

Optimización de sistemas de climatización

Gracias a la combinación de acumulación térmica estacional y aporte solar

Fernando Palacín Arizón¹ y Miguel Angel Lozano Serrano²

¹Centro Nacional de Energías Renovables (CENER)

² GITSE - I3A / Universidad de Zaragoza

Hace ya dos años que entró en vigor el Código Técnico de la Edificación que, además de exigir una mayor calidad en los elementos constructivos de los edificios, obliga a que entre el 30% y el 70% del consumo diario de ACS, en función de la zona climática donde se encuentre el edificio, sea suministrado a partir de energía solar térmica. En otros países europeos, como Alemania, el aprovechamiento de la energía solar térmica está mucho más extendido que en España. Las instalaciones solares que se realizan en estos países están destinadas a suministrar una fracción tanto de la demanda de calefacción como de la de ACS del edificio. Incluso se han diseñado y ejecutado instalaciones solares donde mediante la integración de un sistema de captación solar térmica, instalado sobre las diferentes cubiertas de los edificios, y la utilización de un acumulador estacional de grandes dimensiones, se consigue aprovechar la energía solar en los sistemas de calefacción de distrito. En este artículo se resume el estado del arte de dichas instalaciones y el diseño, la optimización y posterior evaluación energética que tendría una instalación de estas características en la ciudad de Zaragoza.

ESQUEMA Y COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN

La instalación diseñada y que se pretende analizar estará localizada en la ciudad de Zaragoza y dará servicio a un total de cien viviendas.

DEMANDAS TÉRMICAS

Para el cálculo de la demanda energética de calefacción y ACS se utilizó la demanda real del barrio zaragozano "Parque Goya". Partiendo de la demanda de un día tipo por cada mes del año se generó la demanda anual horaria de calefacción y ACS para el conjunto de las cien viviendas. La figura 1

muestra, como ejemplo, la demanda de calefacción (azul) y ACS (rosa) del conjunto residencial para el día tipo de diciembre.

La demanda anual de ACS es de 102 MWh, mientras que la de calefacción de 480 MWh/año es casi cinco veces mayor.

ESQUEMA DE PRINCIPIO

El esquema de principio de la instalación diseñada se presenta en la figura 2.

En contraste con otras instalaciones encontradas en la bibliografía consultada, la instalación aquí presentada dispone de un acumulador para cada servicio energético.

