

Convocatorias 2017  
Proyectos EXCELENCIA y Proyectos RETOS  
AGENCIA ESTATAL DE INVESTIGACIÓN

**AVISO IMPORTANTE**

En virtud del artículo 16 de la convocatoria **NO SE ACEPTARÁN NI SERÁN SUBSANABLES MEMORIAS CIENTÍFICO-TÉCNICAS** que no se presenten en este formato.

**Es obligatorio que la memoria contenga los tres apartados (A, B y C). La parte C de la memoria no podrá exceder de 20 páginas.**

**Lea detenidamente las instrucciones para rellenar correctamente esta memoria, disponibles en la web de la convocatoria.**

**Parte A: RESUMEN DE LA PROPUESTA/SUMMARY OF THE PROPOSAL**

**INVESTIGADOR PRINCIPAL 1** (Nombre y apellidos):

Loreto Valenzuela Gutiérrez

**INVESTIGADOR PRINCIPAL 2** (Nombre y apellidos):

Angel Morales Sabio

**TÍTULO DEL PROYECTO:** Soluciones termosolares para integración en procesos industriales

**ACRÓNIMO:** SOLTERMIN

**RESUMEN** [Máximo 3500 caracteres \(incluyendo espacios en blanco\):](#)

El objeto de este proyecto es avanzar en el desarrollo de soluciones compactas y optimizadas de las tecnologías energéticas termosolares de concentración adecuadas para el suministro de calor en procesos industriales, debido al enorme mercado potencial de este tipo de aplicaciones. Según el estudio publicado en 2015 por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), mirando al año 2030 existe un potencial técnico para suministrar alrededor de 4,17 millones de GWh de energía con sistemas solares térmicos (alrededor de un 20% de la demanda de energía).

En este proyecto se plantea abordar: a) el diseño y desarrollo de un prototipo de captador lineal Fresnel compacto adecuado para su utilización en aplicaciones a calor de proceso de pequeña y mediana potencia, hasta 300°C, incluyendo el estudio de soluciones y de durabilidad de los componentes del sistema concentrador y receptor solar; b) el estudio de la integración del sistema Fresnel en dos aplicaciones concretas, una en procesos de la industria alimenticia y otra para el suministro de vapor a una planta de destilación multiefecto con termocompresión por eyectores de vapor; c) desarrollo de dos soluciones de heliostatos innovadores, para su aplicación a sistemas de torre solar con receptor central para el concepto multitorre, y estudio de innovaciones en el diseño de receptores volumétricos; y d) estudio de un sistema de mini-torre solar integrado en sistema de cogeneración mediante el acoplamiento a un ciclo Brayton y aprovechamiento de calor residual para alimentar una planta de destilación multiefecto. La utilización en la industria de la tecnología solar de concentración con captadores lineales tiene un enorme potencial para el suministro de vapor vivo en el rango de 150 a 250°C y, por otro lado, en relación con la tecnología de torre central, los desarrollos que se realicen facilitarán el uso de esta tecnología para proporcionar energía térmica a procesos que trabajen a altas temperaturas (>500°C) como es el caso de

industrias cementeras, metalúrgicas y cerámicas, mediante el uso de pequeños sistemas de receptor central o mediante sistemas multi-torre.

Los laboratorios e instalaciones experimentales disponibles en la Plataforma Solar de Almería (PSA, [www.psa.es](http://www.psa.es)), considerada Infraestructura Científico Técnica Singular (ICTS) dependiente del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT, [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)), y la dilatada experiencia en sistemas solares térmicos de concentración del equipo investigador que llevará a cabo este proyecto, son una garantía para conseguir los objetivos propuestos.

Aunque la finalidad de este proyecto es avanzar en desarrollos que faciliten la utilización de los sistemas solares térmicos de concentración para aplicaciones industriales de calor de proceso, parte de los desarrollos propuestos, como es el caso de recubrimientos selectivos para receptores solares de alta temperatura y antireflejantes para ventanas de cuarzo utilizadas en receptores de torre central, o los heliostatos de óptica autoalineada, serán también de aplicación a las grandes centrales eléctricas termosolares.

**PALABRAS CLAVE:** Energía solar, captador Fresnel, recubrimiento óptico, durabilidad de materiales, calor de proceso industrial, desalación

**TITLE OF THE PROJECT:** Solar thermal solutions for integration in industrial processes

**ACRONYM:** SOLTERMIN

**SUMMARY** Maximum 3500 characters (including spaces):

The objective of this project is to advance in the development of compact and optimized solutions of the concentrating solar thermal energy technologies suitable for supply heat in industrial processes, because the commercial market for this type of solar thermal application is huge. The study published in 2015 by the International Energy Agency (IEA) and the International Renewable Energy Agency (IRENA) shows that there is a technical potential to provide around 4,17 millions of GWh of solar thermal heat by 2030 (around 10% of industrial energy demand).

In this project it is intended to address: a) the design and development of a compact linear Fresnel collector prototype suitable for use in small and medium industrial process heat applications up to 300 ° C, including the study of solutions and durability of components for the concentrator and receiver system; b) the study of the integration of the Fresnel system in two specific applications, one in food industry processes and another for the supply of steam to a multi-effect distillation plant with thermocompression by steam ejectors; c) development of two innovative heliostats solutions, for application to solar tower systems with central receiver for the multitower concept, and study of innovations in the design of volumetric receivers; and d) study of a solar mini-tower system integrated in a cogeneration plant by coupling to a Brayton cycle and utilization of residual heat to feed a multi-effect distillation plant. The use in the industry of concentrating solar technology with line-focus collectors presents a big potential for the supply of live steam in the range from 150 to 250°C and, on the other hand, with regards to the solar tower technology, the developments proposed in this project will enhance the use of this technology to feed industrial processes working at high temperatures (>500°C) by means of small solar tower systems or multi-tower systems. This is the case of industries in the cement, metallurgy and ceramic sectors.

Laboratories and outdoor experimental facilities available at the Plataforma Solar de Almería (PSA, [www.psa.es](http://www.psa.es)), which is a major Spanish Research Infrastructure owned by the Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT, [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)), and the large experience on concentrating solar thermal systems of the research team in charge of this project are the main assets to achieve the proposed objectives.



Although the aim of this project is to progress in the use of concentrating solar thermal systems for industrial process heat applications, many of the developments proposed here, such as selective coatings for high temperature receivers and anti-reflexive coatings for quartz windows used in central tower receivers, or heliostats with self-aligned optics, will be also applicable to large solar thermal power plants.

**KEY WORDS:** Solar energy, Fresnel collector, optical coating, durability of materials, industrial process heat, desalination

## Parte B: INFORMACIÓN ESPECÍFICA DEL EQUIPO

### B.1. FINANCIACIÓN PÚBLICA Y PRIVADA (PROYECTOS Y/O CONTRATOS DE I+D+I) DEL EQUIPO DE INVESTIGACIÓN (repita la secuencia tantas veces como se precise hasta un máximo de 10 proyectos y/o contratos).

1. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Loreto Valenzuela Gutiérrez, Eduardo Zarza Moya, Lourdes González Martínez, Diego Alarcón Padilla, Julián Blanco Gálvez

Referencia del proyecto: EU – H2020-LCE-2016-ERA (RIA). Grant agreement: 731.287

Título: Integrating National Research Agendas on Solar Heat for Industrial Processes (INSHIP)

Investigador principal: Pedro Horta (Fraunhofer-ISE, Alemania)

Entidad financiadora: EU – Programa H2020

Duración: 01/01/2017 – 31/12/2020

Financiación recibida (en euros): 2,8 M€ (Contribución a CIEMAT: 299.546,25 €)

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

2. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Aránzazu Fernández García, Angel Morales Sabio, Gema San Vicente Domingo, Loreto Valenzuela Gutiérrez, Eduardo Zarza Moya

Referencia del proyecto: EU H2020 NMP-16-2015. Grant agreement: 686.008

Título: Raising the Lifetime of Functional Materials for Concentrated Solar Power Technology (RAISELIFE)

Investigador principal: Florian Sutter (DLR, Alemania)

Entidad financiadora: EU – Programa H2020

Duración: 01/04/2016 – 31/03/2020

Financiación recibida (en euros): 9,3 M€ (Contribución a CIEMAT: 1.073.816,25 €)

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

3. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Aránzazu Fernández García, Gema San Vicente Domingo, Diego Alarcón Padilla, Loreto Valenzuela Gutiérrez, Patricia Palenzuela Ardila

Referencia del proyecto: EU H2020 LCE-02-2015. Grant agreement: 654.479

Título: Water Saving for Solar Concentrated Power (WASCOP)

Investigador principal: Delphine Bourdon (CEA, Francia)

Entidad financiadora: EU – Programa H2020

Duración: 01/01/2016 – 31/12/2019

Financiación recibida (en euros): 5,9 M€ (Contribución a CIEMAT: 708.573,75 €)

Relación con el proyecto que se presenta: está algo relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

4. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Jesús Fernández Reche, Antonio Ávila Marín, María Isabel Roldán Serrano

Referencia del proyecto: EU H2020-LCE-2014-1. Grant Agreement: 640.905

Título: Competitive Solar Power Towers (CAPTURE)

Investigador principal: Marcelino Sánchez González (Cener, España)

Entidad financiadora: EU – Programa H2020

Duración: 01/05/2015 – 30/04/2019

Financiación recibida (en euros): 6,5 M€ (Contribución a CIEMAT: 407.318,75 €)

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

5. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Julián Blanco Gálvez, Eduardo Zarza Moya, Loreto Valenzuela Gutiérrez, Diego Alarcón Padilla, Jesús Fernández Reche, Gema San Vicente Domingo, Lourdes González, Antonio Ávila Marín, María Isabel Roldán

Referencia del proyecto: FP7 ENERGY-2013-IRP. Grant Agreement 609.837

Título: Scientific and Technological Alliance for Guaranteeing the European Excellence in Concentrating Solar Thermal Energy (STAGE-STE)

Investigador principal: Julián Blanco Gálvez (CIEMAT)

Entidad financiadora: EU – DG Research&Innovation

Duración: 01/01/2014 – 31/01/2018

Financiación recibida (en euros): 10 M€ (Contribución a CIEMAT: 949.870,03 €)

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

6. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Eduardo Zarza Moya, Loreto Valenzuela Gutiérrez, Jesús Fernández Reche, Angel Morales Sabio, Gema San Vicente Domingo, Lourdes González Martínez, Aránzazu Fernández García, Antonio Ávila Marín, María Isabel Roldán

Referencia del proyecto: Retos I+D+i 2014. Código ENE2014-56079-R

Título: Nuevos desarrollos para una tecnología termosolar más eficiente (DETECSOL)

Investigador principal: Eduardo Zarza Moya (CIEMAT)

Entidad financiadora: Ministerio de Economía y Competitividad

Duración: 01/01/2015 – 31/12/2017

Financiación recibida (en euros): 363.000,00 €

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

7. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Diego-César Alarcón Padilla, Lidia Roca Sobrino, Patricia Palenzuela Ardila, Javier Bonilla Cruz

Referencia del proyecto: Retos I+D+i 2014. DPI2014-56364-C2-2-R

Título: Control y Gestión Energética de Sistemas Termosolares de Desalación (EFFERDESAL)

Investigador principal: Diego-César Alarcón Padilla (CIEMAT)

Entidad financiadora: Ministerio de Economía y Competitividad

Duración: 01/01/2015 – 31/12/2017

Financiación recibida (en euros): 158.752 €

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

8. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Lidia Roca Sobrino, Javier Bonilla Cruz

Referencia del proyecto: FP7-ENERGY-2012-1.CP. Grant Agreement 308.912

Título: Innovative Configuration of a Fully Renewable Hybrid CSP plant (HYSOL)

Investigador principal: Miguel Lasheras (Cobra)

Entidad financiadora: EU – 7th Framework Programme

Duración: 01/05/2013 – 31/04/2016

Financiación recibida (en euros): 6,2 M€ (Contribución a CIEMAT: 522.659,00 €)

Relación con el proyecto que se presenta: está relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

9. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Loreto Valenzuela Gutiérrez, Eduardo Zarza Moya, Lourdes González Martínez

Referencia del proyecto: ENE2011-24777

Título: Estudios termo-hidráulicos de sistemas con captadores cilindroparabólicos para la generación directa de vapor (GEDIVA)

Investigador principal: Loreto Valenzuela Gutiérrez (CIEMAT)

Entidad financiadora: MINECO. Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental No Orientada. Convocatoria 2011.

Duración: 01/01/2012 – 31/12/2014

Financiación recibida (en euros): 41.140 Euro + Beca FPI (BES-2012-055212)

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

10. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato: Eduardo Zarza Moya, Loreto Valenzuela Gutiérrez, Jesús Fernández Reche, Aránzazu Fernández García

Referencia del proyecto: CIT-440000-2008-5

Título: Captador solar cilindro-parabólico para aplicaciones térmicas hasta 250°C (CAPSOL)

Investigador principal: Eduardo Zarza Moya (CIEMAT)

Entidad financiadora: MICINN. Subprograma de Investigación aplicada colaborativa. Convocatoria 2008.

