

EXPERIENCIAS DE REFRIGERACIÓN CON UNA CAJA DE HELADERA

V. Passamai¹ y M. Bernaski
INENCO – CIUNSa* - CONICET
Facultad de Ciencias Exactas

Av. Bolivia 5150 – 4400 Salta. R. Argentina

Tel.: 0054-87-255389 – Fax: 0054-87-255489 – E-mail: passamai@unsa.edu.ar

T. Newell y J. Alvarado

Mechanical Engineering Laboratory – University of Illinois at Urbana-Champaign

RESUMEN

Se describen los resultados de experiencias de laboratorio realizadas con una masa de agua puesta a congelar en un freezer, y luego a descongelar bajo distintas condiciones. El objetivo de estas experiencias es cuantificar el comportamiento y requerimiento energéticos de este sistema, con miras al estudio de distintas posibilidades de refrigeración solar.

Palabras clave: fusión de hielo, refrigeración, enfriamiento solar.

INTRODUCCIÓN

Recientemente se ha comenzado en Argentina a estudiar sobre la aplicación de la energía solar para la refrigeración. Esta nueva línea de investigación permitiría completar un triángulo de aplicaciones de la energía solar, junto con el secado y la cocción, para el tratamiento de alimentos.

Una pieza fundamental en todo equipo de refrigeración es el gabinete donde se colocarán los productos a mantener en fresco. El mismo puede ser estudiado desde un punto de vista experimental, permitiendo encontrar conclusiones interesantes, en vista a su inserción como pieza clave de cualquier sistema de refrigeración. Si lo que se desea es diseñar y construir un sistema solar o mixto, la evaluación de sus características y capacidad de aislamiento térmico permitirá un mejor dimensionamiento de algún sistema no convencional, y estimar su factibilidad de funcionamiento.

En este punto es apropiado notar las diferencias fundamentales que existen entre un estudio de transferencia de calor y la ayuda que puede provenir de la Termodinámica. Aunque esta última se refiere a la interacción térmica y al papel fundamental que desempeñan la primera y segunda leyes, no considera los mecanismos que proveen el intercambio de calor ni los métodos que existen para calcular la *velocidad* de dicho intercambio (Incropera y De Witt, 1990; de Groot, 1968). La Termodinámica entiende los estados de *equilibrio* de la materia, por lo que implica la inexistencia de gradientes de temperaturas. Por lo tanto, aunque permite calcular la cantidad de energía, en forma de calor, que es necesaria para que un sistema pase de un estado de equilibrio a otro, no reconoce que las transferencias de calor son procesos de no equilibrio. Haciendo uso de la disciplina que estudia la transferencia de calor, y realizando experiencias en que se midan las variaciones de temperaturas, se podrá cuantificar la velocidad de transferencias de calor, es decir realizar un verdadero estudio de la *dinámica térmica* de los fenómenos. En este trabajo se apunta a realizar dicho estudio y concluir acerca de la capacidad de un gabinete aislado térmicamente, para mantener condiciones de baja temperatura, con vistas a su uso para determinar el requerimiento posterior de un sistema solar de refrigeración.

El presente trabajo se desarrolla básicamente en dos partes. La primera para la presentación y breve análisis de la información bibliográfica, tanto local como del exterior; y la segunda para el estudio de los datos experimentales provenientes de un sistema que funciona como lo haría cualquier productor intermitente de hielo, apuntando a obtener alguna conclusión acerca de su factibilidad.

ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Diversos trabajos de investigación, que apuntan a la aplicación de la energía solar para su uso en la refrigeración de alimentos, han sido realizados en el resto del mundo en los últimos veinticinco años. Un estudio bibliográfico de los mismos, así como el intercambio de información con algunos de sus autores, revela que la mayoría de los refrigeradores experimentales construidos tienen las características de funcionar desarrollando un ciclo que produce hielo en un día, en desfasaje con la incidencia de la radiación solar. Esto hace pensar que el uso de una de estas heladeras solares, para la conservación de alimentos y bebidas en la manera habitual que se realiza a diario por parte de los usuarios de heladeras domésticas, se vería restringido por la citada falta de continuidad en la provisión de energía necesaria para la compensación de entradas de calor a través de los productos introducidos, por las aperturas periódicas de la puerta de la heladera durante su uso, etc.

