

INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN CON ENERGÍA SOLAR. SIMULACIÓN DINÁMICA EN VIVIENDA UNIFAMILIAR

D. Silió⁽¹⁾, C. Hoppe⁽²⁾, L. Villegas⁽²⁾, I. Lombillo⁽²⁾, GTED-UC⁽³⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria,
Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.
Teléfono: 942200933, Fax: 942201385, e-mail: delfin.silio@unican.es

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica, Universidad de Cantabria,
Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.
Teléfono: 942201743, Fax: 942201747, e-mail: carlos.hoppe@unican.es, luis.villegas@unican.es,
ignacio.lombillo@unican.es

⁽³⁾Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria
Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.
Teléfono: 942201743, Fax: 942201747, e-mail: gted@unican.es, web: <http://grupos.unican.es/gted/>

Resumen

España es uno de los países de la UE con mayor recurso solar, sin embargo, la gran variación estacional en la disponibilidad de radiación solar y el periodo relativamente corto de la demanda de calefacción, dificultan la penetración de los sistemas solares térmicos en la cobertura de la demanda de calefacción de los edificios. De otra parte, en amplias zonas del territorio español, para mantener unas condiciones adecuadas de bienestar en los edificios, la demanda energética para refrigeración es del mismo orden de magnitud que la correspondiente en calefacción. Para conseguir contribuciones significativas de la energía solar a la cobertura de la demanda energética de los edificios, yendo más allá de las pequeñas contribuciones prescritas por el Código Técnico de la Edificación, es necesario emplear el aporte solar para cubrir parte de la demanda de refrigeración solar. Las instalaciones de refrigeración solar presentan peculiaridades respecto a las de ACS o a las de calefacción, ya que requieren incorporar un mayor grado de detalle y consideraciones adicionales en los procesos de dimensionado y evaluación de actuaciones. En este artículo se presentan los resultados de la simulación de un sistema de refrigeración solar con máquina de absorción (bromuro de litio-agua) que utiliza como fuente de calor la energía solar. El modelo matemático empleado en la simulación, pretende recoger el mayor número de variables que intervienen en el proceso; por ello, contempla las variaciones diarias y mensuales de la temperatura ambiental, de la radiación solar, etc. La implementación del modelo se realiza mediante un software, desarrollado específicamente al efecto, escrito en el lenguaje de programación MATLAB.

Palabras-clave: Energía solar, refrigeración solar, máquina de absorción, simulación dinámica.

1 Introducción

El aumento del nivel de vida en los países industrializados hace que asistimos a un constante crecimiento del mercado del frío; tanto para usos comerciales como industriales, domésticos o de confort. Las instalaciones frigoríficas son sistemas que emplean las fuentes de energía comerciales con el objetivo de producir temperaturas inferiores a la del ambiente. Esta conversión no es directa. La energía comercial se transforma en energía mecánica siendo ésta entregada a un fluido refrigerante. El refrigerante es el agente que transporta la energía. Debido a su naturaleza química, sus emisiones, no deseadas, son las responsables de la destrucción del ozono estratosférico y del aumento del efecto invernadero a nivel planetario.

Los refrigerantes más utilizados son los HCFC y los HFCs, aunque también se utilizan refrigerantes inorgánicos como el amoníaco R717 y el agua R718. Existen varios ciclos frigoríficos pero los más utilizados son los de compresión mecánica y los de absorción.

Los refrigerantes utilizados por el ciclo de compresión mecánica trabajan a presiones superiores a la atmosférica. Por esta razón, en gran parte acaban fugándose y son transportados hasta la estratosfera, dando lugar a los conocidos efectos de destrucción de la capa de ozono y efecto invernadero.

Los ciclos de absorción utilizan las disoluciones agua-amoniaco y bromuro de litio-agua. En el primer caso el agua es el absorbente y el amoníaco el refrigerante. En el segundo, el bromuro de litio es el absorbente y el agua el refrigerante. Ambos utilizan calor como fuente de energía, que puede proceder de la combustión de combustibles fósiles, de fuentes residuales, o de fuentes renovables. Tanto el amoníaco como el agua son refrigerantes que no destruyen el ozono estratosférico ni contribuyen al efecto invernadero directo. Pueden sustituir a todos los refrigerantes orgánicos en el rango de temperaturas -50°C a $+50^{\circ}\text{C}$.