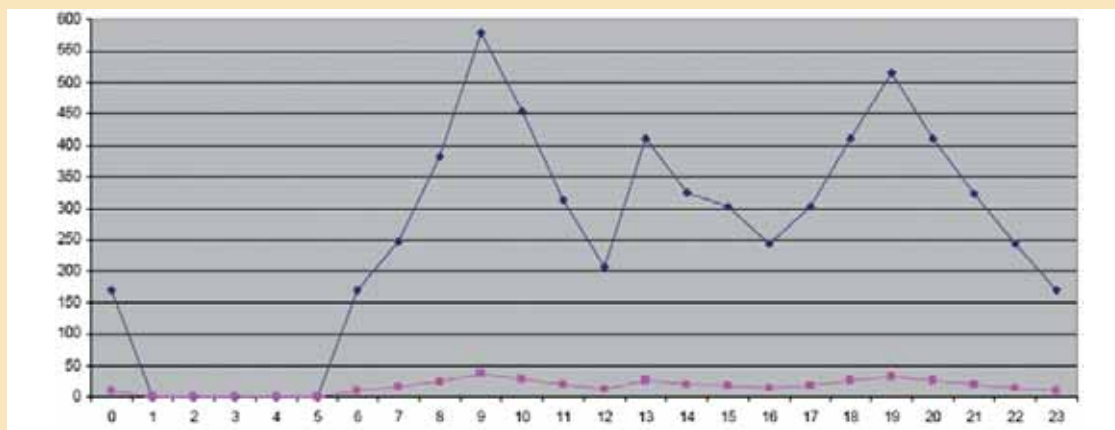


Figura 1. Demanda térmica de los edificios en kW para un día tipo de Diciembre

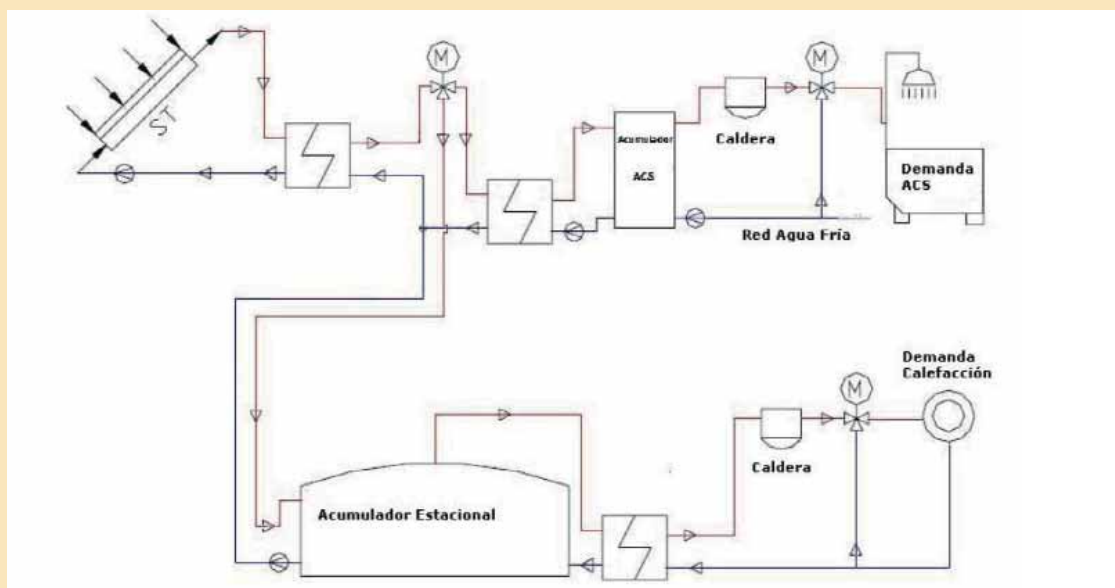


Figura 2: Esquema de principio de la instalación diseñada

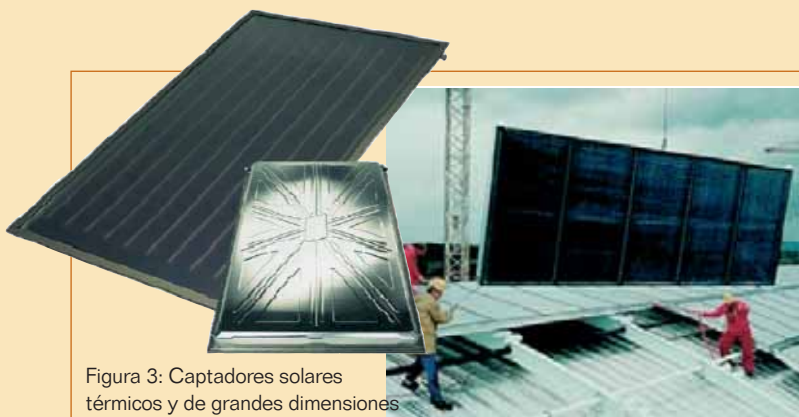


Figura 3: Captadores solares térmicos y de grandes dimensiones

El campo común de captación solar será el encargado de captar la energía solar y suministrarla a ambos acumuladores.

CAMPO DE CAPTACIÓN SOLAR

A diferencia de las instalaciones solares pequeñas y medianas, donde los captadores solares con una superficie bruta de entre 2 y 3 m² son los más utilizados, para el caso de instalaciones de distrito, donde la dimensión del campo de captación solar requiere centenares de metros cuadrados, la instalación de captadores de gran superficie supone un ahorro en mano de obra considerable, aunque requiere una mayor especialización y la utilización de grúas.

Para el dimensionado inicial del campo de captación se tomaron en cuenta las referencias bibliográficas consultadas. Según Lindenberger la superficie de captación utilizada en instalaciones realizadas en Alemania toma valores en el rango 1,0 – 2,5 m²/MWh de demanda térmica del edificio. Puesto que en Zaragoza la radiación solar es mayor que en Alemania, se tomó 1,0 m²/MWh como valor inicial de diseño. Para realizar el diseño del campo solar se tomaron las características del captador solar de gran tamaño que se ve en la figura 4.

ACUMULADOR ESTACIONAL

Los sistemas de acumulación son elementos imprescindibles en cualquier instalación de energía solar térmica. Su mi-

sión consiste en mitigar el desfase temporal que suele presentarse entre la oferta solar y la demanda de calor que requiere el edificio. La decisión de colocar dos acumuladores, uno para cada servicio energético, se basa principalmente en dos razones:

- Al tener un acumulador de menor capacidad destinado a la preparación del ACS se consigue, con un campo solar dimensionado para la demanda térmica total del edificio, alcanzar la temperatura de servicio para el ACS en un tiempo muy reducido.
- El suministro de calefacción se podrá realizar a una temperatura inferior al caso en que un único acumulador atendiera las demandas de calefacción y ACS conjuntamente. En un acumulador estacional es muy importante que la temperatura de retorno sea lo más baja posible.

Se ha realizado un trabajo de documentación sobre diferentes experiencias que existen en materia de acumulación estacional. La mayoría se encuentran localizadas en Alemania y se podrían clasificar en cuatro grupos: depósito de agua enterrado, depósito de agua y piedras enterrado, uso de acuíferos naturales y tubos geotérmicos enterrados en el terreno.



Figura 4: Instalación de captador de gran tamaño

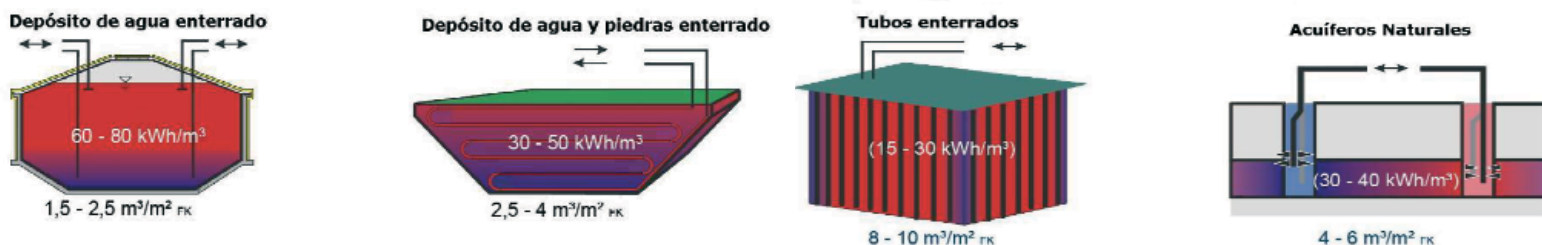


Figura 5: Tipos de depósitos estacionales

En la figura 5 se muestran diferentes tipos de depósitos de acumulación estacional con sus características principales como son la capacidad térmica y la estimación de su volumen en función de la superficie de captación solar.