Por lo tanto, para poder contar con una heladera similar a las eléctricas de uso doméstico, pero alimentada enteramente mediante energía solar y que permita un uso similar al habitual, puede ser necesario pensar, en una primera aproximación, en un sistema de corriente continua que alimente baterías, cuya recarga se realice mediante paneles de celdas fotovoltaicas. Esta solución, factible técnicamente, puede tener la desventaja de los altos costos de inversión en la instalación.

¹ Investigador del CONICET

* Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta, organismo financiador.

Una propuesta diferente podría consistir en el empleo de un sistema híbrido, solar diurno, de tiempo real, con otro nocturno para la producción de hielo. El primero, mediante una heladera que funciona con una alimentación de 12 V de cc, provista por una superficie mínima de paneles fotovoltaicos, sin el uso de baterías, provee del enfriamiento diurno necesario para compensar las pérdidas producidas de hielo, fabricado durante la noche con el método de enfriamiento pasivo por radiación a cielo. También podría pensarse en alguno de los sistemas de producción nocturna de hielo que funcionan por adsorción de pares sólido-líquido.

Comenzando por las publicaciones contemporáneas, podemos mencionar la correspondiente a Wang y sus colegas de la Universidad J de Shangai (Wang, 2000), así como la de Sumathy de la India (Li y Sumathy, 1999). Estos investigadores coinciden entre sí y con los trabajos anteriores de Pons y sus colegas de Francia realizados quince años antes (Pons y Grenier, 1987), en el uso del par Carbón Activado – Metanol, como sistema solar para la producción de hielo. También coinciden en la intención de disponer de una heladera pequeña (con un volumen de un tercio de las domésticas) para su uso en conservación de alimentos y bebidas. Con igual interés, estas heladeras podrían ser usadas para fines sanitarios, como por ejemplo la conservación de vacunas en puestos de salud de zonas aisladas.

Otro grupo de investigadores, como el de Rodríguez González de Méjico, ha informado acerca de la conveniencia de usar este par de adsorción para la refrigeración solar (Rodríguez et al., 1995). Estos inclusive presentan un estudio comparativo con otros pares de adsorción, así como el uso de sistemas de absorción, como el clásico dado por amoníaco y agua. Un sistema similar fue probado también en Salta (Crivelli et al., 1976), habiéndose discontinuado su uso por los problemas de pérdida de NH_3 , discutidos también por Pons et al. (op. cit.). En Sudamérica los trabajos de Pralón, de Brasil (Pralón y Rodríguez, 2001) son continuación de los realizados por Pons inicialmente. Por otro lado, según comunicación personal de Pons, los trabajos de investigación en refrigeración dieron lugar a la construcción comercial de un modelo de heladera de adsorción con el par Carbono-Metanol, pero a la fecha, han sido discontinuados.

Por su parte, en Inglaterra, otro de los expertos en refrigeración solar por adsorción, Critoph, cuyas publicaciones abarcan desde trabajos de laboratorio para el estudio del comportamiento del par Carbón- Metanol, hasta la concreción de experiencias con heladeras solares (Critoph, 1996), insiste en la conveniencia del uso de heladeras solares con el par amoníaco-carbono activado (Critoph, 2002).

Por su parte, en Salta, las experiencias en refrigeración para la producción de hielo, han sido realizadas por Frigerio (1999) quien también ha estudiado los métodos de adsorción como alternativa, pero viene realizando sus mayores esfuerzos en enfriamiento nocturno, a la vista de su confianza en el sistema construido, que presenta la ventaja de su bajo costo, para apuntar a su adopción por parte de potenciales usuarios de la zona de Puna Argentina, mayormente carentes de recursos. Con este mismo enfoque, Passamai (2001) ha iniciado un trabajo de investigación en refrigeración, con el uso de un sencillo dispositivo basado en celdas Peltier de fácil acceso para los magros presupuestos en investigación con que se cuentan, apuntando a la obtención de frío en forma tal que las temperaturas más bajas se logran cuando las intensidades de la radiación son mayores. Estos sistemas son relativamente baratos y sencillos, pues evitan el uso de baterías y podrían apuntar a contar con su uso combinado, para cubrir un tiempo mayor de efecto refrigerante.

DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El sistema en estudio consta de un freezer doméstico, cuya potencia media es de 45 W. La capacidad del mismo es de 66 cm de alto por 35 cm de fondo por 43 cm de ancho, o sea de casi 100 litros. También se usó una caja con aislamiento térmico de poliestireno expandido, de 4,5 cm de espesor, perteneciente a un sistema que produce refrigeración por medio de alimentación de cc a 12 V, a una placa Peltier. El tamaño del receptáculo es de 29 cm $\times$ 21,5 cm $\times$ 25,5 cm, lo que le da una capacidad total de alrededor de 16 litros. Para comparar, una heladera doméstica común tiene una capacidad de 36 l en la zona del congelador, y 240 l en la zona inferior. Se usó una placa de captación de datos de temperatura de hasta 16 canales colocada en una PC 386, un solarímetro para medir la radiación solar total incidente al plano de dos paneles fotovoltaicos, una masa de agua destilada de 1 kg, heladera doméstica y freezer para el congelamiento y subenfriamiento hasta la temperatura de -25 °C. Algunas experiencias previas fueron presentadas en una comunicación anterior (Passamai, op. cit.)

La figura 1 muestra el esquema de una barra de hielo en el proceso de descongelamiento, similar a la que se formó en estas experiencias. De las observaciones realizadas, se tiene que durante el proceso de fusión se forma una barra cilíndrica, concéntrica con el recipiente que se usó (de material PET), la que flota en su propio líquido de deshielo hasta que, finalizada la fusión, se transforma totalmente en agua líquida.

Con q_i se indican en dicha figura los distintos flujos de calor involucrados cuando el sistema se deja calentar en un medio ambiente cuya temperatura media es vista por la masa de agua en forma simbólica por la línea vertical de la derecha. Desde esa pared genérica se produce un flujo q_1 de tipo radiativo, al cual se suma q_6 , de tipo convectivo desde el aire que rodea la muestra. También existe un flujo de conducción a través de la pared, dado por q_7 (los números son correlativos de la figura 2, donde se indica el caso en que la muestra en deshielo está dentro de una caja aislada térmicamente). Luego q_8 representa un flujo convectivo desde la pared al seno del agua de deshielo y q_9 representa dicho flujo desde la masa de agua a la interfase líquido-sólido, correspondiente al sistema agua-hielo. El aporte dado por q_{10} corresponde al flujo de calor desde el aire a la cara exterior del hielo que flota. En el dibujo se ha despreciado la pequeña elevación que corresponde a la masa sólida.

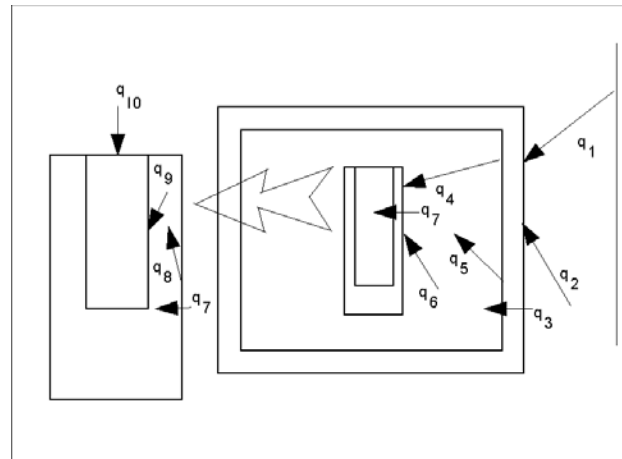
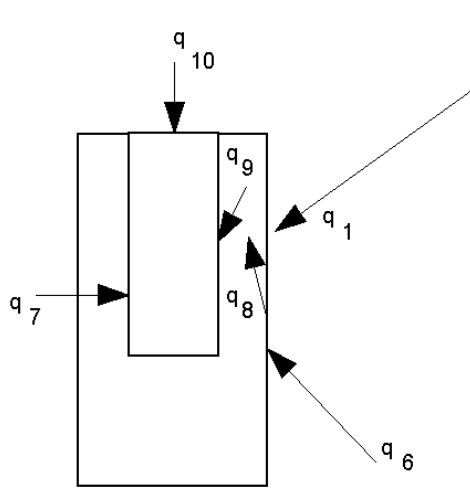


Figura 1: Esquema del bloque de hielo-agua expuesto.

