

# OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO CON TRNSYS: APLICACIÓN A PLANTAS SOLARES DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO ESTACIONAL EN EDIFICIOS

TULUS, Victor <sup>(1)</sup>; BOER, Dieter <sup>(2)</sup>; CABEZA, Luisa <sup>(3)</sup>; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo <sup>(1)(4)</sup>; JIMÉNEZ, Laureano <sup>(1)</sup>

e-mail: victor.tulus@urv.net

<sup>(1)</sup>Universitat Rovira i Virgili, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Química, Departament d'Enginyeria Química, Tarragona (España)

<sup>(2)</sup>Universitat Rovira i Virgili, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria, Departament d'Enginyeria Mecànica, Tarragona (España)

<sup>(3)</sup>Universitat de Lleida, GREA Innovació Concurrent, Lleida (España)

<sup>(4)</sup>The University of Manchester, Centre for Process Integration, School of Chemical Engineering and Analytical Science, Manchester (UK)

## RESUMEN

Según datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente, en el año 2010 el sector residencial-comercial supuso aproximadamente el 40% del consumo total de energía. Por lo tanto, la mejora de la eficiencia energética en este sector podría contribuir de manera importante a la reducción de costes económicos y emisiones de gases de efecto invernadero.

Una tecnología prometedora para el sector de edificios es el uso de plantas solares térmicas centralizadas con almacenamiento estacional (CSHPSS). Hay diferentes tipos de CSHPSS, donde las más comunes emplean colectores solares de placa plana junto con acumuladores de agua caliente.

Debido a los avances tecnológicos de hoy, la implementación de CSHPSS en el sector residencial-comercial representa una alternativa potencialmente viable y eficaz ante las formas convencionales de suministro de energía. Estos sistemas aprovechan la energía de la radiación solar y la almacenan para su uso posterior en periodos de mayor demanda de calefacción del edificio. El uso de CSHPSS podría reducir el consumo de energía no renovable en más de 50%. Desafortunadamente, no existen plantas de este tipo instaladas en España, lo cual abre una oportunidad de investigación que se ajusta a las metas ambientales de la Comisión Europea para 2020.

La simulación del modelo de CSHPSS se realiza con el software TRNSYS 17, en el cual se incorporan ecuaciones para la estimación de los costes de los equipos del sistema, y además, ecuaciones para evaluar su impacto medioambiental. La principal novedad de este trabajo consiste en la implementación de un modelo de optimización multiobjetivo (OMO) que contrasta criterios económicos y medioambientales mediante el uso del algoritmo híbrido de optimización multidimensional de tipo metaheurístico, GPSPSOCCHJ, incorporado en GenOpt.

Esta metodología se ha aplicado a un caso de estudio donde se ha considerado una CSHPSS situada en Barcelona con capacidad para cubrir la demanda de calefacción de más de 1,000 viviendas de una comunidad de vecinos. Tomando como caso base una instalación convencional con caldera de gas natural se han identificado soluciones que reducen hasta un 83% el impacto ambiental y hasta un 14% el coste total de la instalación.

**Palabras clave:** Optimización multiobjetivo, Plantas solares térmicas centralizadas con almacenamiento estacional, TRNSYS.

## 1. Introducción

El continuo aumento de la demanda energética [1], junto con el agotamiento de los recursos energéticos no renovables, ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar tecnologías alternativas capaces de frenar el perjuicio ocasionado al medioambiente. El uso de fuentes de energía renovables constituye una solución atractiva que puede ayudar a paliar el deterioro ambiental sustituyendo parte de la energía producida con combustibles fósiles por energía procedente de fuentes renovables. La implementación de estrategias de uso de energías renovables se convierte en una de las principales prioridades de los gobiernos nacionales de todo el mundo.

En los años 90, en algunos países del norte de Europa aparecieron las primeras plantas solares térmicas centralizadas con acumulación estacional (CSHPSS) [2]. Estos sistemas, capaces de almacenar el exceso de energía solar durante los períodos de verano, y aprovecharla durante los meses de elevada demanda de calefacción, se han convertido en un tema ampliamente estudiado como una alternativa para el ahorro de energía usada para la calefacción doméstica [3–8]. Existen numerosas tecnologías de acumulación de energía térmica estacional [9–11], sin embargo, los sistemas de colectores solares de placa plana y acumulador de agua caliente son los más utilizados, ya que teóricamente pueden ser empleados indiferentemente de las condiciones climáticas del lugar.

