

Factores de diseño y eficiencia en ciclos de adsorción para refrigeración solar

Raúl A. Ortiz Pérez*

En el presente trabajo se relacionan características esenciales de los ciclos de refrigeración con base en procesos de adsorción por sólidos y se destacan los aspectos de estos que se consideran como ventajosos respecto de otros ciclos. Se citan los adsorbentes y refrigerantes más estudiados. Se describe la evaluación de la eficacia de los mencionados ciclos a través del COP frigorífico y de la eficiencia exergética para estas condiciones. Se muestran dependencias calculadas entre estos índices y diferentes parámetros tales como: temperatura máxima de desorción (o foco caliente), temperatura del evaporador, tipos de adsorbentes, etc. Se analiza la utilización de adsorbentes obtenidos a partir de materias primas nacionales (carbón de cáscara de coco y zeolita natural).

Introducción

La utilización de los procesos de adsorción en dispositivos tales como bombas de calor y máquinas refrigerantes comenzó con escasos trabajos alrededor de los años 30 de este siglo (1) y ha venido a cobrar realmente auge en las últimas décadas. Dentro de la refrigeración de adsorción por sólidos, los materiales de mayor interés son los siguientes:

- a. Como adsorbentes: carbones activos, zeolitas y geles de sílice
- b. Como adsorbatos: metanol, agua y amoníaco

De particular interés es el estudio de materiales adsorbentes que en un país determinado resulten abundantes y relativamente baratos. Este es el caso para Cuba del carbón activado obtenido a partir de cáscara de coco y de algún tipo de zeolita natural.

Aunque la refrigeración con consumo exclusivo de energía térmica, puede también conseguirse haciendo uso de ciclos de absorción como los de agua-amoníaco, (2,3) y otros; a los de adsorción se le reconocen ciertas ventajas tales como:

- a. No requieren de circuito de rectificación ni de válvulas
- b. Son sistemas estáticos por lo que no sufren desgaste por fricción
- c. Son relativamente sencillos en su funcionamiento y fiables
- d. En su mayoría operan con refrigerantes que a diferencia de los tradicionales freones, no producen daños ecológicos
- e. En su mayoría operan con refrigerantes que trabajan a presiones sub-atmosféricas, lo cual evita el problema de fugas al exterior.

* Departamento de Física.
Universidad de Camagüey,
Cuba.

Cuadro 1. Parámetros de la ecuación (1).

Adsorbente	Wo(dm ³ /kg)	D(k ⁻ⁿ)	n
AC-35	0,425	5,02.10 ⁻⁷	2,15
AC-207E	0,334	9,62.10 ⁻⁷	2,0
Z-Natural	0,160	7,835.10 ⁻⁸	2,0
Clinoptilolita			

Uno de los principales aspectos que limitan un mayor desarrollo y producción en escala comercial de los enfriadores por adsorción es la insuficiente existencia de metodologías de cálculo que permitan el diseño de sistemas de este tipo, que sean capaces de funcionar con adecuada eficiencia bajo condiciones particulares de interés práctico.

En el presente trabajo se exponen los resultados del análisis de la variación de la eficiencia de ciclos de adsorción en función de las temperaturas de los focos térmicos y de la utilización de adsorbentes como carbón activo y zeolita natural, trabajando en todos los casos con metanol como refrigerante.

Materiales

El fenómeno de la adsorción por sólidos no porosos o de poros grandes se explica como un proceso de carácter superficial que puede llegar a formar capas múltiples de moléculas del adsorbato sobre el adsorbente y que se describe satisfactoriamente con ayuda del ampliamente conocido método BET (4).

Sin embargo para sólidos microporosos como zeolitas y carbones activados, según la teoría de Dubinin (5), la adsorción adquiere un carácter de ocupación volumétrica de las moléculas del adsorbato

sobre todo el volumen de los microporos del adsorbente.