Los sistemas de bromuro de litio de simple efecto utilizan fuentes de calor entre 80°C y 115°C , mientras que los de doble efecto necesitan temperaturas del orden de 160°C . Centrando nuestra atención en los primeros, las temperaturas de trabajo requeridas para su funcionamiento, pueden ser alcanzadas mediante la conversión térmica de la energía solar.

El interés en el uso de la energía solar para alimentar máquinas refrigerantes de absorción ha estado presente desde hace mucho tiempo a nivel conceptual [1], aunque su penetración era limitada en los sistemas de climatización dado el predominio de los sistemas de compresión de vapor. A raíz de las crisis de petróleo, cobró interés el uso de la refrigeración solar por absorción para climatización en los países desarrollados [2] y empezaron a proliferar análisis teóricos más detallados [3], apareciendo los primeros sistemas de carácter experimental-demostrativo [4] y [5]. En España las instalaciones experimental-demostrativas son más recientes, si bien, en los últimos años se ha producido un importante aumento de las instalaciones comerciales para refrigeración solar [6].

2 Descripción del sistema

El diseño del sistema completo se ilustra en la Figura 1. Incluye el sistema solar (colectores planos y depósito de almacenamiento), un sistema de energía auxiliar, la máquina de absorción, el recinto a climatizar y el sistema de control. En las siguientes secciones se detallan los sistemas más importantes.

2.1 Sistema de captación solar

Consiste, básicamente, en un colector solar de placa plana, un tanque de almacenamiento de agua, un intercambiador de calor y un calentador auxiliar. El colector solar recibe la radiación solar en su placa absorbidora y transmite la energía recibida al agua que circula a través del colector. El agua sale del colector y entra en el intercambiador de calor situado en el exterior del depósito, cediendo calor al agua proveniente del depósito, retornando a continuación al colector solar para ser nuevamente calentada. El agua del tanque almacena el calor recibido en el proceso de intercambio.

El agua almacenada se mantiene en todo momento a temperaturas superiores a 80 °C (temperatura mínima de funcionamiento de la máquina de absorción); cuando el aporte solar no sea suficiente para mantener el nivel térmico señalado, entrará en funcionamiento el calentador auxiliar, hasta alcanzar la mínima temperatura indicada.

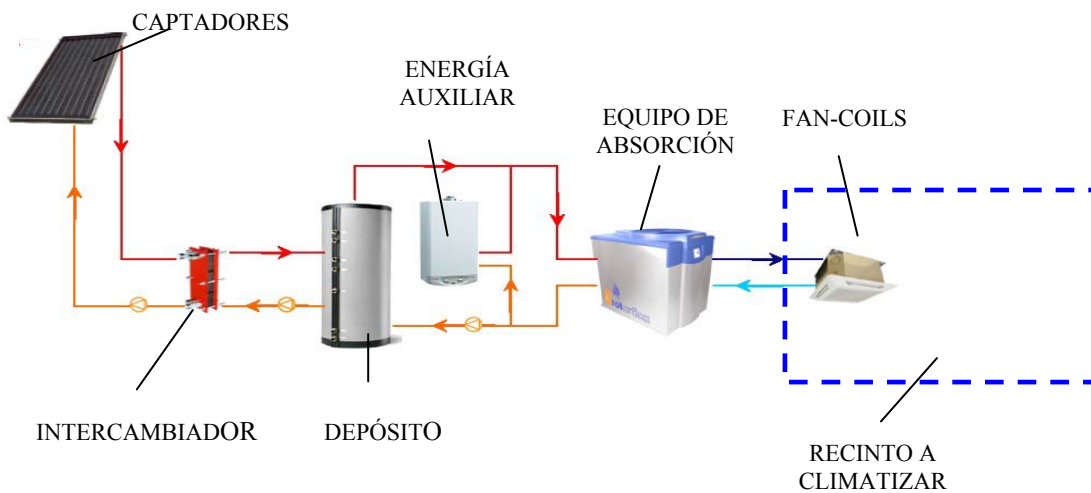


Figura 1 – Esquema de la instalación de refrigeración solar.