Hoy en día, gracias a los avances tecnológicos disponibles, la implementación de plantas CSHPSS en el sector residencial-comercial constituye una opción potencialmente viable, posicionándose como una alternativa para los sistemas de calefacción ordinarios. Mediante el empleo de este tipo de plantas, más del 50% de la energía proveniente de fuentes no renovables podría ser ahorrada [5].

En el escenario mediterráneo, Lozano et al. demostraron que las CSHPSS constituyen una alternativa interesante y prometedora para cubrir la demanda de calefacción de edificios en España [12]. Por otro lado, Frago-Moreno [13] y Guadalfajara et al. [7] evaluaron la viabilidad económica de los sistemas CSHPSS en el clima mediterráneo, y Raluy et al. [14] estimaron el impacto ambiental ocasionado por este tipo de plantas durante su vida útil utilizando la técnica del análisis de ciclo de vida (ACV). Sin embargo, hasta donde nosotros sabemos, actualmente no existen estudios que traten de optimizar este tipo de plantas teniendo en cuenta objetivos económicos y medioambientales de forma simultánea.

Para abordar este tipo de problemas, en los cuales objetivos ambientales han de ser optimizados junto con objetivos económicos, la optimización multiobjetivo (OMO) constituye una técnica ampliamente utilizada y constatada [15].

El objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de una herramienta sistemática de OMO que permita optimizar el diseño de una CSHPSS considerando objetivos económicos y ambientales de manera simultánea. Por esta razón, un sistema de colectores térmicos solares y tanque de almacenamiento estacional ha sido modelado utilizando el software específico de simulación dinámica, TRNSYS 17 [16], y optimizado mediante la herramienta de optimización genérica, GenOpt [17], consiguiendo minimizar conjuntamente el coste económico y el impacto ambiental.

## 2. Metodología

### 2.1. Modelo matemático

El presente trabajo está enfocado en la integración de un modelo de CSHPSS con un algoritmo de optimización externo. El modelo de CSHPSS se simula con la herramienta TRNSYS 17 [16] tomando como válidos los resultados del tercer año de simulación. En términos matemáticos TRNSYS es un programa de simulación que incorpora una serie de equipos, los balances de masa y energía de los cuales están descritos mediante sistemas de ecuaciones lineales y en derivadas parciales. La peculiaridad de TRNSYS es que realiza simulaciones en estado transitorio lo que proporciona más realismo al sistema estudiado.

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal es optimizar el coste de la instalación y su impacto ambiental. Como variables principales se consideran las dimensiones características de los equipos relevantes del sistema, que son el campo de los colectores solares y el tanque de acumulación. Asimismo, las variables de decisión directamente relacionadas con el área superficial de los colectores

y el volumen del tanque de almacenamiento son respectivamente la fracción del área de colector respecto a la demanda de calefacción (A/D) y la fracción del volumen de tanque respecto al área de colector (V/A).

El algoritmo usado para la optimización es un algoritmo híbrido denominado GPSPSOCCHJ [17]. Él representa una combinación de dos algoritmos metaheurísticos: el algoritmo de optimización por enjambre de partículas con coeficiente de construcción (PSOCC) y el algoritmo de Hooke-Jeeves (HJ). El algoritmo PSOCC comienza realizando una búsqueda global sobre el espacio de solución. Finalizado este, y tomando el resultado del PSOCC como punto de partida, se ejecuta el optimizador local, el algoritmo HJ, que continúa con una inspección más exhaustiva alrededor del mínimo encontrado por el PSOCC. De esta manera se pretende evitar los óptimos locales y obtener una solución óptima global del problema. El algoritmo descrito está incorporado en la herramienta de optimización genérica GenOpt [17], la cual sirve de nexo entre el TRNSYS y el algoritmo seleccionado, actuando como controlador.