Figura 2: Esquema de flujos intervinientes en el caso de un contenedor aislado del sistema hielo-agua.

Para el caso de la figura 2, se muestra un receptáculo aislado que contiene el cilindro de hielo-agua, el cual se muestra ampliado a la izquierda. Se observan los flujos de calor desde el exterior, que comienzan desde q_1 , correspondiente a la radiación desde la envoltura exterior, q_2 para la convección desde el aire ambiente a la cubierta externa de la heladora, q_3 que representa la conducción a través de la pared aislada, q_4 que es la radiación desde la pared interna al recipiente de agua, q_5 que indica la convección desde esta pared al aire, para luego continuar como se describió en la figura 1.

Estos diagramas dan una idea de los flujos de calor involucrados y su grado de complejidad en caso de desear realizar su simulación.

EXPERIENCIAS REALIZADAS

Primeramente se realizó el enfriamiento sensible, congelamiento y subenfriamiento de 1 kg de agua destilada en el freezer descrito antes. Se colocaron termocupas para medir la temperatura en la masa de agua, el ambiente exterior y el aire dentro del congelador. Estas mediciones se muestran en la figura 3.

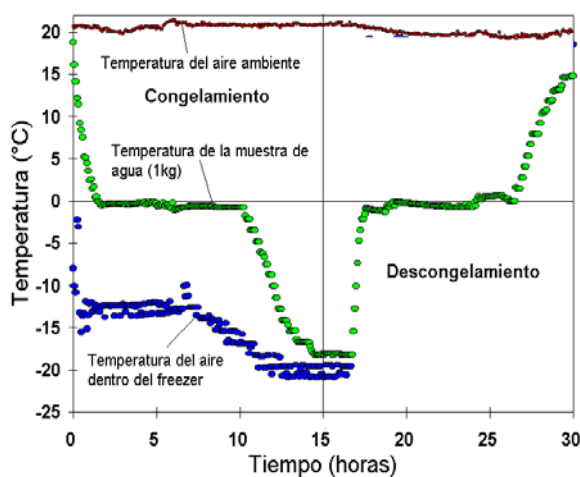


Figura 3: Temperaturas medidas en un freezer y fuera de él.

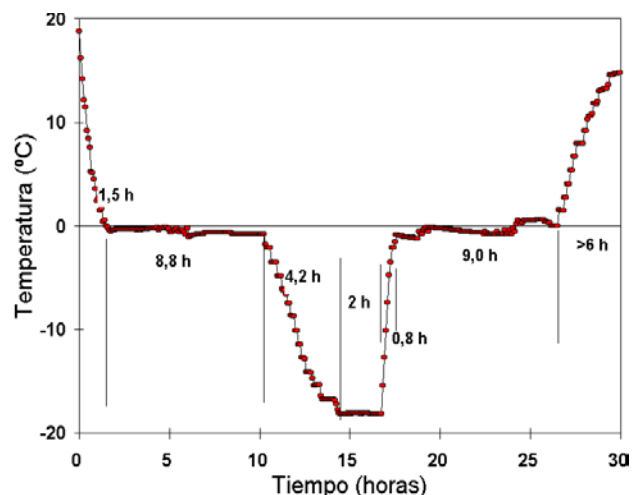


Figura 4: Tiempos empleados para cada proceso.

En la figura 4 se han indicado los tiempos medidos para cada proceso: enfriamiento sensible del agua, solidificación, subenfriamiento del hielo, mantenimiento de la temperatura mínima del hielo subenfriado, calentamiento sensible del hielo, fusión y aumento sensible de la temperatura del agua.

Otra experiencia consistió en colocar el hielo subenfriado dentro de la caja aislada, para medir, de esta forma, su eficacia como aisladora térmica del medio ambiente, manifestada en un aumento de la duración de la fusión, pues se extendió en alrededor de 37 horas. Esto se muestra en la figura 5.

