

aire acondicionado por energía solar para edificios en la zona de San Carlos

Róger Solano G.*

RESUMEN

Se propone un sistema de acondicionamiento de aire para la Biblioteca del Instituto Tecnológico de Costa Rica en San Carlos, Costa Rica.

El sistema completo incluye 300 metros cuadrados de colectores de placa plana, 25 metros cúbicos de tanque de almacenamiento, los controles y el enfriador y usa una unidad de absorción de bromuro de litio — agua.

La carga de diseño de la Biblioteca es 112 855 kj/h. en calor sensible y 72 795 kj/h. en calor latente.

El sistema de enfriamiento usará el agua de río para el condensador en vez de una torre de enfriamiento.

De acuerdo con este trabajo el sistema no puede dar la energía requerida a menos que algunas modificaciones sean hechas, como por ejemplo cambiar el tipo de colector o modificar la concentración del bromuro de litio en la solución de la unidad de absorción.

INTRODUCCION

Existen varios sistemas de aire acondicionado, el más común es el de compresión mecánica del vapor, el que recibe energía mecánica en el motor del compresor para energizar un ciclo termodinámico.

La energía solar puede ser usada para producir electricidad a través de un ciclo Rankine de generación; la electricidad producida servirá para mover el ciclo de compresión mecánica.

Otro sistema de aire acondicionado es el sistema de absorción. Estos sistemas trabajan usando una sal absorbente y un fluido refrigerante. Hay

varios tipos de ciclos entre los que se encuentran bromuro de Litio—agua, agua—amoníaco, trocinato de sodio—amoníaco, bromuro de litio—metanol, y el bromuro de litio de doble efecto. Actualmente el ciclo más comunmente usado es el de bromuro de litio—agua, y el agua—amoníaco los cuales se encuentran disponibles en el comercio internacional.

La idea es usar la energía solar para moderar la temperatura del aire de un recinto. Con base en la experiencia generada en otros países se puede definir que tres procesos son los más prometedoros; el módulo de generación Rankine, el ciclo de bromuro de litio—agua y el ciclo de agua—amoníaco.

La selección de cualquiera de estos procesos es opcional y depende de las circunstancias de la región y desde luego del presupuesto del proyecto.

A continuación se presenta una breve discusión de las características técnicas de cada proceso.

Ciclo Rankine

Durante los últimos años se han hecho considerables progresos en la adaptación del ciclo Rankine al enfriamiento de edificios y casas teniendo como fuente energética la energía solar. La figura No. 1 muestra el ciclo y sus elementos.

Los colectores solares que proveen la energía pueden ser planos, tubo evacuado, o de concentración intermedia, y la selección se hará con base en la temperatura requerida. Un ámbito aproximado es de 75°C a 95°C para colectores de placa plana y hasta 593°C para colectores de alta concentración.

La figura No. 2 describe un típico comportamiento de diferentes colectores bajo las mismas condiciones ambientales.

* Investigador del Centro de Investigación en Energía, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Sistema de absorción bromuro de litio-agua

Este ciclo se ha hecho popular en tiempos recientes para aire acondicionado. En este caso agua es el refrigerante y el bromuro de litio es el absorbente.

El ciclo se compone de los siguientes elementos (figura No. 3).

- a) generador: es donde se lleva a cabo la separación entre el refrigerante y la sal absorbente por medio de la energía proveniente del área de colectores solares,
- b) el refrigerante pasa luego al condensador y de ahí la válvula de expansión donde la presión es reducida de 0,1 atm*, a 0,01 atm.
- c) el refrigerante pasa luego al evaporador donde intercambia calor con el ambiente que se va a refrigerar,
- ch) el siguiente paso es mezclarse otra vez con la sal de bromuro de litio en el absorbedor y de ahí a la bomba donde la presión se eleva a 0,1 atm para repetir el ciclo.

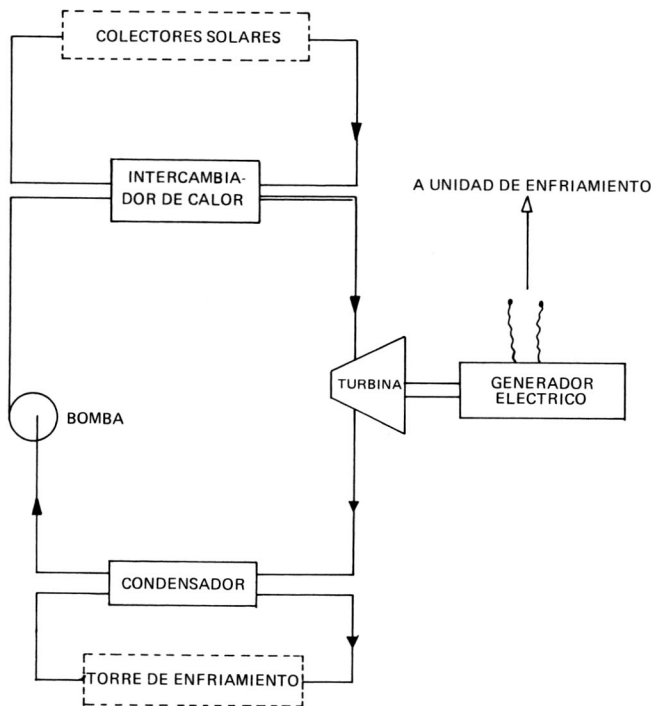


FIGURA No. 1. Ciclo Rankine típico.