2.2 La máquina de absorción

Las características de funcionamiento de la bomba de calor de absorción empleada en este estudio, se corresponden con las de un prototipo experimental de la marca Rotártica, de bromuro de litio de simple efecto, y potencia en refrigeración de 4,5 kW.

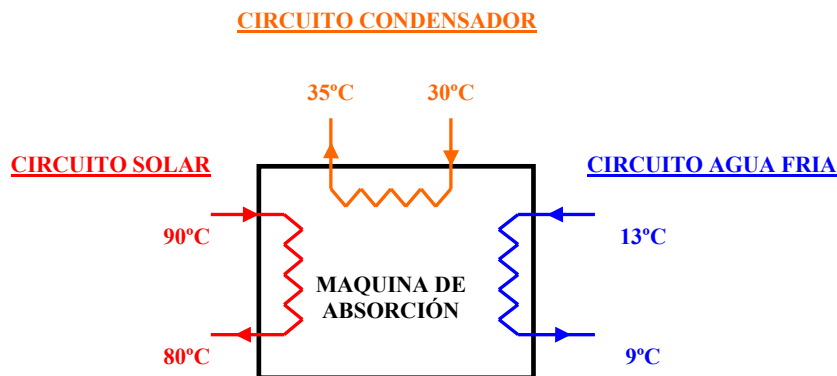


Figura 2 – Descripción de las características de funcionamiento de la máquina de absorción.

El calor obtenido en el sistema solar es aportado al circuito del generador de la máquina de absorción, a partir del cual se produce la desorción de parte del agua de la solución bromuro de litio-agua. El agua separada se utiliza como fluido refrigerante de la bomba de calor, en la que el calor bombeado en el evaporador se emplea para enfriar el agua que circula por los fan-coils existentes en el recinto a refrigerar. La suma de calores aportados en el generador y el evaporador, se disipan en el condensador, el cual cede el calor recibido al ambiente a través de un aerotermo.

En la figura 2 se indican las temperaturas de funcionamiento óptimo en cada uno de los tres circuitos de la maquina de absorción.

3 Modelo matemático

En el modelo matemático que se indica a continuación, se han considerado los desarrollos analíticos expuestos por Duffie y Beckman [7] y Prieto [8].

La variación de los parámetros térmicos del sistema se calcula para intervalos de tiempo de una hora, al ser éste el menor intervalo disponible de las variables meteorológicas empleadas.

La temperatura del agua circulada a la salida del colector solar (entrada al intercambiador) se determina mediante la ecuación:

$$T_{CS} = T_{CE} + \frac{I\eta_C S_C}{m_C C_p} \quad (1)$$

donde I es la intensidad de radiación y η_C , S_C , m_C , C_p , respectivamente, el rendimiento, la superficie, el flujo másico circulante y el calor específico del fluido, en el colector.

El rendimiento del colector viene dado por la expresión:

$$\eta_C = F_R (\tau \cdot \alpha) - (F_R U_C) \frac{T_{CE} - T_{AMB}}{I} \quad (2)$$

en la que F_R es el factor de ganancia, $(\tau \cdot \alpha)$ el producto de transmitancia y absortancia del sistema de cubiertas, U_C el coeficiente global de perdidas de calor en el colector. T_{AMB} es la temperatura ambiental.

La eficiencia del intercambiador P , situado en el interior del tanque viene dada por:

$$P = \frac{T_{CS} - T_{CE}}{T_{CS} - T_D} \quad (3)$$

Las pérdidas de calor en el tanque de almacenamiento se obtienen mediante la ecuación:

$$Q_{PERD} = (S_D U_D)(T_D - T_{ENTORNO}) \quad (4)$$

donde S_D y U_D son, respectivamente, el área y el coeficiente global de perdidas de calor del depósito; $T_{ENTORNO}$ es el valor de la temperatura del recinto en el que se encuentra el depósito de almacenamiento.

El calor extraído del depósito y el consumido en el circuito del generador de la máquina de absorción, se determinan mediante las ecuaciones:

$$Q_{REFRIGER} = Q_{EVAPORADOR} = U_{CERR} S_{CERR} (T_{AMB} - 20) \quad (5)$$

$$Q_{CONSUMO} = Q_{GENERADOR} = \frac{Q_{REFRIGER}}{COP_{MAQ_ABSORC}} \quad (6)$$

donde U_{CERR} y S_{CERR} son, respectivamente, el coeficiente global de transferencia de calor y la superficie total de los cerramientos. El COP_{MAQ_ABSORC} es la eficiencia de conversión de la máquina de absorción, es decir, el cociente entre el calor evacuado en el circuito de refrigeración y el aportado al generador desde el circuito solar.