## 2.2. Funciones objetivo

### *Indicadores económicos*

Se ha estimado el coste de los equipos de la CSHPSS junto con los costes de su instalación y mantenimiento durante la vida útil del sistema, que se ha fijado en 25 años. Los precios de los equipos se han evaluado en base a las ecuaciones que relacionan la dimensión característica del equipo con su coste [12]. Además, se ha considerado el coste de la electricidad usada por las bombas y el coste del gas natural consumido por la caldera auxiliar. La estimación prevista para la inflación de los precios de electricidad y gas natural ha supuesto un 4% y un 5%, respectivamente. El coste actualizado de toda la instalación ( $Cost_{total}$ ), que es la suma de todos los costes mencionados anteriormente, se presenta en Euros por unidad funcional del sistema (€/MWh), en nuestro caso, la demanda energética para la calefacción a lo largo de toda la vida útil de la planta.

### *Indicadores medioambientales*

El impacto medioambiental ocasionado por los materiales de los equipos, su construcción, transporte, montaje y operación durante su vida útil, además del impacto causado por el consumo de electricidad y gas natural en la propia instalación, se cuantifica mediante el ACV, basándose en el método ReCiPe 2008 [18]. Este método incorpora el rigor científico del método CML 2001 y la facilidad de interpretación de los resultados del método Eco-indicador 99. La información relevante para realizar el inventario de los equipos se ha extraído de la base de datos EcoInvent [19]. El impacto total ( $Impact_{total}$ ) a minimizar es la suma de todos los impactos ambientales representados en puntos-ReCiPe por unidad funcional del sistema (Pt/MWh).

## 2.3. Procedimiento resolutivo

Puesto que las funciones objetivo presentan su mínimo en direcciones opuestas, no hay una solución única al problema. Realizando una OMO se obtiene una serie de resultados óptimos que forman la frontera de Pareto. Para obtener estos resultados se usa el método de la suma pondera [20]. Con este método, para obtener cada punto de la curva Pareto, se asigna un peso relativo ( $w$ ) a una de las funciones objetivo y se minimiza la suma ponderada ( $WS$ ) resultante. La ecuación 1 representa la función de la suma ponderada, en la cual se suman los valores normalizados de las funciones objetivo originales, multiplicadas por sus respectivos pesos.

$$WS = w \frac{Impact_{total}^* - Impact_{total}^{MIN}}{Impact_{total}^{MAX} - Impact_{total}^{MIN}} + (1 - w) \frac{Cost_{total}^* - Cost_{total}^{MIN}}{Cost_{total}^{MAX} - Cost_{total}^{MIN}} \quad (1)$$

Los impactos totales mínimo y máximo ( $Impact_{total}^{MIN/MAX}$ ), igual que los costes totales mínimo y máximo ( $Cost_{total}^{MIN/MAX}$ ) son los extremos de la frontera de Pareto, que se obtienen con anterioridad realizando una optimización de cada función objetivo por separado.

### 3. Caso de estudio

#### 3.1. Descripción del sistema

La CSHPSS incorpora como componentes principales unos colectores solares y un tanque de almacenamiento. Dicho tanque normalmente es de gran tamaño que se construye in situ semienterrado o completamente enterrado bajo tierra y cumple la función de un recipiente que almacena el agua caliente proveniente del campo de los colectores solares. El campo de los colectores solares se instala en el suelo en relativa proximidad al sistema de almacenamiento y la red de distribución. Los colectores más utilizados para estos casos son los de placa plana. Cabe mencionar que el presente modelo (Figura 1) está basado en el modelo propuesto por Guadalfajara et al. [7], donde se describe con más detalle el sistema en cuestión.

Las CSHPSS son sistemas dinámicos con una fuerte dependencia de la radiación solar incidente y la demanda de calefacción instantánea, las cuales varían a lo largo del día y durante el transcurso del año. Por esta razón se utiliza la herramienta de simulación de modelos dinámicos, TRNSYS 17 [16].

