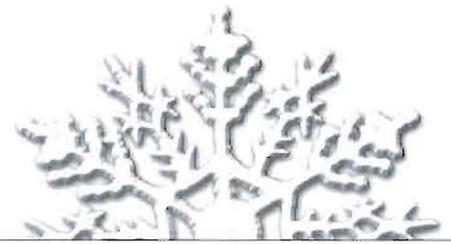


Figura 6. Interacciones térmicas sobre diagrama de Clapeyron

| CICLOS UTILIZADOS EN LA MÁQUINA DE SÍLICA GEL-AGUA |

El ciclo de adsorción descrito es un ciclo intermitente de lecho único (también llamado ciclo básico). Este ciclo simple es muy simple y fiable, y se utiliza, sobre todo, en refrigeración solar. Pero la eficiencia del ciclo básico es muy baja y la potencia frigorífica de salida no es continua. Para que la adsorción fuera continua se necesitan, al menos, dos lechos adsorbentes [4], un evaporador, un condensador y, al menos, cuatro válvulas. Esto ha llevado a la búsqueda de nuevos ciclos de refrigeración de adsorción, diseñados con el fin de mejorar la eficiencia y hacer más práctica la máquina de adsorción. A continuación pasamos revista a algunos de ellos [5 y 6].

| CICLO CON RECUPERACIÓN DE CALOR (HEAT RECOVERY CYCLE) |

El ciclo de recuperación de calor es el ciclo utilizado en el siste-

ma con dos o más lechos. Después de la conmutación entre la adsorción y desorción, el medio de enfriamiento o calentamiento inmediatamente circula entre el adsorbedor caliente y el frío durante la adsorción de un circuito cerrado [7, 8 y 9]. Entonces una parte del calor sensible se recupera del adsorbedor caliente y el COP del sistema aumenta. De acuerdo con las investigaciones correspondientes, el calor de recuperación puede mejorar el COP en un 25%.

La evolución tanto de potencias como de las temperaturas en una máquina de doble lecho se ha presentado de forma orientativa sobre los esquemas de las figuras 7 y 8 [10].

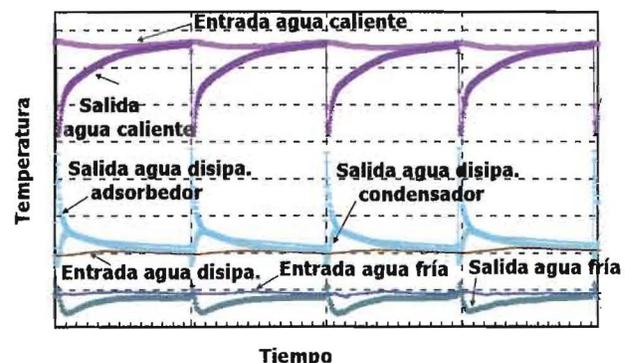
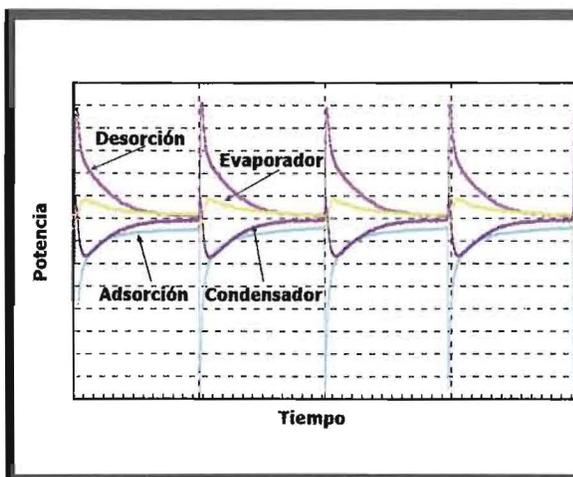
| CICLO DE RECUPERACIÓN DE MASAS (MASS RECOVERY CYCLE) |

En este caso, después de la conexión entre procesos de adsorción y desorción, y antes de la recuperación de calor, si esta última tiene lugar, se produce la conexión entre el adsorbedor de alta presión y el de baja presión mediante una tubería [11, 12, 13 y 14].

En un ciclo de adsorción, la presión es diferente en el adsorber y en el desorbedor. La máquina utiliza esta diferencia para producir la recirculación de masa. El ciclo básico está constituido por cuatro intercambiadores de calor, un evaporador ((EVA), un adsorbedor (HEX1), un condensador (COND) y un desorbedor (HEX2). Esta estructura es la misma que la de una máquina de adsorción normal de dos lechos; la diferencia es la conexión entre lechos, tal como se muestra en la figura 9.

| CICLO DE SORCIÓN DE MULTIPLE EFECTO Y MÁQUINAS MULTITAPA |

Como en el caso de máquinas de absorción, el número de etapas de sistema define el número de ciclos de básicos de adsorción que configuran el sistema. Por otro lado, el número de efectos considera cuántas veces la potencia calorífica suministrada desde el foco caliente es utilizada en el sistema. Eviden-



