



The ASTEP project has received funding from European Union's Horizon 2020 research programme under grant agreement N°884411



H2020: Proyecto ASTEP

BARBERO R. *, MONTES M. J. *, ABBAS R. **, ENRIQUEZ J. ***, ROVIRA, A. *

* Grupo de Investigación: Sistemas Térmicos y Energía Renovable (GISTER). Dpto. Ingeniería Térmica la ETSII UNED.

** ETSII UPM. *** ANALISIS-DSC

El grupo de investigación GISTER coordina este proyecto europeo en el que participan 9 países. El resultado final serán dos prototipos a gran escala que utilizarán energía solar como fuente primaria en el proceso industrial. El proyecto parte del colector solar rotatorio, *SunDial* (patente española: UPM + UNED), para el que se propondrán soluciones tecnológicas que permitan superar las limitaciones de los sistemas actuales.

ASTEP¹ (Application of Solar Thermal Energy to Processes) es la denominación del proyecto de investigación europeo, incluido en H2020², enfocado a la generación de calor y frío renovable y el suministro de energía con coste reducido y con bajas emisiones.

Fue adjudicado al consorcio coordinado por el catedrático Antonio Rovira, profesor de la ETSII de la UNED. En él participan 16 socios de 9 países europeos diferentes (España, Reino Unido, Chipre, Italia, Grecia, Rumanía, Francia, Polonia e Irlanda), que combinan sus conocimientos y experiencia en investigación y generación de valor a productos.

El proyecto comenzó el 1 de mayo de 2020 y, durante los cuatro años siguientes, pretende adaptar el uso del colector solar, *SunDial* (figura 1),

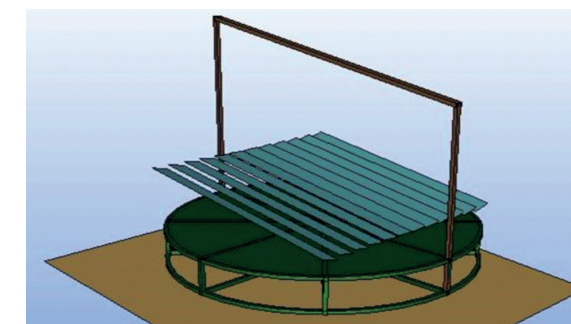


Figura 1. Colector solar *SunDial*.

Solar Heat for Industrial Processes (SHIP)

Fotografía de Danilo Alvesd (Unsplash)



¹ Application of Solar Thermal Energy to Processes (ASTEP) will create a new innovative Solar Heating for Industrial Processes (SHIP) concept focused on overcoming the current limitations of these systems. SHIP is becoming increasingly relevant as one of the ways to meet the high thermal energy demand required for industry. ([link](#))



web del Proyecto de investigación.

² Horizon 2020 is the biggest EU Research and Innovation programme ever with nearly €80 billion of funding available over 7 years (2014 to 2020) – in addition to the private investment that this money will attract. It promises more breakthroughs, discoveries and world-firsts by taking great ideas from the lab to the market. ([link](#))



Web H2020.

para cubrir una proporción significativa de la demanda de calor y frío de la industria de procesos, tanto en ubicaciones propicias a la explotación del recurso solar como en otras donde su explotación es más limitada, por la mayor latitud y menores temperaturas.

El colector *SunDial* es el resultado de 4 patentes españolas [1-4] y 2 internacionales pertenecientes a la UPM y a la UNED [5 y 6].

Este dispositivo es un colector rotatorio en el que, sobre una plataforma horizontal (que rota alrededor de un eje vertical), se ubica un concentrador lineal tipo Fresnel (figura 1). Este tipo de concentradores se caracterizan por el uso de varios espejos de ancho reducido que concentran la radiación solar sobre el tubo receptor que se dispone en paralelo a estos. En este caso, la variante importante es que se trata de una plataforma que puede girar siguiendo al sol. Los espejos tendrán una sección circular para mejorar la concentración en la superficie exterior del tubo receptor, que se sitúa a una determinada altura, por definir, por encima de ellos (figura 1).

A su vez, estos espejos pueden no ser fijos, tal y como ocurre en la tecnología Fresnel, rotando alrededor de su eje longitudinal para conseguir un seguimiento solar en dos ejes y aumentar así el rendimiento óptico.