*1 atm = 1,013252 x 10⁵ Pa.

Las temperaturas más comunes en el generador están en el ámbito de 70°C a 115°C, sin embargo con algunas modificaciones en el sistema, el ciclo puede operar a menos temperatura. El ámbito de temperatura en la torre de enfriamiento es de 10°C a 30°C.

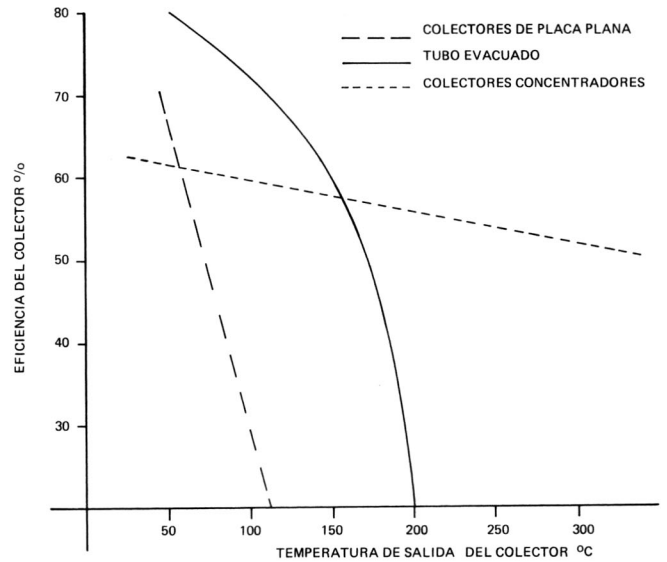


FIGURA No. 2. Tipos de colectores solares a una temperatura ambiente de 21°C y una intensidad de radiación directa de 948 W/m².

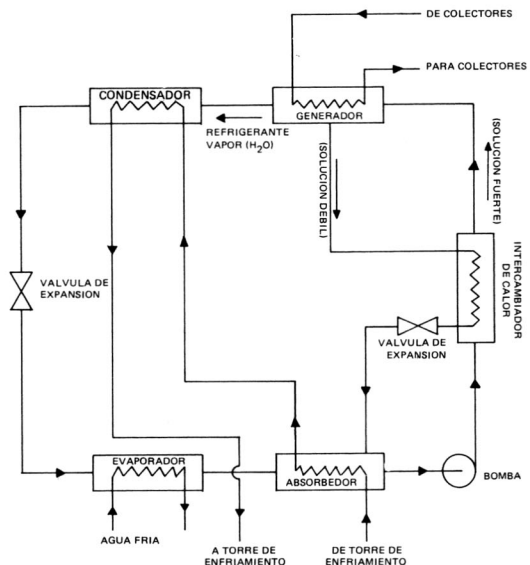


FIGURA No. 3. Diagrama típico de una unidad comercial de bromuro de litio-agua.

El sistema puede ser separado en dos partes, baja presión alrededor de 0,01 atm y alta presión alrededor de 0,1 atm.

La concentración del LiBr en la solución deberá ser controlada debido a problemas de cristalización, que ocurren cuando la fracción de masa de agua en la solución decrece a ciertos niveles dependiendo de la temperatura.

Tamaños comerciales de estas unidades de absorción pueden ser encontrados desde 12 660 Kj/h a 760 000Kj/h (1 a 600 toneladas de refrigeración).

Las bajas temperaturas requeridas por el generador presentan una buena posibilidad de usar energía solar para mover el ciclo.

Sistemas de absorción de agua–amoníaco

Este sistema ha sido usado por cerca de 100 años; sus principales usos han sido en refrigeración y en aquellos lugares donde existe calor de desecho. Recientemente este sistema ha encontrado aplicaciones en sistemas de aire acondicionado domésticos quemando gas natural. Los elementos del ciclo son muy similares en función a aquellos del ciclo de LiBr–agua con la excepción que el generador es reemplazado por una columna de destilación según se muestra en la figura No.4.

Esto es necesario porque el agua y el amoníaco son ambos líquidos y no se separarán suficientemente en una sola etapa de calentamiento. En este sistema el amoníaco es el refrigerante y el agua es el absorbente.

El ámbito de temperaturas en el generador o columna de destilación es de 120°C a 150°C. La parte de baja presión del ciclo es alrededor de 207 kpa (30 psi), y la parte de alta presión 2 070 kpa (300 psi).

Como consecuencia del peligro del amoníaco se deberán de considerar especiales medidas de seguridad.

Comparaciones entre ambos ciclos de absorción

- La temperatura en el generador/columna de destilación son más grandes para el ciclo de agua–amoníaco que para el ciclo de bromuro de litio–agua.
- El sistema de LiBr–H₂O tiene mayor coeficiente de performance (COP) que el sistema de H₂O–NH₃.

