

ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN SOLAR CON TRNSYS

Miguel A. Lozano, Laurent Renin, Jesús Guallar, Carlos Monné y José Ramos
GITSE-I3A, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza
c/ Maria de Luna 3, 50018 Zaragoza
Teléfono: 976762039 , Fax: 976762616
e-mail: miguel.lozano@unizar.es

RESUMEN

La demanda creciente de climatización en los países mediterráneos, debida al aumento de las cargas internas de los edificios y a la mayor exigencia de confort térmico por los usuarios, está provocando problemas en la red de suministro eléctrico los días más calurosos del verano. Por otro lado, la nueva normativa sobre eficiencia energética en los edificios exige la instalación de colectores solares para abastecer un porcentaje elevado de las necesidades de agua caliente sanitaria. La integración térmica en la instalación solar de una máquina de refrigeración por absorción de simple efecto permite funcionar en verano abasteciendo parcialmente las necesidades de aire acondicionado.

Esta comunicación comienza revisando el estado del arte de la refrigeración solar en Europa. A continuación se muestra el esquema de una instalación simple de refrigeración solar detallando las características de sus componentes. Más tarde se presenta el modelo elaborado con TRNSYS para simular su funcionamiento y se caracterizan los parámetros que nos permitirán juzgar su desempeño. La capacidad de simular el comportamiento en régimen dinámico de la instalación modelada, hora a hora a lo largo del año, hace posible determinar las variables físicas requeridas para evaluar dichos parámetros. Finalmente, se analiza el efecto de variables de diseño en la cobertura solar de la demanda de climatización.

INTRODUCCION

La demanda creciente de climatización en los países mediterráneos, debida al aumento de las cargas internas en los edificios y a la mayor exigencia de confort térmico por sus usuarios, se está convirtiendo en uno de los consumos energéticos más importantes. Así, el consumo de potencia eléctrica por los equipos de refrigeración comienza a producir problemas en la red de suministro los días más calurosos del verano. Por otro lado, la normativa sobre eficiencia energética en los edificios exige actualmente la instalación de colectores solares para abastecer un porcentaje elevado de las necesidades de agua caliente sanitaria (ACS). La integración térmica de una instalación solar con una máquina de refrigeración por absorción de simple efecto permite funcionar en verano abasteciendo parcialmente las necesidades de aire acondicionado y da lugar a un mayor aprovechamiento de la radiación solar incidente en los colectores.

El estudio de la viabilidad económica de los sistemas de climatización solar para cubrir las necesidades energéticas de un edificio requiere un conjunto mínimo de datos sobre su ubicación, características y utilización. Este estudio, que nos permitirá disponer de datos objetivos sobre las ventajas de instalar un sistema de climatización solar adecuado al edificio y valorar la rentabilidad económica del mismo, antes de decidir si interesa abordar la inversión, consta de las siguientes etapas: i) Análisis de la demanda energética, ii) Propuesta de instalación incluyendo el dimensionado de equipos, iii) Balance energético (y ambiental) que determine el ahorro energético (y la disminución de emisiones de CO₂) que supone la

instalación propuesta respecto de otra convencional (preexistente ó prevista), y iv) Balance económico que estime el ahorro en la factura energética y el periodo de recuperación de la inversión adicional que supone la instalación solar. Para el estudio de viabilidad y dimensionado de las instalaciones de energía solar térmica para ACS y/o calefacción se disponen métodos simplificados, como el f-Chart (Duffie y Beckman, 2006), ampliamente utilizados. En instalaciones de refrigeración solar, el cálculo de la demanda térmica no puede simplificarse tanto y además no se dispone todavía de información empírica suficiente para validar este tipo de métodos.

Existen, no obstante, herramientas como el simulador TRNSYS (Klein, 2006) que permiten acometer estas tareas. Este trabajo presenta un modelo de simulación TRNSYS para instalaciones de refrigeración solar con colectores planos y enfriadoras de absorción de simple efecto. La capacidad de simular el comportamiento en régimen dinámico de las instalaciones, hora a hora a lo largo del año, nos permite juzgar su desempeño. Como ejemplo de aplicación se analiza el efecto de algunas variables de diseño en la cobertura solar de la demanda.