Considerando además la llamada ecuación característica que postula Polanyi (6) y en la cual se afirma la no influencia de la temperatura en el potencial de adsorción, se obtiene la siguiente ecuación de estado de equilibrio:

$$W = W_0 \text{Esp} [- D (T \ln [P_5(T)/P])^n] \quad (1)$$

Esta ecuación (1) conocida como de Dubinin-Astakhov está considerada en la literatura (6, 7, 8) como satisfactoriamente adaptada para la adsorción tanto en carbones activados como en zeolitas y para el caso de utilizar metanol como adsorbato, se reportan valores para sus parámetros (7, 9, 10) como los que se muestran en el Cuadro 1.

El AC-35, debido a su extendido reconocimiento como un excelente material para la refrigeración solar por adsorción se incluye en este trabajo en calidad de referencia para efectos de análisis comparativos. El AC-207E es un carbón activo de cáscara de coco; la zeolita natural de tipo clinoptilolita es una de las más abundantes en el país.

Modelo

El ciclo que describe la evolución del par adsorbato-adsorbente en un sistema de

refrigeración por adsorción, para fines de cálculo se acostumbra a aproximar por medio de procesos isobáricos e isostéricos.

Las etapas de calentamiento-desorción-condensación y de enfriamiento-adsorción- evaporación, pueden representarse de forma simple en un diagrama de Clapeyron [$\ln(p)$ contra $-1/T$ y W como parámetro] tal como se muestra en la Figura 1.

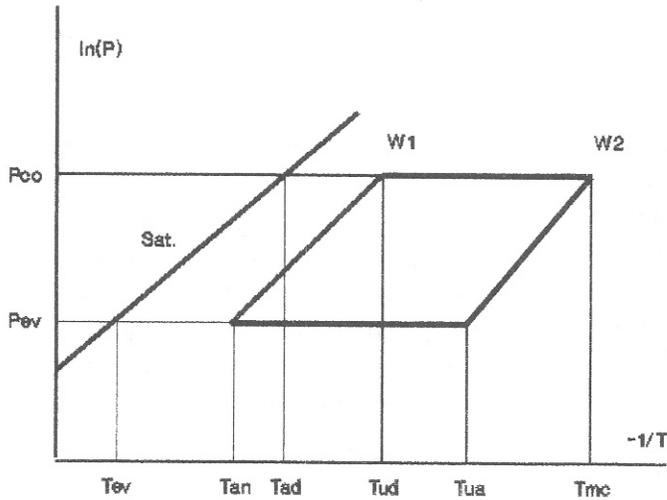


Figura 1. Diagrama de Clapeyron.

Para la evaluación de la efectividad de las máquinas refrigerantes de adsorción se han manejado varios tipos de eficiencia (11, 12), no obstante para el presente trabajo se tienen en cuenta dos formas fundamentales: el coeficiente de comportamiento frigorífico (COP) y la llamada eficiencia exergética (EFIEX), los cuales quedan definidos de la manera siguiente:

$$COP = \frac{Q1}{Q2} \quad (2)$$

$$EFIEX = \frac{COP}{COPR} \quad (3)$$

Para la determinación de los valores que alcanzan las anteriores formas de eficacia del ciclo, se instrumentó una vía de simulación numérica a partir de la

descripción del sistema refrigerante de adsorción con un modelo matemático que además de las ecuaciones ya planteadas hace uso de las siguientes:

$$Q1 = (M1 - M2) [L - Cpr (Tan - Tev)] \quad (4)$$

$$Q2 = Cpa (Tmo - Tan) + Hm (M1 - Mz) + [(M1 + M2)/2] Cpr (Tmo - Tud) + M1 Cpr (Tud - Tan) \quad (5)$$

$$Hm = R [\ln(P2/P1)] / [(T1)^{-1} - (T2)^{-1}] \quad (6)$$

$$L = R [\ln(Pco/Pev)] / [(Tev)^{-1} - (Tad)^{-1}] \quad (7)$$

$$COPR = \frac{[(Tev - Tan)]}{[(Tad - Tmc)]} \frac{[(Tmc - Tad)]}{[(Tan - Tev)]} \quad (8)$$

Debe notarse que según estas ecuaciones durante la etapa de calentamiento-desorción se considera que el calor recibido se emplea en los procesos siguientes:

- Calentamiento del adsorbente y de su carga máxima de adsorbato entre las temperatura Tan y Tud
- Calentamiento del adsorbente y de la medio carga de adsorbato entre Tud y Tmc .