Duración: 01/05/2008 – 31/12/2010

Financiación recibida (en euros): 234.900 € (Contribución a CIEMAT: 93.900,00 €)

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

**B.2. RELACIÓN DE LAS PERSONAS NO DOCTORES QUE COMPONEN EL EQUIPO DE TRABAJO** (se recuerda que los datos de los doctores del equipo de trabajo y de los componentes del equipo de investigación no se solicitan aquí). Repita la siguiente secuencia tantas veces como precise.

1. Nombre y apellidos: Rafael Monterreal Espinosa  
Titulación: Titulado Medio en Ciencias Físicas  
Tipo de contrato: Funcionario. Escala de Técnicos Especialista de Grado Medio OPI
2. Nombre y apellidos: Francisco Javier León Alonso  
Titulación: Ingeniero Técnico Industrial  
Tipo de contrato: Personal laboral fijo
3. Nombre y apellidos: Ginés García Navajas  
Titulación: Ingeniero Técnico Industrial  
Tipo de contrato: Personal laboral fijo
4. Nombre y apellidos: Eneko Setien Solas  
Titulación: Ingeniero Industrial (Esp. Termo energética)  
Tipo de contrato: Contratado laboral temporal (2016-2019)
5. Nombre y apellidos: Raúl Enrique Orts  
Titulación: Ingeniero Industrial  
Tipo de contrato: Contratado laboral temporal (2015-2018)
6. Nombre y apellidos: Mario Biencinto Murga  
Titulación: Ingeniero de Telecomunicación  
Tipo de contrato: Contratado laboral temporal (2015-2018)
7. Nombre y apellidos: Rafael Antonio López Martín  
Titulación: Licenciado en Ciencias Físicas  
Tipo de contrato: Contratado laboral temporal (2015-2018)
8. Nombre y apellidos: David Argüelles Arizcun  
Titulación: Ingeniero Téc. Industrial  
Tipo de contrato: Contratado laboral temporal (2017-2020)
9. Nombre y apellidos: Alejandro García Segura  
Titulación: Ingeniero Químico





- Tipo de contrato: Contratado predoctoral UAL (2015-2018)
10. Nombre y apellidos: Diego Pulido Iparraguirre  
Titulación: Ingeniero Mecánico  
Tipo de contrato: Inv. predoctoral visitante (Univ. Antofagasta – Chile) (2015-2019)
11. Nombre y apellidos: Jose Antonio Carballo López  
Titulación: Ingeniero Téc. Industrial – Master en Energías Renovables  
Tipo de contrato: Contratado predoctoral UAL (2015-2018)
12. Nombre y apellidos: Nuria Germán Cordero  
Titulación: Formación profesional 2 grado  
Tipo de contrato: Funcionaria grupo C1 (Técnico de laboratorio)
13. Nombre y apellidos: Lucía Martínez Arcos  
Titulación: Formación profesional Química ambiental; Análisis y Control de Calidad  
Tipo de contrato: Contratado laboral temporal (Técnico de laboratorio) (2017-2021)
14. Nombre y apellidos: Meryem Farchado Dinia  
Titulación: Graduada en Ciencias Químicas  
Tipo de contrato: Contratado temporal programa Garantía Juvenil (2016-2018)

**Parte C: DOCUMENTO CIENTÍFICO. Máximo 20 páginas.****C.1. PROPUESTA CIENTÍFICA****C.1.1. Antecedentes y estado actual de los conocimientos**

La necesidad de evolucionar hacia un mercado energético más renovable es cada vez más evidente. Entre las energías renovables, **la energía solar destaca por su gran potencial y disponibilidad**: la energía asociada a la radiación solar que llega a la Tierra ( $1,7 \times 10^{14}$  kW) es varios miles de veces superior al consumo total de energía primaria mundial, por lo que el uso de una mínima parte permitiría abastecer todas nuestras necesidades energéticas.

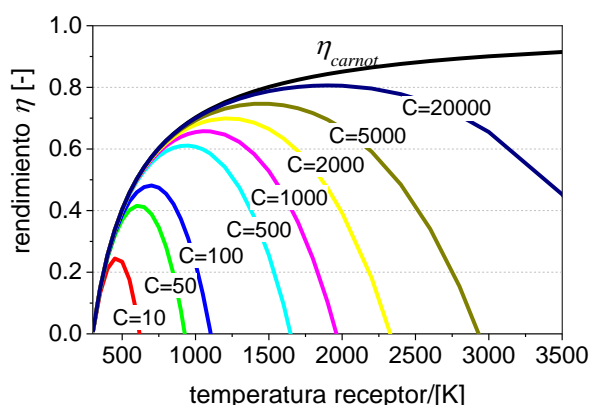
Actualmente hay tres grandes grupos de sistemas para aprovechar la energía de la radiación solar: a) sistemas fotovoltaicos, b) sistemas foto(electro)químicos y c) sistemas térmicos. Dentro de los sistemas térmicos existen dos tecnologías diferentes: los sistemas sin concentración (también denominados de baja temperatura) y los **sistemas con concentración de la radiación solar directa** (denominados usualmente como **sistemas de media y alta temperatura**), porque en ellos la concentración de la radiación solar permite su transformación en energía térmica a temperaturas que pueden superar los  $1000^\circ\text{C}$ . Como hay una relación biunívoca entre el grado de concentración de la radiación solar y la temperatura que puede alcanzarse (ver figura 1), el **campo de aplicación de los sistemas solares térmicos con concentración es muy amplio**, extendiéndose a todos los procesos que requieran energía térmica dentro del amplio rango de temperaturas que estos sistemas pueden alcanzar. La aplicación comercial de los sistemas solares térmicos con concentración que más desarrollo ha alcanzado hasta la actualidad es la generación de electricidad mediante ciclos termodinámicos (Rankine principalmente).

La energía solar concentrada se transforma en energía térmica que alimenta el ciclo de potencia y se convierte en energía mecánica que se utiliza para accionar un generador eléctrico donde finalmente se produce la electricidad. Estos sistemas reciben el nombre de **Centrales Termosolares**. España es líder mundial en esta tecnología, con  $2,3 \text{ GW}_e$  de potencia total instalada y 50 centrales (Protermosolar, 2017). En la actualidad existen unos  $5 \text{ GW}_e$  de centrales termosolares en el mundo, y otros  $5 \text{ GW}_e$  están en construcción o promoción.

Puesto que el mayor interés ha estado en las centrales termosolares, la mayor parte del esfuerzo de I+D dedicado durante las dos últimas décadas dentro del campo de los sistemas solares térmicos de concentración se ha dirigido al desarrollo de este tipo de aplicación comercial, habiéndose dedicado menos esfuerzo a la otra gran aplicación comercial de este tipo de sistemas solares: las aplicaciones a procesos industriales que requieren energía térmica, lo que se conoce genéricamente como **Aplicaciones a Calor de Proceso** (*Solar Heat for Industrial processes*, **SHIP**, en inglés).

El desarrollo de las aplicaciones SHIP es de un gran interés en la actualidad, pues poseen un potencial comercial enorme, debido precisamente al amplio rango de temperaturas que los sistemas solares térmicos con concentración pueden suministrar. Este amplio rango de temperaturas permite considerar la aplicación de la tecnología a sistemas de climatización solar con máquinas de absorción, a industrias del sector de la alimentación, química, cerámica y metalúrgica, entre otras (Naegler et al, 2015).

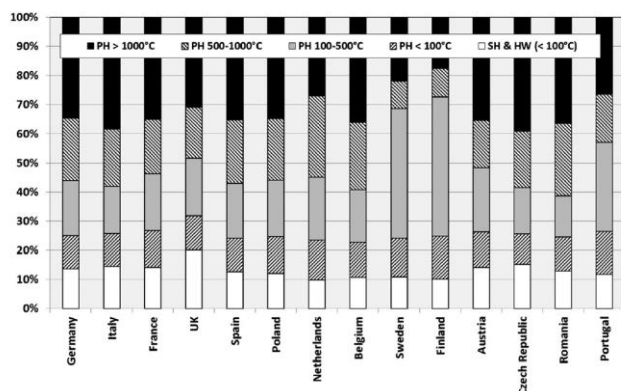
En el mundo, **más del 66% del consumo energético total en el sector industrial se dedica a procesos de calor industrial**, y el 50% de este consumo de energía térmica tiene lugar por debajo de los  $400^\circ\text{C}$ . Según datos de finales de 2015, un 40% del consumo industrial de energía primaria se surtió con gas natural y aproximadamente el 41% con petróleo (IEA-ETSAP, 2015). Esto significa que mirando al año 2030 existe un potencial



**Figura 1.** Relación entre el grado de concentración de la radiación solar, C, y la temperatura óptima de operación de un sistema solar con concentración (condiciones ideales).



técnico para suministrar alrededor de  $4,17 \cdot 10^6$  GWh de energía con sistemas solares térmicos (alrededor del 10% de la demanda energética industrial), mientras que el aporte de energía térmica de origen solar en el sector industrial podría alcanzar el 33%.



**Figura 2.** Distribución de niveles de demanda de energía térmica por temperatura en los 14 países de la UE mayores consumidores de calor en la industria, dispuestos de acuerdo al consumo total de energía para calor industrial (de izq. a derecha) (Naegler et al, 2015).

Existen importantes áreas de aplicación en el sector de la alimentación, textil, maquinaria y papel, donde en torno al 60% del consumo térmico puede ser suministrado a temperaturas inferiores a 250°C (GIZ, 2011). No obstante, hay también otros sectores de interés, como por ejemplo los sectores metalúrgico y cerámico que requieren temperaturas muy superiores a 400°C, donde los sistemas solares de alta concentración pueden trabajar sin problemas. Si se examina la demanda de energía por niveles de temperatura, las mayores economías europeas, entre las que se encuentra

España, tienen perfiles de demanda bastante similares, con más de un 48% de la demanda total de energía por encima de los 500°C (ver figura 2). Las penalizaciones cada vez más fuertes por las emisiones de gases de efecto invernadero por ejemplo, están empujando a estos procesos industriales a explorar alternativas energéticas a los combustibles fósiles.

A pesar del gran potencial comercial que existe para las aplicaciones SHIP, el número de instalaciones existentes es aún pequeño y se necesita un esfuerzo de I+D para que sean más rentables, competitivas y atractivas para los potenciales usuarios. Este tipo de sistemas solares aún representa una pequeña fracción del total de la capacidad solar térmica instalada en el mundo, pues a finales de 2014 había menos de 120 instalaciones solares para calor de proceso, con capacidad total de algo más de 40 MW<sub>t</sub> (ETP-RHC, 2014).

En España, el Plan de Energías Renovables PER 2011-2020 (IDAE, 2011) hace referencia a la importancia del desarrollo de aplicaciones en procesos industriales para producción tanto de calor como de frío, para poder cumplir sus objetivos para el 2020. Las barreras más importantes para el desarrollo comercial de las aplicaciones SHIP son, por un lado, que el 95% de las plantas industriales que consumen calor de proceso son pequeñas o medianas, lo que obliga a un diseño del sistema solar que resulte adecuado a este tamaño. Además, para industrias pequeñas o medianas la implantación de sistemas en los que la inversión inicial es grande, aunque los costes anuales de O&M sean pequeños, es normalmente una desventaja. Por último, la existencia de un cierto desconocimiento de las soluciones termosolares posibles y su funcionamiento, así como la escasez de suministradores de componentes y equipos fiables y duraderos, suponen una barrera importante en la actualidad para el desarrollo de Aplicaciones Solares a Calor de Proceso.

Una motivación para el proyecto propuesto es el hecho que los **sistemas solares para aplicación a calor de proceso pueden ser diseñados y comercializados por empresas pequeñas y medianas (Pymes)**, que son las que realmente impulsan la economía de España. Las centrales eléctricas termosolares, debido a su tamaño y coste, están fuera de las posibilidades de pymes de ingeniería y montaje, mientras que las aplicaciones solares a calor de proceso resultan asequibles a este tipo de empresas. Los objetivos propuestos en este proyecto supondrían un paso importante para el desarrollo de tecnología y soluciones que pueden ser comercializadas por pymes, no solo de España, sino de otros países que cuenten también con un buen nivel de radiación solar.

Para contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas para la aplicación de las tecnologías termosolares de concentración a procesos industriales, **se plantea el desarrollo de este proyecto que integra** varios frentes: **desarrollo de un nuevo captador solar** que pueda integrarse más fácilmente en los espacios generalmente disponibles en la industria, **estudio de mejoras y soluciones optimizadas a la integración de tecnología solar en procesos industriales, adecuación de dichas soluciones al funcionamiento en los entornos industriales, y selección e integración de dichos sistemas en varios procesos de**

**industrias concretas.** Otro de los retos importantes para el aporte de energía termosolar en la industria es el correcto acople entre la generación de origen solar y la demanda térmica de los procesos, por tanto: la **optimización en el diseño de los sistemas**, simulación de la producción energética anual a partir de datos meteorológicos del emplazamiento y la adecuada definición de los mecanismos de regulación de la operación del campo solar, incluso en presencia de transitorios de la radiación solar.

A continuación se detallan antecedentes y estado actual de los conocimientos para los componentes y actividades concretas que se abordarán en este proyecto.