El primer sistema, el depósito de agua enterrado, es con el que se ha experimentado en más ocasiones, ya que tiene más amplio rango de posibilidades de aplicación. Puede emplearse independientemente de las condiciones geológicas o para tamaños más pequeños. El tanque normalmente se construye de hormigón armado, y está parcialmente enterrado en el suelo. Está aislado, al menos en la superficie superior y en las superficies verticales de los laterales.

Para el acumulador estacional, cuya misión es almacenar la máxima cantidad de energía solar, Lindenberger propone un volumen de acumulación entre 1,2 y 4,2 m³/m² de superficie de captación.

MODELO TRNSYS DE LA INSTALACIÓN

En este apartado se explican los pasos seguidos para la modelización de la instalación con TrnSys. Al final del mismo se resumen los datos principales que caracterizan su diseño. La figura 6 muestra la representación en TrnSys de la instalación analizada. En ella puede observarse la separación de las instalaciones de ACS (parte superior) y de calefacción (parte inferior), ambas con sus respecti-

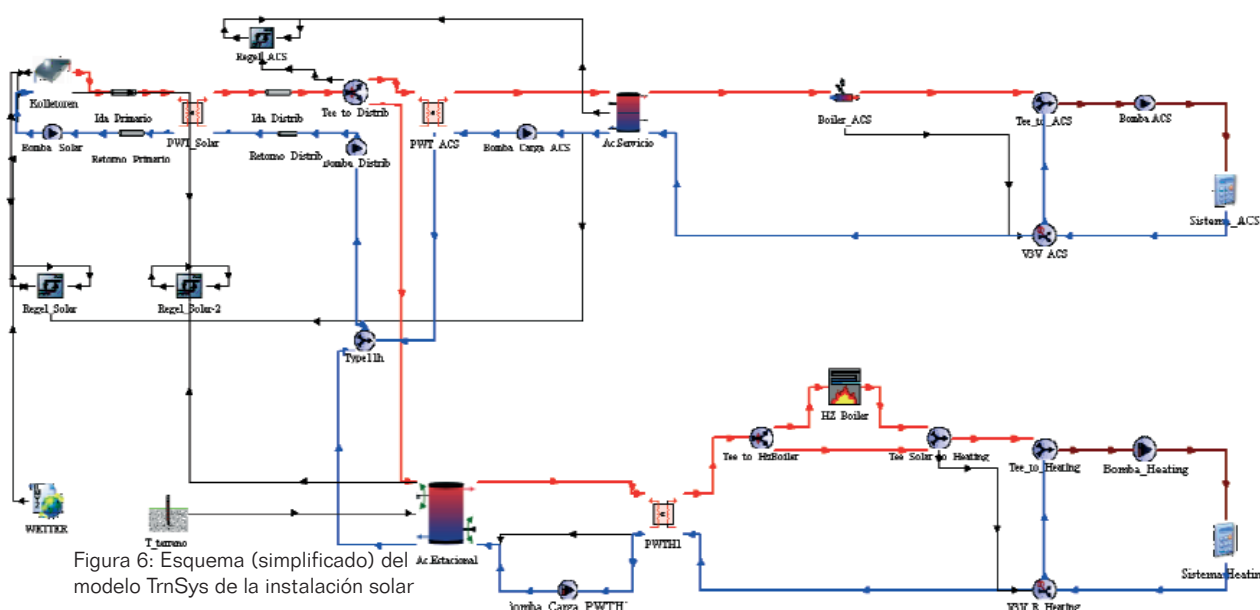


Figura 6: Esquema (simplificado) del modelo TrnSys de la instalación solar

vos acumuladores. Para una mejor comprensión no se han mostrado los elementos auxiliares y de salida que gestionan y facilitan la extracción de datos y resultados del modelo.

Algunas de las hipótesis simplificadoras utilizadas en el modelo son:

- Se desprecia la energía eléctrica consumida por las bombas.
- Se supone que las bombas no transmiten energía térmica al fluido.
- Cuando las bombas funcionan los flujos máscicos se mantienen constantes.

DEMANDAS TÉRMICAS

Las demandas térmicas fueron facilitadas en forma horaria en formato de archivo de texto. Para modelizar el suministro de ACS se partió de la demanda de energía conocida en cada hora y de la temperatura de agua de red para la localidad de Zaragoza. Fijando la temperatura de impulsión en 60°C se calculó el caudal necesario para cubrir la demanda de energía.

Para modelizar la demanda de calefacción se supuso un intercambiador de calor ideal entre la energía suministrada por la instalación y la demanda a cubrir. El circuito de calefacción trabaja para suministrar la demanda de calefacción, impulsando un caudal variable a una temperatura constante.

Parámetro	Unidades	Valor
Superficie de absorción	m ²	9.4
Rendimiento óptico k_0	-	0,7981
Coeficiente de pérdidas k_1	W/(m ² ·K)	3,2829
Coeficiente de pérdidas k_2	W/(m ² ·K ²)	0,0187

Tabla 1: Parámetros principales del campo de captación solar

DATOS CLIMATOLÓGICOS

Los datos de radiación solar y condiciones ambientales utilizados han sido obtenidos de la base de datos climáticos del programa TrnSys para Zaragoza. Estos datos climáticos están recogidos en base horaria y en formato de archivo tm2.