ENERGÍA SOLAR Y EDIFICACIÓN

Con una irradiación solar anual de entre 1.100 y 1.900 kWh/(m²·año), España ofrece condiciones muy favorables para el aprovechamiento de la energía solar. De hecho, en los últimos años se ha despertado un gran interés por la energía solar térmica como demuestra el crecimiento significativo de la superficie instalada de colectores solares (ver Fig. 1).

La razón de este despertar solar es, todavía, la actividad de las Administraciones Públicas abriendo líneas de subvención y regulando su obligatoriedad para ciertos usos. Recientemente, la *Directiva 2002/91/CE*, de la Unión Europea, relativa a la *Eficiencia Energética de los Edificios* impuso (Art. 5) que en los edificios nuevos con una superficie útil total de más de 1.000 m², los Estados miembros velarán por que la viabilidad técnica, medioambiental y económica de sistemas alternativos como los sistemas descentralizados de producción de energía basados en energías renovables, entre otros, se consideren y se tengan en cuenta antes de que se inicie la construcción. El *Código Técnico de la Edificación* (*Real Decreto 314/2006*) que regula los requisitos que han de cumplir las edificaciones en España, ordena, dentro del *Documento Básico sobre Ahorro de Energía*, una contribución solar mínima anual de los sistemas de captación solar a la demanda de ACS, variando entre 30 y 70% según sea: i) la zona climática (irradiación solar anual), ii) la magnitud de la demanda, y iii) el tipo de fuente energética de apoyo.

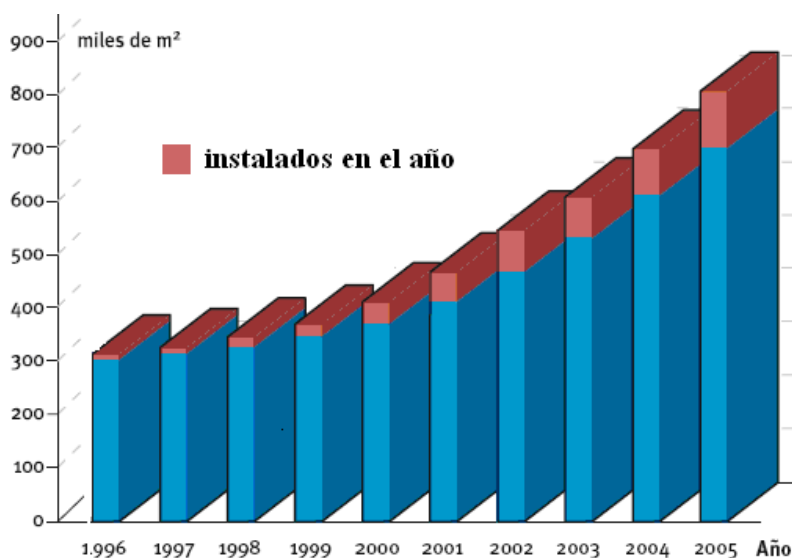


Fig. 1: Superficie instalada de colectores solares (Fuente: IDAE)

CLIMATIZACIÓN SOLAR

Actualmente, la energía solar permite abastecer no solo las demandas de calor de un edificio, como la producción de ACS y la calefacción, sino también la demanda de refrigeración. De hecho, una instalación solar que funciona en verano cubriendo parcialmente las necesidades de aire acondicionado, aprovecha las siguientes ventajas: i) simultaneidad de la producción solar con la demanda de aire acondicionado, ii) mayor aprovechamiento de una fuente de energía inagotable, gratuita y respetuosa con el medio ambiente, y iii) mayor seguridad de suministro gracias a la diversificación de fuentes energéticas.

Existen diferentes tecnologías para producir refrigeración (enfriamiento de procesos industriales, conservación de productos, aire acondicionado, etc.) a partir de la energía solar (y de la energía solar térmica en particular). Syed et al. (2002) realizaron un análisis económico simple comparando 8 configuraciones diferentes de sistemas de refrigeración solar. Dichas configuraciones contemplaban combinaciones razonables de refrigeración (eyector, compresión y absorción) y de accionamiento solar eléctrico (con colectores fotovoltaicos) ó térmico (con colectores cilindro-parabólicos, planos y de tubos de vacío). Algunas conclusiones del estudio fueron: i) los sistemas convencionales de refrigeración mecánica accionados con electricidad de la red son, hoy por hoy, los más económicos, ii) de entre los sistemas solares, los sistemas solares térmicos que utilizan refrigeración por absorción son los más económicos; en particular aquellos de baja temperatura (colectores planos y absorción de simple efecto), iii) los colectores solares suponen el mayor de los costes de ciclo de vida en todas las configuraciones analizadas.