- *Concentradores lineales Fresnel para generación de energía solar térmica*

Las opciones tecnológicas para campos solares pequeños y medianos (alrededor de 3-5 MW<sub>t</sub> o 1 MW<sub>e</sub>) difieren de las opciones para grandes centrales eléctricas termosolares. Entre otros aspectos, la opción de usar **captadores lineales Fresnel (CLF)** compactos puede resultar muy interesante, frente al uso de grandes captadores cilindroparabólicos (CCP), si el uso de terreno o superficie disponible para el campo solar está limitado. Si se compara a un CCP, la eficiencia óptica de un CLF es inferior (Morin, 2012), pero un CLF tiene un **diseño más simple**, utiliza **reflectores** y sistema de **seguimiento solar más económicos**, requiere **menos terreno** que un CCP para la misma potencia termodinámica, y tiene costes de instalación menores, por lo que en determinadas aplicaciones industriales y lugares puede resultar una solución más ventajosa que el uso de CCPs.

Los CLFs están formados por un conjunto de reflectores (espejos largos y delgados) que reflejan la radiación solar directa sobre un receptor elevado (ver figura 3), cuyo eje axial está situado a lo largo de la línea focal común de los reflectores, y por el que circula un fluido caloportador que recibe en forma de calor parte de la energía captada en el receptor. Normalmente los diseños incluyen un concentrador secundario en torno al receptor que permite re-direccionar hacia el receptor aquellos rayos solares que no lo interceptan directamente en la primera reflexión. Los reflectores que se utilizan en el concentrador secundario se encuentran expuestos a radiación solar concentrada (y, por consiguiente, a altas temperaturas), que son especialmente agresivas para su durabilidad y que pueden deteriorar la eficiencia del sistema en un periodo de tiempo relativamente corto. Aunque existen varios estudios sobre la durabilidad de los reflectores solares primarios (García-Segura et al., 2016), el único estudio conocido por este equipo sobre la durabilidad de reflectores secundarios ha sido llevado a cabo por este grupo de investigación (Fernández-García et al., 2014). En este estudio, se ha destacado la importancia de conocer para cada diseño que temperaturas alcanzan los **concentradores secundarios** durante la operación del sistema con el objetivo de seleccionar debidamente los materiales reflectores que puedan soportarlas manteniendo sus propiedades ópticas y, si es necesario, incorporar un sistema de refrigeración apropiado. Los tubos receptores para CLFs operan sin vacío para simplificar el sistema y reducir los costes. Esto implica que el absorbente debe ser estable en aire, por lo que no es posible el uso de los absorbentes selectivos desarrollados para los captadores planos para agua caliente sanitaria, debido a la elevada temperatura de trabajo o los tubos de vacío empleados en los CCPs de las centrales eléctricas termosolares, que tienen diseños no optimizados a la geometría de los diseños de CLF compactos.

Actualmente existen sistemas de CLF que utilizan tubos de vacío diseñados para CCPs de elevado coste (Soltigua, Italia) o recubrimientos absorbentes selectivos de bajas prestaciones ópticas y moderada durabilidad (Areva, Francia). Por estas razones, es necesario **desarrollar un absorbente selectivo, estable a media temperatura** (300-400°C) y **en condiciones sin vacío**, que presente buenas prestaciones ópticas y térmicas.

La Unidad de Sistemas Solares de Concentración (USSC) de la PSA tiene experiencia en el diseño y desarrollo de captadores solares lineales del tipo parabólico, y en el último año se ha comenzado también a trabajar en el estudio de soluciones para CLFs (Pulido et al, 2016).

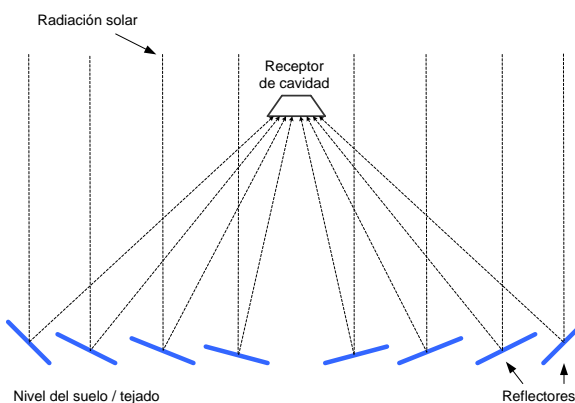


Figura 3. Captador solar lineal Fresnel.

- *Tecnología de torre central para aplicaciones industriales*

Aunque la tecnología termosolar de concentración que dispone de algunos ejemplos de aplicación a procesos de calor industrial (SHIP) es la tecnología de foco lineal (CCPs o CLFs), también existen numerosos procesos industriales que requieren temperaturas más elevadas ( $>400^{\circ}\text{C}$ ) y pueden ser alimentados por sistemas de torre central, como la industria del cemento (González and Flamant, 2014) y procesos con elevada demanda de vapor (AalborgCSP, 2017). Existen numerosos procesos industriales que trabajan a altas temperaturas donde la energía térmica se aporta con quemadores de combustibles fósiles, que pueden ser sustituidos por un receptor solar, permaneciendo el resto de la planta industrial casi sin cambios. Con la progresiva reducción del coste de sistemas solares de concentración, su aplicación a los procesos industriales térmicos será económicamente viable. **Los helióstatos representan el 40-50% del coste de una central solar de torre**, por lo que este componente, que es el encargado de reflejar la radiación solar directa sobre el receptor solar, debe ser de coste relativamente bajo para que el coste de la energía térmica de origen solar dada a la planta sea competitivo con el de los combustibles fósiles. Para lograr el objetivo de reducción de coste, se necesitan diseños y soluciones innovadoras del heliostato completo y sus componentes, que sigan en cualquier caso asegurando una adecuada calidad óptica y rigidez estructural. Además, las dimensiones de los helióstatos deben seleccionarse para minimizar los costes de fabricación y de instalación (Pfahl, 2017). El estudio de nuevos diseños de helióstatos está identificado como una necesidad para el desarrollo comercial de esta tecnología energética.

Para el sistema receptor, en una torre solar existen diferentes soluciones tecnológicas, dependiendo del ciclo de potencia o aplicación final que haga uso de la energía térmica generada en el receptor. **La tecnología de receptores volumétricos permite generar aire a temperaturas de hasta  $1000^{\circ}\text{C}$  y a presión atmosférica o presurizado**, que puede ser utilizado tanto para alimentar generadores de vapor para ciclos Rankine, como alimentar directamente ciclos Brayton u otros procesos industriales con necesidades de energía térmica de muy alta temperatura. Los receptores volumétricos son una opción prometedora que puede incrementar la eficiencia del receptor, al reducir las pérdidas frontales y trabajar a altas temperaturas. El primer volumétrico data del año 1983 y desde entonces se han realizado varios estudios para maximizar la eficiencia del receptor a altas temperaturas.

En el sistema receptor de un sistema de torre central, el área de captación (superficie de los reflectores de los helióstatos) es muy elevada frente al área de receptor, por lo que prima la absorción de la radiación solar incidente frente a las pérdidas térmicas por radiación. Por este motivo, el recubrimiento absorbente debe tener la máxima absorptancia solar, aunque se penalice la emitancia térmica. Este hecho, y la ausencia de absorbentes selectivos estables en aire a tan alta temperatura, han hecho que se hayan utilizado pinturas de alta temperatura como absorbentes para la captación de la radiación en los sistemas de receptor central, que presentan absorptancias entre 0,90 y 0,95, pero con emitancias térmicas en torno a 0,90 y durabilidad térmica y ambiental muy reducida, lo que hace que los receptores se deban repintar cada dos años.

En el proyecto DETECSOL (Ref.ENE2014-56079-R), se ha desarrollado un **absorbente selectivo estable en aire a  $700^{\circ}\text{C}$**  para sistemas de receptor central **sobre sustratos metálicos**, con muy buenas propiedades ópticas y elevada durabilidad térmica. Pero no hay investigaciones sobre la deposición de esta solución de absorbente sobre sustratos cerámicos para su uso en receptores volumétricos.

En el Laboratorio de recubrimientos ópticos de la Plataforma Solar de Almería (PSA) se preparan absorbentes mediante las técnicas sol-gel y dip-coating, que se caracterizan por su gran versatilidad y su bajo coste en comparación con la técnica de pulverización catódica, usada comercialmente para la preparación del 100% de los absorbentes solares selectivos.

Por otro lado, **las ventanas de cuarzo** se utilizan en los sistemas de receptor central para confinar receptores volumétricos con dos objetivos principales, por un lado **reducir las pérdidas en el infrarrojo (IR)** de los absorbedores debido a las altas temperaturas de trabajo y, por otro lado, poder **presurizar el absorbedor**, de manera que se puedan acoplar a ciclos de potencia más eficientes (ciclo Brayton), ambas características son inclusivas. El aumento de pérdidas por reflexión que se produce al utilizar estas ventanas de cuarzo, puede ser minimizado aplicando un **recubrimiento antirreflectante (AR)** sobre ambas caras de la ventana (Amsbeck, 2009). Ya que las ventanas instaladas en receptores solares



presurizados pueden alcanzar temperaturas de alrededor de 550°C cuando son refrigeradas o incluso más altas cuando no se refrigeran, con lo que estos recubrimientos no solo tienen que aumentar la transmitancia del cuarzo (minimizar la reflexión), sino que también deben presentar estabilidad térmica. Aprovechando la experiencia de la PSA en el desarrollo de recubrimientos AR sobre otro tipo de vidrios y para otros componentes solares, se ha desarrollado dentro del proyecto DETECSOL, un recubrimiento AR de SiO<sub>2</sub>, que permite aumentar la transmitancia del cuarzo más de un 4%. La **influencia de la contaminación ambiental y del ciclado térmico** que se produciría en operación de estos tipos de materiales, pueden producir un **deterioro de las propiedades ópticas no solo del AR, sino también del cuarzo** (Hertel et al, 2016). Por tanto, es necesario mejorar el desarrollo inicial para su aplicación a receptores volumétricos de sistemas de torre central.

Las condiciones de trabajo de un receptor de torre central son muy severas, tanto para materiales metálicos con altas prestaciones mecánicas como las superaleaciones de níquel y los materiales cerámicos. Además de elevadas temperaturas y presiones (en algunos casos, dependiendo de la tecnología de receptor), con fuertes y bruscos gradientes de temperatura, el material del receptor se ve expuesto a elevados flujos de radiación solar, y todo ello de forma cíclica. Es por tanto fundamental estimar la **durabilidad de los materiales utilizados en los receptores a lo largo de la vida útil de la planta**, para lo que se necesita información sobre el envejecimiento del material, es decir, conocer la evolución con el tiempo de uso de la microestructura del material y las condiciones de su superficie que determinan sus propiedades para unas condiciones similares a las condiciones reales de uso. Sin embargo, son pocos los estudios de este tipo de materiales a las temperaturas más elevadas típicas de esta aplicación (700°C) y todavía más escasos son los estudios que combinan temperatura y radiación solar concentrada, que genera de forma natural intensos gradientes térmicos que el material debe soportar de forma cíclica (Setien et al, 2014).

- *Adecuación y durabilidad de componentes para concentradores solares instalados en ambientes industriales*

Las instalaciones termosolares de concentración ubicadas en entornos industriales para el suministro de calor de proceso o para la cogeneración están expuestas a contaminación atmosférica que puede ser considerable. Este tipo de atmósferas puede interactuar con los reflectores de los concentradores primarios y afectar significativamente a su comportamiento. Por tanto, el estudio de los **fenómenos de ensuciamiento y degradación de dichos reflectores en tales ambientes industriales** es clave y concierne a la selección de los métodos de limpieza y tipo de reflector adecuados a la aplicación y emplazamiento final de la instalación, con el fin de evitar importantes pérdidas de eficiencia que conllevarían pérdidas económicas cuantiosas (García-Segura et al., 2016).

Por un lado, determinados **ambientes corrosivos** industriales (CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, Cl<sub>2</sub> e hidrocarburos) pueden degradar la capa reflectora (de plata o aluminio, principalmente), provocando una merma en sus propiedades ópticas (especularidad). Anteriormente, se han realizado algunos estudios sobre degradación de reflectores por gases contaminantes en condiciones aceleradas, pero no con la profundidad que el tema requiere (Coyle et al., 1982). Por esto, este equipo abrió una línea de investigación en el proyecto DETECSOL, en el que se realizaron estudios de durabilidad de reflectores primarios sometidos a atmósferas corrosivas, tanto en condiciones aceleradas en cámaras de envejecimiento como en condiciones reales a intemperie, en emplazamientos apropiados al estudio, incluyendo ambientes industriales de costa, industrial de interior, urbano de costa y urbano-rural de interior. Ahora se propone continuar con esta línea de investigación, ya que sus resultados son prometedores, y mientras que la actividad anterior se centraba en centrales termosolares cercanas o no a otros ambientes industriales, en esta ocasión se acota el estudio a instalaciones SHIP, con la exposición a atmósferas potencialmente contaminadas. Por otro lado, la **deposición de suciedad sobre la superficie de los reflectores** también es causante directa de una pérdida de specularidad. Aunque existen estudios acerca de la suciedad depositada en centrales termosolares instaladas en ambientes desérticos (Bouaddi et al., 2017), hasta la fecha ningún estudio se ha centrado específicamente en la **caracterización del tipo de suciedad existente en ambientes industriales y en los métodos de limpieza adecuados para su eliminación** de la superficie de los reflectores solares.

