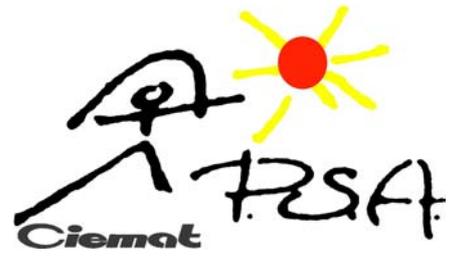


Plataforma  
Solar de  
Almería



# Informe Anual 2003



## Índice

Introducción .....	5
Presentación General .....	7
La PSA como Gran Instalación Solar: Datos Generales .....	7
Organigrama y Estructura Funcional .....	8
Recursos Económicos y Humanos .....	9
Entorno de Colaboración .....	11
Instalaciones e Infraestructuras .....	13
Descripción General de la PSA .....	13
Instalaciones de Receptor Central: CESA-1 y CRS .....	14
Instalaciones con Concentradores de Foco Lineal: DCS, DISS, EUROTROUGH y LS3 .....	17
Sistemas Disco-Stirling: DISTAL y EURODISH .....	22
El Horno Solar .....	24
Instalaciones de Química Solar y Desalación .....	27
Otras Instalaciones .....	30
Proyectos de I+D .....	33
Introducción .....	33
Tecnología de Receptor Central .....	35
Tecnología de Colectores Cilindroparabólicos .....	51
Química Solar .....	64
Formación y Acceso .....	85
Referencias Documentación .....	91
Lista de Acrónimos .....	97



## Introducción

La actividad de la Plataforma Solar de Almería durante el año 2003 ha estado estructurada en tres líneas principales de trabajo: tecnología de producción de electricidad por vía termosolar, uso de la radiación solar para aplicaciones medioambientales y actividades encaminadas a difundir y diseminar a la mayor escala posible las posibles aplicaciones de estas tecnologías.

A la hora de escribir estas líneas, la actividad investigadora de la PSA se estructura de forma diferente que en el año 2003. Actualmente se organiza en tres Programas de I+D con las siguientes denominaciones: Energía Solar Térmica a Media Temperatura, Energía Solar Térmica a Alta Temperatura y Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar. Sin embargo, y dado que nuestras actividades se llevaron a cabo durante el año 2003 con arreglo a la anterior organización, hemos considerado oportuno mantener la estructura de este informe según el modelo anterior.

En el área de colectores cilindro-parabólicos seguimos enfocando nuestros esfuerzos hacia la consolidación de la tecnología de generación directa de vapor, mediante la cual se esperan reducir los costes de producción de electricidad mediante esta tecnología en alrededor de un 30%. El hito más importante de este año se debe al proyecto europeo INDITEP y ha consistido en el montaje y puesta en servicio de dos nuevos colectores cilindro-parabólicos del modelo ET-100 en el lazo de ensayos para la generación directa de vapor, DISS. Con estos dos nuevos colectores, la capacidad de producción de vapor del campo solar se ha visto incrementada hasta 1 kg/s.

También relacionada con la producción de electricidad, la actividad del grupo de tecnología de receptor central ha venido marcada por los ensayos realizados en dos proyectos: SOLAIR 3 MW y SOLGATE. El proyecto SOLAIR ha venido a demostrar la viabilidad del concepto modular para esta tecnología, siendo el receptor ensayado en la PSA la unidad básica con la que se podría componer un receptor de varias decenas de MW para una planta de carácter comercial. El proyecto SOLGATE, por su parte ha permitido avanzar exitosamente en la integración de la energía solar en un ciclo Brayton de gas para producción eléctrica mediante el uso de una turbina convencional adaptada.

Nuestra actividad en aplicaciones medioambientales ha estado centrada en las líneas de destoxificación de aguas residuales y en la de desalinización de agua de mar. Un hito importante ha sido el comienzo de las obras de la primera planta comercial de detoxificación solar que se instala en el mundo para el tratamiento del agua de lavado procedente del reciclado de envases de productos fitosanitarios. Este proyecto está promovido por la empresa 'Albaida Recursos Naturales y Medioambiente' y se basa en los desarrollos científicos y tecnológicos realizados en la Plataforma Solar de Almería durante los últimos años.