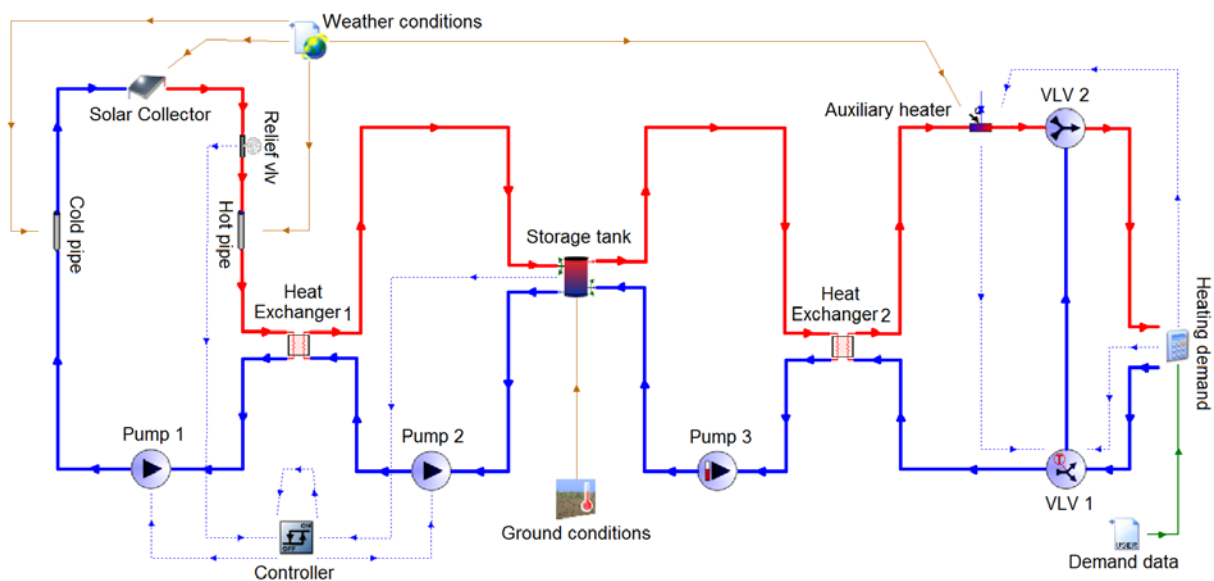


Figura 1. Esquema del modelo de CSHPSS simulado en TRNSYS 17.

#### 3.2. Especificaciones del modelo

El presente estudio se basa en un sistema CSHPSS construido en la ciudad de Barcelona (España) para satisfacer una demanda de calefacción anual de 4,223 MWh. Los datos climáticos en base horaria se han obtenido de la base de datos EnergyPlus [21]. Sin embargo, las demandas de calefacción han sido simuladas en TRNSYS 17 para un edificio de 6 plantas con pisos de 90 m<sup>2</sup>, diseñado según el Código Técnico de Edificación [22].

En cuanto al análisis económico, se define una tasa de descuento anual del 3.5%. El precio del gas natural durante el primer cuadrimestre del 2015 se establece en 0.039 €/kWh y el precio de la electricidad en 0.1735 €/kWh. Asumimos una tasa anual de inflación de los precios del 5% para el gas natural y 4% para la electricidad. Como vida útil de la planta se fija un intervalo de 25 años. No obstante, siendo la vida útil del tanque de almacenamiento de 50 años, se considera la posibilidad de su posterior reutilización en una planta renovada. De esta manera en el cómputo global de este modelo se considera la mitad del coste del tanque y la mitad de su impacto ambiental acumulado.

Adicionalmente, se ha considerado como caso base (BC) un sistema de calefacción convencional, constituido por una caldera de gas natural, para la comparación con los resultados de la optimización.

#### 4. Resultados y discusiones

En la Figura 2 se muestra el resultado de optimización del modelo de CSHPSS descrito anteriormente. El valor de peso relativo de cero para la función de la suma ponderada ( $w=0$ ) representa el mínimo coste de la instalación (42.55 €/MWh), pero con el inconveniente de tener el impacto medioambiental más elevado entre todas las soluciones óptimas de la frontera de Pareto (6.0 Pt/MWh). A su vez, el impacto mínimo se obtiene dándole todo el peso al primer término de la función de la suma ponderada ( $w=1$ ) y es cuando podemos observar un descenso hasta los 4.26 Pt/MWh, haciendo que el coste de la instalación sea el más elevado (50.23 €/MWh). El incremento del coste de la planta entre las dos soluciones extremas consiste en un 15%, mientras que elegir entre una u otra de estas soluciones se refleja en un 29% de diferencia en el eje del impacto ambiental. Las demás soluciones de la curva de Pareto toman valores intermedios de coste e impacto y pueden servir de alternativas a la hora de decantarse por una u otra configuración de la CSHPSS.