- *Integración de sistemas solares de concentración en industrias con demanda de energía térmica en rangos de la media y alta temperatura*

Pese a que la energía solar térmica ha sido utilizada en procesos industriales tanto en *baja* como en *media temperatura* desde los años 70, su uso no está aún en una etapa comercial. En España hay bastantes ejemplos de aplicación a baja temperatura, sobre todo para producción de agua caliente sanitaria a nivel residencial y en hoteles. Los ejemplos recientes de aplicaciones SHIP con CCPs están fuera de España, como por ejemplo dentro de la industria alimenticia, las plantas de Abengoa Solar situadas en la fábrica de Frito Lay en California (producción de maíz y patatas fritas) (2008) o la situada en Kraft Food en Brasil (zumos de frutas, galletas y dulces) desde 2012; plantas de apoyo a la minera El Tesoro (2012) o la minera Gaby Codelco (2013) ambas en Chile (Grágeda et al, 2016); o planta de GlassPoint en Oman para la recuperación mejorada de petróleo (Glasspoint, 2017).

No existe una herramienta comercial que permita realizar el modelado, la simulación dinámica y el control de campos solares de concentración lineal con captadores innovadores por lo que es imprescindible el uso de herramientas desarrolladas de forma individual. Esta es la principal razón de proponer continuar con el desarrollo de las herramientas que la PSA viene utilizando para estudios de simulación y control de algunos casos de aplicación industrial de la energía termosolar de concentración.

La USSC de la PSA tiene una amplia experiencia en el diseño tanto de campos solares con captadores lineales de concentración como con heliostatos, especialmente para centrales eléctricas termosolares, pero también dispone de experiencia en el diseño de campos solares acoplados a procesos industriales, como el trabajo realizado en el marco del proyecto hispano-portugués RITECA para el proceso de cocido del corcho (Biencinto et al., 2014). Actualmente se dispone de una **herramienta de simulación** ampliamente **desarrollada y verificada**, que permite simular el **comportamiento térmico e hidráulico de sistemas de concentración solar lineal**. Esta herramienta se ha usado en diferentes proyectos y servicios técnicos con empresas como Arenales Solar, Sacyr Industrial SL., Acciona Energía, FCC Energía, para la realización de estudios de producción de centrales termosolares con CCPs. La herramienta es suficientemente flexible y permite la modificación de la configuración (dimensiones, componentes) del sistema, las características (geométricas, ópticas, térmicas) del captador utilizado, el tipo de fluido caloportador, etc (Biencinto et al, 2014).

Por otro lado, la Unidad de Desalación (UDeS) de la PSA ha trabajado en el **modelado y simulación de sistemas de destilación multiefecto (MED) con bombas de calor** (eyectores de vapor y bombas de absorción) para su acoplamiento a sistemas de energía solar de concentración, constituyendo éste un ejemplo concreto y con mucho potencial futuro de aplicación de la tecnología. En el caso de plantas MED con eyectores de vapor (lo que se conoce como MED con termocompresión o MED-TVC), se ha trabajado en el estudio paramétrico de plantas MED-TVC para determinar la posición óptima del eyector de vapor que maximice la eficiencia energética de la planta y minimice el área específica de intercambio de calor requerida (Ortega-Delgado et al, 2016). A su vez, se ha trabajado en el desarrollo de modelos dinámicos de plantas MED-TVC con el propósito de simular comportamientos transitorios, desarrollar lazos de control y optimizar estrategias de acoplamiento en el caso de que estas plantas alimentadas con energía solar. Una línea de trabajo reciente ha sido la introducción de eyectores de área variable, cuya relevancia es significativa en esquemas de plantas MED-TVC con energía solar debido a la posibilidad de adaptar su operación a condiciones ambientales variables sin que ello suponga una pérdida de eficiencia (Ortega Delgado, 2016). En el caso de plantas MED con bombas de absorción (MED-ABS), la UDeS ha contribuido significativamente a la evaluación experimental de este tipo de sistemas con el objeto de determinar los puntos de operación óptimos (Alarcón-Padilla et al, 2007) y de identificar nuevas estrategias de control que mejoren el comportamiento del sistema (Palenzuela et al, 2014). La integración de plantas de destilación multiefecto en esquemas de cogeneración con ciclos de potencia Rankine y Brayton (aire presurizado generado en sistema de torre central con receptor volumétrico) es también una de línea de trabajo de la UDeS (Palenzuela et al, 2015; Sadat et al, 2016). La integración de todos estos modelos ha permitido la simulación tanto de plantas CSP-CCP+MED como CSP-Torre Central+MED con el objetivo de realizar análisis técnico-económicos que permitan establecer la mejor configuración en diferentes escenarios.

### C.1.2. Hipótesis de partida y objetivos generales

Estudios como el recogido en el informe de “Evaluación del potencial de la energía solar térmica en el sector industrial en el periodo 2011-2020”, realizado por el IDAE, prevén importantes reducciones tanto en las emisiones de gases de efecto invernadero como en el consumo de combustible fósiles, con el uso de fuentes de energía sostenible y limpia, como la energía solar, en el ámbito de los procesos industriales. Teniendo en cuenta estas predicciones, el objetivo de este proyecto es abordar la aplicación de la energía solar de concentración desde varias perspectivas, que incluyen tanto el desarrollo de nuevos componentes para sistemas solares térmicos de concentración, como estudios de integración en distintos procesos industriales reales.

Para ello, se trabajará a nivel multidisciplinar, con los siguientes objetivos generales dirigidos a buscar soluciones tecnológicas técnicamente viables, adecuadas para su integración en entornos industriales, y optimizadas para las aplicaciones SHIP:

- **Desarrollo** de un sistema solar basado en un **captador solar lineal Fresnel compacto, apto para** aplicaciones a calor de proceso de **pequeña y mediana potencia** (<5 MW<sub>t</sub>), para suministro de energía **a temperaturas inferiores a 300°C**, que incluye el desarrollo de un recubrimiento absorbente optimizado y de bajo coste, desarrollo optimizado de la geometría de receptor con reflector secundario, y el análisis del comportamiento de los materiales utilizados como reflectores primarios en ambientes industriales.
- Estudio de la **integración del sistema Fresnel** desarrollado en **procesos térmicos** de aplicaciones concretas, para el suministro de calor y frío **en una industria alimenticia** y, por otro lado, para el aporte de energía térmica a una **planta desaladora MED-TVC**.
- **Desarrollo de soluciones** para los componentes de un sistema de torre **para el concepto “multitorre”**, que incluye desarrollo de dos nuevos **diseños de heliostato innovadores**, desarrollo de **recubrimientos para absorbedores volumétricos**, estudio de mejoras (**recubrimiento AR para ventana de cuarzo**), y **análisis de durabilidad de materiales** para el receptor a temperaturas de 700°C.
- Estudio de soluciones para la **integración de una planta desaladora MED a un ciclo de potencia Brayton termosolar alimentado con un sistema “minitorre”**.

### C.1.3. Objetivos específicos

Para contribuir al desarrollo de soluciones de aprovechamiento eficiente de la energía solar térmica concentrada para su utilización como fuente energética en procesos industriales o de cogeneración, este proyecto aborda los objetivos específicos:

#### ***Estudio y desarrollo de recubrimientos y materiales utilizados en receptores solares para sistemas termosolares con captadores lineales Fresnel y heliostatos.***

- Desarrollo de un absorbente selectivo de tres capas con absorptancia solar superior a 0,95 y una emisividad inferior a 0,10 a 350°C, estable en aire hasta 350°C, para su aplicación al receptor multitubular para el captador lineal Fresnel que se desarrollará.
- Desarrollo de dos absorbentes para receptores de sistemas de torre central:
  - Un absorbente selectivo, estable en aire a alta temperatura (700°C) sobre sustratos cerámicos como alúmina y carburo de silicio, incluyendo el desarrollo de un volumétrico compuesto por una parte exterior reflectora IR y otra parte interior selectiva.
  - Un absorbente no selectivo para reemplazar a las pinturas negras empleadas en ciertos receptores volumétricos. Este absorbente está compuesto de una base de alúmina y un pigmento de elevada absorción solar, como las espinelas de manganeso, cobalto y cobre, empleadas en el resto de absorbentes solares.
- Estudio de utilización de un recubrimiento antirreflejante (AR) sobre ventanas de cuarzo, utilizadas en receptores volumétricos, en particular análisis de la durabilidad del recubrimiento AR sobre cuarzo tanto en ensayos de laboratorio como en un banco de ensayos con simulador solar. Para ello se partiría del recubrimiento con mejores propiedades ópticas desarrollado en el proyecto DETECSOL sobre cuarzo.
- Estudio de la evolución temporal de la microestructura y condiciones de la superficie de materiales metálicos para receptores de sistemas de torre central a temperaturas elevadas (700°C) y alto flujo de radiación solar en condiciones cíclicas.



***Estudio del comportamiento de los concentradores solares en entornos industriales.***

- Estudio de materiales reflectores y optimización de los mismos para su utilización como concentradores solares primarios en entornos industriales con atmósferas corrosivas.
- Análisis de la suciedad que se acumula en los materiales reflectores de los concentradores primarios como consecuencia de su exposición en ambientes industriales y determinación de los métodos de limpieza más adecuados para su eliminación.

***Diseño y desarrollo de un concentrador lineal Fresnel compacto para aporte de energía térmica hasta 300°C.***

- Diseño de un prototipo de captador lineal Fresnel (CLF) compacto de apertura aproximada 4mx10m.
- Optimización del diseño atendiendo a criterios de inclinación, altura del receptor, geometría del receptor multi-tubular (diámetro de tubo y número de tubos en la parrilla).
- Estudio numérico del comportamiento óptico y térmico del diseño optimizado.
- Diseño y optimización del concentrador secundario para el CLF compacto.
- Construcción y evaluación experimental del prototipo de CLF compacto desarrollado, y determinación de sus parámetros ópticos y térmicos característicos de acuerdo a los estándares de ensayo para concentradores solares con seguimiento solar ISO9806:2013 y ASTM E905-87(2013).

***Diseño y desarrollo de dos soluciones de heliostato compactos para integración en sistema de torre central.***

- Desarrollo de un prototipo de heliostato de óptica autoalineada (Monterreal et al, 2014), en el que la distancia focal es conferida al heliostato por la estructura soporte y no por la superficie reflectante, adaptándose ésta a la forma de dicha estructura.
- Mejora de la eficiencia de los campos de heliostatos mediante el diseño de un prototipo de heliostato de reflexión no divergente (se intentará patentar la invención en el transcurso del proyecto), reduciendo de esta forma el desbordamiento de la radiación solar en las inmediaciones del receptor solar situado en la torre.

***Estudio de la aplicación de sistemas termosolares tipo Fresnel lineales (CLF) y puntuales (sistema de torre con campo de heliostatos) a diferentes procesos: Casos de estudio.***

- Definición y simulación de un campo solar con CLFs compactos acoplado a una industria alimenticia que requiere energía térmica en forma de vapor a temperaturas inferiores a 200°C.
- Definición, simulación y estudio de aplicación de la tecnología CLF a plantas desaladoras MED-TVC y MED-ABS.
- Definición, simulación y estudio de aplicación de la tecnología de torre central con receptor volumétrico a un proceso de cogeneración que utiliza el calor residual para la alimentación de una planta MED (baja temperatura LT-MED y con termocompresión MED-TVC).

Estos **objetivos** se adecúan al reto nº3 identificado en la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación: “Energía segura, eficiente y limpia”, así como también al reto nº5 “Acción sobre el cambio climático y eficiencia en la utilización de recursos y materias primas” y a una de las Tecnologías Facilitadoras Esenciales definidas también en el artículo 16 de la convocatoria: **materiales avanzados**.

Las **actividades** que se plantean desarrollar en el proyecto también están **alineadas con las iniciativas de I+D** que se promueven en Europa para la promoción de aplicaciones **SHIP**, por ejemplo a través de la financiación de proyectos de investigación conjuntos entre los diversos estados miembros de la UE como es el caso del proyecto INSHIP “*Integrating National Research Agendas on Solar Heat for Industrial Processes*” (H2020-LCE-2016-ERA. GA: 731.287) en el que este equipo de investigación participa.

Además, **el proyecto** en su conjunto pretende fortalecer la investigación conjunta de carácter interdisciplinar entre todos los investigadores de la Unidad de Sistemas Solares de Concentración y de la Unidad de Desalación de la Plataforma Solar de Almería (PSA): investigación en materiales (nuevos materiales y análisis de durabilidad de

otros ya utilizados en sistemas solares de concentración); configuración y optimización de sistemas para la generación de energía térmica; modelado, simulación y experimentación de nuevas soluciones; y aplicación de la tecnologías termosolares de concentración a procesos industriales, en particular a procesos de desalación. Se pretende así **favorecer la coordinación de las actividades y fortalecer la investigación aplicada que se realiza en estas dos Unidades de investigación** de la PSA.