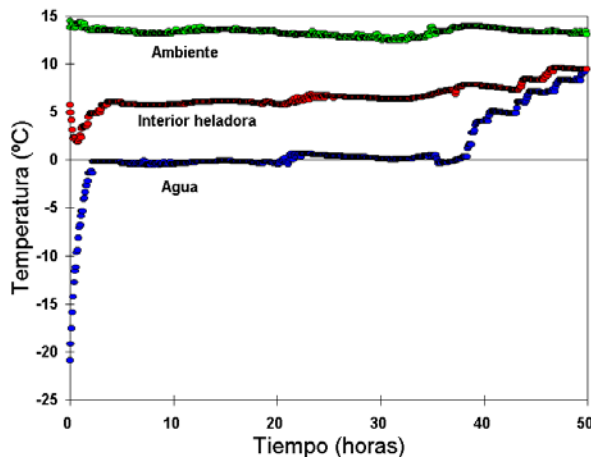
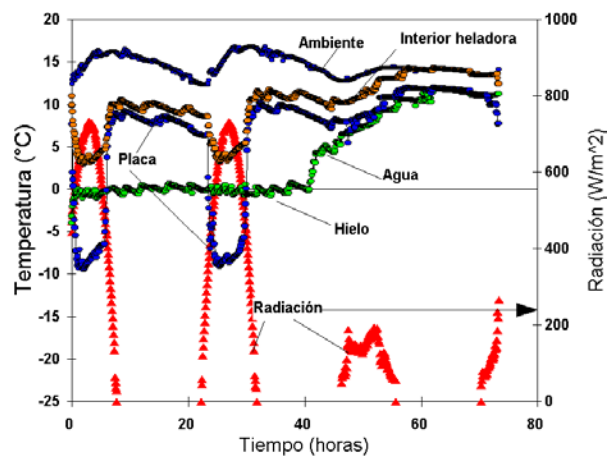


Figura 5: Temperaturas medidas dentro de la caja aislada. Figura 6: Caja aislada asistida por energía solar.



La última experiencia muestra, en la figura 6, el caso en que se asistió mediante energía solar el enfriamiento durante las horas diurnas de insolación correspondientes a dos días claros. Se observan las temperaturas del ambiente (que no se mantuvo aproximadamente constante como antes, debido a la fuerte insolación), el aire del interior de la heladora, la placa Peltier que sólo disminuye su temperatura por debajo de cero cuando las celdas fotovoltaicas reciben radiación y la temperatura del hielo -que esta vez comienza desde -5°C - el período de fusión y el de calentamiento sensible del agua. También se puede leer la radiación solar en el eje secundario de la derecha de la figura, observándose que los dos días finales fueron nublados. No obstante, gracias a la incidencia de la radiación solar durante los dos primeros días, la duración del período de fusión fue de alrededor de 42 horas.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

A partir de las mediciones realizadas se realizaron estimaciones que permiten extraer alguna conclusión.

En primer lugar, el cálculo del calor extraído del agua en cada tramo del proceso de congelamiento dentro del freezer, correspondiente al primer experimento, permite determinar la potencia mínima que es necesaria -desde el punto de vista del agua que se congela- para llevar a cabo el mismo (tener en cuenta que en todos los casos la base del cálculo es $m = 1\text{ kg}$ para la masa de agua):

- 1) enfriamiento sensible desde la temperatura inicial del agua hasta el inicio de la solidificación

$$Q_{es} = C_p A_g (0 - T_0) = 4,18 (-18,8) = -78,6\text{ kJ}$$

donde $C_p A_g$ es el calor específico del agua y T_0 era su temperatura inicial (aproximadamente igual a la ambiente). Los datos se han expresado en unidades coherentes.

A partir del dato de tiempo de 1,5 horas (figura 4), se obtiene la potencia absorbida para esta parte del proceso, la que resulta ser:

$$\dot{Q}_{es} = -14,55\text{ W}$$

Los signos negativos indican que el sistema agua ha perdido energía.

- 2) solidificación

$$Q_s = -h_{fs} = -333,4\text{ kJ}$$

donde h_{fs} es el calor latente de fusión del agua, necesario para el paso completo del estado líquido a sólido.