Observamos que el caso base queda en la región de las soluciones sub-óptimas. De esta manera, eligiendo una de las soluciones de la frontera de Pareto conseguiremos una disminución del impacto ambiental de entre 76% y 83%, lo que supone una reducción significativa y un punto a favor de la tecnología de acumulación estacional. Por otro lado, eligiendo una de las soluciones óptimas también es posible conseguir una reducción del coste total de la instalación de hasta el 14%. El inconveniente más importante de las plantas CSHPSS es su elevada inversión inicial y, al menos con las condiciones actuales, la baja posibilidad de conseguir un ahorro a largo plazo con respecto a los sistemas de calefacción convencionales.

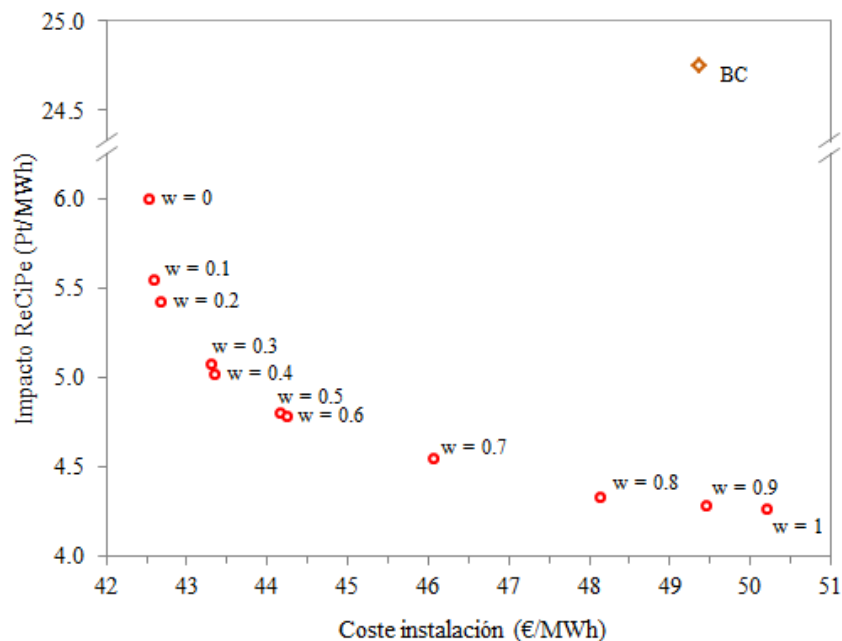


Figura 2. Soluciones óptimas de la CSHPSS, que forman la frontera de Pareto a partir de un conjunto de pesos relativos ( $w$ ) aplicados a la función de la suma ponderada, y el caso base (BC), un sistema de calefacción convencional alimentado por gas natural.

A continuación, en la Figura 3, se muestran las configuraciones de los equipos principales de la planta situadas en la frontera de Pareto. En esta figura se muestran las áreas de los colectores solares y los volúmenes de los tanques de acumulación estacional para cada uno de los 11 puntos óptimos discutidos anteriormente. La configuración económicamente más barata ( $w=0$ ) está formada por un tanque de almacenamiento de unos 40,800 m<sup>3</sup> y un campo de colectores solares de 4,200 m<sup>2</sup>. Mientras que la configuración más respetuosa con el medioambiente ( $w=1$ ) presenta un tanque de acumulación relativamente pequeño, de unos 14,600 m<sup>3</sup> y un gran campo de colectores solares de hasta 11,600 m<sup>2</sup> de superficie. Las dimensiones de cada uno de los equipos varían en más del 60% entre los extremos de la frontera de Pareto. Cabe mencionar que todas las configuraciones óptimas superarían los 90% de fracción solar y por lo tanto, el consumo de gas natural se reduciría al mínimo.