Por su parte para la etapa de enfriamiento-adsorción se tiene en cuenta que el calor útil extraído por el evaporador es la resultante de:

- Enfriamiento debido a la evaporación del adsorbato condensado
- Consumo de frío para el enfriamiento del propio refrigerante desde Tan hasta Tev

El calor isostérico queda en función de la cantidad adsorbida al ser evaluado a través de las isósteras específicas de cada proceso y la determinación del calor de vaporización por medio de la línea de saturación lleva implícita la dependencia entre esta magnitud y la temperatura.

Para analizar la influencia del cambio de los diferentes parámetros en la eficiencia del ciclo refrigerante, se creó un algoritmo de cálculo automatizado, codificado en lenguaje Turbo Pascal para PC; el cual fue aplicado a los adsorbentes del Cuadro 1, tomando metanol como refrigerante y haciendo uso de las ecuaciones de la (1) a la (8).

Para las temperaturas de ensayo fueron tomados valores que resultan válidos para un sistema de enfriamiento por adsorción con características tales como: alimentación con energía solar a partir de un colector plano; enfriamiento para condensación por convección con el aire ambiental y que alcance temperaturas en su evaporador que puedan permitir ya sea la producción de hielo o el enfriamiento de agua para un bebedero, o sea:

Tev: -5/+5°C, Tad: 30°C, Tan: 20/40°C, Tmc: 85/140°C.

Análisis de resultados

Los resultados calculados con ayuda del modelo utilizado en este trabajo se presentan en forma de dependencias graficadas en las Figuras de la 2 a la 9.

En las Figuras 2 y 3 se muestra la influencia que tiene en el COP la variación del foco caliente (Tmc) para el Ac-207E. Se puede apreciar que para el caso menos exigente de Tev = +5°C la variación de la temperatura del foco caliente obtenida por colección solar no provoca cambios muy significativos en el COP; en cambio, para el caso que se necesiten temperaturas de evaporación como para producir hielo Tev = -5°C, temperaturas del foco caliente por debajo de 100°C producen disminución apreciable de la eficiencia, especialmente si se tiene un deficiente enfriamiento nocturno del generador-adsorbedor que dé Tan = 40°C.

Se nota además en las Figuras 2 y 3 que se alcanzan valores máximos del COP

para temperaturas del foco caliente que se encuentran entre 100 y 120°C, lo cual confirma la factibilidad de utilización de colectores solares planos como fuente energética de sistemas refrigerantes por adsorción que utilicen el par AC-207E/metanol.