Figuras 7 y 8. Evolución de potencias y temperaturas

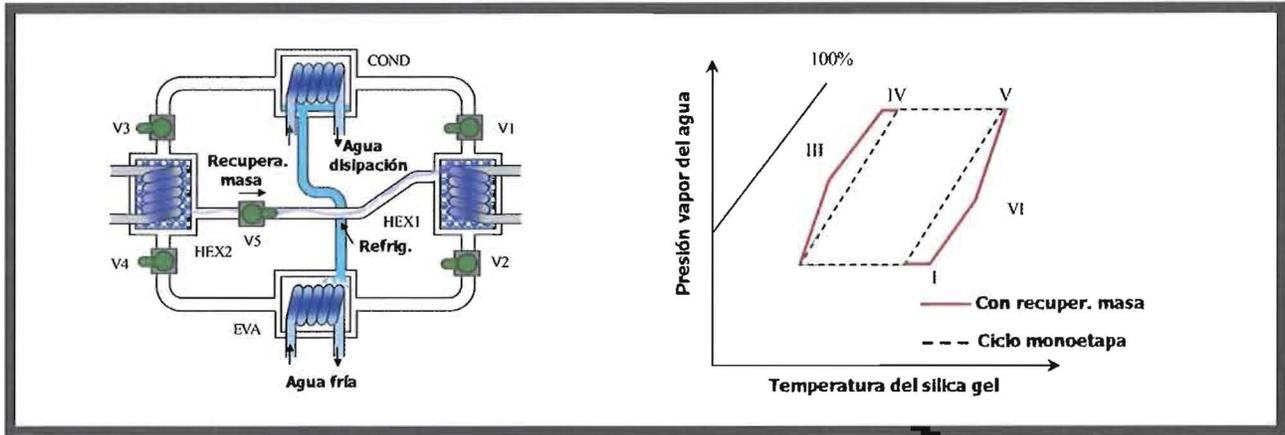
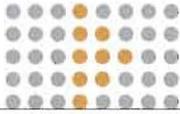


Figura 9. Ciclo con recuperación de masa

temente, un incremento en el número de efectos conduce a una mayor eficiencia de la planta. Sin embargo, para un ciclo con "n" etapas, el número máximo de efectos posibles viene dado por "2n - 1"

I SISTEMAS DE DOBLE EFECTO I

En una máquina convencional, el ciclo trabaja entre dos niveles de presión: el de alta presión durante la regeneración y el de baja presión durante la producción de frío. En el caso del ejem-

plo de doble efecto que mostramos, existen tres niveles de presión. La máquina se compone de un adsorbedor de alta, otro de baja, y de condensador- evaporador unidos por expansor. El ciclo tiene dos fase. En la primera (Fig. 10) el adsorbedor de alta recibe potencia térmica del exterior a alto nivel. Esto produce un aumento en la presión hasta el nivel del condensador. Por cesión de calor al agente de disipación, el refrigerante se condensa y pasa al evaporador, a través de expansor. Simultáneamente, el adsorbedor de baja cede calor al agente de disipación y absorbe los vapores desde el evaporador

a la presión "p₀". El calor latente de vaporización produce el efecto útil "Q₀" a "T₀".

Durante la segunda fase (Fig.10) se invierte el funcionamiento de los adsorbedores: el adsorbedor de alta realiza tareas de adsorción y el otro la de desorción. Cuando el adsorbedor de alta es conectado al de baja, se produce un proceso de resorción a un nivel de presión "p_L" inferior a "p₀". Este proceso trae consigo un segundo enfriamiento por absorción de calor durante la desorción del adsorbedor de baja.

En resumen, con esta máquina se producen dos procesos de enfriamiento a partir de una única fuente caliente. Máquinas con más de dos efectos son posibles: más eficientes, pero de mayor complejidad tecnológica.

I MÁQUINAS DE DOBLE ETAPA I

Un ciclo convencional de adsorción con sílica gel-agua no puede trabajar con un foco térmico a 50°C si el foco disipativo se encuentra a un nivel superior a 30°C; para poder trabajar con niveles de 50 a 75°C puede utilizarse un ciclo en doble etapa. En máquinas de doble etapa, el salto de presión es dividido