La fuente auxiliar de energía, entrará en funcionamiento, únicamente, si la temperatura del agua almacenada desciende de 80 °C; en ese caso, la energía consumida se cuantificará por medio de,

$$Q_{AUX} = M_{DEPOSITO} (C_p)_{AGUA} (80 - T_D) \quad (7)$$

siendo $M_{DEPOSITO}$ la masa de agua almacenada en el deposito.

El balance energético realizado sobre el depósito de almacenamiento da:

$$M_{DEPOSITO} (C_p)_{AGUA} \frac{dT_D}{dt} = Q_{COLECTORES} - Q_{PERD} - Q_{CONSUMO} + Q_{AUX} \quad (8)$$

ecuación diferencial que representa la dinámica del sistema simulado.

La simulación se realiza considerando en cada mes los valores correspondientes, tanto de insolación como de parámetros ambientales y de consumo, a un día medio. En cada uno de los meses, se determinan las cantidades $Q_{CONSUMO}$ y Q_{AUX} ; una vez contabilizadas estas cantidades a lo largo del año, se define el factor de cobertura solar (f) por:

$$f(\%) = 100 \frac{(Q_{CONSUMO})_{ANUAL} - (Q_{AUX})_{ANUAL}}{(Q_{CONSUMO})_{ANUAL}} \quad (9)$$

4 Parámetros de la simulación

Las simulaciones se realizan para una instalación con superficie de captación de 20 m², y un volumen de almacenamiento de 1000 litros. Los valores de insolación considerados, así como de temperaturas ambientales, son los correspondientes a la ciudad de Santander. El sistema de captación solar está orientado al mediodía, con una inclinación de 45° respecto a la horizontal.

El sistema de colectores simulado responde a un modelo comercial, con rendimiento dado por:

$$\eta_C = 0,81 - 3,5 \frac{T_{CE} - T_{AMB}}{I} \quad (10)$$

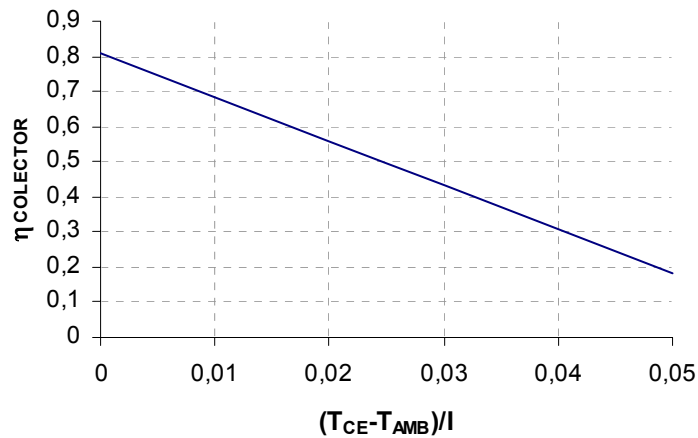


Figura 3 – Rendimiento de los colectores empleados en la simulación.

La eficiencia del intercambiador (P) se ha supuesto constante con valor 0,95.

Se supone una variación sinusoidal de las temperaturas diarias, que responde a la ley:

$$T_{AMB} = T_{MEDIA} + \frac{T_{MAX} - T_{MIN}}{2} \cos\left[\frac{\pi}{12}t - \pi\right] \quad (11)$$

Con respecto a la demanda de refrigeración, se han considerado una superficie de cerramientos $S_{CERR} = 350 \text{ m}^2$ y un valor del coeficiente de transferencia de calor medio $U_{CERR} = 1 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

5 Resultados

Los resultados de la simulación se muestran en los Figuras 4 a 9. La Figura 4 muestra los valores de la carga de refrigeración en el interior de la vivienda para un día medio en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