En los últimos años se han desarrollado proyectos de investigación sobre refrigeración solar con el propósito de desarrollar nuevos equipos, reducir costes y estimular su integración en el mercado de la climatización de edificios. Los proyectos CLIMASOL y SACE destacan entre los proyectos de I+D recientes financiados por la Comisión Europea (Cameron, 2006). La Agencia Internacional de la Energía dentro del *Solar Heating and Cooling Program* ha desarrollado la TASK 25 sobre esta temática. El libro de Henning (2004), basado en esta tarea, presenta una revisión excelente de como aplicar las tecnologías de refrigeración con energía solar térmica para el acondicionamiento de aire en los edificios.

Según Henning (2007), en Europa a finales de 2005 había 70 sistemas de refrigeración utilizando colectores solares térmicos. La mayoría de ellos se ubicaban en Alemania (28) y España (19). La superficie total de colectores solares se aproximaba a 17.500 m² y la potencia frigorífica sumaba unos 6.300 kW. Aproximadamente un 60% de las tres magnitudes anteriores correspondían a sistemas de refrigeración por absorción.

REFRIGERACION SOLAR POR ABSORCION

Los equipos esenciales de un sistema de refrigeración solar por absorción son el colector solar y la enfriadora de absorción. Según sea la configuración también existirán depósitos de agua caliente y/o agua fría, equipos auxiliares para la producción de calor y/o frío. Además deben tenerse en cuenta los subsistemas de transporte de energía (tuberías, bombas e intercambiadores) y de seguridad y control de la instalación. En el diseño del sistema hay que considerar que, tan importante como la buena selección y el dimensionado adecuado de los equipos, es la integración armónica de la operación de todos ellos y la sencillez y eficacia de las estrategias de control implementadas.

En la actualidad las enfriadoras de absorción también presentan un gran interés para el aprovechamiento de calores residuales en instalaciones de trigeneración. La operación de los sistemas de refrigeración por absorción esta bien documentada (Dorgan et al., 1995; Herold et al., 1996) y no será descrita aquí. En particular, su aplicación a la refrigeración solar ha sido bien analizada por Li y Sumathy (2000) y Grossman (2002).

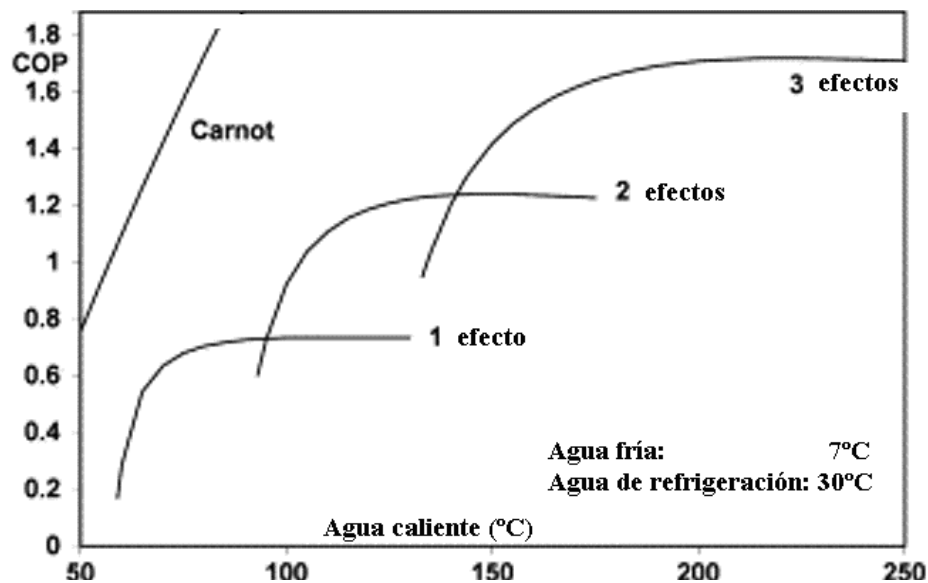


Fig. 2: COP de las enfriadoras de absorción de LiBr-H₂O (Grossman, 2002)