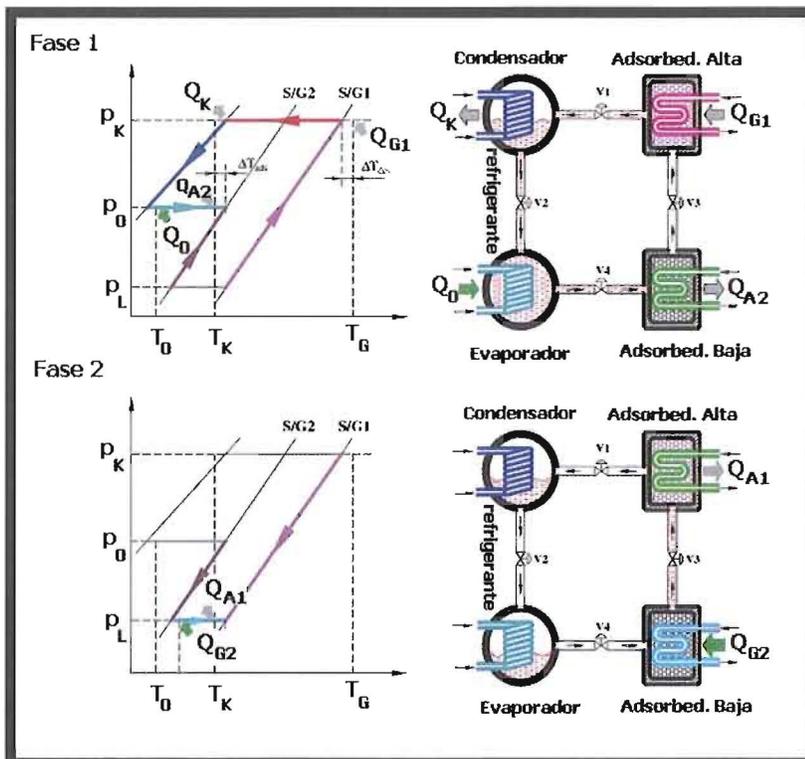


Figura 10. Ciclo de doble efecto

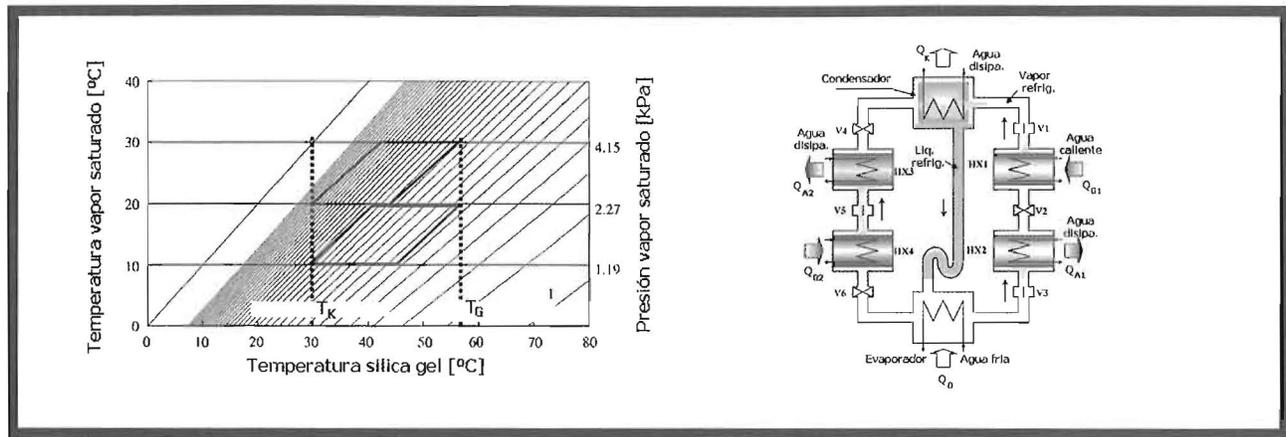


Figura 11. Ciclo de doble etapa

en dos saltos consecutivos, con el objetivo de aprovechar focos térmicos a baja temperatura, para lo cual es necesario trabajar con cuatro adsorbedores, tal como se muestra en la figura 11 [15, 16 y 17].

Por lo tanto, el refrigerante debe aumentar la presión en dos pasos consecutivos, desde la presión de evaporación a la de condensación. En un ciclo en doble etapa, los lechos adsorbentes operan cíclicamente en cuatro fases: precalentamiento, desorción, preenfriamiento y adsorción.

En la figura 11 se presenta el funcionamiento de la instalación. En el inicio, los desorbedores HX1 y HX4 son calentados, y los HX2 y HX3 disipan calor. Después de un corto espacio de tiempo, se abren las válvulas 1, 3 y 5 para permitir la circulación de refrigerante de HX1 al condensador, del evaporador a HX2, y entre HX4 y HX3. Cuando las concentraciones se encuentran cerca del equilibrio, los caudales de agua caliente y de disipación son redireccionados, por acción de las válvulas, de modo que los lechos que actuaban como desorbedores pasan a adsorbedores, y viceversa.

Saha ha propuesto un ciclo de tres etapas en el que dispone de un total de seis lechos.

| CICLO DE CASCADA |

Si bien estas máquinas no trabajan únicamente con silicagel agua, vamos a incluirlas en este apartado de clasificación de ciclos. En la figura 12 se presenta un esquema en cascada de dos ciclos de adsorción con refrigerantes R134a y R507A. Obsérvese que su configuración es similar en concepción a las cascadas con ciclos de compresión.

| CICLOS HÍBRIDOS |

En este punto nos limitaremos a las combinaciones de ciclos de compresión y adsorción. El objetivo de los ciclos híbridos es parcializar el proceso de compresión en dos partes: una llevada