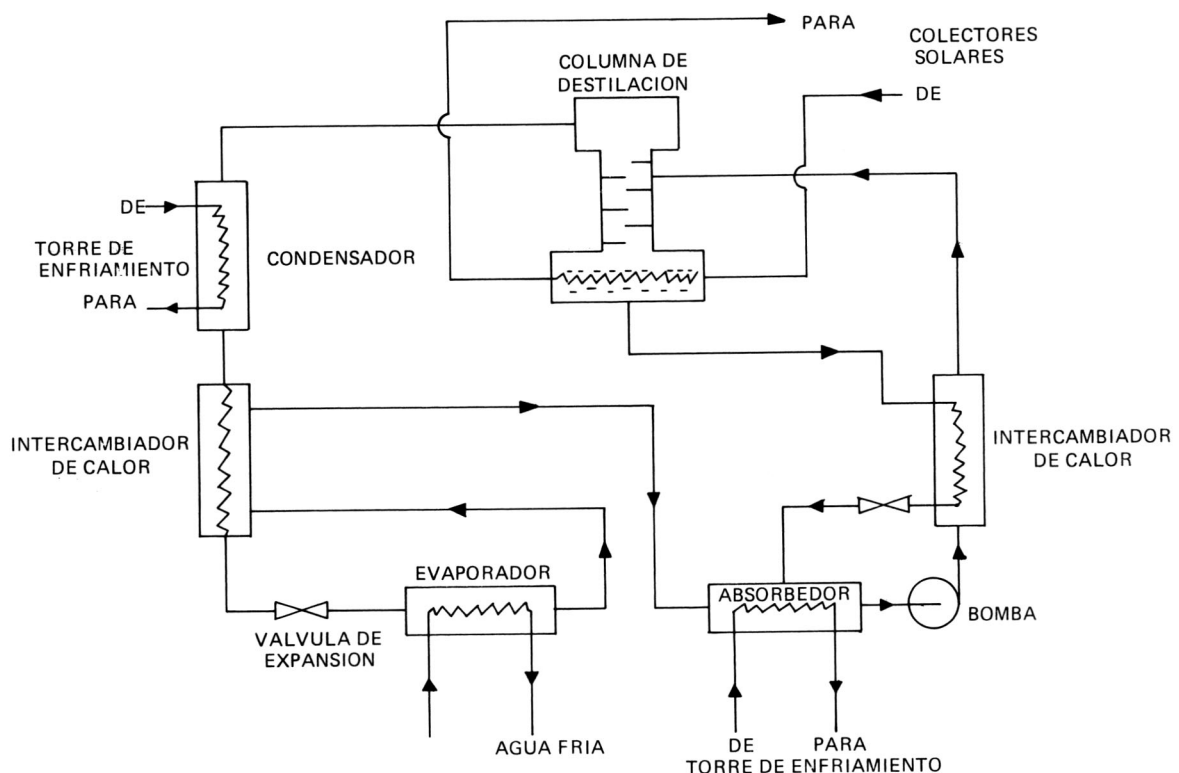


FIGURA No. 4. Diagrama de un sistema de agua–amoníaco.

c) El ciclo de H_2O-NH_3 puede operar a temperaturas más bajas de $40^{\circ}C$ debido a las características del refrigerante. El ciclo de $LiBr-H_2O$ no puede operar bajo $40^{\circ}C$ debido a que el refrigerante es agua.

ch) Debido a las temperaturas necesitadas por el ciclo H_2O-NH_3 es difícil usar colectores de placa plana y se requieren otras clases de colectores como tubos de vidrio evacuado o colectores de concentración intermedia.

impulsado por aire acondicionado son colectores, tanques de almacenamiento, controles, bombas y el ciclo termodinámico de absorción. Existen varias formas de instalar estos componentes, dependiendo de la situación. Este trabajo considerará solamente una de estas formas, fundamentado en las condiciones climáticas, localización del proyecto y facilidades de mantenimiento. El sistema escogido se muestra en la figura No. 5.

CUADRO No. 1. Temperatura ambiente y radiación solar incidente en un colector con 10° de inclinación