Este tipo de concentrador rotatorio presenta el inconveniente de que las pérdidas de final de colector son elevadas, al tener una longitud pequeña. Es por ello, que se ha propuesto como

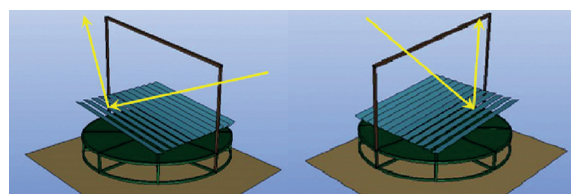


Figura 2. Inclinación del colector solar para reducir las pérdidas en el final del tubo.

solución que la longitud del receptor exceda la longitud de los espejos primarios; además, se están considerando otras soluciones, como la introducción de un espejo que refleje los rayos que no impactarían en el tubo receptor y/o la inclinación de la plataforma (figura 2).

Estas soluciones tecnológicas serán analizadas y optimizadas en el desarrollo del proyecto de modo que sea posible un aporte de calor de origen solar a procesos industriales con necesidades a temperaturas medias y ubicados en zonas dónde, hasta la fecha, no se hacía.

Se instalarán dos prototipos a gran escala en entornos industriales, de acuerdo con el TRL 5 (*Technology Readiness Level*), esperado como resultado final del proyecto:

- Proceso de pasteurización, generando calor a 175 °C en una industria láctea ubicada en Grecia (latitud: 37,93 N).
- Proceso de calentamiento de tubos por encima de 220 °C en una industria siderometalúrgica en Rumanía (latitud: 47,1 N).

Actualmente hay 111 plantas con aporte de calor solar a procesos operando en Europa, de acuerdo con la base de datos del IEA, task 49 [7], de las cuales sólo 17 trabajan por encima de 150 °C, y sólo en 6 países europeos.

El reto es poder superar los 150 °C en altas latitudes usando un concentrador Fresnel, que es una tecnología con gran potencial para la reducción de costes. En el caso de estudio correspondiente a Rumanía se optará por seguimiento en doble eje para conseguir dicho objetivo, debido a su latitud.

Este colector estará integrado con un sistema de almacenamiento de energía térmica, basado en *PCM* (Phase Change Material, materiales de cambio de fase), mediante los equipos de

control necesarios para mantener el servicio continuo durante todas las horas de funcionamiento del proceso, en el caso de algunos de los días de verano.

Si se cuantifican los objetivos, el proyecto busca cumplir con los siguientes retos:

- Llegar hasta 135 kWh de producción térmica por día y 25 MWh de producción térmica anual en cada caso de estudio.
- Evitar la emisión de 5,7 t de CO₂ y 5 kg de NO_x a la atmósfera.
- Ahorrar el consumo de 2 t de gas natural.

Además, el sistema ASTEP permitirá la consecución de otra serie de objetivos importantes para el proyecto:

- Reducir los requisitos de mantenimiento, que en el caso griego está garantizado debido a que los espejos serán fijos.
- Evitar la introducción de cambios en los procesos industriales actuales.

Dichos objetivos se pretenden conseguir mediante el desarrollo de una serie de tareas en las que la UNED participará de forma destacada, en colaboración con los demás socios del proyecto ASTEP:

- Realización de simulaciones termo-fluido-mecánicas que permitan caracterizar el funcionamiento de los distintos elementos (figuras 3, 5 y 7).

- Desarrollo de herramientas *ad-hoc* para la simulación de su comportamiento estacionario y transitorio (figura 4).

- Ensayos de laboratorio para los casos del sistema de almacenamiento y, selección y montaje de espejos.

- La realización de ensayos sobre los prototipos en instalaciones de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), que permitirán a los investigadores del consorcio el acceso a una importante base de datos para la mejora de sus desarrollos.

ALMACENAMIENTO

En la figura 3 se puede observar la evolución del proceso de fusión del sólido durante la etapa de carga. Dicha imagen fue obtenida mediante simulaciones de fluidodinámica computacional (CFD) por la empresa ANALISIS-DSC, haciendo uso del código ANSYS-CFX.