#### C.1.4. Metodología

##### ***Actividad 1. Diseño y desarrollo de un captador lineal Fresnel compacto para aporte de energía térmica hasta 300°C.***

###### Tarea 1.1. Diseño básico y optimización de la geometría de un captador lineal Fresnel (CLF) compacto.

Para la el diseño de la geometría optima del prototipo de CLF compacto se utilizará un modelo de simulación mediante trazado de rayos que utiliza técnicas de Monte Carlo y está implementado en entorno Matlab®, y que ha sido desarrollado en la PSA (Serrano-Aguilera et al, 2016). La herramienta ha sido contrastada con otras herramientas de simulación óptica mediante trazado de rayos, como el software Tonatiuh (Blanco et al, 2005).

En el proceso de optimización de la geometría y configuración del captador (número de filas, anchura del reflector, longitud del reflector, separación entre filas, altura del receptor sobre el plano formado por el conjunto de reflectores primarios, etc.), se realizará un análisis energético de la potencia solar incidente en el receptor solar, considerando una ubicación geográfica en el sur de España y datos meteorológicos tipo para esta localización.

###### **HITOS:**

1. Definición de geometría optima del prototipo CLF compacto (M6)

###### Tarea 1.2. Estudio del concentrador secundario.

Se desarrollará un modelo óptico y térmico del concentrador secundario del CLF para simular sus condiciones reales de operación. El modelo óptico, basado en el método de trazado de rayos, permitirá determinar el perfil de flujo incidente en el concentrador secundario para una ubicación representativa. El modelo térmico se implementará mediante un programa de computación fluido-dinámica (CFD) que utilizará como parámetro de entrada el perfil de flujo de radiación, previamente determinado, y dará como salida el perfil térmico en el concentrador secundario para las condiciones de operación representativas.

Una vez calculada la temperatura de operación a la que estarán sometidos los materiales reflectores del concentrador secundario durante su operación, se identificarán y adquiriran aquellos materiales reflectores (tanto comerciales como prototipos) que sean susceptibles de soportar dichas condiciones sin sufrir un deterioro significativo a lo largo del tiempo. A continuación, se diseñará y ejecutará una campaña de ensayos en cámaras climáticas, en la que se reproducirán de forma acelerada las condiciones de operación de los concentradores secundarios, con especial atención a la radiación solar concentrada y a la consiguiente temperatura de trabajo. El diseño experimental se realizará en base a las conclusiones obtenidas en los ensayos previos realizados. En función de los resultados obtenidos, se seleccionará el material más adecuado para el concentrador secundario y se utilizará para la fabricación del prototipo de CLF compacto. Finalmente, los resultados teóricos desarrollados sobre el comportamiento del secundario se verificará durante la campaña de evaluación de dicho prototipo gracias a la incorporación de instrumentación para monitorizar el perfil de temperaturas en el secundario durante la operación del sistema.

El equipo de trabajo e investigación tiene una amplia experiencia en el desarrollo del tipo de modelos de simulación descritos. En cuanto a las posibles dificultades que puedan aparecer, se ha identificado la posibilidad de que tras la realización de los ensayos acelerados se concluya que no existen materiales comerciales que puedan soportar las temperaturas de trabajo objetivo. En este caso se procederá a diseñar un sistema de refrigeración que permita trabajar por debajo de las máximas temperaturas admisibles por los materiales.

###### **HITOS:**

1. Perfil de temperaturas en el concentrador secundario y estudio de resultados (M12).
2. Ensayos en condiciones aceleradas realizados (M18) y análisis de resultados (M24).
3. Comparación de resultados numéricos del perfil de temperaturas en el concentrador secundario con los resultados de la campaña experimental (M48).

**Tarea 1.3. Desarrollo de un recubrimiento selectivo para el receptor solar del CLF compacto.**  
En el CIEMAT, se ha desarrollado un absorbente selectivo sobre tubos de acero AISI 321 que presenta una absorptancia solar de 0,955 y una emitancia térmica a 250°C de 0,13. Su estabilidad térmica en aire es de 350°C. Este absorbente consta de dos capas (figura 4).

El propio acero inoxidable se usa como reflector infrarrojo (IR), por lo que la emitancia térmica es elevada. Se utilizará una capa metálica adicional como reflector IR de cromo o aluminio, para reducir la emitancia térmica del absorbente a valores inferiores a 0,10 a 350°C. El cromo se deposita fácilmente por electrodeposición y para el aluminio se pueden emplear tubos bimetálicos comerciales que constan de un núcleo de acero y un tubo exterior de aluminio de elevada pureza.

SiO <sub>2</sub>
MnCoCuOx
AISI 321

**Figura 4.** Estructura de absorbente selectivo para aplicación a receptores solares para uso < 300°C.

#### *Preparación de los absorbentes.*

En el Laboratorio de tecnología de recubrimientos ópticos de la PSA se han desarrollado, durante los últimos 20 años, diferentes absorbentes solares para las múltiples aplicaciones de la energía solar térmica, mediante las técnicas sol-gel y dip-coating. El procedimiento es sencillo: el sustrato a recubrir se extrae de esta solución a velocidad constante, quedando una fina película adherida. Finalmente, se realiza un tratamiento térmico para obtener la densificación de la película. Ambas técnicas son fáciles de implementar a escala industrial. Se necesita un dispositivo para extraer los sustratos y un horno para el sinterizado. La temperatura de sinterización depende del material y la aplicación, siendo recomendable un mínimo de 400°C. Son técnicas de deposición indicadas para sustratos planos, tubos y, generalmente, para piezas de formas complicadas con simetría de revolución. Esta experiencia nos permitirá abordar el desarrollo de un absorbente solar de elevadas prestaciones ópticas para el receptor del CLF.

#### *Técnicas de caracterización*

La caracterización óptica del absorbente selectivo implica la determinación de la absorptancia solar y la emitancia térmica. Para el cálculo de la absorptancia solar se medirá la reflectancia hemisférica, en el rango solar entre 0,3 y 2,5 micras, con un espectrofotómetro dotado con esfera integradora. Para el cálculo de la emitancia térmica se medirá la reflectancia hemisférica, en el infrarrojo térmico entre 2,5 y 25 micras, con un espectrofotómetro IR de transformada de Fourier dotado con esfera integradora de oro. La caracterización microestructural se realiza mediante Microscopía electrónica de barrido (SEM) y la composición química mediante Microscopía de Electrones Auger y Espectroscopia Electrónica para Análisis Químico (ESCA), disponibles en el CIEMAT.

#### *Ensayos de durabilidad*

El estudio de la durabilidad del absorbente solar requerirá de los siguientes ensayos:

- ensayos de durabilidad térmica a 400°C en aire para evaluar la degradación del absorbente por corrosión/oxidación del sustrato y/o difusión entre capas. Los ensayos se realizarán en un horno de convección natural en aire. Las muestras se extraerán periódicamente y se calcularán propiedades ópticas y, si se producen variaciones, se realizará un estudio mediante SEM para estudiar cambios microestructurales y mediante Microscopía Auger para estudiar cambios de composición química y difusión entre capas.
- ensayos de durabilidad ambiental en cámara climática. Se realizarán ciclos alternos de condensación, temperatura y radiación ultravioleta.

#### *HITOS:*

1. Desarrollo de un recubrimiento selectivo optimizado para CLF (M20)

#### **Tarea 1.4. Diseño de detalle, construcción y ensayo del prototipo de CLF compacto.**

En esta tarea se finaliza el diseño y se realizará la construcción, puesta en marcha y ensayo del prototipo de CFL compacto, considerando los resultados de las tareas 1.1, 1.2 y 1.3.

Durante los dos primeros años de proyecto se realizará el diseño mecánico del CLF, la selección de materiales para la estructura soporte, se trabajará en el diseño optimizado del conjunto receptor, incluyendo el concentrador secundario, teniendo en cuenta los resultados de los desarrollos que se realicen en las tareas 1.2 y 1.3, se estudiarán las soluciones para la construcción y ensamblaje de los reflectores primarios a la estructura soporte del concentrador primario, y el estudio de soluciones efectivas para el sistema de seguimiento solar. Durante el segundo año también se iniciará el acopio de materiales para el prototipo.

La construcción del prototipo se comenzará en el tercer año, y se situará en un lazo de ensayos de captadores solares con agua presurizada (máximo @ 30bar/230°C) de la PSA. Por último, durante el cuarto año de proyecto se realizará una campaña de ensayos intensiva para la caracterización óptico-térmica del prototipo CLF compacto siguiendo las metodologías de los estándares de ensayo ISO9806:2013 y ASTM E905-87 para captadores solares térmicos, con objeto de determinar los parámetros ópticos (rendimiento y modificadores por ángulo de incidencia longitudinal y transversal) y térmicos. Además, la monitorización continua del prototipo permitirá contrastar resultados numéricos del comportamiento de los reflectores primarios, concentrador secundario, comportamiento térmico y mecánico del receptor, etc.

**HITOS:**

1. Diseño mecánico detallado para la construcción del prototipo de CLF (M12)
2. Construcción del prototipo de CLF (M36)
3. Ensayo y evaluación del comportamiento mecánico, óptico y térmico del CLF (M48)

**Tarea 1.5. Estudio del comportamiento de los reflectores utilizados en el concentrador primario en entornos industriales.**

Se identificarán y seleccionarán materiales reflectores solares comerciales. Por un lado, se considerarán los reflectores de plata-vidrio de segunda superficie, por ser los que tienen mayor presencia en cualquier tipo de planta termosolar debido a su alta reflectancia solar (>0,93-0,94 dependiendo del grosor) y durabilidad. Por otro lado, se considerarán también reflectores de aluminio de primera superficie, que ya han sido utilizados en CCPs de pequeño tamaño para aplicaciones SHIP, debido a que sus propiedades mecánicas permiten moldearlos en la forma y tamaño deseados.

- Los ensayos de ambientes corrosivos en cámaras de envejecimiento acelerado serán diseñados de manera que se contemple una casuística amplia de condiciones (temperatura, humedad relativa, concentración de los diferentes gases). El diseño experimental se hará teniendo en cuenta la normativa existente y la experiencia previa con materiales reflectores u otro tipo de materiales. Tras los experimentos, se evaluarán los resultados en el Laboratorio de análisis de reflectores de la PSA.

- Los ensayos en condiciones reales a intemperie se realizarán en paralelo, para obtener datos de la corrosión y de la deposición de suciedad en ambientes industriales. Los distintos materiales se expondrán en emplazamientos industriales representativos y se evaluarán periódicamente para determinar los mecanismos de degradación y de ensuciamiento. Además, estos ensayos servirán como validación del diseño experimental en condiciones aceleradas, para establecer un protocolo de ensayos acelerados que permita evaluar la degradación de los materiales reflectores en periodos más reducidos. En el caso de los fenómenos de ensuciamiento, se analizarán los depósitos acumulados durante la exposición a intemperie para determinar que métodos de limpieza serían más adecuados.

El laboratorio de análisis de reflectores solares de la PSA cuenta con una amplia experiencia en la realización de ensayos de durabilidad, así como en medida de ensuciamiento y estudios de limpieza. En relación a las posibles dificultades que puedan surgir, puede ocurrir que durante la exposición a intemperie de las muestras de reflectores, éstos no muestren signos de degradación. Para mitigar dicha dificultad, además de muestras de reflectores originales, se expondrán muestras con cierto deterioro previo en las capas protectoras para potenciar el contacto de los gases corrosivos y acelerar los procesos de corrosión.

**HITOS:**

1. Materiales expuestos a intemperie (M6).
2. Ensayos en condiciones aceleradas realizados (M36).
3. Evaluación de los métodos de ensayo en condiciones aceleradas más representativos de los mecanismos de degradación de reflectores en entornos industriales (M48).
4. Estudio de los tipos de suciedad representativos de los entornos industriales y de los métodos de limpieza adecuados para su eliminación (M45).

***Actividad 2. Diseño y desarrollo de dos soluciones de heliostato compactos para integración en sistema de torre central.***

Los objetivos específicos de esta actividad son el desarrollo de dos heliostatos innovadores, por un lado un *heliostato de óptica autoalineada*, en el que la focal característica del heliostato es conferida por la estructura soporte y por el reflector, que en este caso se



adapta a la estructura, y por otro lado, un diseño de *heliostato de reflexión no divergente* que permita aumentar la eficiencia de un campo completo de heliostatos, reduciendo el desbordamiento de la radiación solar en las inmediaciones del receptor central. Para el desarrollo de estas dos vías de trabajo, se plantean dos tareas:

#### Tarea 2.1. Desarrollo de soluciones para heliostato de óptica autoalineada.

Se desarrollará una faceta vidrio/metal que sea fácilmente ajustable a la estructura soporte del heliostato, siguiendo el siguiente cronograma de subtareas:

1. Ensayos de durabilidad de la unión vidrio/metal (M12)
2. Construcción de facetas prototipo a tamaño real y análisis de durabilidad (M24)
3. Construcción de facetas para un prototipo de heliostato de 40 m<sup>2</sup> de superficie reflectante (M36).
4. Evaluación del prototipo de heliostato de óptica autoalineada y resultados (M48).