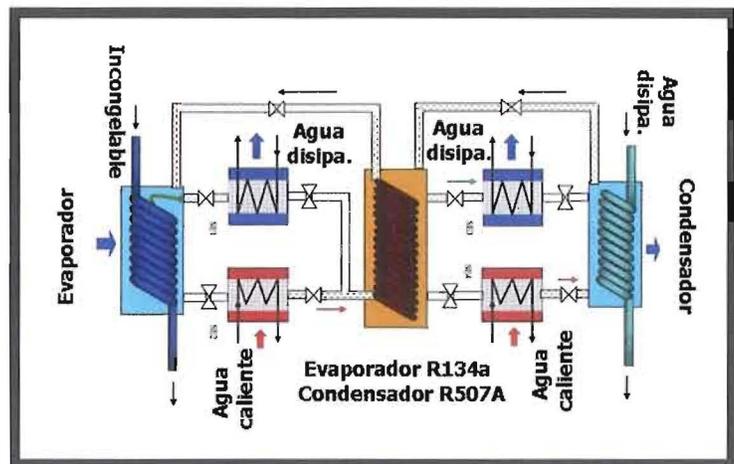


Figura 12. Ciclo en cascada

a cabo mediante un compresor mecánico convencional, y la segunda etapa mediante el compresor térmico asociado a una máquina de adsorción. El ejemplo que se presenta es el de la instalación de CO₂ transcritical, mostrada sobre la figura 13, en el que el adsorbente es carbono activo.

La disposición de cuatro lechos adsorbentes se debe a la necesidad de procurar un flujo continuo de refrigerante. Según estudios teóricos de [18 y 19], esta disposición es capaz de triplicar el COP de un régimen transcritical convencional de CO₂. Por su parte, Banker N.D. ha presentado ciclos híbridos con R134a. En ambos casos no se hace referencia al problema del retorno de aceite lubricante al cárter del compresor.

| MÁQUINAS EN MERCADO CON EL PAR DE TRABAJO SILICA GEL-AGUA |

Utilizando como par de trabajo silica gel-agua, comercialmente existen diferentes máquinas enfriadoras para diversas aplicaciones, bien industriales o comerciales/domésticas. El potencial de

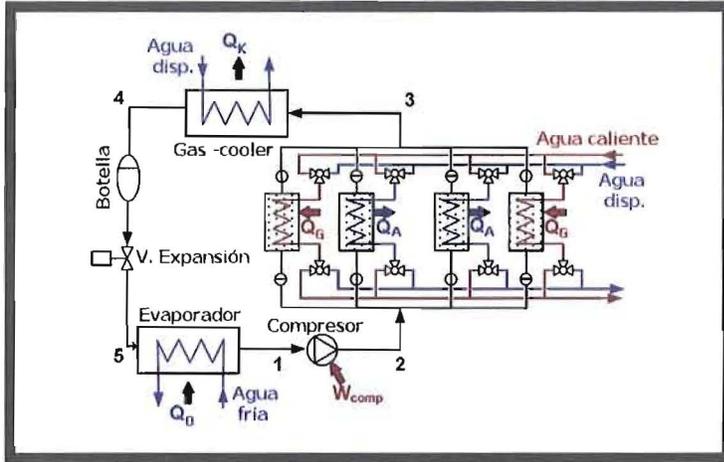
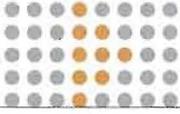


Figura 13. Instalación híbrida compresión-adsorción para CO₂ en régimen transcrito

las máquinas de adsorción basadas en dos lechos adsorbentes de sílica gel utilizando como refrigerante agua fue evaluado por gran número de investigadores. Wang et al (2002), Sakoda and Suzuki (1984), Cho and Kim (1992), Saha et al (1995), Boelman et al (1995), Boelman et al (1997). Como consecuencia de estas investigaciones, han sido comercializadas para aplicaciones industriales dos máquinas de adsorción japonesas de las empresas Mycom y Nishiyodo, así como una máquina de alemana de la empresa GBU; dichas máquinas trabajan a una temperatura de 70°C.

Inicialmente las máquinas enfriadoras de adsorción se produjeron por la Nishiyodo Kuchouki, Co. Ltd, y aparecieron en el mercado en 1986. Nishiyodo Kuchouki fabrica máquinas de adsorción sílica gel-agua, las cuales se comercializan en el mercado USA por HIJC USA In. Su modelo comercial se denomina ADCM, con capacidad de refrigeración comprendida en los 70 kW y los 1.300 kW. Estas enfriadoras pueden generar frío a

partir de una fuente de calor entre 50°C a 90°C, y la temperatura del agua fría está próxima a los 3°C. El COP puede alcanzar los 0,7 cuando la enfriadora funciona con agua caliente a 90°C.

Usando la marca comercial Mycom, Mayekawa Mfg están produciendo máquinas de adsorción sílica gel-agua (Adref), que puede funcionar en un rango de potencias comprendidas entre 35 kW y 350 kW para uso en la industria del aire acondicionado. Estas máquinas funcionan con una temperatura comprendida entre los 60°C y los 90°C. Las enfriadoras que fabrican sí son alimentadas con agua caliente a 75 °C; el agua puede enfriarse hasta los 9°C, alcanzando un COP de 0.6. La potencia eléctrica de estas máquinas es normalmente un 6% de su capacidad de enfriamiento, y la relación peso/potencia de enfriamiento es 0,2 toneladas/kW.

GBU está fabricando los equipos basados en el mismo principio que Nishiyodo Kuchouki (NAK), con capacidades comprendidas entre los 10 kW y los 300 kW.