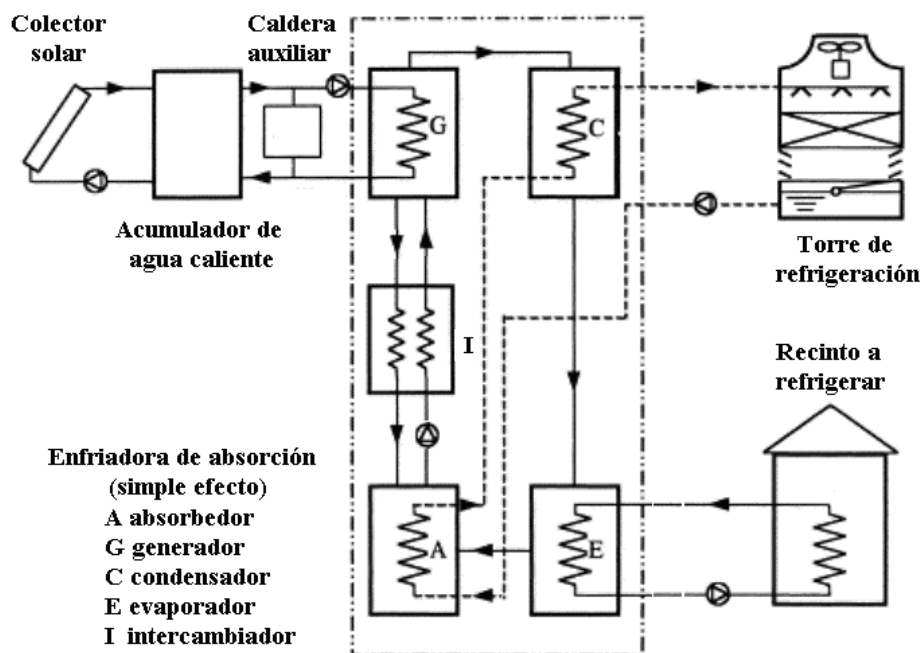


Fig. 3: Esquema del sistema de refrigeración solar (Li y Sumathy, 2000)

Tabla 1: Características técnicas de la enfriadora Yazaki WFC SC10 (www.absorsistem.com)

Característica	Unidades	Valor
Potencia frigorífica (n)	kW	35,0
Temperatura agua fría (n)	°C	12,5 → 7,0
Rango temperatura salida	°C	5 – 20
Potencia calorífica a aportar (n)	kW	50,2
Temperatura agua caliente (n)	°C	88,0 → 83,0
Rango temperatura entrada	°C	70 - 95
Potencia calorífica a disipar (n)	kW	85,5
Temperatura agua refrigeración	°C	31,0 → 35,0
Rango temperatura entrada	°C	24 – 32
Potencia eléctrica consumida	kW	0,21

Como indica la Fig. 2, el coeficiente de operación de la enfriadora de absorción de BrLi-H₂O de simple efecto tiene un valor reducido (aprox. 2/3) frente al de las enfriadoras de dos y tres efectos. Presentan, sin embargo, la ventaja de utilizar colectores solares de baja temperatura que resultan mucho más económicos. Para aplicaciones que requieren el calor solar recolectado a menos de 100°C los colectores tradicionales de placa plana son los más utilizados, seguidos por los colectores de tubos de vacío. En los colectores planos, el absorbente está protegido contra las pérdidas térmicas por medio de un material de aislamiento como lana mineral y una cubierta simple ó doble de vidrio. Los tubos de vacío están formados por dos tubos concéntricos de vidrio: el interior actúa como captador y el exterior como cubierta. La eliminación de aire entre los tubos reduce las pérdidas de energía. Una ventaja de los tubos de vacío con absorbente plano, desde el punto de vista de la integración arquitectónica, es que pueden instalarse sobre una superficie horizontal ó vertical y girar los tubos para que el absorbente esté a la inclinación adecuada (Peuser et al., 2005).

Aunque a nivel de investigación se han instalado otro tipo de combinaciones (Florides et al., 2002; Assilzadeh et al., 2005) el “tandem” colector plano – enfriadora de simple efecto es el que hoy está más representado en el mercado. El esquema de la instalación que analizaremos aquí se presenta en la Fig. 3. El acumulador de agua caliente es de presencia obligada, al igual que en otras aplicaciones, e incluso suele ser de mayor volumen que el empleado en las instalaciones para ACS. Para la caldera auxiliar se prefiere su disposición en paralelo para evitar que su operación contribuya a calentar el agua del acumulador.