#### Tarea 2.2. Desarrollo de un heliostato/faceta de reflexión no divergente.

En esta tarea se plantea trabajar en:

1. Análisis y simulación óptica de las alternativas factibles de ser empleadas en la colimación de la radiación solar concentrada mediante técnicas de recubrimientos intermedios de índice de refracción variable (M12)
2. Diseño y fabricación de prototipos de facetas de reflexión no divergente (M28)
3. Ensayos del comportamiento óptico de dichas facetas que se instalará en el prototipo de heliostato de óptica autoalineada y generación de resultados (M45).

### ***Actividad 3. Desarrollo de recubrimientos para receptores volumétricos de sistemas de torre central y estudio del comportamiento de materiales base para receptores en condiciones reales de operación***

#### Tarea 3.1. Desarrollo de dos recubrimientos selectivos para receptores volumétricos.

La metodología que se seguirá para el desarrollo de dos recubrimientos estables en aire, selectivo y no selectivo (con base de alúmina y pigmento de elevada absorción solar), adecuados para su utilización en receptores volumétricos para sistemas de torre central será similar a la planteada en la Tarea 1.3, pero con el objetivo del desarrollo y ensayo de durabilidad de las soluciones para temperaturas de 700°C y el estudio de técnicas de aplicación del recubrimiento a las geometrías que se utilizan en receptores volumétricos.

**HITOS:**

1. Desarrollo de recubrimiento selectivo para su aplicación sobre SiC (M24)
2. Estudio y mejora de durabilidad del recubrimiento selectivo para uso sobre SiC (M36)
3. Desarrollo de un absorbente no selectivo para aplicación a ciertas geometrías de receptores volumétricos (M36).

#### Tarea 3.2. Estudio de la estabilidad y durabilidad de un recubrimiento AR para ventanas de cuarzo de receptores volumétricos.

Se estudiará la durabilidad del recubrimiento AR sobre cuarzo tanto en ensayos de laboratorio como en un banco de ensayos con simulador solar. En condiciones de operación, estos materiales sufren ciclados térmicos, cambios bruscos de temperatura, y contaminación ambiental, que pueden degradar sus propiedades ópticas. Para ello se partirá del recubrimiento con mejores propiedades ópticas desarrollado en el proyecto DETECSOL sobre cuarzo. La metodología seguida será:

- Preparación de recubrimientos del AR sobre cuarzo, en las condiciones optimizadas, tanto en muestras planas rectangulares, de al menos 7x4 cm (que permite realizar la caracterización de la muestra) así como muestras circulares de 6cm de diámetro, para ensayar en banco con simulador solar.
- Estudio de la durabilidad de los recubrimientos rectangulares en hornos, realizando ensayos de ciclado térmico. Asimismo, se realizará también en horno el estudio de la posible degradación por choque térmico. También, se estudiará el efecto de las altas temperaturas con presencia de partículas tipo polvo, arena, que pueden actuar como centro de nucleación que promueva la formación de cristales en la superficie, degradando el recubrimiento. La contaminación ambiental es un proceso natural que se da en condiciones de operación, que por efecto de cargas de viento facilita el impacto de partículas presentes en el aire sobre la superficie de la ventana.

- Estudio de las ventanas de cuarzo con recubrimiento AR en un banco de ensayos con simulador solar, para evaluar el efecto de la radiación solar concentrada.

Para todos los ensayos, tanto de muestras rectangulares como circulares, se usará como factor de degradación la transmitancia solar. Asimismo, las muestras serán analizadas por microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X, para identificar defectos, cambios en composición, aparición de cristales, etc.

Según los resultados que se obtengan en los distintos ensayos, nuevas formulaciones para la preparación de películas serán investigadas para mejorar la durabilidad de las mismas.

#### **HITOS:**

1. Preparación de recubrimientos AR sobre cuarzo para ensayo en laboratorio (M12).
2. Ensayos de ciclado térmico y evaluación de recubrimientos AR en muestras de cuarzo en horno (M24).
3. Ensayos de recubrimientos AR sobre ventanas de cuarzo en simulador solar y evaluación de resultados (M45).

#### **Tarea 3.3. Estudio de la influencia de las ventanas de cuarzo en el comportamiento termodinámico de receptores volumétricos.**

Para completar el estudio de los beneficios de la utilización y posible mejora del comportamiento termodinámico de un receptor volumétrico, en esta tarea se analizará la influencia sobre un absorbedor volumétrico de la presencia de una ventana de cuarzo sin y con el recubrimiento AR desarrollado en la tarea 3.2 (funcionando con aire atmosférico). Para ello se preparará un dispositivo experimental en el simulador solar disponible en el Laboratorio de materiales porosos de la PSA.

##### *Desarrollo de sistema colimador para simulador solar de 7 kW*

Se plantea desarrollar una mejora de la instalación del Laboratorio de materiales porosos, para el diseño e instalación de un sistema colimador para una lámpara de Xenón de 7 kW cuyo objeto es conseguir radiación colimada y un perfil de radiación cuasi-homogéneo.

Los simuladores solares que son ampliamente utilizados para reproducir características similares a los sistemas ópticos de concentración y al espectro solar, presentan una distribución de flujo tipo gaussiana con una marcada zona de flujo máximo en el centro y un fuerte descenso del flujo incidente en las colas de la gaussiana. Además, estos simuladores solares se utilizan para multitud de aplicaciones en la tecnología termosolar, pero debido a la curva gaussiana típica de este tipo de simuladores se hace irrealizable una óptima evaluación de los posibles elementos que pueden evaluarse en estos dispositivos, por el gran gradiente de flujo existente, que no permite trabajar en condiciones homogéneas. Así, el desarrollo de un homogeneizador de flujo o colimador permitirá transformar esta curva gaussiana con un flujo pico muy alto en el centro y muy bajo en las colas, en un flujo cuasi-plano, con una radiación homogénea tras colimar la radiación (a costa de reducir la radiación saliente del colimador en aproximadamente un 50% debido a las pérdidas ópticas). Se diseñará y optimizará, mediante herramientas de trazado de rayos, un colimador optimizado ópticamente, que se instalará en un simulador solar de 7 kW. Tras ello, se verificará, mediante el uso de radiómetros, el flujo antes y después de instalar el colimador para verificar su diseño y poder usar el sistema en futuras aplicaciones, en particular en el ensayo y estudio de las soluciones para receptores volumétricos de este proyecto.

#### **HITOS:**

1. Desarrollo de un sistema colimador para una lámpara Xenón de 7 kW (M24)
2. Ensayo y evaluación de la influencia termodinámica en un receptor volumétrico de una ventana de cuarzo sin y con recubrimiento AR (M45).

#### **Tarea 3.4. Estudios de envejecimiento de materiales metálicos para receptores de sistemas de torre central.**

En esta tarea se estudiará el envejecimiento de los materiales utilizados en receptores de torre, es decir la evolución con el tiempo de uso de su microestructura y las condiciones de su superficie en ensayos a temperaturas de operación típicas de esta aplicación (700°C) en combinación con radiación solar concentrada de forma cíclica.

El material elegido será una superaleación de níquel con geometría tubular utilizada típicamente en los proyectos comerciales. De las muestras de material original se extraerán muestras de dimensiones adecuadas para su envejecimiento y caracterización.



Se plantea realizar tres tipos de ensayos de envejecimiento, sacando muestras a distintos tiempos para la caracterización de su microestructura y superficie:

- En condiciones isotermas a 700°C. Para ello se utilizarán hornos mufla.
- En condiciones cíclicas que simulen los transitorios del receptor. Se utilizarán hornos tubulares también disponibles en la PSA.
- Con radiación solar concentrada en condiciones cíclicas. Para realizar los ensayos con elevado flujo de radiación y durante tiempo prolongado se usará un disco parabólico.

En los ensayos en el disco, con radiación concentrada, se plantea alcanzar 500 h de ensayo durante el proyecto. En los ensayos de envejecimiento que utilizan hornos de laboratorio será más fácil acumular más tiempo de envejecimiento.

Una vez envejecido el material, se prepararán secciones metalográficas para estudiar la microestructura de las muestras a distintos tiempos de envejecimiento para cada tipo de ensayo: isotermo, cíclico y cíclico con radiación solar. Para el estudio de la microestructura se utilizarán técnicas microscópicas (óptico, confocal, y microscopía electrónica) y de análisis químico (microanálisis EDX) sobre las secciones del tubo preparadas. También se estudiará la superficie externa del tubo para determinar la influencia de la radiación solar concentrada en las propiedades ópticas del material.

La comparación entre los resultados obtenidos para los tres tipos de ensayos de envejecimiento, teniendo en cuenta también la información disponible en la bibliografía, permitirá determinar los factores más agresivos para el tipo de material seleccionado, así como detectar posibles sinergias entre ellos. La información que se obtenga con el desarrollo de este proyecto será de gran utilidad para estimar la durabilidad de receptores fabricados con la aleación seleccionada.

#### **HITOS:**

1. Ensayo de aleaciones de níquel en condiciones isotermas a 700°C y estudio de la evolución de su microestructura y superficie (M36).
2. Ensayo aleaciones de níquel en condiciones cíclicas con una temperatura máxima de 700°C y estudio de la evolución de su microestructura y superficie (M45).
3. Ensayo de aleaciones de níquel bajo radiación solar concentrada para una temperatura de trabajo de 700°C y estudio de la evolución de su microestructura y superficie (M45).

#### **Actividad 4. Análisis de la integración de sistemas tipo Fresnel en procesos industriales. Casos de estudio.**

##### Tarea 4.1. Integración de un sistema con CLFs compactos en una industria del sector de alimentación y bebidas.

Se analizarán dos posibilidades de integración en una industria del sector de alimentación y bebidas de un campo solar utilizando el CLF compacto, para lo que se utilizará la herramienta desarrollada por este equipo de trabajo en el entorno TRNSYS, cuya librería de componentes se completará con los elementos adecuados para hacer los estudios que se plantea en este proyecto. Para el campo solar será necesario adaptar el software, ya disponible, considerando las características del CLF compacto. Para el proceso industrial, será necesario evaluar si se dispone de todos los elementos necesarios para modelar el proceso industrial seleccionado o si es necesario adaptar o desarrollar algún componente específico. Una vez seleccionados los procesos industriales de una industria:

- se determinarán aquellos más adecuados para ser alimentados con el campo solar y se estudiará el punto de los procesos más convenientes para aportar la energía térmica de origen solar;
- se procederá al dimensionado del campo solar con CLFs y desarrollo del modelo;
- y se realizará una simulación anual y análisis de resultados y orientación hacia nuevos procesos industriales

#### **HITOS:**

1. Análisis de los procesos industriales a estudiar (M24).
2. Modelo de simulación del campo con CLF compacto integrado en la industria (M36).
3. Informe final de resultados de producción energética anual y orientación hacia nuevos procesos industriales (M45).

#### Tarea 4.2. Integración de un sistema con CLFs compactos a una planta de destilación multiefecto con eyectores de vapor.

##### *Modelado y validación de eyectores de vapor de área variable*

Dado el gran interés que tiene la desalación en países que poseen un alto nivel de radiación solar, en esta tarea se abordará el desarrollo de modelos físicos cuasi-dinámicos de eyectores de vapor de área variable para su aplicación en plantas desaladoras acopladas a sistemas termosolares sometidos a variabilidad del recurso solar.

La validación de dichos modelos será posible a partir de campañas experimentales que tendrán lugar en la instalación de ensayos de eyectores de la PSA. Se dispone de un banco de ensayos de eyectores de vapor, formado por dos generadores de vapor (250 kW y 500 kW) alimentados actualmente por un campo solar de CCPs que puede suministrar energía térmica a temperaturas de hasta 400°C. Estos generadores de vapor suministran vapor a diferentes presiones y temperaturas, con dos niveles diferentes de operación: 0.074 bar/42°C y a 0.16bar/58°C. A su vez el vapor de alta y baja presión se utiliza en un tren de 4 eyectores de vapor acoplados a una planta MED. Los eyectores de vapor pueden trabajar en un amplio rango de condiciones de presión de vapor vivo (40-6 bar; 4-2 bar), permitiendo así la caracterización de estos dispositivos.

##### *Optimización y control en la integración directa de plantas de destilación multiefecto con termocompresión a un campo solar con CLFs compactos*

Esta tarea se centra en el estudio de distintas estrategias de optimización y control de plantas MED-TVC integradas con sistemas Fresnel. Para abordar dicha tarea, es necesario integrar modelos de plantas MED con modelos de termocompresores junto con resultados experimentales y de simulación del sistema Fresnel diseñado. La optimización tendrá como objetivo determinar las condiciones óptimas de operación para minimizar el consumo energético y maximizar la producción de destilado en función de criterios energéticos y exergéticos. El control automático permitirá seleccionar el punto de operación óptimo del sistema en función de las entradas y perturbaciones a las que esté sometido.

##### **HITOS:**

1. Modelo de simulación de sistema formado por campo Fresnel y planta MED-TVC (M30).
2. Estrategias de control para la operación óptima del sistema completo formado por el campo solar Fresnel y la planta MED con termocompresión (M45).