Como se midió un tiempo de 8,8 horas para la finalización del congelamiento a 0°C del agua, la potencia extraída en este caso fue:

$$\dot{Q}_s = -10,5\text{ W}$$

Se observa que, si bien la energía total extraída es mayor que la correspondiente al enfriamiento sensible del agua, la potencia fue menor debido al mayor tiempo en que se estuvo aplicando.

- 3) subenfriamiento

$$Q_{se} = C_{pHielo} (T_f - 0) = 2,07 (-18,17) = -37,6\text{ kJ}$$

donde C_{pHielo} es el calor específico del hielo.

Tanto para el caso 1), como el 3), no se han considerado las variaciones de capacidad calorífica del agua para los respectivos intervalos de temperaturas.

Empleando el dato de tiempo que llevó este proceso, 4,2 horas, resulta que la potencia fue:

$$\dot{Q}_{se} = -2,5 \text{ W}$$

Considerando los cálculos anteriores, se pueden establecer las siguientes conclusiones parciales: la energía total extraída del kg de agua, para pasar del estado líquido al sólido subenfriado fue de $-455,5 \text{ kJ}$, lo que implica, porcentualmente, los siguientes valores:

$$Q_{es} (\%) = 18,5 ; \quad Q_s (\%) = 73,2 \quad y \quad Q_{se} (\%) = 8,3$$

Se observa que la mayor parte del calor extraído se ha invertido en el cambio de fase y no en la disminución de temperaturas.

Respecto del tiempo total empleado, que fue de 14,5 horas para todo el proceso, el reparto porcentual es el siguiente:

$$t_{es} (\%) = 10,3 ; \quad t_s (\%) = 60,7 \quad y \quad t_{se} (\%) = 28,9.$$

Por lo tanto, un ciclo diario de 12 horas es suficiente para producir hielo, siempre que se garanticen potencias de extracción del calor similares a las encontradas.

En segundo lugar, la repetición de los cálculos anteriores para el proceso de calentamiento del hielo subenfriado, según puede verse en la figura 4, da por resultado los mismos valores para los calores puestos en juego si se tiene en cuenta el proceso inverso respectivo, desde el punto de vista de la Termodinámica, como ya se mencionó:

- 4) calentamiento sensible desde la temperatura inicial del hielo subenfriado hasta el inicio de la fusión

$$Q_{csHielo} = C_{pHielo} (0 - T_i) = 2,07 (18,8) = 37,6 \text{ kJ}$$

Sin embargo, como el hielo se puso a descongelar en el medio ambiente del laboratorio, lo cual implica mecanismos de transferencia de calor con distintos potenciales térmicos, los datos de los tiempos involucrados son diferentes, como lo son las respectivas potencias. Así, como el calentamiento sensible del hielo subenfriado se realizó en 0,8 hora (figura 4), se obtiene que la potencia absorbida por el hielo para esta parte del proceso resulta ser:

$$\dot{Q}_{csHielo} = 13,1 \text{ W}$$

donde ahora el signo positivo indica que el sistema hielo ha ganado energía.

- 5) fusión

$$Q_f = h_{fs} = 333,4 \text{ kJ}$$

donde h_{fs} es el calor latente de fusión del agua, igualmente necesario para el paso completo del estado sólido al líquido.

En este caso el tiempo empleado fue aproximadamente igual al recíproco dentro del freezer: 9 horas (figura 4), lo que implica que la potencia entregada en este caso también fue similar:

$$\dot{Q}_f = 10,3 \text{ W}$$

Obviamente, su valor está relacionado con la temperatura media del ambiente que “vió” el hielo.

- 6) calentamiento sensible del agua desde la temperatura de 0°C hasta la del ambiente

$$Q_{cs} = C_{pAg} (T_a - 0) = 4,18 (20,2) = 84,4 \text{ kJ}$$

Dado que no se esperó hasta que el agua llegó a la temperatura de equilibrio con el ambiente del laboratorio, como se observa en la figura 4, se estima que el tiempo necesario fue de aproximadamente 10 hs, lo que implica una potencia de sólo 2,3 W.