CAMPO DE CAPTACIÓN SOLAR

Los parámetros principales del captador se muestran en la tabla 1. Estos son los coeficientes de la curva de rendimiento del captador y la superficie de captación total.

La orientación del campo es sur y su inclinación es de 45°. Como caudal específico de diseño del campo de captación se ha tomado un valor de 15 l/(h·m²), que se encuentra en el rango de "low-flow". En instalaciones convencionales se podrían presentar problemas durante los periodos estivales cuando la oferta solar es elevada y la demanda mínima, alcanzando el campo solar temperaturas muy altas. En el caso que se presenta, debido a la existencia del acumulador estacional, se elimina este problema, ya que en verano se continuara almacenando la energía solar en el acumulador.

SISTEMAS DE ACUMULACIÓN

Como se ha mencionado anteriormente, se ha utilizado un acumulador convencional para la instalación de ACS y un acumulador estacional para la instalación de calefacción. Para ACS y en función de la demanda media diaria, se dimensionó inicialmente un volumen de 7 m³. Para el acumulador estacional el volumen inicial es de 1.600 m³. Las características principales de ambos acumuladores se encuentran en la tabla 2 .

Parámetro	Resultados	
Localidad: Zaragoza Operación: Anual	Demanda Anual de ACS:	101,5 MWh/a
	Demanda Anual de Calefacción:	479,5 MWh/a
Captador Solar: Sonnenkraft GK10 Número de Captadores: 58 (Área Total: 580 m ²) Orientación: Sur Inclinación: 30° Caudal Específico: 15 l/h·m ²	Radiación sobre Horizontal:	834,1 MWh/a
	Radiación sobre captador:	869,6 MWh/a
	Energía Captada:	455,1 MWh/a
	Rendimiento Captador:	52%
Acumulador ACS: 6 niveles de temperatura Volumen Acumulador: 7 m ³ Coeficiente de pérdidas: 0,556 W/m ² ·K	Rendimiento Acumulador:	96%
Acumulador Estacional: 12 niveles de temperatura Volumen Acumulador: 1600 m ³ Coeficiente de pérdidas: 0,278 W/m ² ·K	Rendimiento Acumulador:	73%
Sistema Auxiliar ACS: Potencia: 50 kW Rendimiento sobre PCI: 98%	Energía suministrada:	12,7 MWh/a
Sistema Auxiliar Calefacción: Potencia: 370 kW Rendimiento sobre PCI: 98%	Energía suministrada:	315,18 MWh/a
	Fracción Solar ACS:	88%
	Fracción Solar Calefacción:	37%
	Fracción Solar Total	46%

Tabla 2: Diseño base

CALDERAS AUXILIARES

Todo sistema solar térmico requiere un sistema auxiliar para asegurar el suministro de la demanda térmica. En esta instalación, al dividir servicios para cada demanda, se definieron dos calderas de gas de condensación. Sus características se encuentran en la tabla 2.

DISEÑO BASE

Tras la definición de los componentes principales de la instalación solar, se realizó un diseño base de la misma. Los principales parámetros de los componentes utilizados y los resultados más importantes, tanto para los componentes individuales como para la instalación global se resumen en la tabla 2.

ANÁLISIS PARAMÉTRICO

A continuación se van analizando aquellos parámetros de diseño que se consideran más importantes y que se señalan con negrita

en la tabla 2. En todos los análisis realizados se modifica el valor de un solo parámetro manteniendo el resto en el valor correspondiente al diseño base.

SUPERFICIE DE CAPTACIÓN SOLAR

El primer análisis de sensibilidad se realizó variando la superficie de captación solar. En este estudio al variar la superficie de captación y mantener constantes el resto de parámetros, se modificará la relación entre el volumen de acumulación y la superficie. En la figura 7 se muestra

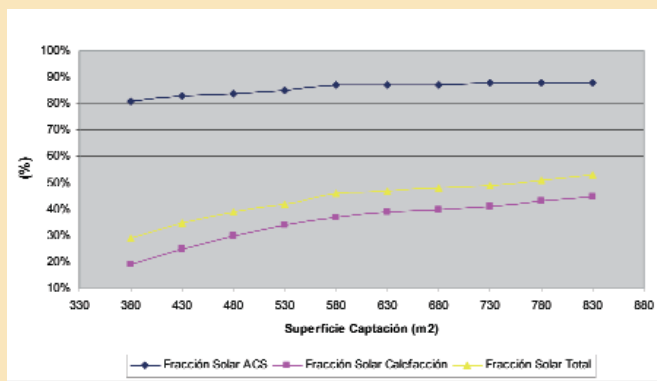


Figura 7: Variación de la fracción solar con la superficie de captación solar

la fracción solar obtenida en función de la variación de la superficie.

Los resultados muestran que la fracción solar para ACS se mantiene constante, aproximadamente, mientras que la fracción solar de calefacción aumenta a medida que aumenta la superficie de captación. Esto es debido a que la superficie de captación se dimensiona a partir de la demanda térmica total, teniendo en ésta un gran peso la demanda de calefacción. El campo estaría sobredimensionado si solamente se tuviera la demanda de agua caliente sanitaria.