#### Tarea 4.3. Integración de un sistema de torre acoplado a un ciclo Brayton y una planta MED.

Esta tarea tiene como objetivo el estudio de las diferentes posibilidades existentes para la integración de una planta de destilación multiefecto a un ciclo de potencia Brayton termosolar. En concreto, se estudiarán las siguientes opciones: 1) ciclo combinado con turbina de gas y turbina de vapor acoplada, donde la planta de destilación multiefecto se puede acoplar o bien en modo de baja temperatura (LT-MED) a la salida de la turbina de vapor, o bien a una extracción intermedia de la turbina de vapor en modo termocompresión mediante eyectores de vapor (MED-TVC); 2) redirigir los gases de escape de la turbina de gas a una caldera de recuperación donde se generaría el vapor requerido para alimentar a una planta MED-TVC. Como resultado de dicho estudio, se determinará cuál es la mejor opción desde el punto de vista de eficiencia global del ciclo y eficiencia térmica de la planta de desalación así como de cantidad de agua total producida.

##### **HITOS:**

1. Modelo básico de simulación del sistema completo formado por el sistema de torre central (mini-torre), el ciclo de potencia y la planta MED (M32)
2. Estudio de las opciones de integración de la planta MED en el ciclo de potencia, análisis de producción de cantidad de agua total producida y eficiencia global del ciclo (M45).

#### **C.1.5. Medios materiales, infraestructuras y equipamientos singulares**

El CIEMAT es un Organismo Público de Investigación en materias de energía y de medio ambiente, así como en tecnologías de vanguardia y en diversas áreas de investigación básica. Por su naturaleza está sujeto a la Legislación Estatal tanto en la gestión presupuestaria como en la jurídico administrativa, lo que garantiza la correcta ejecución de sus gastos. El proyecto será llevado a cabo por personal técnico y científico perteneciente a la USSC y la UDeS, ambas unidades de la Plataforma Solar de Almería (PSA). Para el desarrollo del proyecto se cuenta con las propias instalaciones y laboratorios de la PSA, el

mayor centro de I+D del mundo para sistemas termosolares de concentración donde existe ya una amplia experiencia en las diferentes áreas de trabajo que se proponen.

A continuación se detallan la infraestructura y equipamiento que se utilizará para el desarrollo de las actividades de este proyecto:

- Licencias temporales de programas de Computación Fluidodinámica (CFD) y de programas complementarios, tales como Matlab (Actividades 1, 2 y 3)
- Lazo de ensayo de captadores solares con agua presurizada 30 bar/230°C (Activ.1).
- Laboratorio de recubrimientos ópticos avanzados (Actividades 1 y 3) provisto de equipos de preparación y análisis de recubrimientos selectivos y antirreflexivos formados por: a) dos sistemas de *dip-coating* o inmersión para la aplicación de películas por el método sol-gel; y b) tres hornos para tratamiento térmico de las muestras, para 1200°C, 800°C, y 600°C. Además dispone de espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 950, con esfera integradora de 150 mm de diámetro, para medida de transmitancia y reflectancia en el rango solar, espectrofotómetro FTIR, Perkin Elmer Frontier, con esfera integradora de oro, para medidas de reflectancia hemisférica en IR, y cálculo de emitancia térmica, abrasímetro lineal TABER modelo 5750 para evaluación de la resistencia a la abrasión de los materiales, y cámara climática QUV, Q-PANEL, para ensayos de envejecimiento acelerado. Cumple las especificaciones de ensayos según ASTM G154, ISO 4892-10, UNE 104-281-88, etc.
- Laboratorio de caracterización óptica de materiales reflectores (Actividades 1 y 2) provisto de equipos de medida de reflectancia (varios reflectómetros y un espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 1050) y con equipamiento para microscopía.
- Laboratorio de análisis de durabilidad de reflectores solares (Actividades 1 y 2) provisto de varios hornos de mufla (uno con ciclado térmico agresivo), dos cámaras climáticas (con control de humedad, temperatura y lluvia, además de un módulo de radiación que reproduce el espectro solar), una cámara de ensayo de lluvia ácida (ensayo Kesternich con SO<sub>2</sub>) y una cámara de ensayo en atmósferas corrosivas con cuatro líneas de gases (H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>), una cámara climática para ensayos de condensación, una cámara climática para ensayos cíclicos con UV y condensación, y dos cámaras de niebla salina.
- Estructuras para exposición de materiales a intemperie, ubicadas en diferentes localizaciones y dispositivo para ensayos de materiales con radiación concentrada (Act. 1).
- Detectores de gases para instalación a la intemperie (medida de concentraciones de gases en la atmósfera potencialmente corrosivos para los reflectores solares) (Actividad 1).
- Instalación de ensayos en sistema de torre central CESA-I: Infraestructura dotada con un blanco lambertiano de gran tamaño (12mx12m) donde enfocan prototipos de heliostatos para la evaluación de su calidad óptica y de su sistema de seguimiento solar. Sistema de medida con cámara CCD. Sistemas de medida fotogramétricos y con láser-scanner para modelado 3D de superficies reflectantes (Actividad 2)
- Dos simuladores solares con lámparas de Xenón de 4 y de 7 kW<sub>e</sub>; lazo calorimétrico para ensayo en el laboratorio de caracterización de receptores volumétricos (Actividad 3).
- Tres discos parabólicos de 50 kW térmicos, con sistemas de seguimiento en dos ejes, mod. DISTAL-II, para el ciclado térmico de materiales, 1 horno mufla para tratamiento isotérmico de muestras metálicas y 3 hornos tubulares para ciclado térmico (Actividad 3).
- Microscopio confocal, microscopio óptico, microscopio electrónico, durómetro y balanza de precisión para la caracterización de las muestras. (Actividad 3).
- Planta de destilación multiefecto (MED) compuesta por 14 etapas; con caudal nominal de 8 m<sup>3</sup>/h la producción de destilado es de 3m<sup>3</sup>/h, y el consumo térmico de la planta de 190 kW<sub>t</sub>. El gradiente nominal de temperatura entre la primera y última etapa es 40°C con una temperatura máxima de operación de 70°C en la 1ª etapa.
- Bomba de calor por absorción de doble efecto conectada a la planta MED.
- Banco de ensayos de eyectores de vapor, compuesta por generadores de vapor y un tren de cuatro eyectores de vapor acoplados a una planta desaladora MED.
- Licencias temporales de los programas de Computación TRNSYS, IPSEPro, EES, Dymola y de programas complementarios (Actividad 4).

Además, se complementará este equipamiento con la **adquisición de los siguientes equipos y elementos:**

- Colorímetro (Actividad 1).
- Abrasímetro por oscilación (Actividad 3).
- Software para el desarrollo de sistema control y adquisición de datos (Actividad 1).

## C.1.7. Cronograma

Actividades/Tareas	Persona responsable y otras involucradas	Año 1				Año 2				Año 3				Año 4			
T1.1: Diseño básico y optimización geometría del CLF	<u>LVG</u> , EZM, AFG, DPI	x	x														
T1.2: Estudio del concentrador secundario	<u>EZM</u> , LVG, AFG, DAA, DPI, MRS, LMA		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x
T1.3: Desarrollo de absorbente selectivo para el CLF	<u>AMS</u> , GSD, NGC, MFD	x	x	x	x	x	x	x	x								
T1.4: Diseño, de detalle, construcción y evaluación del CLF	<u>LVG</u> , EZM, AFG, DPI, DAA, GGN, REO, JLA, RLM, ESS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x
T1.5: Estudio de reflectores en ambientes industriales	<u>LVG</u> , AFG, MJAC, AGS, MJGS, DAA, LMA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x
T2.1 Heliostato de óptica autoalineada	<u>JFR</u> , RME, REO, AFG, LMA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
T2.2 Heliostato reflexión no divergente	<u>JFR</u> , RME, REO	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
T3.1. Recubrimientos selectivos para receptores volumétricos	<u>AMS</u> , GSD, NGC, AAM, JFR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
T3.2: Recubrimientos AR para ventanas de cuarzo de receptores volumétricos	<u>GSD</u> , AMS, NGC	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
T3.3: Influencia de ventanas de cuarzo con AR en receptores volumétricos	<u>GSD</u> , AAM	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
T3.4: Envejecimiento de materiales metálicos para receptores de torre	<u>MJAC</u> , ESS, JFR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
T4.1: Integración de campo solar CLF en industria alimenticia	<u>LGM</u> , MBM, EZM, LVG			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
T4.2: Aplicación de un campo solar CLF a planta MED-TVC	<u>DAP</u> , PPA, LRS, JBC, JAC, LGM, LVG			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
T4.3: Aplicación de un sistema de torre acoplado a ciclo Brayton+MED	<u>DAP</u> , PPA, JBC, JAC, JFR			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Loreto Valenzuela Gutiérrez (LVG), Angel Morales Sabio (AMS), Eduardo Zarza Moya (EZM), Gema San Vicente Domingo (GSD), Aránzazu Fernández García (AFG), María Jesús Ariza Camacho (MAC), María José García Salinas (MJGS), Alejandro García Segura (AGS), Javier León Alonso (JLA), Gines García Navajas (GGN), Diego Pulido Iparraguirre (DPI), Rafael López Marín (RLM), Nuria Germán Cordero (NGC), Meryem Farchado Dinia (MFD), Lucía Martínez Arcos (LMA), David Argüelles Arizcun (DAA), Jesús Fernández Reche (JFR), Rafael Monterreal Espinosa (RME), Raul Enrique Orts (REO), Antonio Luis Ávila Marín (AAM), Eneko Setien Solas (ESS), Lourdes González Martínez (LGM), Mario Biencinto Murga (MBM), María Isabel Roldán Serrano (MRS), Diego Alarcón Padilla (DAP), JBG (Julian Blanco Gálvez), Patricia Palenzuela Ardila (PPA), Lidia Roca Sobrino (LRS), Javier Bonilla Cruz (JBC), Jose Antonio Carballo (JAC)

## C.2. IMPACTO ESPERADO DE LOS RESULTADOS

### C.2.a. Impacto científico-técnico social y/o económico esperado.

El desarrollo de nuevas soluciones termosolares para aplicaciones a procesos industriales en el marco de este proyecto se prevé que tenga un impacto a corto, medio y largo plazo, puesto que se abordan aspectos diferentes de la tecnología que pasan por buscar soluciones efectivas y optimizadas para la reducción de costes de los concentradores y receptores solares, estudiar e incrementar la durabilidad de dichos componentes, y analizar unas aplicaciones concretas de integración de los sistemas en la industria o en sistemas de cogeneración, en particular en procesos de una industria del sector de alimentación y bebida, y en un sistema de cogeneración para la producción simultánea de electricidad y agua desalada.

En el caso del desarrollo del captador lineal Fresnel, se espera poder desarrollar una solución de captador que sea fácilmente transferible a pymes interesadas en su desarrollo,



comercialización e integración en procesos industriales. Y en cualquier caso, las soluciones individuales que se investigarán en el ámbito del componente reflector, recubrimientos para el receptor, durabilidad de los secundarios, etc. también se espera tengan un impacto técnico y económico en soluciones comerciales que ya utilizan la tecnología termosolar.

Respecto a los heliostatos innovadores, si el desarrollo se culmina con éxito, permitirá minimizar las pérdidas por desbordamiento (spillage) en los sistemas de receptor central, con la consecuente mejora de eficiencia de los sistemas de torre. Al mismo tiempo se reduciría el tiempo requerido para la implantación de los campos de heliostatos ya que, con el empleo del heliostato de óptica autoalineada, no se requeriría de un personal con alta cualificación para el montaje y se reducirían notablemente las tareas de conformado de la superficie reflectante de los heliostatos durante la construcción.

### **C.2.b. Plan de difusión de resultados.**

La difusión de los resultados del proyecto se realizará en tres ámbitos diferenciados:

#### *Ámbito científico:*

Se prepararan artículos con las investigaciones realizadas, que se enviarán a revistas científicas con índice de impacto relacionadas con las temáticas abordadas en el proyecto (Solar Energy, Applied Energy, Applied Thermal Engineering, Desalination, o similares).

Además se asistirá a los congresos internacionales SolarPACES o ISES SWC, que son los foros científicos a nivel mundial más adecuados para la difusión de los resultados del proyecto. También se tiene intención de asistir a seminarios y congresos nacionales e internacionales relacionados con los aspectos científico- técnicos que aborda el proyecto.

#### *Ámbito institucional y empresarial*

Se asistirá a reuniones nacionales e internacionales que se vienen manteniendo en el ámbito de AENOR (España), IEC, SolarPACES, EIP Water y WssTP (Internacionales), donde participan instituciones públicas de I+D+i, empresas del sector energético y fabricantes de componentes para sistemas de concentración solar, para ofrecer el conocimiento de utilidad generado durante la ejecución del proyecto. Así mismo, se intensificará la participación de la PSA en el grupo de trabajo de Media Temperatura de la plataforma tecnológica SolarConcentra y en el programa Solar Heating and Cooling de la IEA, donde investigadores de este equipo de trabajo ya han participado con anterioridad.