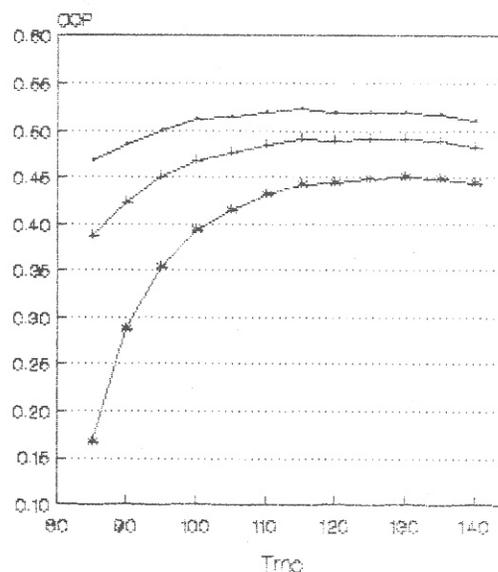


Figura 2. AC-207 E, Tev = -5°C

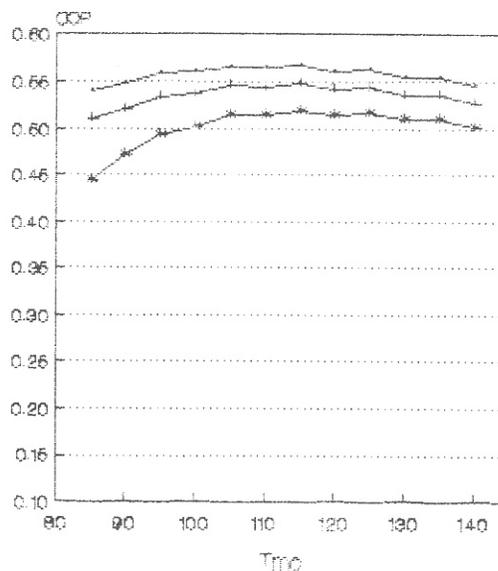


Figura 3. AC-207 E, Tev = +5°C

Por su parte las Figuras 4 y 5 presentan la influencia del foco caliente en la eficiencia exérgica, para el mismo par de materiales ya citados. Especialmente se destaca el hecho de que aunque en general estas curvas muestran la tendencia a que la EFlEX disminuya conforme aumenta la T_{mc} , para el caso particular de $T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$ y $T_{an} = 40^{\circ}\text{C}$ se manifiesta un incremento apreciable en esta eficiencia al elevar la T_{mc} entre 85 y 100 $^{\circ}\text{C}$.

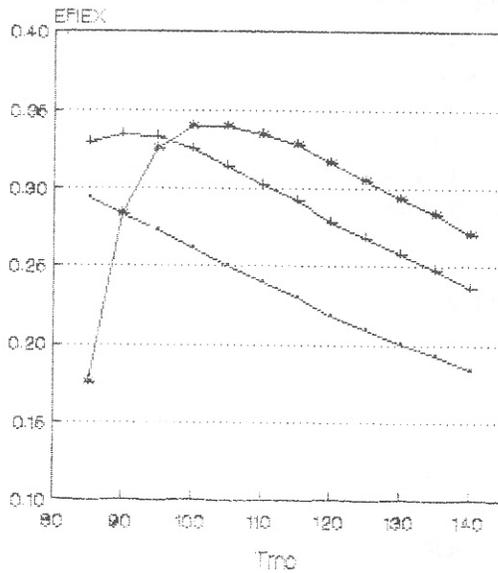


Figura 4. AC-207 E,
 $T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$

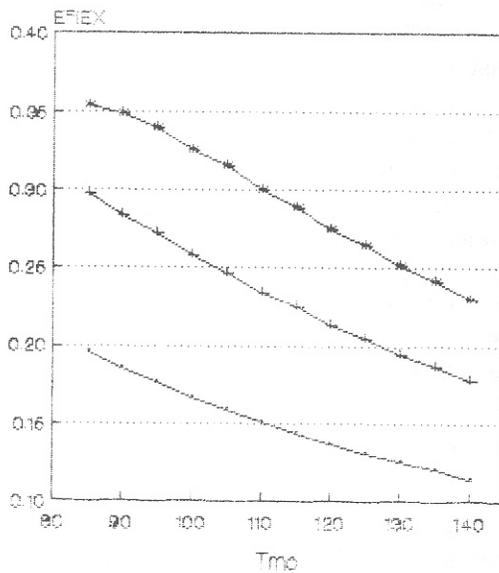


Figura 5. AC-207 E,
 $T_{ev} = +5^{\circ}\text{C}$

Para el caso de la zeolita estudiada, las Figuras 6 y 7 muestran resultados del COP que son apreciablemente inferiores a los logrados con el AC-207E y que además crecen regularmente a medida que aumenta la temperatura del foco caliente; no se encuentran valores máximos de esta magnitud en el intervalo de temperaturas que típicamente puede cubrir un colector solar plano.