INCLINACIÓN DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN SOLAR

La experiencia con instalaciones de ACS y calefacción solar recomienda una inclinación de los colectores igual a la latitud del lugar donde se instalan e incluso hasta 10° más para favorecer la captación en el periodo de invierno. La latitud de Zaragoza es de 41° , aproximadamente, por lo que la inclinación recomendada para instalaciones de ACS y calefacción sería $40-50^\circ$. En la figura 8 se muestra la variación de la fracción solar con la inclinación.

Aumentar la inclinación favorece la captación en épocas invernales y la penaliza en verano. Por ello, como primera tentati-

va se tomó una inclinación de 30° en el diseño base. Con esta inclinación se pretendía una máxima captación solar en verano y su posterior aprovechamiento en la última parte de año. La inclinación óptima será un compendio entre aquella que permita tener cargado al máximo el acumulador estacional a final de verano y aquella que maximice la captación en periodos en que la altura solar sea inferior. La simulación realizada muestra que 45° de inclinación es lo más adecuado.

CAUDAL ESPECÍFICO DEL CAMPO DE CAPTACIÓN SOLAR

Con este estudio se pretendía conocer qué caudal específico era el más adecuado. Un caudal específico bajo (low-flow), a diferencia de un caudal alto (high-flow), permite obtener temperaturas más elevadas a la salida del campo de captación pero penaliza el rendimiento del captador. Los valores para un caudal low-flow suelen ser alrededor de $15 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$ mientras que el high-flow contempla caudales superiores a $50 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$.

Los caudales low-flow dan lugar a problemas de sobrecalentamiento en épocas de alta radiación solar y baja demanda. Por ello solo se suelen utilizar en zonas donde existe poca oferta solar o cuando la demanda térmica lo requiera como es

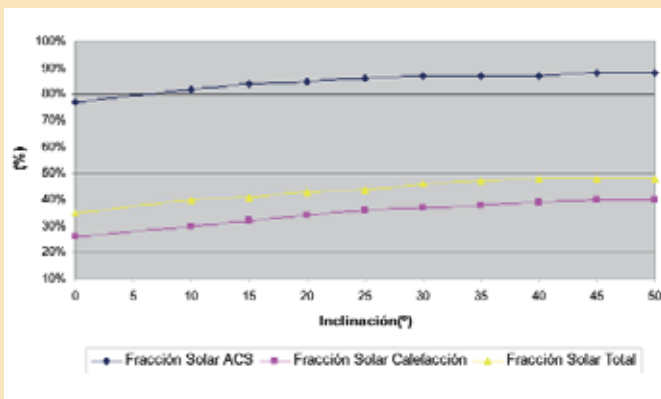


Figura 8: Variación de la fracción solar con la inclinación de la superficie de captación solar

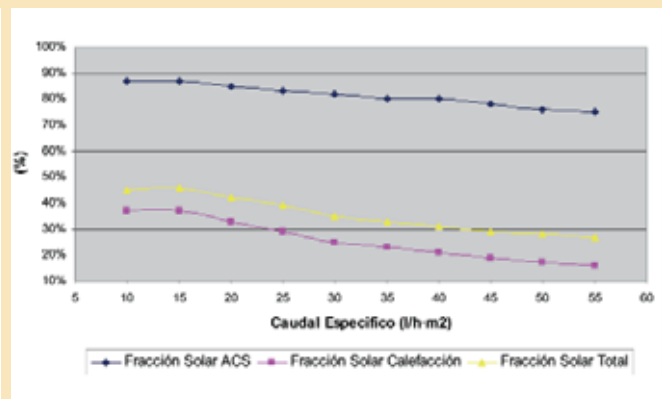


Figura 9: Variación de la fracción solar con el caudal específico del campo de captación solar

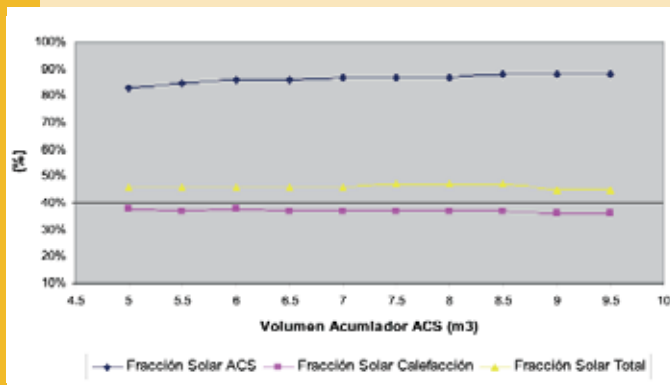


Figura 10: Variación de la fracción solar con el volumen de acumulación para ACS

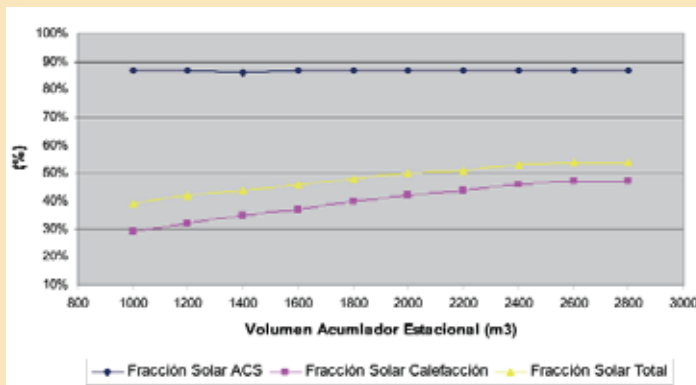


Figura 11: Variación de la fracción solar con el volumen de acumulación para calefacción

el caso de la refrigeración solar. Al contar la instalación con un acumulador estacional, que en verano se encontrará en fase de carga, siempre va a existir “demanda”. En periodos con escasa oferta solar, el hecho de trabajar el campo solar con valores de low-flow, permitirá obtener temperaturas más elevadas y buenos rendimientos. La simulación realizada muestra que un caudal específico bajo es más adecuado.