#### *Ámbito general*

Además de los cauces clásicos de difusión, los resultados que se vayan obteniendo a lo largo del proyecto serán presentados a la comunidad científica-técnica a través de un portal específico para el proyecto en la web de la Plataforma Solar de Almería ([www.psa.es](http://www.psa.es)) y adicionalmente, se contará con la Unidad de Comunicación y Relaciones Públicas del CIEMAT para dar difusión a través de la propia web del organismo ([www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)) o por medio de notas de prensa, de los progresos, hitos y eventos relacionados con el proyecto.

### **C.2.c. Transferencia de resultados.**

Se buscará la protección de los desarrollos y resultados susceptibles de ello mediante patentes o modelos de utilidad. En particular, se explorará la posibilidad de patentar los desarrollos de CLF compacto y heliostato de reflexión no divergente. Además, se potenciará la transferencia de los resultados a la industria mediante acuerdos de explotación de las patentes (sin exclusividad) o bien mediante acuerdos de colaboración para la cesión de conocimiento adquirido durante la realización del proyecto, como viene siendo habitual con otros resultados obtenidos por este equipo de investigación y trabajo.

Las Unidades de investigación del CIEMAT que participarán en este proyecto tienen experiencia en este tipo de gestión de transferencia de resultados, como lo demuestran los acuerdos de explotación de una patente en recubrimientos antireflexivos con dos empresas (véase CV abreviado del Dr. Morales), o los acuerdos con empresas como SENER Ingeniería y Sistemas, S.A. (España) o Schlaich Bergermann und Partner (SBP) (Alemania) para la gestión de derechos para el CIEMAT sobre la explotación de desarrollos de componentes solares comercializados por estas empresas.

## **C.3. CAPACIDAD FORMATIVA DEL EQUIPO SOLICITANTE**

La capacidad de la USSC y de la UDeS de la Plataforma Solar de Almería para formar doctores queda demostrada por las 9 tesis doctorales que se han completado en estas

Unidades en los últimos 5 años, además de las 7 tesis doctorales que hay en curso. Se enumeran a continuación algunas de las tesis realizadas y en curso:

- Maria Isabel Roldán Serrano, "Diseño y análisis térmico de un receptor volumétrico para un horno solar de alta temperatura". Universidad de Almería, Julio de 2012.
- Aránzazu Fernández García, "Optimización de herramientas para el diseño y evaluación de captadores solares cilindroparabólicos para el suministro de energía térmica a temperaturas inferiores a 250°C. CAPSOL". Universidad de Almería, Abril de 2013.
- David Hernández Lobón, "Contribución al modelado termo-hidráulico de CCPs para la generación directa de vapor". Universidad de Almería, Abril de 2014.
- Inmaculada Cañadas García, "Desarrollo de prototipos de reactores de lecho fluidizado y horno rotatorio para la generación de calor solar en procesos industriales de alta temperatura". Universidad de Sevilla, Julio de 2014.
- Antonio Luis Ávila Marín, "Análisis Termo-fluido-dinámico de absorbedores volumétricos de porosidad gradual con mallas metálicas". UNED. Junio de 2016.
- Patricia Palenzuela Ardila, "Evaluación del acoplamiento de plantas de Destilación Multiefecto a plantas termosolares". Universidad de Almería. 2012.
- Bartolome Ortega Delgado, "Theoretical analysis of high-efficient multi-effect distillation processes and their integration into Concentrating Solar Power plants." Universidad de Sevilla, 2016.
- Juan José Serrano Aguilera, "Thermal-hydraulic and optical modeling of solar direct steam generation sytems based on parabolic-trough collectors". Universidad de Málaga. Fecha prevista de defensa: Septiembre de 2017. (Beca BES-2012-055212).
- Eneko Setien Solas, "Efecto de la radiación solar concentrada en el envejecimiento a tiempos largos de receptores solares de alta concentración". Univ. de Almería. Fecha prevista de defensa: 1er semestre de 2018.
- Mario Biencinto Murga, "Simulación y optimización de centrales termosolares de generación directa de vapor con captadores cilindroparabólicos usando un modelo cuasidinámico". UNED. Fecha prevista de lectura de defensa: 1er semestre de 2018.
- Alejandro García Segura, "Durabilidad de reflectores solares en ambientes corrosivos", Universidad de Almería. Fecha prevista de defensa: 2o semestre de 2018.

El beneficio de una formación pre-doctoral para licenciados e ingenieros se concreta en:

- La integración en un enriquecedor equipo multidisciplinar, en el que participan Ingenieros, Físicos y Químicos.
- Una estrecha relación con la Universidad de Almería, UAM, UNED, Univ. de Sevilla, entre otras, en la que los futuros doctorandos pueden optar entre diferentes programas de doctorado. Además, en los últimos años en el Laboratorio de recubrimiento ópticos de la USSC, se han realizado 8 proyectos fin de Máster del Máster "Tecnologías y Combustibles del Futuro" de la UAM, y es en este laboratorio donde se quiere realizar una acción formativa solicitada en esta propuesta de proyecto, como se indica más adelante.
- Una dotación de instalaciones sumamente completa, la más importante a nivel mundial en relación con la tecnología de sistemas termosolares de concentración, tal y como se muestra en la Web institucional de la PSA (<http://www.psa.es/es/instalaciones/index.php>). Prácticamente la mayoría de los equipos disponibles han sido desarrollados ex-novo por la PSA, en solitario o bien en colaboración con otras instituciones públicas de investigación o empresas europeas (incluyendo españolas), por lo que son únicos.
- Una estrecha colaboración con el mundo empresarial, a través de contratos y proyectos Europeos con importantes empresas españolas y europeas. Además del intercambio de experiencia, los estudiantes en formación aprenderán "de primera mano" los retos y problemática del desarrollo de productos, la transferencia de tecnología, la protección de la propiedad intelectual, la investigación básica y aplicada, etc.
- Colaboraciones científicas con prestigiosos laboratorios de toda Europa (por ej. la PSA pertenece a la red SolLab, [www.sollab.eu](http://www.sollab.eu)) y del resto del mundo, como reflejan el número de proyectos Europeos en los que ha estado y actualmente está participando el grupo, además de la adecuada producción científica reflejada en el número de artículos en revistas con índice de impacto, capítulos de libros, contribuciones a congresos, etc.

En el marco del proyecto, **se solicita la realización de una acción formativa vinculada a las tareas 1.3 y 3.1** (desarrollo de recubrimientos ópticos para receptores solares).



## C.4. IMPLICACIONES ÉTICAS Y/O DE BIOSEGURIDAD

No aplica.

## REFERENCIAS

- Aalborg CSP, 2017. CSP – Industrial system. Output possibilities. <http://www.aalborgcsp.dk>
- Alarcón-Padilla, et al., 2007. *Desalination* **212**:303-310.
- Amsbeck L et al., 2009. Development of a Broadband Antireflection coated transparent silica window for a solar-hybrid microturbine system. En Proc. of SolarPACES Conf 2009, Berlin, Alemania. ISBN: 978-3-00-028755-8.
- Areva, 2017. <http://www.areva.com>. (acceso 03/07/2017)
- ASME/ASTM, 2013. *ASTM E905 - 87(2013) Standard Test Method for Determining Thermal Performance of Tracking Concentrating Solar Collectors*.
- Avila-Marin AL, 2011. *Solar Energy* **85**:891-910. DOI: [10.1016/j.solener.2011.02.002](https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.002).
- Biencinto M, et al, 2014. *Energy Procedia* **48**:1134-1143. DOI: [10.1016/j.egypro.2014.02.128](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.128).
- Biencinto M, et al, 2014. *Energ. Convers. Manage.* **87**:238-249. DOI: [10.1016/j.enconman.2014.07.017](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.017).
- Blanco MJ, et al, 2005. The Tonatihu Software Development Project: an open source approach to the simulation of solar concentrating systems. In: *Proc. of the ASME Int Mechanical Eng Congress and Expo*, pp. 157–164.
- Bouaddi S et al., 2017. *Renew. Energy* **101**:437-449. DOI: [10.1016/j.renene.2016.08.067](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.067).
- Coyle RT et al., 1982. *Sol. Energy Mater.* **6**:351-73. DOI: [10.1016/0165-1633\(82\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0165-1633(82)90040-5).
- Deck M, 2017. SolarReserve, Personal Communication.
- DETECSOL, Nuevos desarrollos para una tecnología solar más eficiente. Convocatoria 2014. Programa de Proyectos de I+D “Excelencia” y Proyectos de I+D+I “Retos Investigación”. Ministerio de Economía y Competitividad, Referencia: ENE2014-56079-R. (01/01/2015 - 31/12/17).
- ETP-RHC (European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling), 2014. *Solar heating and cooling technology roadmap*. <http://www.rhc-platform.org> (acceso 03/07/2017)
- Fernández-García A, et al, 2014. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **130**:51-63.
- Fernández-García A, et al, 2015. *Journal of Cleaner Production* **89**:272-285. DOI: [10.1016/j.jclepro.2014.11.018](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.018).
- García-Segura A, et al., 2016. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **62**:453-467. DOI: [10.1016/j.rser.2016.04.060](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.060).
- Giostrì A, et al, 2013. *J. Sol. Energy Eng.* **135**:11001. DOI: [10.1115/1.4006792](https://doi.org/10.1115/1.4006792).
- GIZ, 2011. Identification of industrial sectors promising for commercialisation of solar energy. <https://www.giz.de/en/worldwide/15776.html> (acceso 03/07/2017)
- Glasspoint, 2017. <http://www.glasspoint.com>. (acceso 03/07/2017)
- González RS, Flamant G, 2014. *J. Sol. Energy Eng.* **136**: 025001. DOI: [10.1115/1.4026573](https://doi.org/10.1115/1.4026573).
- Grágeda M, et al., 2016. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **59**:583-596. DOI: [10.1016/j.rser.2015.12.149](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.149).
- Hertel J, et al, 2016. *AIP Conference Proceedings* **1734**: 030020. DOI: [10.1063/1.4949072](https://doi.org/10.1063/1.4949072).
- Houaijia A, et al, 2015. *Int J Energy Research* **39**:1120-1130. DOI: [10.1002/er.3316](https://doi.org/10.1002/er.3316).
- IDAE, 2011. *Plan de Energías Renovables 2011-2020*. <http://www.idae.es> (acceso 03/07/2017)
- IEA-ETSAP (International Energy Agency-Energy Technology Systems Analysis Programme) and IRENA (International Renewable Energy Agency) *Technology Brief E21*. Enero 2015. <http://www.irena.org/publications>
- ISO, 2013. *ISO 9806 Solar Energy – Test method for solar collectors*.
- Kurup P, Turchi C, 2015. *Initial investigation into the potential of CSP industrial process heat for the Southwest United States*. Technical report NREL/TP-6A20-64709.
- Monterreal R, et al, 2014. Concentrador solar, Patente española ES 2 428221 B1.
- Monterreal R, et al, 2017. *AIP Conf. Proc* **1850**: 030036. DOI: [10.1063/1.4984379](https://doi.org/10.1063/1.4984379).
- Morales A, 2001. *Process to deposit metal and metal oxides*. Patente europea EP 1321539.
- Morales A, 2001. *Procedimiento para la preparación mediante la técnica sol-gel, siguiendo la ruta polimérica, de recubrimientos porosos*. Patente española ES 2 1915442 B1.
- Morin G, et al, 2012. *Solar Energy* **86**:1-12. DOI: [10.1016/j.solener.2011.06.020](https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.020).
- Naegler T, et al, 2015. *Int J Energy Research* **39**:2019-2030. DOI: [10.1002/er.3436](https://doi.org/10.1002/er.3436).
- Ortega-Delgado B, et al, 2016. *Desalination* **394**: 18-29.
- Ortega-Delgado B, 2016. *Theoretical Analysis of High efficient Multi-effect Distillation Processes and their Integration into Concentrating Solar Power Plants*. Tesis Doctoral. Univ. de Sevilla.
- Palenzuela P et al, 2014. *Applied Thermal Engineering* **63**:84-96.
- Palenzuela P et al, 2015. *Desalination* **366**:130-138.
- Pfahl A, 2017. *Solar Energy*, en prensa. DOI: [10.1016/j.solener.2017.03.029](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.029).
- Protermosolar, 2017. *Mapa de proyectos termosolares de España*. <http://www.protermosolar.com/proyectos-termsolares/mapa-de-proyectos-en-espana/>
- Pulido D, et al, 2016. Optimizing design of a linear Fresnel reflector for process heat supply. *Conference Proceedings of EuroSun 2016*, Palma de Mallorca (Spain), 11-14 Octubre.
- Sadat F, et al, 2016. *Comparative assesment of multi-effect distillation and reverse osmosis processes coupled to a solar-driven high temperature power cycles*. Master Thesis, University of Hamburg (Alemania).
- Serrano-Aguilera JJ, et al, 2016. *Solar Energy* **124**:184-197. DOI: [10.1016/j.solener.2015.11.036](https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.11.036).
- Setien E, et al, 2014. *Solar Energy* **105**:303-313. DOI: [10.1016/j.solener.2014.04.004](https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.004).
- SolarCONCENTRA, 2017. *Plataforma SolarCONCENTRA*, Grupo de trabajo 2: Media Temperatura. <http://www.solarconcentra.org> (acceso 03/07/2017).
- Soltigua, 2017. <http://www.soltigua.com> (acceso 03/07/2017).