Por la zona central de este sistema circula el fluido caloportador que irá calentando el PCM, empezando la fusión en la zona pegada a las pare-

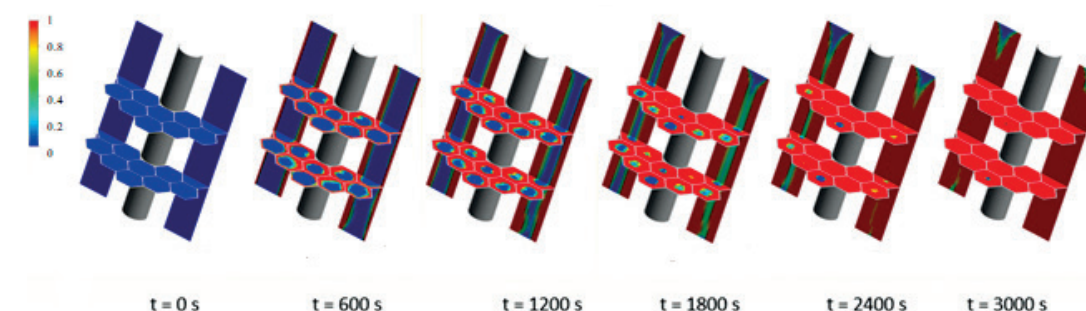


Figura 3. Evolución de la fracción de volumen de fluido en el sistema de almacenamiento. Simulación realizada por la empresa ANALISIS-DSC.

des de las aletas y extendiéndose a la zona central de los canales a medida que avanza su carga.

Los procesos de cambio de fase presentan una fenomenología compleja y se utilizan modelos para caracterizarlos, que forman parte del estado del arte en este campo. Por tanto, será necesario realizar una validación de los resultados mediante ensayos de laboratorio. La universidad de Politechnika Wroclawska en Polonia será la encargada de llevar a cabo dichos experimentos.

Una vez validado el modelo CFD se realizarán varias simulaciones transitorias de una unidad básica del sistema de almacenamiento, que permitirán el desarrollo de modelos analíticos, enfocados a caracterizar la energía que se podrá almacenar en cada momento y los tiempos de carga y descarga.

Además, el modelo analítico será integrado en una herramienta dinámica enfocada a analizar su acoplamiento con el colector solar y el proceso.

COLECTOR

Uno de los puntos clave del proyecto es la caracterización del colector, que se llevará a cabo mediante el desarrollo de herramientas específicas por parte de la UPM y la UNED, utilizando modelos basados en desarrollos propios de ambas universidades.

Como primer paso, es necesario conocer la concentración de rayos solares sobre el receptor (figura 4), que se obtendrá en base a una herramienta de trazado de rayos desarrollada en la UPM.

Esta herramienta permite evaluar la concentración solar sobre el receptor para distintas configuraciones del colector y teniendo en cuenta tanto el ángulo longitudinal como el transversal. El objetivo final será obtener un sistema con un comportamiento óptimo desde el punto de vista óptico, mediante el dimensionado de parámetros como el número, ancho y longitud de espejos, entre otros parámetros.

Es necesario garantizar que la concentración sobre el receptor sea adecuada, por lo que los espejos serán curvados. Esto implica, por un lado, habrá que evaluar si los espejos soportan las tensiones locales generadas y, por otro, analizar si la curvatura obtenida se corresponde con la esperada o no. Para evaluar ambos factores se utilizarán herramientas de cálculo mecánico basadas en elementos finitos (figura 5), que serán apoyadas mediante ensayos de laboratorio realizados en las instalaciones de la UPM.

Una vez se conoce dicha concentración, hay que estimar la energía útil absorbida por el fluido caloportador restando la energía disipada hacia el exterior (figura 6) para lo que se hará uso de los modelos de pérdidas térmicas desarrollados en la UNED.

Las pérdidas térmicas vendrán dadas por expresiones del tipo de la ecuación 1 [8].

De tal modo que el flujo de calor al exterior por unidad de superficie (\dot{q}_{perd}'') viene expresado en función del calor absorbido por unidad de superficie (\dot{q}_{abs}''), las pérdidas en los soportes del receptor ($\dot{q}_{perd,soportes}''$) y dos parámetros característicos de cada receptor (\dot{q}_{crit}'' , F'_{crit}) definidos por las ecuaciones 2 y 3 [8].

Ambos parámetros quedan definidos en función de los coeficientes de transferencia de calor al exterior, característicos del receptor concreto (h_{ext} y ϵ_{ext}) y las temperaturas del fluido a la entrada en el receptor (T_{fe}) y en el exterior (T_{ext}). Estos modelos analíticos se apoyarán también en simulaciones CFD para poder obtener los parámetros característicos con precisión (figura 7).