DESCRIPCION DEL PROYECTO

MES	Horas	6:30	7:30	8:30	9:30	10:30	11:30	12:30	1:30	2:30	3:30	4:30	5:30
Ene.	T	18	19	20	22	24	26	28	30	28	27	26	26
	I_t	110	512	1010	1591	1771	2006	2006	1771	1591	1010	512	110
Feb.	T	18,5	19,5	20,5	23	25	27	30	32	31	28	27	26
	I_t	115	597	1037	1527	1902	2118	2118	1902	1527	1037	547	115
Mar.	T	19,5	20	21	24	27	29	31	33	31	29	27	26,5
	I_t	150,2	615,8	1111	1577	1922	2102	2102	1922	1577	1111	615,8	150,2
Abr.	T	20	21	22	24,5	26	29	31	32	31	30	28	26
	I_t	294,3	850,2	1308	1700	1962	2125	2125	1962	1700	1308	850,2	294,3
May.	T	19,5	20	21	22	24	25	27	29	28	27	26	25
	I_t	342,2	758,8	1190	1532	1755	1889	1889	1755	1532	1190	758,8	342,2
Jun.	T	19	19,5	20	21	23	25	27	28	27,5	26	25	25
	I_t	319	663,5	1020,8	1301	1492,9	1569	1569	1492,9	1301	1020,8	663,5	319
Jul.	T	19	20	21,5	22	24	26	28	29	28	27,5	27	26
	I_t	286	660,9	997,6	1271	1471	1546	1546	1471	1271	997,6	660,9	286
Ago.	T	19	20	22	23	24	25	28	29	28,5	27,5	26	26
	I_t	277	703	1082	1420,65	1610	1731	1731	1610	1420	1082	703	277
Set.	T	19,5	20	22	23	25	26	27	28	27	26	25	25
	I_t	240	751	1201	1562	1772	1922	1922	1772	1562	1201	751	240
Oct.	T	20	20,5	21	23	25,0	27	30	28	27	26,5	26	26
	I_t	214	750	1210	1634	1884	2022	2022	1884	1634	1210	750	214
Nov.	T	19	20	22	23	24,5	26	27	28	27	26	25,5	25
	I_t	111	583	968	1316	1552	1676	1676	1552	1316	968	583	111
Dic.	T	18	19	21,5	23	25	26	27	28	26	25	25	24
	I_t	88	566	969	1359	1598	1724	1724	1598	1359	969	566	88

T = Temperatura $^{\circ}C$

I_t = Radiación solar kJ/m^2-h colector con 10° de inclinación.

El propósito del proyecto es determinar la posibilidad técnica y económica de usar aire acondicionado movido por energía solar en la Biblioteca del Instituto Tecnológico de Costa Rica en la Región de San Carlos, Costa Rica. Esta región se caracteriza por su clima altamente tropical predominando alta temperatura y alta humedad.

La Biblioteca se ha diseñado para una capacidad de aproximadamente 180 personas. Sus materiales de construcción son comunes al nivel de construcción de Costa Rica, no existen especiales métodos de aislamiento en el edificio con excepción de que las ventanas tienen doble vidrio. La carga de refrigeración del sistema ha sido calculada por el Departamento de Equipamiento del ITCR y su estimado es de 185 680 KJ/h (150 tons), de los cuales 112 855 kJ/h son de calor sensible y 72 795 KJ/h de calor latente basado sobre las condiciones de $31,4^{\circ}C$ y 91% de humedad relativa.

La información climática de la zona es una información muy importante, y la eficiencia del sistema dependerá fuertemente de esta información, no disponemos de datos sobre radiación directa y difusa que es necesaria para analizar el sistema.

Es por esto que un método de correlación ha sido adoptado, este es un método de Collares—Peireira y Rab. Los resultados de esta correlación son mostrados en el cuadro No.1.

La información climática se publica aquí solo para los días promedio de cada mes y los cálculos se harán únicamente para esos días. Se considera que estos cálculos darán una muy buena aproximación sobre la eficiencia del sistema de absorción.

Los principales componentes de un sistema

Los colectores seleccionados son colectores de placa plana debido al bajo precio, fácil mantenimiento y fácil instalación. Estos colectores se conectarán en paralelo.

En este sistema se deben instalar tanques de almacenamiento porque las condiciones meteorológicas lo requieren. El alto porcentaje de nubosidad durante el año, elimina la posibilidad del uso directo de la energía solar sin almacenaje.

El sistema de absorción seleccionado es el bromuro litio-agua, porque este puede trabajar con temperaturas más bajas que las del ciclo de agua-amoniaco y además el COP es mejor. El ciclo Rankine y módulo de generación se elimina debido a la alta inversión inicial que debe hacerse (aproximadamente seis veces más caro que el ciclo de bromuro de litio para la misma capacidad).

Existen varios fabricantes que están produciendo este tipo de máquinas en capacidades de 12 660 Kj/h (1 ton) a 630 000 Kj/h (50 tons), entre estas compañías están Arkla, Carrier, estas dos de los Estados Unidos y Yazaki Co., de Japón. La mayoría de estos modelos son diseñados para trabajar agua caliente.

El agua de un río que pasa cerca de la Biblioteca se utilizará para el condensador y el absorbedor eliminando la torre de enfriamiento.

de Energía Solar. El programa consiste de muchas subrutinas que modelan sistemas en componentes. Dentro de los subsistemas se encuentra el ciclo de aire acondicionado por absorción, este subsistema está basado en una máquina comercial específicamente la Arkla WF-36 de una capacidad de 37 980 Kj/h (3 tons). Bajo recomendación de los fabricantes y técnicos que trabajaron en el programa de computadora este modelo puede usarse para capacidades mayores o menores según sea el caso.

El programa se usó primeramente para determinar el comportamiento del sistema cuando existen variaciones en el generador, debido a las variaciones de radiación colectada por día. Los parámetros usados son:

- Tiempo de arranque: 1,05 horas y tiempo de apagado 0,0133 horas,
- temperatura inicial del generador: 70°C. La mínima temperatura para enfriamiento es 77°C.
- el flujo de agua caliente es 12 100 Kg/h (esto es calculado por el mismo programa).