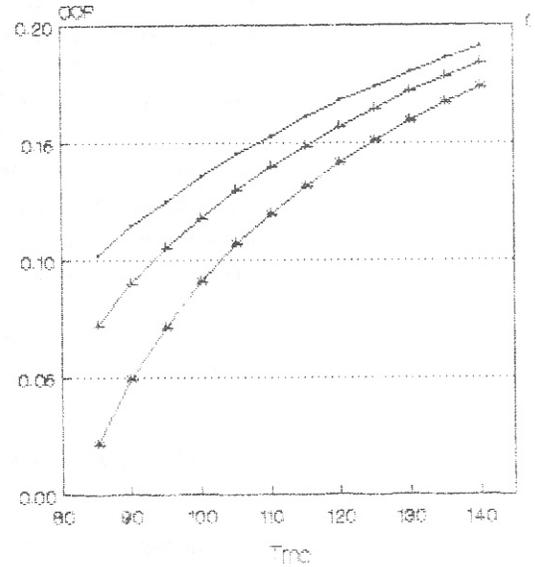


Figura 6. Z-Clinopt, $T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$

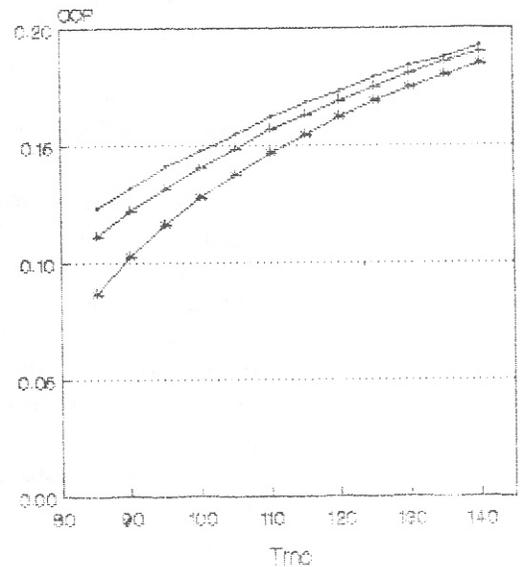


Figura 7. Z-Clinopt, $T_{ev} = +5^{\circ}\text{C}$

Esta conveniencia de altos valores de la T_{mc} para el caso de la zeolita queda expresada también en las Figuras 8 y 9 donde, a diferencia de lo obtenido para el AC-207E, la EFIEX tiende en general a crecer a medida que se aumenta la temperatura del foco caliente, indicando

con ello lo inadecuado de utilizar este tipo de adsorbente en refrigeradores de adsorción que se alimenten con energía solar recibida por un simple colector plano.

A fin de analizar además la influencia de los otros parámetros se muestran los Cuadros 2 y 3.