En la figura 7 se puede observar el nivel detalle que se buscará con estas simulaciones para poder obtener los distintos coeficientes de transmisión de calor en el diseño propuesto.

El objetivo es obtener la energía total transmitida al fluido de transferencia a lo largo de un año mediante la integración de las herramientas

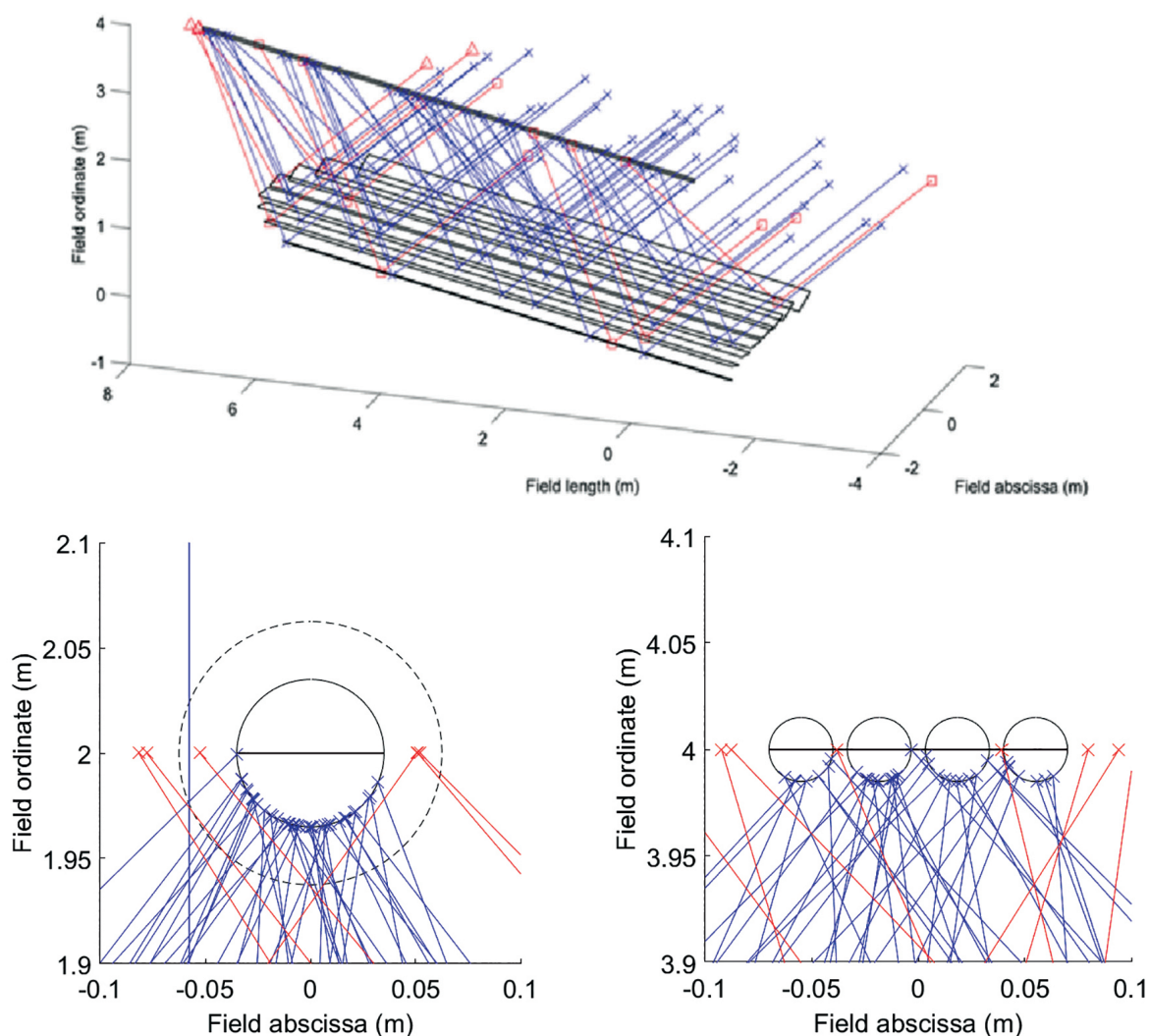


Figura 4. Simulaciones para la estimación del rendimiento óptico del SunDia.