Las variables son:

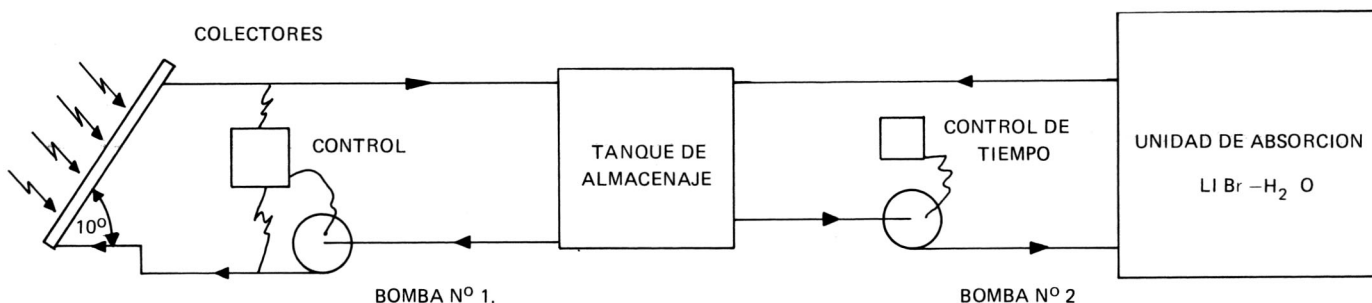


FIGURA No. 5. Diagrama de un sistema para aire acondicionado por energía solar.

ANALISIS

El sistema es simulado con un programa de computadora llamado TRNSYS (abreviación en inglés de **a transient simulation program**). Este programa fue desarrollado en la Universidad de Wisconsin en Madison por miembros del Laboratorio

- temperatura del agua caliente suplida, y
- temperatura del agua del condensador y absorbedor.

El siguiente es un análisis del sistema por cada unidad.

Colectores

Se escogieron los colectores de placa plana con superficie selectiva absorbente, en este caso se especificó un tipo de colector que se encuentra fácilmente en el mercado internacional. El producto del factor de remoción de calor F_r , y la transmitancia-absortancia $\tau \alpha$ es 0,76; el producto del factor de remoción F_r y el coeficiente total de pérdidas, U_L , es = 14,45 $\text{kJ/h} \cdot \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$. El colector es de una cubierta, el panel absorbente es cobre con superficie tratada en negro cromo.

Almacenamiento

El tanque de almacenamiento tendrá 10 cm. de fibra de vidrio como aislante. El volumen por regla general es 0,08 a 0,2 m^3 de almacenamiento por metro cuadrado de colector. El programa se corrió para varios volúmenes de almacenamiento para optimizar el tamaño. La temperatura en el tanque no es homogénea y está estratificada en tres capas, baja, media y alta capa de temperatura. El programa analiza la estratificación y entrega una temperatura promedio, esta es la temperatura de entrada al generador en el ciclo de absorción.

Las pérdidas en el tanque son 1,7 $\text{kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Controles

Tres tipos de controles son usados:

- a) **Control diferencial** encendido/apagado entre la entrada y la salida del colector: cuando la temperatura en la salida es menor o igual que la entrada, la bomba No. 1 (figura No. 6) se apaga.
- b) **Controlador de tiempo** encendido/apagado, el control prende cuando la Biblioteca abre y apaga cuando la Biblioteca cierra.
- c) **Control diferencial en la máquina de absorción**, este apaga cuando la temperatura en el generador es igual o menor que la temperatura mínima del generador que es 77°C .

El flujo entre el tanque de almacenamiento y la máquina enfriadora es constante y es definida

por la unidad. El flujo entre los colectores y tanque de almacenamiento podría ser cambiada y optimizada de acuerdo con la temperatura en el tanque.

ANALISIS DE RESULTADOS

La figura No. 6 muestra los resultados provenientes de programas de computadora sobre la variación de la capacidad de la unidad de absorción con respecto a la temperatura en el generador, T_g , para una temperatura de torre de enfriamiento, T_w , definida. Se puede observar que la capacidad disminuye cuando la temperatura del generador disminuye manteniendo constante la temperatura de la torre T_w . El gráfico también muestra a qué temperatura de generador la capacidad es 100%, este punto es importante ya que puede evitar el sobrediseño. Una importante información en este gráfico es la variación de la capacidad del sistema con la temperatura de torre de enfriamiento T_N , para una temperatura de generador dada. T_w depende de la temperatura de bulbo húmedo y temperatura ambiente, parámetros que pueden variar con el tiempo, y estas variaciones deberán ser consideradas por el diseñador.

La torre del enfriamiento puede ser reemplazada por otro sistema de enfriamiento, como por ejemplo un río, lago, pozo o cualquier otra fuente donde las variaciones de temperatura diarias no sean muy grandes y normalmente están bajo la temperatura ambiente, de tal manera que el agua de estas fuentes pueden ser bombeadas hasta el absorbedor y el condensador del sistema. Se sabe que las temperaturas de estas fuentes pueden estar bajo los 22°C , sin embargo el gráfico no contempla estas variaciones dado que el programa TRNSYS no puede trabajar con información de menos de 22°C para T_w .