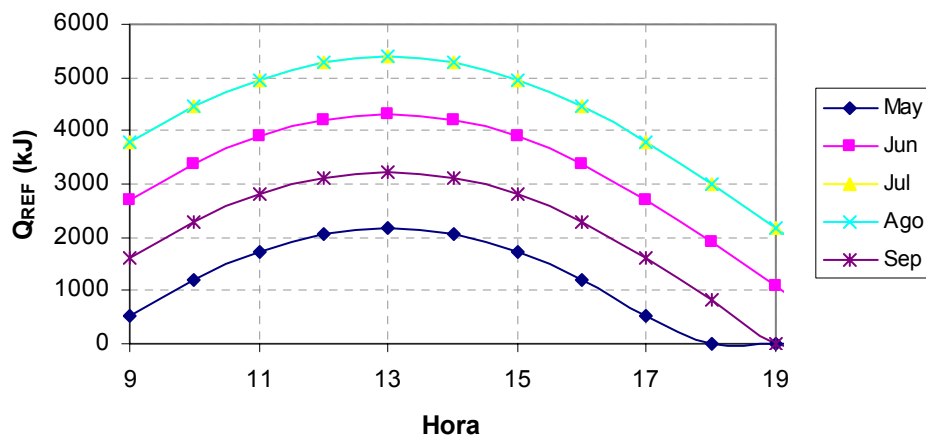


Figura 4 – Carga de refrigeración de la vivienda.

Las Figuras 5 y 6, representan la evolución de la energía capturada por los colectores y las temperaturas en el depósito de almacenamiento, respectivamente. La energía convertida en el campo de captadores en los meses de junio, julio y agosto, es significativamente superior a la de los meses de mayo y septiembre. Este efecto se justifica en parte por unos niveles de insolación un poco superiores en los meses centrales, y sobre todo, por un mayor rendimiento de los colectores (ver Figura 7). Como puede observarse, la temperatura en el interior del depósito alcanza valores máximos en los meses de menor carga de refrigeración del recinto (mayo y septiembre), con la consiguiente disminución del rendimiento del sistema de captación.

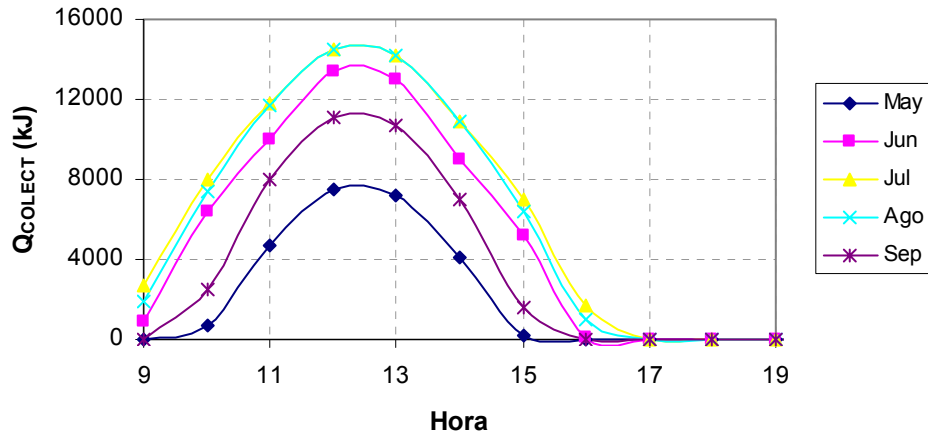


Figura 5 – Energía útil del sistema de captación solar.

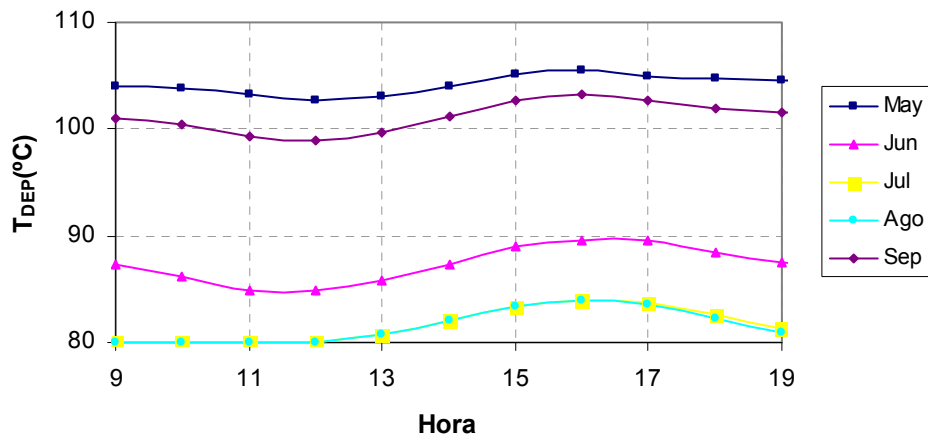


Figura 6 – Energía útil del sistema de captación solar.