VOLUMEN DE ACUMULACIÓN PARA ACS

Otro parámetro importante dentro de la instalación es la capacidad que tiene para acumular la energía captada por el campo solar. Al presentar la instalación dos acumuladores se ha realizado un estudio separado para cada uno de ellos. Los resultados para el acumulador de agua caliente sanitaria se muestran en la figura 10.

El valor de 7 m³ de volumen de acumulación para ACS, considerado en el diseño base, resulta suficiente. Un incremento considerable de volumen no produce variaciones sustanciales en la fracción solar del sistema. Esto es debido a que la demanda de ACS es mucho menor que la de calefacción, por lo que en la fracción solar total tiene poco peso.

VOLUMEN DE ACUMULACIÓN PARA CALEFACCIÓN

El último parámetro estudiado es el volumen de acumulación para calefacción. Se prevé que aumentando la capacidad de acumulación del sistema, aumentará la energía disponible para la primera parte de la temporada de calefacción, incrementando así la fracción solar de la demanda de calefacción y por extensión la total.

Al variar el volumen de acumulación, se modifica también su relación con el área del campo solar, al igual que ocurría en el primer punto de este estudio paramétrico. La fracción solar del sistema mostrada en la figura 10 varía desde un 39% para una relación entre el volumen de acumulación y la superficie de captación de 1,7 m³/m², hasta un 54% para un ratio de 4,8 m³/m². Por lo tanto se cumplen las expectativas que se esperaban antes de realizar el estudio.

DISEÑO FINAL

Una vez realizado un estudio pormenorizado del efecto de los distintos parámetros de diseño sobre las prestaciones de la instalación con el modelo TrnSys, llegamos al diseño final mostrado en la tabla 3.

Parámetro	Resultados
Localidad: Zaragoza Operación: Anual	Demanda Anual de ACS: 101,5 MWh/a Demanda Anual de Calefacción: 479,5 MWh/a
Captador Solar: Sonnenkraft GK10 Número de Captadores: 58 (Área Total: 580 m ²) Orientación: Sur Inclinación: 45° Caudal Específico: 15 l/h·m ²	Radiación sobre Horizontal: 834,1 MWh/a Radiación sobre captador: 932,7 MWh/a Energía Captada: 493,3 MWh/a Rendimiento Captador: 53%
Acumulador ACS: 6 niveles de temperatura Volumen Acumulador: 7 m ³ Coeficiente de pérdidas: 0,556 W/m ² ·K	Rendimiento Acumulador: 96%
Acumulador Estacional: 12 niveles de temperatura Volumen Acumulador: 2000 m ³ Coeficiente de pérdidas: 0,278 W/m ² ·K	Rendimiento Acumulador: 72%
Sistema Auxiliar Agua Caliente Sanitaria: Potencia: 50 kW Rendimiento sobre PCI: 98%	Energía suministrada: 12,3 MWh/a
Sistema Auxiliar Calefacción: Potencia: 370 kW Rendimiento sobre PCI: 98%	Energía suministrada: 284,2 MWh/a
	Fracción Solar ACS: 88% Fracción Solar Calefacción: 44% Fracción Solar Total: 52%

Tabla 3: Diseño final

SISTEMA DE CAPTACIÓN SOLAR

La figura 12 presenta la radiación mensual recibida y la radiación mensual captada. La radiación solar incidente es máxima en los meses de verano, alcanzando valores mensuales de unos 100.000 kWh (172,4 kWh/m²) en julio y agosto. Sin embargo, es en los meses de marzo a junio cuando, en proporción, más energía solar se capta. Esto es debido a que conforme el acumulador estacional se va cargando la temperatura en su parte inferior aumenta, con lo cual el periodo de tiempo en que el diferencial de temperaturas con el campo de captación es propicio para que las bombas funcionen se

reduce en los meses posteriores a junio, disminuyendo el aprovechamiento de la radiación recibida.

PRODUCCIÓN DE CALEFACCIÓN Y ACS

Respecto los balances energéticos del sistema global se observa una fracción solar muy elevada durante la segunda mitad del año.

Los resultados del análisis del sistema de ACS muestran que la fracción solar anual para la demanda de ACS alcanza un valor del 88%, siendo del 100% durante los meses centrales de año.