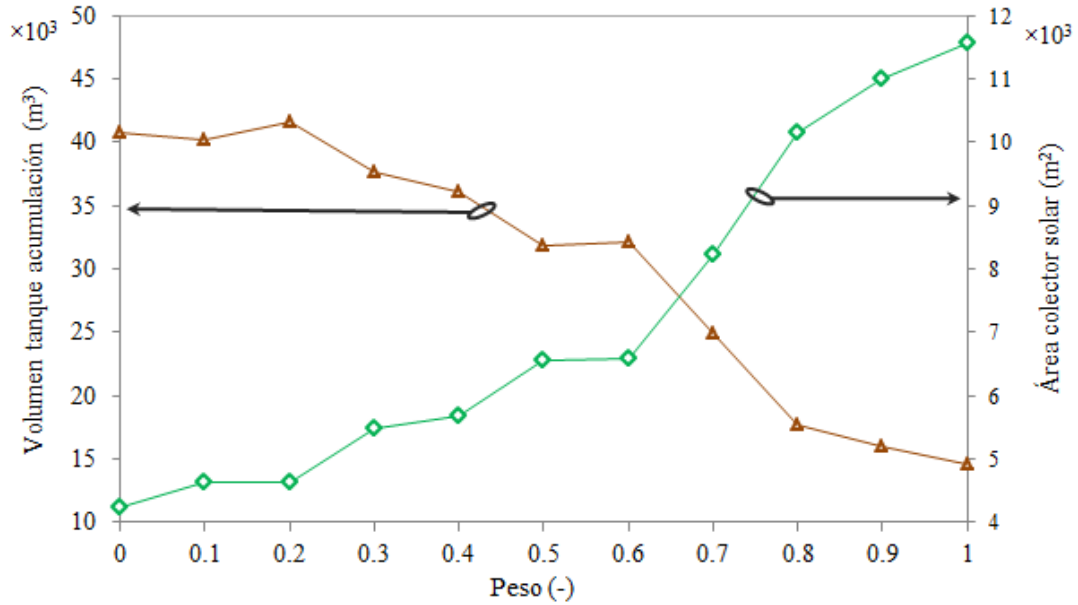


Figura 3. Dimensiones óptimas del tanque de acumulación (izquierda) y los colectores solares (derecha) del modelo de CSH PSS para los distintos puntos de la frontera de Pareto.

En la Figura 4, a modo de ejemplo, presentamos los perfiles de transferencia de energía térmica para una solución óptima intermedia con un peso relativo de 0.5 entre ambas funciones objetivo.