Durante este año 2003 se han dado los primeros pasos para establecer el 'Laboratorio Asociado Europeo de Energía Solar' (SolLAB). Este laboratorio virtual estaría constituido por los principales institutos europeos de investigación en energía solar concentrada, es decir: el IMP-CNRS de Odeillo (Francia), la división de energía solar del DLR (Alemania), el

laboratorio de energías renovables del Instituto Tecnológico Federal de Zürich (Suiza) y el propio CIEMAT. Es de esperar que el acuerdo se firme a principios del año 2004 y que nuevos socios puedan irse adhiriendo al mismo rápidamente.

Por otro lado, la continuada e intensa colaboración con la Universidad de Almería (UAL) se verá reforzada y consolidada con la creación de un centro mixto CIEMAT-UAL para la investigación conjunta de aplicaciones de la energía solar. Esta colaboración se localizará físicamente en un nuevo edificio que, financiado por el programa FEDER, se comenzará a construir en el campus de la UAL a principios del 2004.

Las actividades de formación y diseminación continúan con paso firme, ya que somos conscientes de que no debemos descuidar la faceta de informar a la sociedad acerca de la existencia de esta opción dentro de las energías renovables. Se mantienen los convenios educativos con distintas universidades y se ha continuado la participación en los programas de acceso de investigadores promovidos por la Comisión Europea.

No quisiera terminar esta introducción sin agradecer el apoyo y el buen hacer a todo el personal de la PSA tras este mi primer año como Director.



Diego Martínez Plaza  
Director de la Plataforma Solar de Almería

## Presentación General

### La PSA como Gran Instalación Solar: Datos Generales

La Plataforma Solar de Almería (PSA), perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), es el mayor centro de investigación, desarrollo y ensayos de Europa dedicado a las tecnologías solares de concentración. La PSA desarrolla sus actividades integrada como una línea de I+D dentro de la estructura del Departamento de Energías Renovables del CIEMAT.

Los objetivos que inspiran su actividad investigadora son los siguientes:

- Contribuir al establecimiento de un esquema de suministro energético mundial limpio y sostenible.
- Contribuir a la conservación de los recursos energéticos de Europa y a la protección de su clima y medio ambiente.