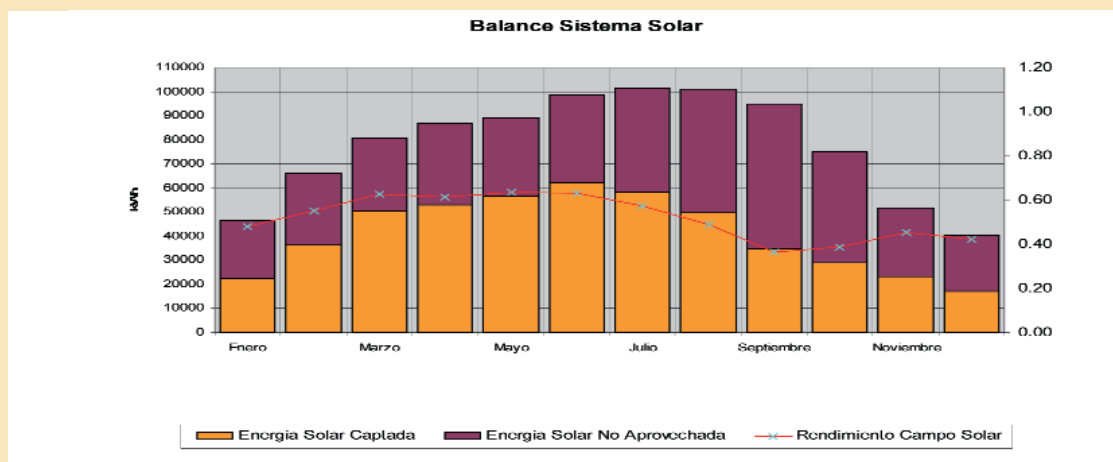


Figura 12: Radiación solar incidente y captada

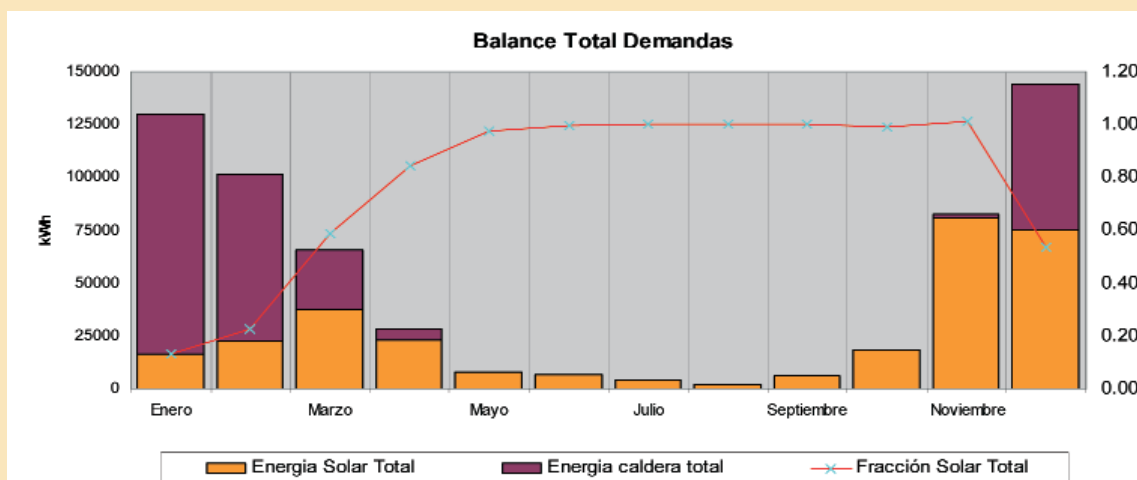


Figura 13: Resultados del sistema global

Cabe destacar la diferencia de aporte solar del sistema en los meses de diciembre y enero. Teniendo estos dos meses demandas térmicas de magnitud similar, el acumulador estacional se descarga casi por completo, energéticamente hablando, en diciembre, aportando más del 50% de la demanda térmica del mes. Prácticamente solo se utiliza energía convencional del sistema auxiliar durante cuatro meses al año. La fracción solar para calefacción alcanza el 44% anual.

ACUMULACIÓN ESTACIONAL

En este apartado se presenta el comportamiento del acumulador estacional. La figura 14 recoge el balance de energía del acumulador y su perfil de temperaturas a diferentes alturas y a lo largo del año.

Al inicio del año el acumulador estacional se encuentra cargado con la energía sobrante del periodo anterior. A medida que avanza el año el sistema de captación solar va aportando energía al acumulador (color amarillo), alcanzándose valores máximos para la energía acumulada (color naranja) a finales de verano. El acumulador suministra energía (color azul) para atender la demanda de calefacción mayoritariamente en los últimos meses del año. Como era de esperar, la

relación de carga y descarga de energía del acumulador va ligada al perfil de temperatura que experimenta el acumulador. En la figura inferior se observa la temperatura de la parte superior del acumulador (línea rosa), temperatura de la parte inferior (línea azul) y la temperatura media del acumulador (línea verde). Se aprecia la estratificación que existe en el acumulador a lo largo de todo el año.

RESULTADOS GLOBALES

La figura 15 resume las magnitudes energéticas más importantes. La fracción solar global que se alcanza es del 52%. Aumentando la superficie de captación para incrementar el aporte de energía solar y el volumen de acumulación estacional para retenerla se podría aumentar la fracción solar global de la instalación.

CONCLUSIONES

Tras el estudio paramétrico que nos ha permitido definir un diseño final razonable y el análisis de los resultados correspondiente a la simulación anual de este, se alcanzan las siguientes conclusiones:

- Respecto a la superficie de captación, se constató que es suficiente 1 m²/MWh de demanda térmica anual. Este valor se encuentra en el límite inferior del



Figura 14. Balance energético del acumulador estacional y evolución de la temperatura a diferentes alturas

rango recomendado para el Norte de Europa, pero resulta lógico atendiendo a la mayor radiación solar en España. Un aumento de la superficie favorece el incremento de la fracción solar del sistema, pero solo hasta cierto límite. Este lo impone el volumen del acumulador estacional que debe ser capaz de almacenar buena parte de la energía que pueden suministrar los captadores solares en los meses de verano.