La Figura 8 muestra los aportes de energía auxiliar que necesita el sistema para que la temperatura en el depósito mantenga el valor mínimo de 80°C. Los meses de mayo, junio y septiembre, no se precisan aportes de energía auxiliar, es decir, se cubre la demanda de refrigeración únicamente con energía solar. En los meses de julio y agosto, es necesario aportar cierta cantidad de energía desde el sistema auxiliar, para evitar que la temperatura del tanque se sitúe por debajo del valor mínimo requerido por el equipo de absorción; las cantidades aportadas representan un 17% en julio, y un 15% en agosto, de la energía total diaria demanda en el generador en esos meses.

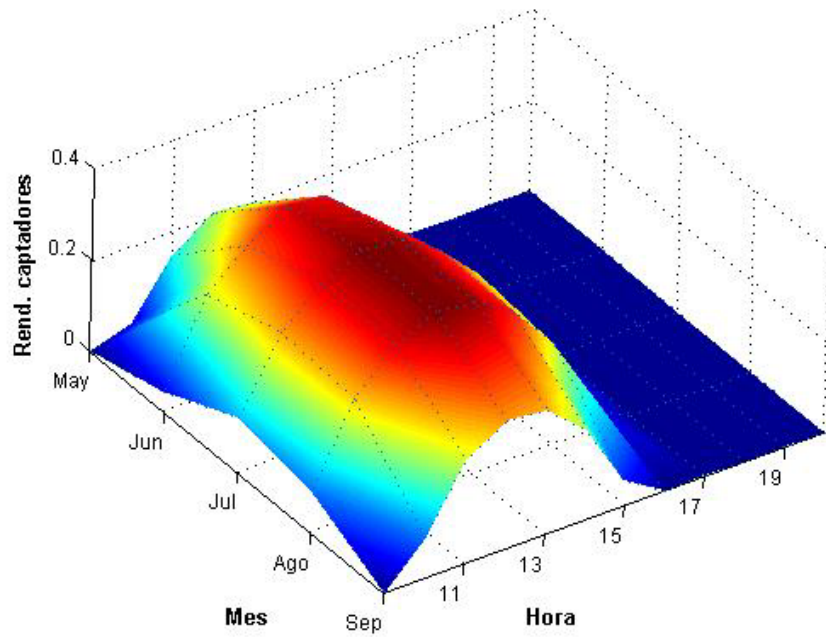


Figura 7 – Rendimiento de los captadores.

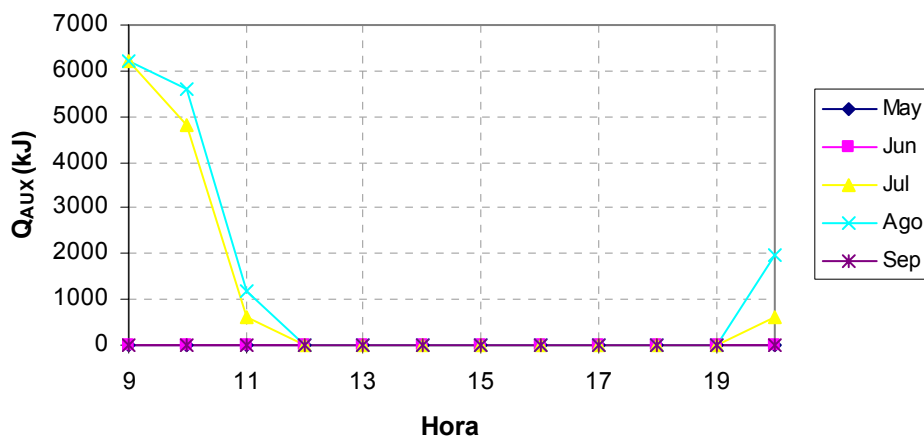


Figura 8 – Aporte de energía auxiliar.