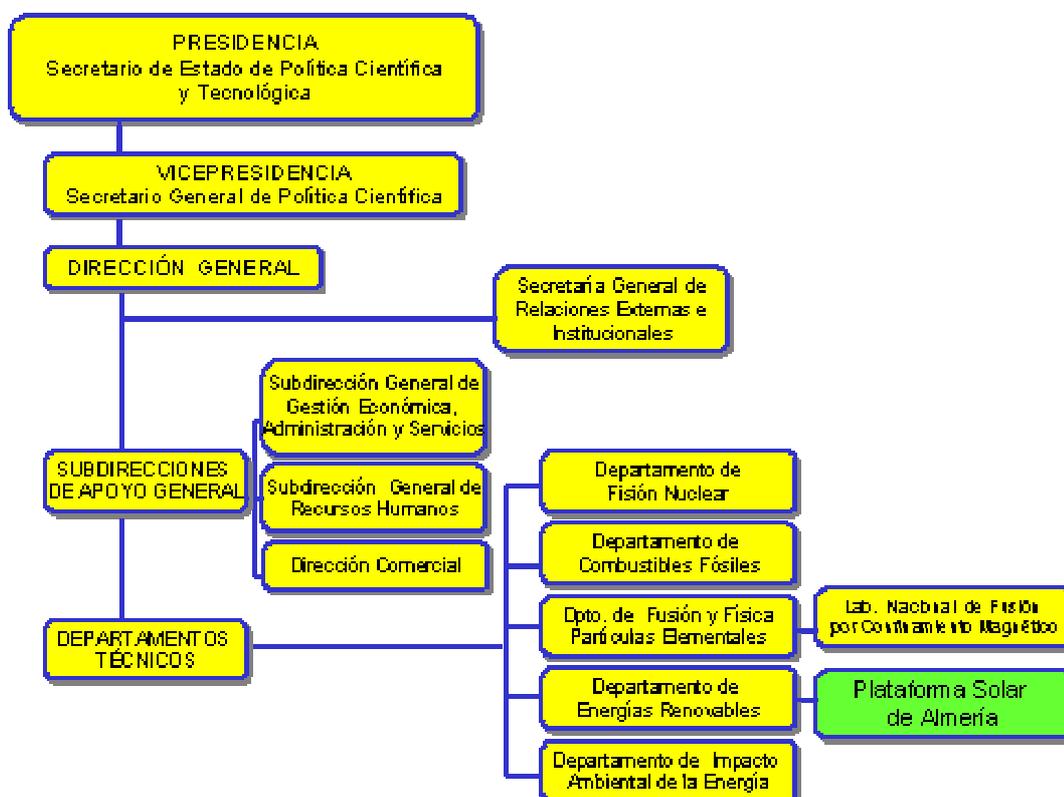


Figura 1 Integración de la PSA en la estructura orgánica del CIEMAT



Figura 2 Vista aérea de la Plataforma Solar de Almería

- Promover la introducción en el mercado de las tecnologías termosolares y las derivadas de los procesos de química solar.
- Contribuir al desarrollo de una industria termosolar europea exportadora y competitiva.
- Reforzar la cooperación entre el sector empresarial y las instituciones científicas en el campo de la investigación, el desarrollo, la demostración y el marketing de las tecnologías termosolares.
- Potenciar innovaciones tecnológicas orientadas a la reducción de costes que contribuyan a incrementar la aceptación en el mercado de las tecnologías termosolares.
- Promover la cooperación tecnológica Norte – Sur, especialmente en el Área Mediterránea.
- Apoyar a la industria en la identificación de oportunidades de mercado relacionadas con las tecnologías termosolares.

## Organigrama y Estructura Funcional

La actividad investigadora que se lleva a cabo en la Plataforma Solar de Almería se estructura en torno a cuatro grandes proyectos de investigación: "Tecnología de Colectores Cilindroparabólicos", "Tecnología de Receptor Central", "Química Solar" y "Formación y Acceso a la Plataforma Solar de Almería". Los dos primeros están dedicados al desarrollo de nuevas y mejores formas de producir electricidad por medios termosolares; el tercero a explorar las posibilidades químicas de la energía solar, sobre todo en lo que se refiere a su potencial para la destoxificación de efluentes industriales, la síntesis de productos de química fina y la desalinización de agua; finalmente, el cuarto tiene como objetivo la puesta a disposición de la comunidad científica internacional de las infraestructuras de la PSA y la formación de jóvenes investigadores en las tecnologías que se desarrollan en el centro.

Como apoyo a los proyectos de I+D anteriormente mencionados, la PSA cuenta con las correspondientes áreas de gestión y servicios, que dada la variedad y complejidad de instalaciones existentes son de extraordinaria importancia para el desenvolvimiento diario de todas las líneas de actuación que tienen lugar en el centro.

Cada Proyecto de I+D cuenta con un Jefe de Proyecto y un personal técnico en cuyo trabajo descansan las líneas maestras de actividad científica y de desarrollo tecnológico de la PSA. Éstos cuentan con una gran autonomía para la ejecución del presupuesto, la planificación de sus objetivos científicos y la gestión técnica de sus recursos. No obstante,

los cuatro Proyectos de I+D comparten una gran cantidad de recursos, servicios e infraestructuras de la PSA, por lo que han de mantener en todo momento una comunicación fluida con las unidades de apoyo técnico y de administración, a través del Área de Dirección, la cual ha de velar porque las capacidades, infraestructuras y recursos humanos de apoyo son distribuidos de forma eficiente. Es también el Área de Dirección quién canaliza las demandas hacia las distintas Subdirecciones de Apoyo General del CIEMAT ubicadas en Madrid.

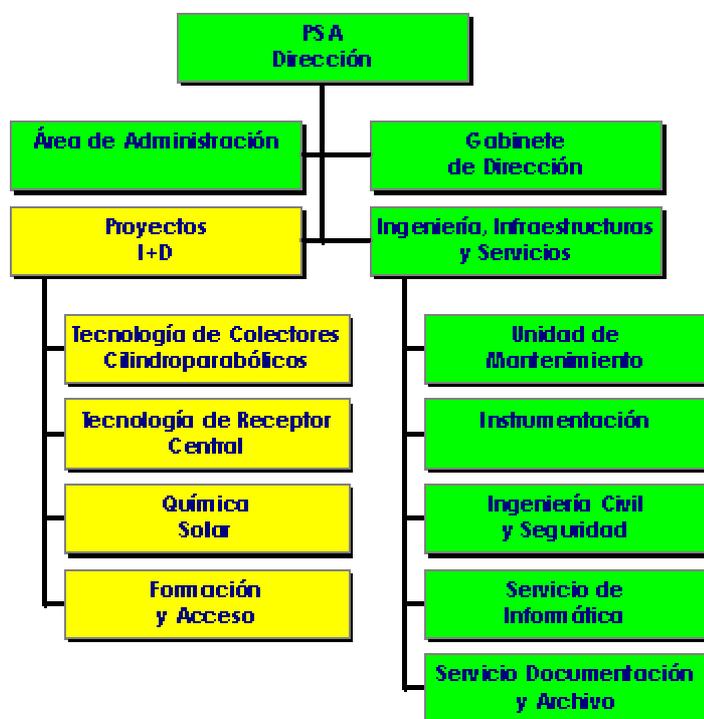


Figura 3 Organigrama PSA 2003. En color verde se recogen las unidades funcionales y servicios adscritos al Área de Dirección.