- La inclinación óptima del campo solar alcanza un valor próximo a la latitud de la localización de la instalación. A priori, inclinaciones bajas del campo solar favorecerían una mayor

captación en los meses con mayor radiación solar, cargando el acumulador estacional. Pero del estudio se desprende que una inclinación mayor favorece la fracción solar en los meses de invierno y no se deja de aprovechar la capacidad de almacenamiento del acumulador estacional en verano.

- El caudal específico del campo solar es un factor importante para mejorar la fracción solar. Con bajos caudales específicos se obtienen temperaturas de captación y fracciones solares más elevadas. La desventaja del low-flow, que es la reducción del rendimiento

del captador debido a la mayor temperatura queda más que compensada por un mayor periodo de captación solar.

- La dimensión del acumulador de ACS, no influye en la fracción solar de la instalación, al ser la demanda de este servicio inferior al 20% de la demanda térmica total del sistema.

- El volumen del acumulador estacional es decisivo pues su mayor capacidad térmica evitará la utilización de los sistemas auxiliares. Este acumulador atiende la demanda de calefacción, que supera el 80% de la demanda térmica total. Un volumen de 4 m³/MWh de demanda de calefacción anual resulta adecuado. La relación entre el volumen del acumulador estacional y la superficie de captación, 4 m³/m², se encuentra en el límite superior del rango recomendado para el norte de Europa.

REFERENCIAS

- Remmers, K.H. et al. Grosse Solareanlagen. Solarpraxis (2001).
- Peuser, F.A. et al. Langzeiterfahrung Solarthermie. Solarpraxis – Progensa (2005).
- Klein, S.A. et al. TRNSYS 16 (a TRANSient SYstem Simulation program, <http://sel.me.wisc.edu/TrnSys>). Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison (2004).
- Henning, H.M. Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings. Springer (2004).
- Duffie, J.A.; Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes (3ª ed). Wiley (2006).

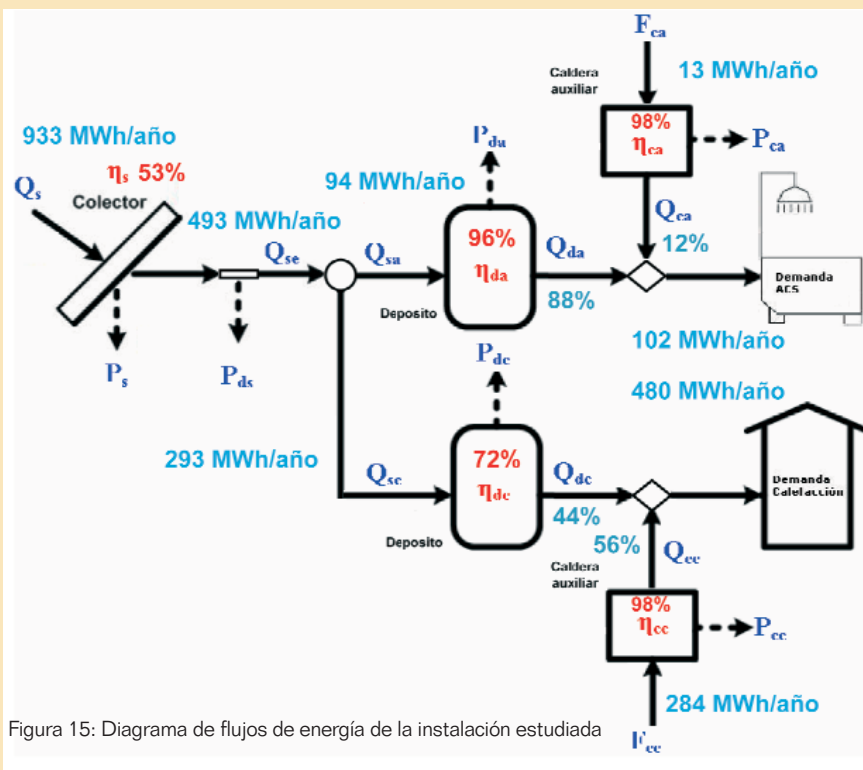


Figura 15: Diagrama de flujos de energía de la instalación estudiada

- Lindenberger, D. et al. Optimization of solar district heating system: seasonal storage, heat pumps and cogeneration. Energy 25, pp. 591-608 (2000).
- Puertas, J. et al. Generación eléctrica distribuida. Gas Natural (2005).
- Rummig, Y. et al. A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. Energy and Buildings 37, pp 663-671 (2004).
- Monzón, R. Análisis de sistemas de trigeneración con acumulación térmica para calefacción y refrigeración de distrito. Proyecto fin de carrera, CPS, Universidad de Zaragoza (2004).
- Katlschmitt, M. et al. Renewable Energy, Technology, Economics and Environment. Springer (2007).
- Reglamento de instalaciones térmicas (RITE). Ministerio de Industria (2007).
- Real Decreto 865/2003. Prevención y control de la legionelosis. Mº de Industria (2003).
- Sonnenkraft. Fabricante austriaco de sistemas solares térmicos.
- Viessmann. Fabricante alemán de calderas y generadores de calor. ■