La enfriadora de adsorción sílica gel-agua fue el primer sistema comercial de adsorción de refrigeración. Las máquinas comerciales de adsorción de sílica gel-agua, pertenecientes a la empresa Mycom, y la de la empresa Nishiyodo Kuchouki, informadas por HIJC EE.UU. tienen la misma estructura, como se muestra en la figura 14. La única diferencia entre ellos es una válvula de by-pass instalada entre los dos adsorbentes para ayudar a esta última enfriadora a terminar el proceso de recuperación de la masa. Estas dos enfriadoras dependen de las válvulas de vacío internas para cambiar los lechos adsorbentes durante el proceso de adsorción y desorción, de acuerdo con la resultados teóricos y experimentales.

Para aplicaciones comerciales/domesticas encontramos tres máquinas comerciales, una proveniente de la universidad China SJTU (Shanghai Jiao Tong University), otra del fabricante alemán Sortech, con características similares de potencia frigorífica

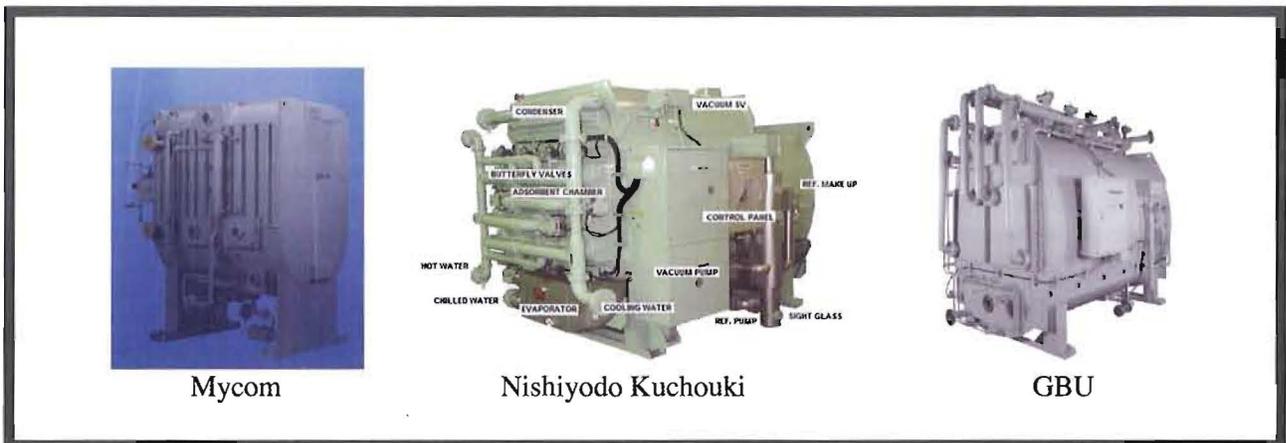


Figura 14. Máquinas sílica gel-agua alta potencia

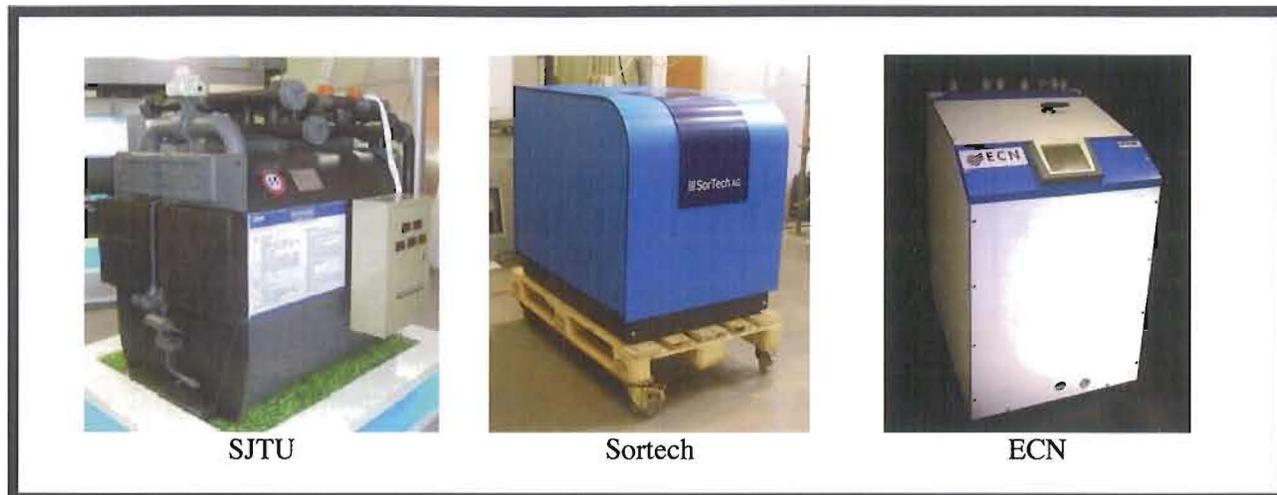


Figura 15. Máquinas sílica gel-agua baja potencia

ca, y, por último, la del Energy research Centre of the Netherlands ECN de 2.5 kW (Fig. 15).