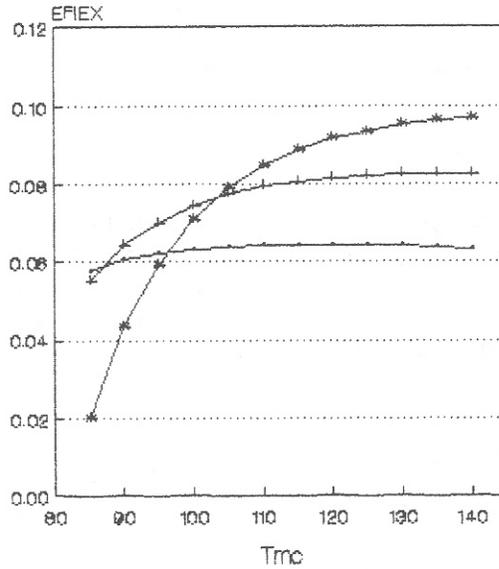


Figura 8. Z-Clinopt,
 $T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$

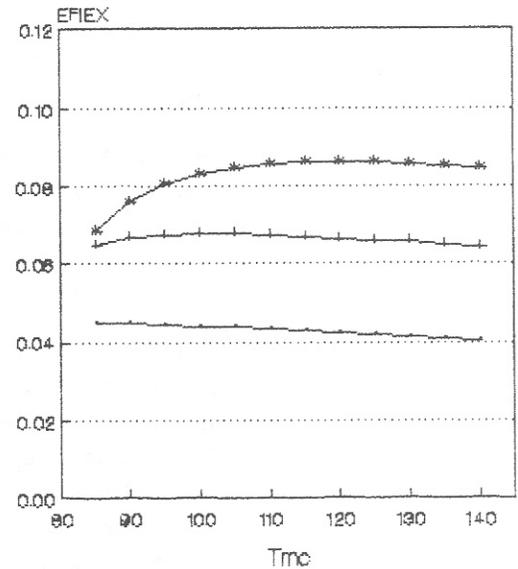


Figura 9. Z-Clinopt, $T_{ev} = +5^{\circ}\text{C}$

Cuadro 2. Resultados para AC-207E.

	T_{ev}	$T_{an}=20$	30	40
COP_{max}	-5	0,522	0,490	0,450
	+5	0,567	0,547	0,519
$EFIEX_{max}$	-5	0,294	0,335	0,340
	+5	0,196	0,298	0,353

Cuadro 3. Resultados para Z-clinopt.

	T_{ev}	$T_{an} = 20$	30	40
COP_{max}	-5	0,191	0,184	0,174
	+5	0,193	0,190	0,185
$EFIEX_{max}$	-5	0,064	0,083	0,097
	+5	0,045	0,068	0,086

Para el AC-207E, de acuerdo con los resultados del Cuadro 2, se aprecia que el COP máximo crece tanto con el aumento de la T_{ev} como con la disminución de la T_{an} . Para una temperatura de evaporación de $+5^{\circ}\text{C}$ y una final de adsorción de 20°C se obtiene el valor más alto del COP, el cual aparece a una temperatura final de desorción adecuada para alimentación solar (115°C) y que es de 0,567 (equivalente a un 91% del obtenido para el AC-35 para las mismas condiciones).

Aspirando a producir hielo ($T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$) y considerando un enfriamiento nocturno que no sea muy bueno ($T_{an} = 30^{\circ}\text{C}$), se alcanza un valor máximo del COP de 0,490 (91% del AC-35).

Para los valores máximos de la EFIEX, se puede notar a través del mismo Cuadro 2, que la influencia tanto de la T_{ev} como la de T_{an} es inversa con respecto al efecto que las mismas producen en el COP; lográndose como mejor resultado el valor de 0,353. La influencia inversa que en este caso provocan estas temperaturas se debe a que las mismas causas que disminuyen el COP (aumento de T_{an} y reducción de T_{ev}), disminuyen también pero más fuertemente la eficiencia del ciclo reversible de 4 temperaturas que le sirve de referencia; dando definitivamente la ecuación (3) los resultados ya citados.

Para el caso de la zeolita natural analizada según se observa en el Cuadro 3, se revelan efectos en los valores máximos del COP y de la EFIEX debido a variaciones de la T_{ev} y de la T_{an} , que son por su sentido similares a los anteriormente discutidos para el AC-207E.

Los valores particulares logrados son sin embargo apreciablemente menores que sus homólogos para el AC-207E; el mejor COP es en este caso 0,193 (31% del AC-35 y 34% del AC-207E) y la mayor EFIEX es de 0,097.

Conclusiones

Se ha conformado un algoritmo de cálculo que permite obtener la influencia que tienen en el COP frigorífico y en la eficiencia exergética EFIEX, las variaciones de las temperaturas posibles de prefijar en un diseño de refrigerador solar de adsorción; así como la variación que introduce el uso de diferentes adsorbentes cuya adsorción se describe a través del modelo de Dubinin-Astakhov.

Queda confirmada la factibilidad de utilización de un sistema refrigerante por adsorción que se alimente con energía solar a partir de un colector solar plano, empleando carbón activo de cáscara de coco y metanol, ya que se pueden obtener valores del COP que son del orden del 91% del obtenido por el carbón de mayor reconocimiento en la literatura para estos fines (AC-35).