En tercer lugar, las experiencias de calentamiento del hielo dentro de un recinto aislado térmicamente, como lo es la heladora, tanto si se realiza refrigeración o no, implican una sustancial modificación al comportamiento térmico, especialmente en lo que se refiere al proceso de fusión. Efectivamente, si bien el análisis Termodinámico ofrece los mismos resultados para la fusión en cuanto al aporte necesario de energía, la experimentación permitió obtener los tiempos reales así como las potencias involucradas. De las figuras 5 y 6, se obtienen los siguientes datos relevantes:

- 7) potencia para la fusión del hielo dentro de la heladora, sin aporte de energía solar para enfriar, y sólo en mérito al aislamiento térmico:

$$\dot{Q}_{fAislamiento} = 2,5 \text{ W}$$

- 8) potencia para la fusión del hielo dentro de la heladora, con aporte de energía solar para enfriar:

$$\dot{Q}_{fAislamientoEs} = 2,2 \text{ W}$$

CONCLUSION

Las diferencias entre los cálculos obtenidos en 7) y 8) no son sustanciales. Teniendo en cuenta los tiempos, se concluye también que es fundamentalmente la aislación térmica y no el aporte de la energía solar (por lo menos para el sistema Peltier que se usó) lo que provee de una mayor autonomía a la capacidad de mantener frío para el sistema planteado. Por otra parte, si se trata de un sistema de enfriamiento tanto solar como por refrigeración nocturna, la cadena de frío se cortará aproximadamente a los dos días de producido el hielo. Tanto un caso como el otro presenta este inconveniente: en el caso de un refrigerador de carbón activado y metanol, por la posibilidad de días nublados que impiden un funcionamiento adecuado del sistema y, para el de enfriamiento nocturno, cuando el cielo no tiene la temperatura adecuada, tanto en noches no despejadas, como en verano.

Una conclusión positiva se obtiene desde el punto de vista de la factibilidad de obtención de hielo, dadas las bajas potencias involucradas, siempre y cuando la aislación térmica y el medio de transferencia -en su caso, quita- de calor sean eficientes.

REFERENCIAS

- Critoph, R. (1996): Evaluation of alternative refrigerant-adsorbent pairs for refrigeration cycles. *Appl. Thermal Eng.* Vol. 16, No. 11, 891-900.
- Critoph, R. (2002). Comunicación personal.
- de Groot, S. (1968) : Termodinámica de los procesos irreversibles. Alhambra.
- Frigerio, E. (1999): Sistema de refrigeración por convección natural: nuevos ensayos. *Av. en En. Ren. y Med. Amb.*, Vol. 3, N° 1, 3.21-3.24.
- Incropera, F. y De Witt, D. (1990): *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
- Li, Z. y Sumathy, K. (1999): A solar-powered ice-maker with the solid adsorption pair of activated carbon and metanol. *Int. J. Energy Res.*, 23, 517-527.
- Passamai V. (1998): Experiencias de laboratorio y de campo con un refrigerador solar. *Com. del XXIV Congreso de ASADES*, Vol. 5, co03-02.pdf.
- Pralón, A. y Rodríguez, L. (2001): Caracterización y dimensionamiento de un refrigerador solar adsorptivo destinado a la producción de hielo. Comunicación personal, trabajo enviado a un congreso de Venezuela.
- Pons, M. y Grenier, P. (1987): Experimental data on a solar-powered ice maker using activated carbon and metanol adsorption pair. *J. of Solar Energy Eng.* Vol. 109, 303-310.
- Rodríguez, J. et al. (1995): Diseño, construcción y operación de un prototipo experimental para la refrigeración solar por adsorción. *Memoria de la XIX Semana Nacional de Energía Solar ANES*, Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Wang, R., et al. (2000) : An energy efficient hybrid system of solar powered water heater and adsorption ice maker. *Solar Energy* Vol. 68, No. 2, 189-195.

ABSTRACT

Laboratory results are described after freezing one kilogram of pure water. The obtained ice was melted under ambient conditions and inside an insulated box. A Peltier cell was used to cool down the box during ice melting, by means of solar energy collection. Comparison is made of the obtained results.

Palabras clave: ice fusion, refrigeration, solar cooling.