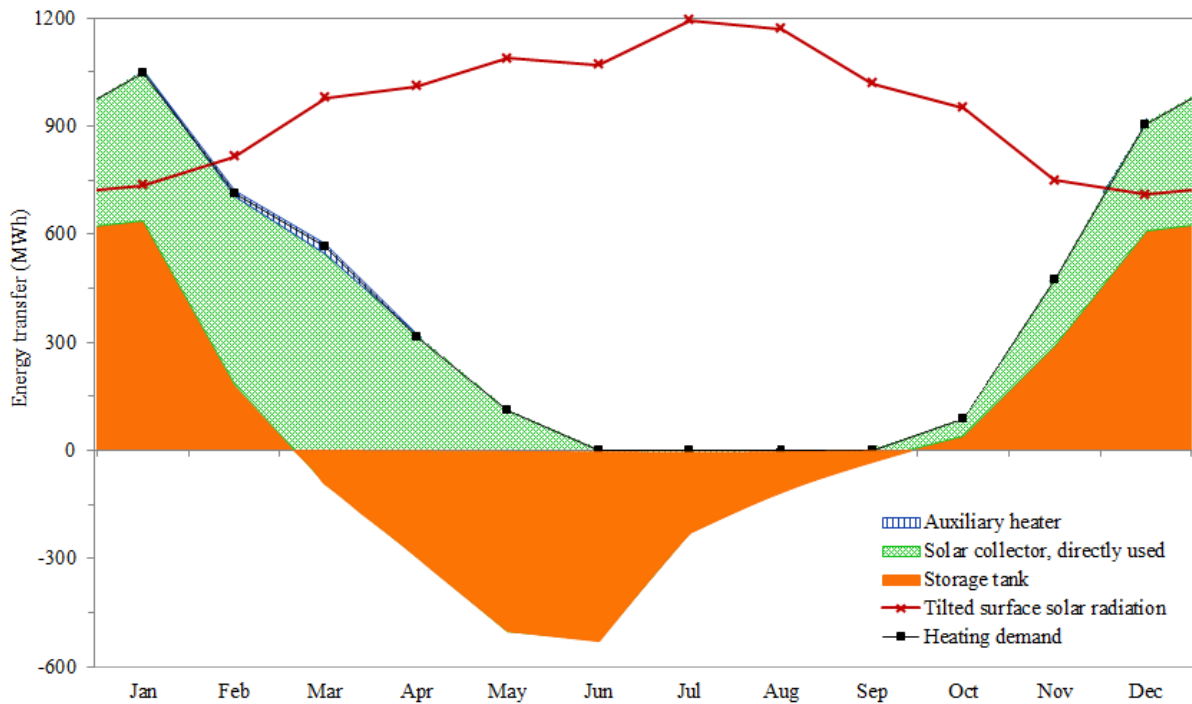


Figura 4. Perfiles de energía térmica transferida por los equipos principales de la CSH PSS, junto con la radiación incidente y la demanda total del tercer año de simulación para el caso de la solución óptima con  $w=0.5$ . En el eje negativo se representa la energía acumulada durante los meses de primavera-verano, que se aprovecha posteriormente durante los meses de otoño-invierno.

Simulados 3 años consecutivos, los perfiles de transferencia de energía anual se estabilizan y se puede observar una acumulación de energía solar térmica entre los meses de marzo y septiembre, que se aprovecha a continuación durante los meses más fríos del otoño e invierno junto con un aporte directo de energía proveniente directamente desde las placas solares. El funcionamiento de la caldera auxiliar se reduce al mínimo, llegando a encenderse durante un corto período en primavera cuando ya no hay

suficiente energía térmica en el tanque de almacenamiento y los colectores solares no son capaces de conseguirla de la radiación solar.

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo se ha desarrollado un procedimiento de optimización multiobjetivo con el método de la suma ponderada, teniendo en cuenta objetivos económicos y medioambientales de manera simultánea. Este procedimiento permite optimizar modelos de plantas CSHPSS simulados en TRNSYS. Para llevar a cabo la optimización se ha usado un algoritmo metaheurístico, GPSPSOCCHJ, integrado en la herramienta de optimización GenOpt.

Se ha realizado la optimización de un caso de estudio, una CSHPSS situada en la ciudad de Barcelona y capaz de suministrar la cantidad de energía térmica necesaria para la calefacción de 1,000 casas de una comunidad de vecinos durante todo el año. Hemos determinado una serie de soluciones óptimas que forman la frontera de Pareto y hemos especificado las dimensiones de los equipos principales para cada solución. Con la solución de menor impacto ambiental (14,600 m<sup>3</sup> volumen de tanque de acumulación y 11,600 m<sup>2</sup> área de campo solar) se conseguiría reducir en un 83% los impactos producidos por una caldera convencional operando durante 25 años. De la misma manera, según los datos económicos del caso de estudio, el coste monetario de la solución de Pareto más barata (40,800 m<sup>3</sup> volumen de tanque de acumulación y 4,200 m<sup>2</sup> área de campo solar) llegaría a reducirse hasta un 14% en comparación con el sistema de calefacción convencional. Sin embargo, un inconveniente importante sería la elevada inversión inicial necesaria para construir la planta CSHPSS.

Las plantas CSHPSS son una alternativa económico y ambientalmente viable para el clima mediterráneo. Se consiguen soluciones óptimas competitivas, pero las elevadas inversiones iniciales posiblemente frenan la construcción de tales plantas.

En un futuro trabajo se considerará mejorar el procedimiento de optimización incorporando algoritmos exhaustivos que permitan asegurar la determinación de los óptimos globales y a la vez reduzcan el tiempo de la OMO. Otro punto interesante sería el estudio de las incertidumbres relacionadas con los costes de las energías no renovables y la inflación anual de los mismos ya que se ha observado una importante dependencia de las suposiciones iniciales.

## 6. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el soporte económico del Ministerio de Economía y Competitividad del gobierno español (DPI2012-37154-C02-02, CTQ2012-37039-C02) y del gobierno catalán por la acreditación de calidad de su grupo de investigación GREA (2014 SGR 123). La investigación ha recibido financiación del Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea (FP / 2007-2013) en el acuerdo de subvención no. PIRSES-GA-2013-610692 (INNOSTORAGE).