Vamos a presentar el funcionamiento de una de las pequeñas máquinas domésticas, en concreto de la ACS 08, de la firma Sortech, de 5.5 kW de potencia nominal. El dispositivo está constituido por cuatro elementos: un condensador, un evaporador y dos adsorbentes [20 y 21]. Este ensamblaje se envuelve en un recipiente hermético, con una capa externa de aislamiento térmico en el acero inoxidable. Los dos adsorbentes contienen gel de sílice, extremadamente poroso. Químicamente es un mineral inerte que es fundamental para trabajar en un proceso adsorción. El refrigerante utilizado es agua. Esta configuración se muestra sobre la figura 16.

Las cuatro cámaras de procesos están interconectadas mediante las válvulas auto-operadas, que controlan el flujo del refrigerante vapor. El funcionamiento de la máquina sigue las cuatro fases esquematizadas sobre la figura 17.

Fase 1.- El lecho adsorbente I se encuentra en regeneración, conectado al foco de mayor nivel térmico; recibe potencia y, con ello, se produce la separación del vapor de agua. El lecho adsorbente II y el condensador reciben una corriente de agua de disipación para eliminar tanto la potencia de adsorción como la de condensación. Por último, el evaporador recibe un caudal de agua destinada a enfriarse por evaporación del agua líquida en este equipo; este último proceso es común a todas las fases y asegura un funcionamiento continuo.

Fase 2.- El adsorbedor I, regenerado en la fase anterior, va a invertir su funcionamiento. No obstante, al encontrarse caliente, para recuperar esta energía (heat recovery) el caudal de agua de disipación sale caliente y se envía al depósito de agua caliente. En paralelo al lecho 1, se envía también al condensador agua de disipación para que se produzca el cambio de estado de vapor a líquido. El agua caliente se envía al lecho II para iniciar su regeneración. El