En la Figura 9 representa la variación de la eficiencia del equipo de absorción. Aquí, el efecto conjunto de mayores temperaturas de almacenamiento en el tanque, y por tanto de alimentación en el generador, junto a temperaturas ambientales ligeramente menores, hace que en los meses de mayo y septiembre, la máquina de absorción presente niveles de eficiencia (COP) superiores al resto de meses.

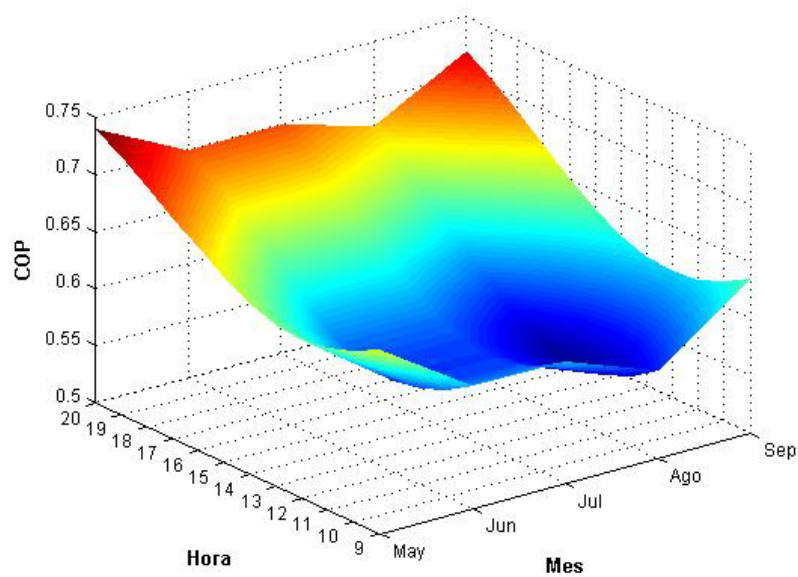


Figura 9 – Eficiencia frigorífica de la máquina de absorción.

6 Conclusiones

- En este trabajo se ha realizado una simulación del comportamiento dinámico en un sistema solar fototérmico acoplado a una máquina de absorción para cubrir las necesidades de refrigeración de una vivienda unifamiliar.
- Se ha utilizado la simulación numérica para analizar las características de funcionamiento y viabilidad, de un sistema de refrigeración con máquina de absorción, asistido por un sistema solar. Los resultados obtenidos, para el caso concreto estudiado, muestran la capacidad de estos sistemas para cubrir niveles de demanda de refrigeración requeridos.
- La refrigeración solar por absorción constituye una alternativa tecnológica interesante para cubrir la creciente demanda energética de climatización de nuestros edificios con criterios de sostenibilidad. Además presenta ventajas adicionales como evitar el uso de los fluidos refrigerantes a base de hidrocarburos halogenados dañinos para la capa de ozono.

Referencias

- [1] Tabor H.Z., 'Solar energy for cooling purposes', Solar Energy, VI (2), p136-141, 1962.
- [2] Tabor H.Z., 'Utilization of solar energy for refrigeration and air-conditioning', Int. Inst. Of Refrig., Com.E.1, E.2, Jerusalem, 1982.
- [3] Butz L.W., Beckman W.A., Duffie J.A., 'Simulation of a solar heating and cooling system', Solar Energy, 16, 129, 1974.
- [4] Oonk R.L., Beckman W.A., Duffie J.A., 'Modelling of the CSU heating/cooling system', Solar Energy, 17, 21, 1975.

- [5] Karaki S., Brisbane E., Löf G.O.G., 'Performance of the solar heating and cooling system for the CSU house III- Summer season 1983 and winter season 1983-84', Colorado State University Report SAN 11927-15 to US Department of Energy, 1984.
- [6] Ajona-Maeztu J.I., 'Aprovechando el calor del sol para climatizar nuestros edificios', Climatización 2003, Madrid, 26/2-1/3, 2003.
- [7] Duffie J.A., Beckman W.A., 'Solar Engineering of Thermal Processes', Ed John Wiley & Sons (1991).
- [8] Prieto J.I., 'Fundamentos y Aplicaciones de la Energía Solar Térmica', Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, (1998).