$$\dot{q}_{perd}'' = \dot{q}_{abs}'' - F'_{crit} \cdot [\dot{q}_{abs}'' - \dot{q}_{crit}''] + \dot{q}_{perd,soportes}'' \quad \text{Ec. 1}$$

$$\dot{q}_{crit}'' = \sigma \cdot \epsilon_{ext} \cdot (T_{fe}^4 - T_{ext}^4) + h_{ext} \cdot (T_{fe} - T_{ext}) \quad \text{Ec. 2}$$

$$F'_{crit} = \frac{1}{\frac{U_{crit}}{U_{rec}} + 1}; U_{crit} = 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon_{ext} \cdot T_{fe}^3 + h_{ext} \quad \text{Ec. 3}$$

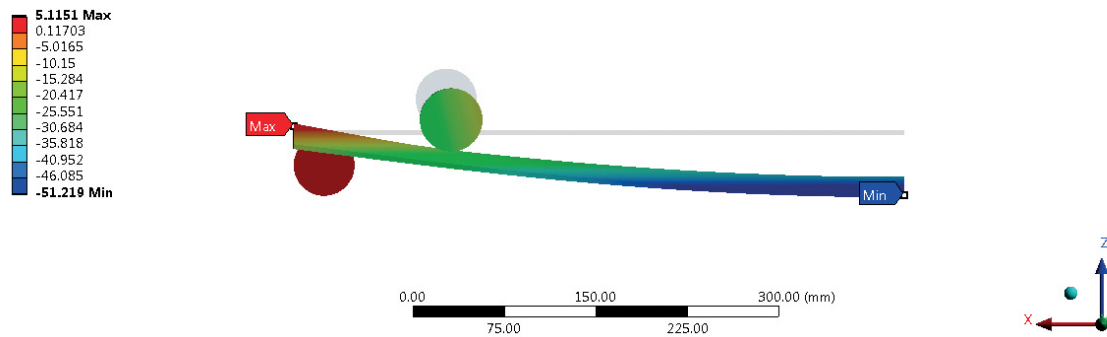


Figura 5. Simulaciones de elementos finitos para analizar la deformada del espejo.

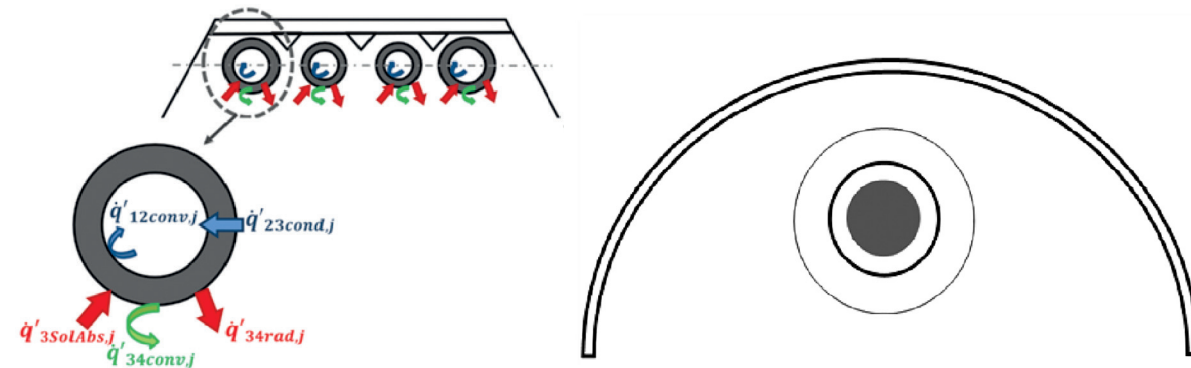


Figura 6. Diseños de receptor planteados y esquema del modelo térmico.

descritas. En la figura 8 se representa la energía producida a lo largo de cinco años para el usuario final localizado en Corinto (Grecia) para un primer diseño aproximado.

CONJUNTO

La posterior integración del modelo de receptor con los modelos dedicados al almacenamiento y al resto de sistemas, tanto en su modalidad pseudo-estacionaria como dinámica, permitirá el análisis completo de la instalación y un correcto diseño de los sistemas de control, lo que contribuirá a optimizar su comportamiento.

Por tanto, gran parte del éxito del proyecto radicará en la adecuación de los modelos desarrollados durante los últimos años por la UNED y

por otros socios del proyecto, ya que en las instalaciones llevadas a ensayo sólo se permitirá la introducción pequeñas adaptaciones, pero no de cambios sustanciales en el diseño.