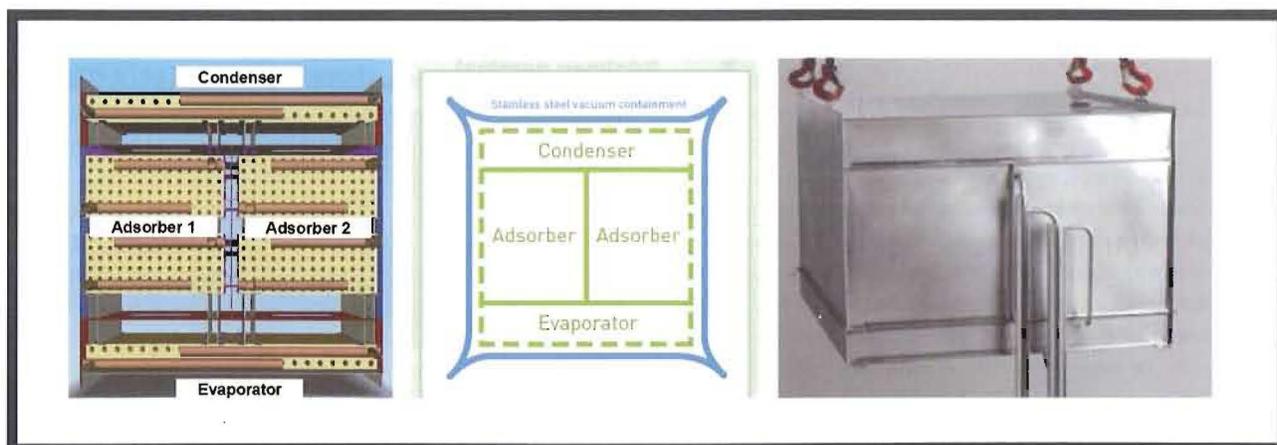


Figura 16. ACS 08 de Sortech

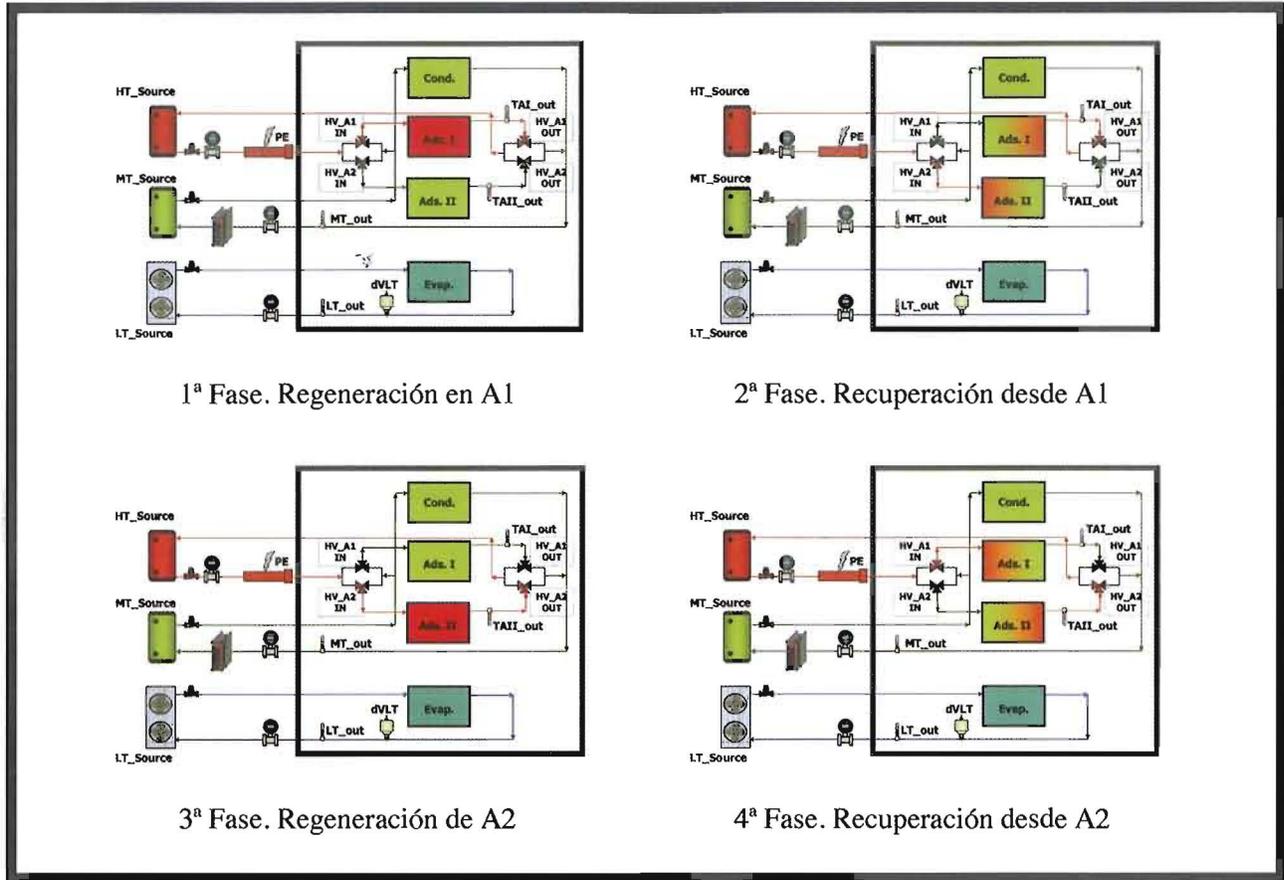


Figura 17. Fases en la máquina Sortech

proceso en evaporador no cambia, como se ha dicho, respecto a la fase 1.

Fase 3.- Esta fase es similar a la primera, excepto por la inversión de funcionamiento de los lechos adsorbentes I y II.

Fase 4.- Esta fase es idéntica a la 2, pero ahora se recupera calor sobre el lecho adsorbente II.

En la figura 18 se observa que, con bajos valores de temperatura en el foco caliente, el COP de la máquina de adsorción es superior al de la de absorción, lo que puede hacer mas conveniente a las máquinas de adsorción de cara al aprovechamiento

COMPARACIÓN ENFRIADORAS ABSORCIÓN-ADSORCIÓN

En el apartado de conceptos básicos se han comparado los sistemas tritéricos de absorción-adsorción con el ditérmico de compresión mecánica. La comparación entre máquinas de adsorción, básicamente con el par sílica gel-agua, con las máquinas, también tritéricas de absorción, en particular con la mezcla bromuro de litio-agua, debería abarcar una gran variedad de aspectos. En cuanto a una visión energética, sobre la figura 18 se muestra la evolución del COP en ambos tipos de máquinas, en función de la temperatura del foco a mayor nivel térmico.

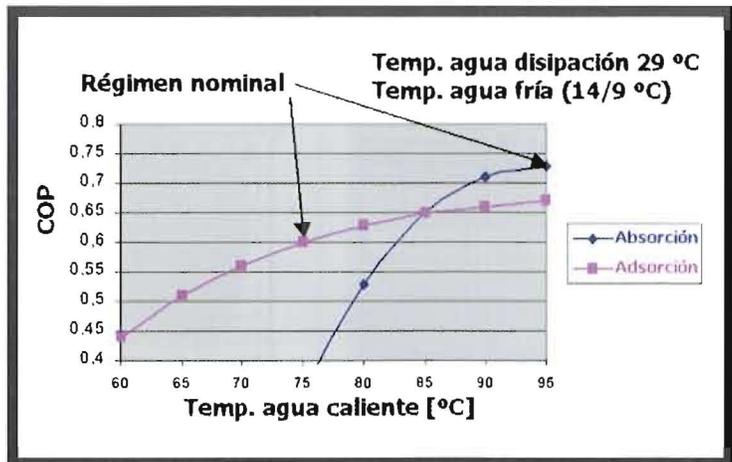


Figura 18. Comparación COP máquinas absorcion-adsorcion



NOMENCLATURA

p	Presión
Q	Potencia térmica
T	Temperatura
x	Concentración
Simbolos griegos	
ϵ	COP de máquina ideal
Subíndices	
0	Evaporador
G	Generador
K	Condensador
A	Adsorbedor
m	Foco a temperatura intermedia
sat	Saturación

de efluentes térmicos de baja calidad, incluso la pone en mejor situación para la utilización de energía solar. En el capítulo de ventajas de las máquinas de adsorción, también puede comentarse el hecho de no necesitar inhibidores de la corrosión, ni tener problemas de cristalización.