Componentes de la instalación

El punto de partida de la instalación analizada es la enfriadora de simple efecto WFC-SC10 con COP $\cong 0,7$ y potencia frigorífica nominal Q_{fnom} de 35 kW (ver Tabla 1). Se ha seleccionado el colector solar plano Vitosol 100 (ver Tabla 2). Su rendimiento térmico instantáneo viene dado por la ecuación

$$\eta = k_0 - k_1 \cdot (\Delta\theta / G) - k_2 \cdot (\Delta\theta^2 / G)$$

siendo $\Delta\theta$ (°C) la diferencia entre la temperatura media del agua en el captador y la temperatura ambiente y G (W/m²) la radiación total incidente sobre la superficie de absorción. Para accionar la máquina de absorción cuando la temperatura del agua en el acumulador resulta insuficiente se ha seleccionado una caldera de potencia nominal de 60 kW ($Q_{fnom}/COP = 35/0,7 \cong 50$) y rendimiento, que se supondrá constante, del 90%. La torre de refrigeración mecánica seleccionada, la EWK 064/09 (ver Tabla 3), es capaz de disipar hasta 103 kW [$Q_{fnom} (1 + 1/COP) = 35 \cdot 2,43 \cong 85$] en condiciones nominales.

Tabla 2: Características técnicas del captador solar Vitosol 100 (www.viessmann.es)

Característica	Unidades	Valor
Superficie de absorción	m ²	2,50
Rendimiento óptico k_0	-	0,840
Coeficiente de pérdidas k_1	W/(m ² ·K)	3,36
Coeficiente de pérdidas k_2	W/(m ² ·K)	0,013

Tabla 3: Características técnicas de la torre Sulzer EWK 064/09 (www.sulzercoolingtowers.com)

Característica	Unidades	Valor
Potencia frigorífica (n)	kW	103
Temperatura húmeda (n)	°C	24,0
Temperatura agua refrigeración	°C	35,0 → 30,0
Potencia motor	kW	0,55

SIMULACION

TRNSYS es un programa de simulación dinámica modular de sistemas energéticos. TRNSYS es un programa especialmente diseñado para la simulación de sistemas solares activos y la simulación térmica de edificios. TRNSYS utiliza un entorno gráfico de descripción de sistemas energéticos en el que el usuario puede seleccionar los módulos que constituyen el sistema e indicar la forma en la que están interconectados. La librería de TRNSYS incluye módulos (TYPES) que representan a los equipos utilizados habitualmente en los sistemas energéticos, módulos de tratamiento de datos meteorológicos, módulos de tratamiento de los resultados de la simulación, etc. La estructura modular de TRNSYS le aporta gran flexibilidad para analizar distintos tipos de sistemas energéticos.

Modelo TRNSYS

La Fig. 4 muestra la representación en TRNSYS del sistema de refrigeración solar descrito en el apartado anterior (Fig. 3). La Tabla 4 recoge los componentes más importantes del sistema, el tipo de módulo (TYPE) que los representa y algunos parámetros de diseño. Se han eliminado algunos componentes y flujos de menor importancia. La demanda de frío se simula con el Type 686 que genera una carga sintética con funciones senoidales y parámetros ajustables que determinan sus variaciones diarias y horarias a lo largo del año.