La performance de la unidad es expresada en términos del coeficiente de performance COP, definido como:

$$\text{COP} = \frac{\text{efecto de refrigeración obtenido}}{\text{energía neta de entrada}}$$

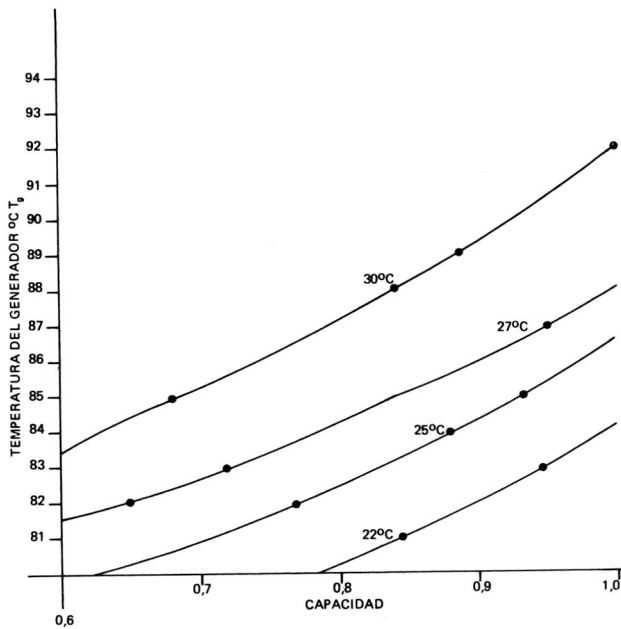


FIGURA No. 6. Temperatura del generador vs capacidad.

En la figura No. 7 se presenta la variación del coeficiente de performance con la temperatura del generador para varios Tw. Es claro que el COP se incrementa cuando T_g se aumenta hasta alcanzar una T_g de diseño para una temperatura de torre de enfriamiento dado. La importancia de mantener Tw tan bajo como sea posible se puede ver en la figura No. 7 donde el más bajo Tw corresponde al más alto COP.

El programa TRNSYS se usó para seleccionar el área óptima de colectores, los resultados son presentados en la figura No. 8 donde el área de colectores A, es graficado con la temperatura promedio de almacenaje, Tc para un factor de volumen V donde

$$V = \text{volumen de almacenamiento (m}^3\text{)}/\text{área de colectores (m}^2\text{)}$$

Dos factores de volumen se consideraron 0,08 y 0,1 m³ de almacenaje/m² de colector; estos factores son los más comunes.

Desde el punto de vista técnico el área óptima de colectores se logra cuando se alcanza la temperatura de diseño, en otras palabras cuando el COP alcanza un máximo dado una temperatura de torre de enfriamiento Tw, que es en este caso 84°C.

El programa de computadora se corrió con los datos meteorológicos presentados en el cuadro No. 1 y usando el modelo de la figura No. 5. Cuando el factor de volumen decrece la temperatura en

el tanque de almacenamiento se incrementa para un área específica de colectores y caudal, este es un resultado obvio, sin embargo, de acuerdo con las reglas V = 0,08 es el mínimo considerado y no es conveniente trabajar en los límites inferiores.

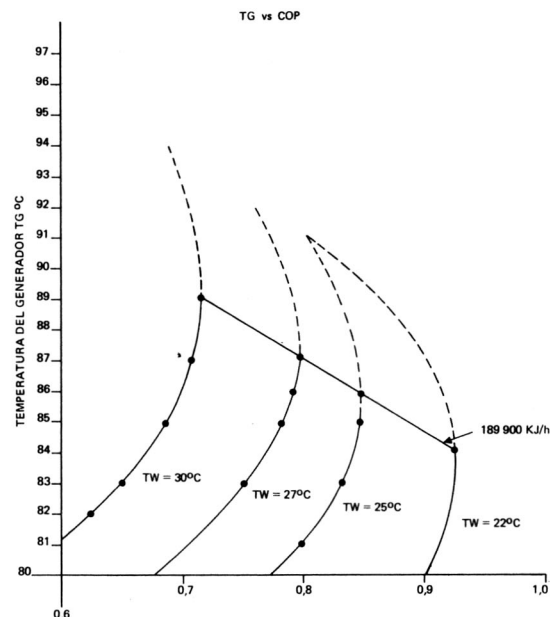


FIGURA No. 7. Coeficiente de performance.

En la figura No. 8 se muestra que el área óptima puede escogerse entre 250 y 300 m² que es donde la pendiente de las curvas se acentúa más. Un programa de computadora se corrió por cada área de los resultados, mostrando que el sistema trabaja mejor con 300 m².

El sistema también se probó con pequeños flujos entre el área de colectores y el tanque de almacenaje, los resultados muestran que los cambios en la temperatura de los tanques de almacenamiento no son realmente significativos, por lo tanto el flujo se determinó en 16 000 kg de H₂O/h.