Por lo que respecta a desventajas, frente a la absorción pueden destacarse su mayor coste, el hecho de funcionar de forma discontinua, su bajo desarrollo actual (sólo hay unos pocos fabricantes en el mercado) y su mayor tamaño para igual potencia frigorífica. Por supuesto, su menor COP con temperaturas habituales en el foco caliente.

REFERENCIAS

- [1] R. E. Critoph. Evaluation of alternative refrigerant-adsorbent pairs for refrigeration cycles. *Applied Thermal Engineering* Vol. 16. No. 11, pp. 891-900, 1996.
- [2] M. R. A. Afonso. Characterization of equilibrium conditions of adsorbed silica-gel/water bed according to Dubinin-Astakhov and Freundlich. *Thermal Engineering* Vol. 4 · No. 1 · June 2005 · p. 3-7.
- [3] Zai Z. Xia, Chuan J. Chen, Jeremiah K. Kiplagat, Ru Z. Wang, and Jin Q. Hu. Adsorption Equilibrium of Water on Silica Gel. *J. Chem. Eng. Data* 2008, 53, 2462-2465.
- [4] H.T. Chua, K.C. Ng, A. Maleka, T. Kashiwagi, A. Akisawa, B.B. Saha. Modeling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chillers. *International Journal of Refrigeration* 22 (1999) 194-204.
- [5] Yu. I. Aristov, L. L. Vasiliev, V. E. Nakoryakov. Chemical and sorption heat engines: state of the art and development prospects. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 81, No. 1, 2008.
- [6] Felix Ziegler. State of the art in sorption heat pumping and cooling technologies. *International Journal of Refrigeration* 25 (2002) 450-459.
- [7] G. Maggio, A. Freni, G. Restuccia. A dynamic model of heat and mass transfer in a double-bed adsorption machine with internal heat recovery. *International Journal of Refrigeration* 29 (2006) 589-600.
- [8] M. Pons and Y. Feng. Characteristic parameters of adsorptive refrigeration cycles with thermal regeneration. *Applied Thermal Engineering* Vol. 17, No. 3, pp. 289-298, 1991.
- [9] M. Pons. Global analysis of refrigerative adsorption cycles with thermal regeneration (non-uniform temperature). *Int. J. Refrig.* Vol. 20, No. 6, pp. 411-420, 1997.
- [10] W.S. Chang, C. C. Wang, C. C. Shieh. Design and performance of a solar-powered heating and cooling system using silica gel/water adsorption chiller. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 2100-2105.
- [11] Akira Akahira, K.C.A. Alam, Yoshinori Hamamoto, Atsushi Akisawa, Takao Kashiwagi. Mass recovery adsorption refrigeration cycle - improving cooling capacity. *International Journal of Refrigeration* 27 (2004) 225-234.
- [12] Akira Akahira, K.C.A. Alam, Yoshinori Hamamoto, Atsushi Akisawa, Takao Kashiwagi. Experimental investigation of mass recovery adsorption refrigeration cycle. *International Journal of Refrigeration* 28 (2005) 565-572.
- [13] K.C.A. Alam, A. Akahira, Y. Hamamoto, A. Akisawa, T. Kashiwagi. A four-bed mass recovery adsorption refrigeration cycle driven by low temperature waste/renewable heat source. *Renewable Energy* 29 (2004) 1461-1475.
- [14] Xiaolin Wang, Hui Tong Chua, Kim Choon Ng. Experimental investigation of silica gel-water adsorption chillers with and without a passive heat recovery scheme. *International Journal of Refrigeration* 28 (2005) 756-765.
- [15] M.Z.I. Khan, K.C.A. Alam, B.B. Saha, Y. Hamamoto, A. Akisawa, T. Kashiwagi. Parametric study of a two-stage adsorption chiller using re-heat. The effect of overall thermal conductance and adsorbent mass on system performance. *International Journal of Thermal Sciences* 45 (2006) 511-519.
- [16] K.C.A. Alam, M.Z.I. Khan, A.S. Uyun, Y. Hamamoto, A. Akisawa, T. Kashiwagi. Experimental study of a low temperature heat driven re-heat two-stage adsorption chiller. *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 1686-1692.
- [17] Yoshinori Hamamoto, K.C. Amanul Alam, Atsushi Akisawa, Takao Kashiwagi. Performance evaluation of a two-stage adsorption refrigeration cycle with different mass ratio. *International Journal of Refrigeration* 28 (2005) 344-352.
- [18] Skander Jribi, Anutosh Chakraborty, Ibrahim I. El-Sharkawy, Bidyut Baran Saha*, Shigeru Koyama. Thermodynamic Analysis of Activated Carbon- CO₂ based Adsorption Cooling Cycles. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 43 2008.
- [19] Skander Jribi, Shigeru KOYAMA, Bidyut Baran SAHA. Engineering Sciences Reports, Kyushu University.
- [20] M. Schickanz, T. Nuñez. Modelling of an adsorption chiller for dynamic system simulation. *International Journal of Refrigeration* 32 (2009) 588 - 595.
- [21] Uli Jakob, Walter Mittelbach. Development and investigation of a compact silica gel/water adsorption chiller integrated in solar cooling systems. VII Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources", Minsk, Belarus, September 8-11, 2008. ■