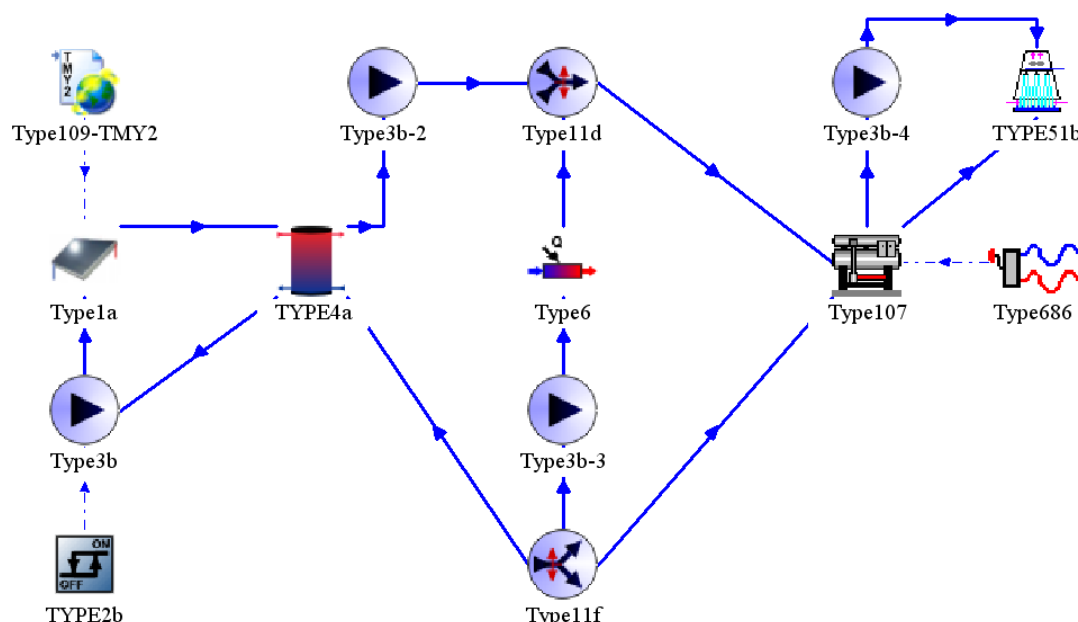


Fig. 4: Esquema (simplificado) del modelo TRNSYS de la instalación de refrigeración solar

Tabla 4: Listado de los componentes más importantes del modelo TRNSYS

Componente	Type TRNSYS	Parámetros (valores de diseño)
Colector solar	Type 1a	Vitosol 100 (Tabla 2) Número de colectores (12) Inclinación (30°) / Orientación (Sur)
Acumulador agua caliente	Type 4a	Volumen (50 litros / m ² de colector)
Caldera auxiliar	Type 6	Rendimiento (90%)
Enfriadora de absorción	Type 107	Yazaki WFC SC10 (Tabla 1)
Torre de refrigeración	Type 51b	Sulzer EWK 064/09 (Tabla 3)
Datos climatológicos	Type 109 – TMY2	Localización: Logroño (España)
Bomba colector	Type 3b	Caudal [50 (l/h)/m ² de colector]
Control bomba colector	Type 2b	Temp. máxima acumulador (90°C) Ganancia mínima colector (5°C)

Resultados

La Fig. 5 muestra un diagrama de flujos de energía de la instalación solar analizada. También se indican los símbolos utilizados para describir la eficiencia de los componentes de la instalación.

La Fig. 6 muestra los valores mensuales de demanda de frío y de cobertura solar (demanda de frío cubierta con energía solar/demanda total de frío) correspondientes al diseño base de la instalación (Tabla 4).

La Tabla 5 detalla los valores mensuales de los flujos de energía más importantes y los rendimientos medios mensuales de los equipos.

En las Tablas 6 a 9 se analiza como influyen en la cobertura solar el área de colectores, el volumen del acumulador, el caudal circulado a través de los colectores solares y la inclinación de estos.

Más resultados y un análisis económico pueden verse en Renin (2007).