Sin embargo la utilización en similares condiciones de un adsorbente relativamente barato y disponible en el país como lo es la zeolita natural de tipo clinoptilolita, resulta realmente muy poco eficiente; ya que debido al relativamente alto valor de la energía característica de adsorción para metanol de este material (casi 4 veces mayor que la del AC-35) y a su mayor capacidad calorífica, los volúmenes de refrigerante desorbidos y por tanto el correspondiente enfriamiento producido es bastante inferior; lográndose en el mejor de los casos valores del COP que son del orden del 31% del obtenido para el AC-35.

Nomenclatura

W:	volumen adsorbido, dm^3/kg
W ₀ :	volumen máximo adsorbible, dm^3/kg
n:	exponente de Dubinin
D:	coeficiente de Dubinin
P ₅ (T):	presión de saturación, hPa

P:	presión, hPa
Pco:	presión de condensación, hPa
Pev:	presión de evaporación, hPa
Tev:	temperatura de evaporación, K
Tad:	temperatura de condensación, K
Tan:	temperatura final de adsorción, K
Tmc:	temperatura máxima del adsorbente, K
Tud:	temperatura umbral de desorción, K
T1, P1, T2, P2:	valores sobre una isótera
Q1:	calor extraído por el evaporador, kJ/kg
Q2:	calor suministrado al generador, kJ/kg
COPR:	COP del ciclo reversible de 4 temperaturas
M1:	masa adsorbida en la isótera rica, kg/kg
M2:	masa adsorbida en la isótera pobre, kg/kg
L:	calor latente de vaporización, kJ/kg
Hm:	isotérico de adsorción, kJ/kg
Cpa:	específico del adsorbente, kJ/kg.K
Cpr:	específico del adsorbato, kJ/kg.K
R:	constante de los gases

En las figuras desde la 2 hasta la 9 se emplea la siguiente leyenda:

-----o-----	: Tan = 20°C
-----+-----	: Tan = 30°C
-----*-----	: Tan = 40°C

Literatura consultada

1. Hulse G.E. **Revue Generale du Froid**, 10, 281, 1929.
2. Chinnappa, J.C.V. *Performance of an Intermittent Refrigerator Operated by a Flat-Plate Collector*, **Solar Energy**, vol. 6, 1962.
3. Exell, R.H.B.; Korsakoo S. *The Development of a Solar Powered Refrigerator for Remote Village*, **Solar World Forum**, Brighton, 1982.
4. Brunauer, S.; Emmett, P.H. and Teller, E. **J. Amer. Chem. Soc.** 60, 309, 1938
5. Dubinin, M.M. **Progress in surface and membrane sciences**, 9, 1975
6. Malherbe, R. R. **Adsorción física de gases**. ENPES, 1987
7. Passos, E., et al. *Thermodynamic performance improvement of an intermittent solar-powered refrigeration cycle using adsorption of methanol on activated carbon*. **Heat Rec. Syst.** Vol.6, No 3, 1986.
8. Pons, M. et al. *Design of an experimental solar powered solid adsorption ice maker*. **J. Solar Energy Engineering**. Vol. 108, 1986.
9. Dubinin, M. M. *et al. Izv. Akad. Nauk. Ser. Khim.* 4, 731, 1976.
10. Sridar, K. *Studies on activated charcoal-methanol systems with relevance to ice making*, M.Sc. **Thesis, A.I.T.**, Bangkok, Thailand, 1987.
11. Sakoda, A. *et al.*, *Simultaneous transport of heat and adsorbate in closed typed adsorption cooling system utilizing solar heat*. **J. Solar Energy Engineering**. Vol. 108, 1986.
12. Meunier, F., *Second law analysis of solid adsorption heat pump operating on reversible cascade cycles: application to the zeolite-water pair*. **Heat Rec. Sys.** Vol.5, No 2, 1985.
13. Pons, M. *et al.* *Design of an experimental solar powered solid adsorption ice maker*. **J. Solar Energy Engineering**, Vol. 108, 1986.