Las especificaciones para el sistema en la figura No. 5 son:

- Area óptima de colectores = 300 m²
- Volumen tanque de almacenaje = 25 m³
- Flujo (1) = 16 000 kg/h
- Flujo (2) = 12 000 kg/h.

La energía para la unidad de absorción y la energía requerida para acondicionar la biblioteca se

muestran en la figura No. 9). Solamente cuatro meses se plantearon, enero, abril, julio y octubre, por simplificación. El resto de los meses pueden ser encontrados en el programa de computadora.

El gráfico muestra que la energía entregada no satisface la energía requerida, (figura No. 9) y hay meses semejantes a julio que la capacidad de enfriamiento suplida por los sistemas de absorción es muy pequeña y solamente para más horas. Como es lógico la energía producida por el sistema en la figura No. 5 da más energía para meses como más alta radiación semejante a marzo y abril y en algunos casos alcanzando 50% de la energía requerida en horas pico.

El horario de la biblioteca será de 8 a.m. a 10 pm. y la carga de enfriamiento se incrementará especialmente en las tardes y noches. De acuerdo con los resultados del ciclo de absorción, la unidad arranca a mediodía con cierto porcentaje de energía integrada, la unidad detiene su proceso entre 3 pm. y 6 pm. dependiendo de la energía y temperatura en los tanques de almacenaje.

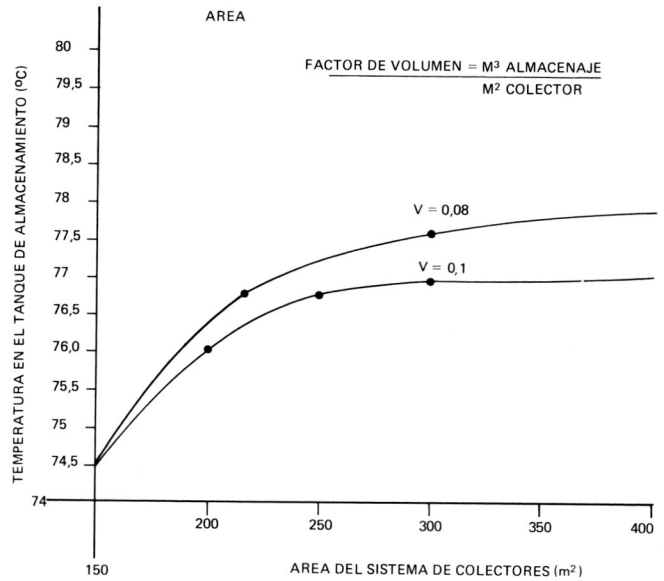


FIGURA No. 8. Temperatura en el tanque de almacenamiento vs área del sistema de colectores.