## 7. Referencias

- [1] CAPROS, P. MANTZOS, L. TASIOS, N. DE VITA, A. KOUVARITAKIS, N. *EU energy trends to 2030 - UPDATE 2009*. 2010.
- [2] DALENBÄCK, J.O. *Large Scale Solar Heating Plants*. [en línea]. Disponible en: [www.solar-district-heating.eu/ServicesTools/Plantdatabase.aspx](http://www.solar-district-heating.eu/ServicesTools/Plantdatabase.aspx) [Consulta: 19 noviembre 2014]
- [3] BAUER, D. MARX, R. NUSSBICKER-LU, J. *German central solar heating plants with seasonal heat storage*. *Solar Energy*. 2010. vol. 84, no. 4, pp. 612-623.
- [4] MELIS, M. SPÄTE, F. *The solar heating system with seasonal storage at the Solar-Campus Jülich*. *Solar Energy*. 2000. vol. 69, no. 6, pp. 525-533.
- [5] PAHUD, D. *Central solar heating plants with seasonal duct storage and short-term water storage: design guidelines obtained by dynamic system simulations*. *Solar Energy*. 2000. vol. 69, no.6, pp. 495-509.
- [6] SIBBITT, B. MCCLENAHAN, D. DJEBBAR, R. *The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system—five years of operation*. *Energy Procedia*. 2012. vol. 30, pp. 856-865.

- [7] GUADALFAJARA, M. LOZANO, M.A. SERRA, L.M. *Evaluation of the potential of large solar heating plants in Spain*. Energy Procedia. 2012. vol. 30, pp. 839-848.
- [8] UCAR, A. INALLI, M. *Thermal and economical analysis of a central solar heating system with underground seasonal storage in Turkey*. Renewable Energy. 2005. vol. 30, no. 7, pp. 1005-1019.
- [9] MEYER, C. *Overview of seasonal thermal energy storage (STES) technology*. Energy exploration & exploitation. 1983. vol. 2, no. 2, pp. 113-122.
- [10] PINEL, P. CRUICKSHANK, C.A. BEAUSOLEIL-MORRISON, I. WILLS, A. *A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. vol. 15, no. 7, pp. 3341-3359.
- [11] ROTH, K. BRODRICK, J. *Seasonal energy storage*. ASHRAE Journal. 2009. vol. 51, no. 1, pp. 41-43.
- [12] LOZANO, M.A. ANASTASIA, A. PALACÍN, F. SERRA, L.M. *Simulation study and economic analysis of large-scale solar heating plants in Spain*. EUROSUN. 2010. pp. 1-8.
- [13] FRAGO-MORENO, J. *Análisis Económico y geográfico de sistemas de calefacción de distrito con acumulación estacional*. Proyecto final de carrera. Universidad de Zaragoza. 2011. pp. 1-42.
- [14] RALUY, R. SERRA, L. GUADALFAJARA, M. LOZANO, M. *Life Cycle Assessment of Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage*. Energy Procedia. 2014. vol. 48, pp. 966-976.
- [15] AZAPAGIC, A. CLIFT, R. *Life cycle assessment and multiobjective optimisation*. Journal of Cleaner Production. 1999. vol. 7, no. 2, pp. 135-143.
- [16] KLEIN, S.A. ET AL KLEIN, S.A. BECKHAM, W.A. MITCHELL, D.W. *TRNSYS 17.1: A Transient System Simulation Program*. Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin, Madison, USA. 2010.
- [17] WETTER, M. *Generic Optimization Program User Manual*. Energy. 2011. pp. 1-108.
- [18] GOEDKOOP, M. HEIJUNGS, R. DE SCHRYVER, A. STRUIJS, J. VAN ZELM, R. *ReCiPe 2008. A LCIA method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Characterisation*. 2013. pp. 1-133.
- [19] WEIDEMA, B.P. BAUER, C. HISCHIER, R. MUTEL, C. NEMECEK, T. REINHARD, J. VADENBO, C.O. WERNET, G. *The ecoinvent database: Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*. [en línea]. 2013. Disponible en: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org) [Consulta: 13 diciembre 2014]
- [20] DEB, K. *Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. 2001. 497 p. (Ed. John Wiley & Sons, Ltd)
- [21] *EnergyPlus. Energy Simulation Software: Weather Data*. [en línea]. Disponible en: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> [Consulta 15 octubre 2014].
- [22] MINISTERIO DE LA VIVIENDA. *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación - CTE (BOE n.74)*. 2006.