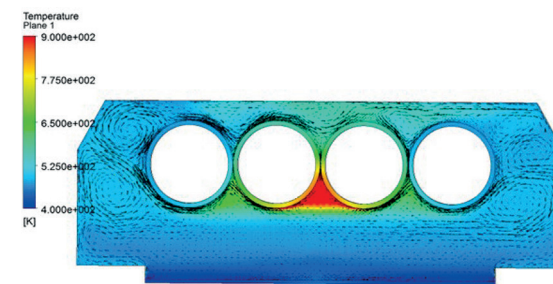


Figura 7. Simulación CFD de un receptor Fresnel realizada por el GISTER para el desarrollo de modelos.

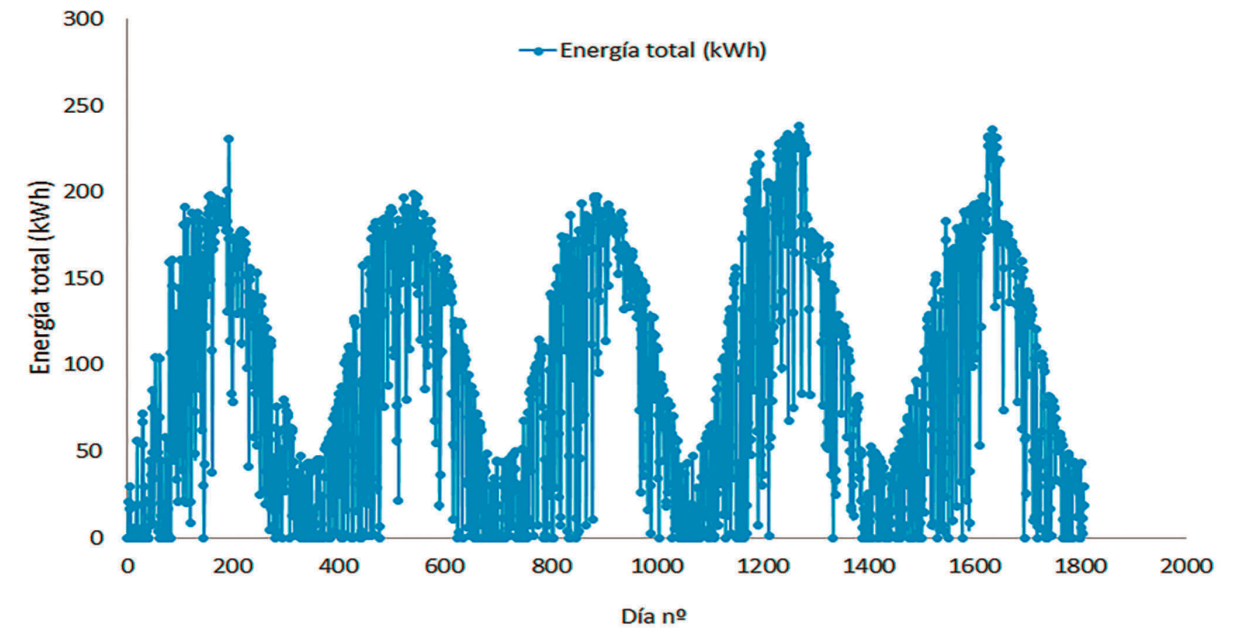


Figura 8. Energía total hora a hora transferida al fluido.

Como resultado final del proyecto se espera presentar una alternativa económica y sostenible que sea capaz de cubrir en el futuro una parte relevante de la demanda de calor en la industria a temperaturas medias (150-300 °C).

El consorcio y, por tanto, el grupo de investigación STER se enfrenta a un reto importante de cara a hacer una contribución relevante en un futuro sostenible en términos energéticos.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto ASTEP ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención n.º 884411.

REFERENCIAS

- [1] Patente ES2578804B2.
- [2] Patente ES1138715U.
- [3] Patente ES2537607B2.
- [4] Patente ES2713799A1.
- [5] Patent WO/2016/166388A1.
- [6] Patent WO/2016/166390A1.
- [7] Database for applications of solar heat integration in industrial processes (2018) <http://shiplants.info/>
- [8] BARBERO, R. *Desarrollo de un modelo teórico para la caracterización del rendimiento térmico en colectores solares. Aplicación a tecnologías de generación eléctrica* (2018). Tesis doctoral en Tecnologías Industriales (UNED).