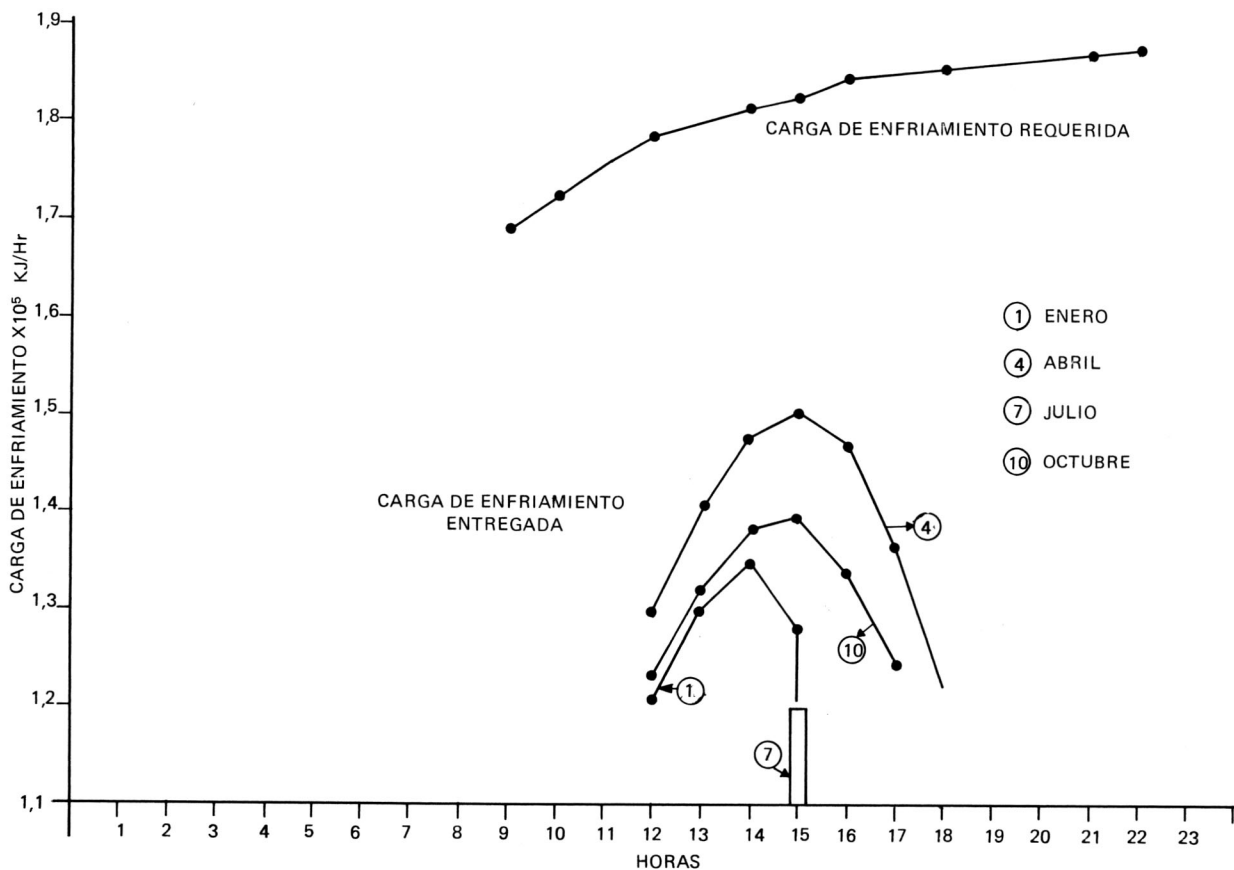


FIGURA No. 9. Variación de la carga de enfriamiento durante un día.

CONCLUSIONES

El sistema de absorción de bromuro de litio-agua tiene una performance que es fuertemente dependiente de temperatura del generador, y la temperatura de agua de enfriamiento. Cualquier variación de estas temperaturas producirán una variación en la capacidad y por lo tanto en el coeficiente de performance, COP, de la unidad.

El área óptima de colectores es de 300 m² y el volumen del tanque de almacenamiento es de 25 m³. Los resultados mostraron que un incremento de esta área realmente no incrementa significativamente la temperatura del tanque de almacenamiento.

El sistema en la figura No. 5, definitivamente no parece suplir toda la energía para acondicionar la biblioteca. La máxima energía entregada por el sistema es 80% de la carga de enfriamiento, esto hace necesario usar energía auxiliar para satisfacer la carga total.

Por lo tanto aire acondicionado energizado por energía solar para esta parte de Costa Rica necesita ser complementado con otras fuentes de energía cuando un sistema semejante al de la figura No. 5 es usado.

Como se dijo anteriormente se ha usado solamente una estrategia y aunque los resultados técnicamente hablando no son muy prometedores el estudio de este tópico deberá ser complementado con diferentes esquemas.

RECOMENDACIONES

El modelo comercial ARKLA WF-36, usado en este trabajo, también ha sido estudiado en otros proyectos, en algunos de ellos se ha modificado la máquina, reduciendo la concentración de bromuro de litio en la solución, una reducción en el tiempo de arranque y una disminución en la temperatura mínima de trabajo se encontraron con esta modificación. Un cambio semejante en nuestro sistema puede ayudar bastante a mejorar los resultados.

Una forma de incrementar la temperatura en el generador sería cambiando el tipo de colector a uno de tubo evacuado o de concentración intermedia con lo que se producirán temperaturas más altas en el tanque de almacenamiento. Esta decisión deberá ser hecha a la luz de un estudio de factibilidad económica.

Es necesario evaluar otras marcas comerciales que también trabajan con bromuro de litio-agua para conocer el comportamiento técnico de estos y para tener otra información que sirva para establecer comparaciones.

La segunda etapa de este trabajo será el estudio de factibilidad económica del proyecto si este se complementa con energía auxiliar.

LITERATURA CONSULTADA

- 1) Air Conditioning and Refrigeration, Section SC *Certified Solar Collectors*. 1982.
- 2) Alizadeh, Bahar, and Gedola. *Design and optimization of a absorption refrigeration system by solar energy*. *Solar Energy*, Vol. 22, pp 149-154, 1979.
- 3) ASHRAE, *Fundamentals. Handbook*, 1981.
- 4) Auh, Paul. *An overview on absorption cooling technology in solar applications*. *Proceedings of the third workshop on the use of solar energy for the cooling buildings*. 1978.
- 5) Conway and Lof. *Solar powered residential air conditioning by lithium-bromide absorption system at Colorado State University*. *Proceedings of the third workshop on the use solar energy for the cooling buildings*. 1978.
- 6) Duffie and Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: John Wiley, 1980.
- 7) Hancock, Beach, and Lowery. *Solar cooling of a Florida Welcome Station*.
- 8) Kreider and Kreith. *Solar Heating and Cooling, Active and Passive Design*. New York: Mc Graw Hill, 1982.
- 9) Newton, Alwing. *Solar System for Space Cooling*. *Solar Energy Handbook*. New York: Mc Graw Hill, 1981.
- 10) Mc Quiston and Parker. *Heating Ventilation and Air Conditioning*. New York: John Wiley, 1982.
- 11) TRANE. *Absorption Refrigeration*. 1969.
- 12) University of Wisconsin. Solar Energy Laboratory. *TRNSYS. Handbook*, Madison, 1979.