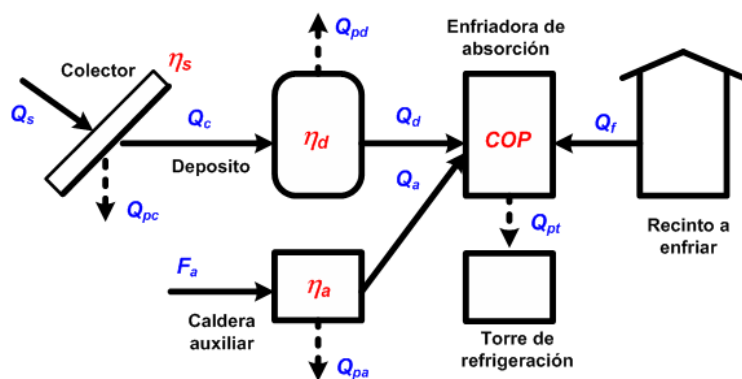


Fig. 5: Flujos de energía y eficiencia de equipos

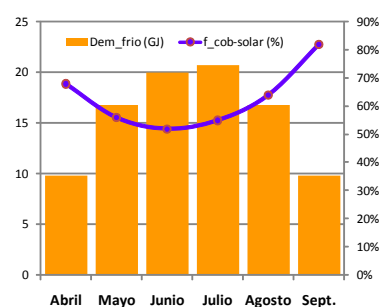


Fig. 6: Cobertura solar

Tabla 5: Balance energético mensual y anual

Mes	Q_s (GJ)	Q_c (GJ)	η_s	Q_d (GJ)	η_d	F_a (GJ)	Q_f (GJ)	COP	COP_{global}	Cob. Solar
Abril	16,1	9,4	0,59	9,1	0,96	4,7	9,8	0,73	2,05	0,68
Mayo	19,0	12,8	0,67	12,3	0,96	11,4	16,8	0,74	1,47	0,56
Junio	20,2	14,0	0,69	13,5	0,97	14,9	20,0	0,74	1,34	0,52
Julio	21,6	15,3	0,71	14,8	0,97	14,4	20,7	0,74	1,43	0,55
Agosto	20,7	14,7	0,71	14,2	0,97	9,2	16,8	0,74	1,82	0,64
Sept.	17,8	11,2	0,63	10,9	0,98	2,7	9,8	0,73	3,52	0,82
Año	115,3	77,4	0,67	74,9	0,97	57,5	93,8	0,74	1,63	0,60

Tabla 6: Variación de la cobertura solar con el área de colectores

Area (m^2)	10	20	30	40	50
Cobertura solar (%)	21,1	41,9	60,3	75,4	84,7

Tabla 7: Variación de la cobertura solar con el volumen del acumulador

Volumen (l/m^2)	20	30	40	50	60
Cobertura solar (%)	60,3	60,6	60,5	60,3	60,2

Tabla 8: Variación de la cobertura solar con el flujo

Flujo [$l/h/m^2$]	20	30	40	50	60
Cobertura solar (%)	59,9	60,2	60,3	60,3	60,2

Tabla 9: Variación de la cobertura solar con la inclinación del colector

Inclinación ($^\circ$)	10	20	30	40	50
Cobertura solar (%)	61,1	61,4	60,3	57,8	54,0

REFERENCIAS

- Assilzadeh, F. et al. (2005). Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors. *Renewable Energy* **30**, 1143-1159.
- Cameron, A. (2006). Keeping Cool. Solar Air-Conditioning. *Renewable Energy World*, Sept. 2006, pp. 92-101.
- Dorgan, C.B. et al. (1995). *Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration Using Recovered Heat*. ASHRAE.
- Duffie, J.A.; Beckman, W.A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes* (3^a ed). Wiley.
- Florides, G.A. et al. (2002). Modelling and simulation of an absorption solar cooling system for Cyprus. *Solar Energy* **72**, 43-51.
- Grossman, G. (2002). Solar-Powered Systems for Cooling, Dehumidification and Air-Conditioning. *Solar Energy*, **72**, 53-62.
- Henning, H.M. (2004). *Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings*. Springer.
- Henning, H.M. (2007) Solar assisted air conditioning of buildings-an overview. *Applied Thermal Engineering* **27**, 1734-1749.
- Herold, K.E. et al. (1996). *Absorption Chillers and Heat Pumps*. CRC Press.
- Klein, S.A. et al. (2004). *TRNSYS 16 (a TRaNsient SYstem Simulation program)*. Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison (<http://sel.me.wisc.edu/trnsys>).
- Li, Z.; Sumathy, K. (2000). Technology development in the solar absorption air-conditioning systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **4**, 267-293.
- Peuser, F.A. et al. (2005). *Sistemas solares térmicos. Diseño e instalación*. Progenisa.
- Renin, L. (2007). *Etude d'un système de climatisation solaire par absorption*. Master Thesis, ENSEEIHT, Toulouse.
- Syed, A. et al. (2002). A study of the economic perspectives of solar cooling schemes. *CIBSE National Conference* (<http://www.cibse.org/docs/Athar%20Syed.doc>).
- CLIMASOL Project: *Promoting Solar Air-Conditioning* (<http://raee.org/climatisationsolaire>).
- SACE Project: *Solar Air-Conditioning in Europe* (<http://www.ocp.tudelft.nl/ev/res/sace.htm>).
- SHC TASK 25: *Solar-Assisted Air-conditioning of Buildings* (<http://www.iea-shc-task25.org>).