## Recursos Económicos y Humanos

Los compromisos científicos y técnicos de la PSA, y la carga de trabajo asociada que ello comporta, son acometidos por un equipo humano de 93 personas que constituye a diciembre de 2003 la plantilla que de forma permanente presta sus servicios para la Plataforma Solar. A esta plantilla se viene a sumar un importante caudal humano en forma de becas de formación y estancias que son gestionadas a través del Proyecto de Formación y Acceso y que será descrito con posterioridad.

De las 93 personas que diariamente desarrollan su trabajo en la PSA, un colectivo importante lo forman el personal de las contratatas de operación, mantenimiento y limpieza de las distintas instalaciones (29 personas). Por otro lado, las contratatas auxiliares están formadas por 8 administrativos y secretarías, 2 técnicos de servicio a usuarios de informática y 5 vigilantes de seguridad. En cuanto a las contratatas de O+M se distribuyen en 8 operadores de instalaciones, 5 vigilantes de operación, 13 personas de mantenimiento mecánico, eléctrico y electrónico y 3 limpiadoras. El resto del personal se distribuye en 37 personas de plantilla de la PSA (personal de CIEMAT) y 12 personas que forma parte de la delegación permanente que DLR tiene en la PSA como consecuencia del desarrollo de los actuales compromisos del Convenio Hispano Alemán.

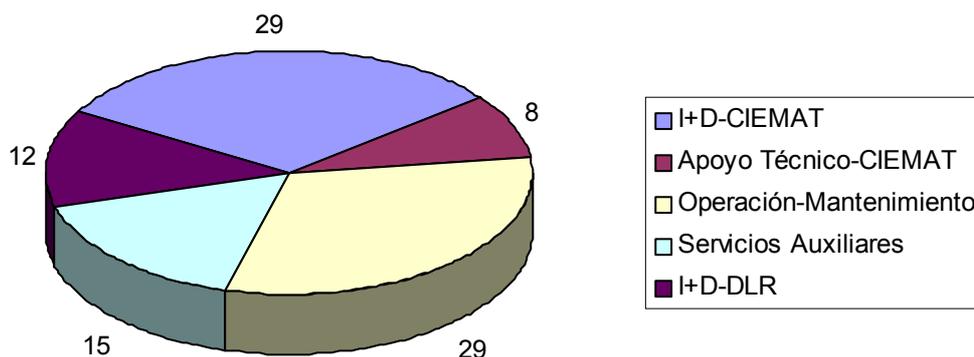


Figura 4 Distribución del personal que desarrolla su actividad en la PSA de forma permanente a Diciembre de 2003

Centrándonos en el personal que desarrolla labores específicamente de I+D, podemos observar que la PSA cuenta con una plantilla todavía reducida de 37 personas de las cuales 24 están ubicadas en Almería y otras 13 personas desarrollan su actividad integradas en los proyectos de I+D de la PSA, pero desempeñando su labor desde el CIEMAT en Madrid. Otras 12 personas de la delegación permanente de DLR se suman a las labores de I+D, por lo que el total de personal de I+D en la PSA asciende a 49 personas.

En lo que se refiere al presupuesto de la PSA, se puede apreciar que a pesar de la retirada de DLR del presupuesto básico de gastos de O+M, se ha podido mantener la tendencia creciente, gracias en buena medida a la mayor captación de ingresos y a que el propio CIEMAT ha asumido la parte del presupuesto básico que antes absorbía el Convenio Hispano Alemán.

En el éxito de captación de ingresos, fundamentalmente de la Comisión Europea, ha tenido una contribución destacable el propio DLR. El planteamiento de un buen número de nuevos proyectos conjuntos a la CE ha facilitado que DLR siga presente en la PSA en una nueva relación basada en la realización de proyectos específicos y fruto de este éxito es la relevancia de la delegación alemana en la PSA.

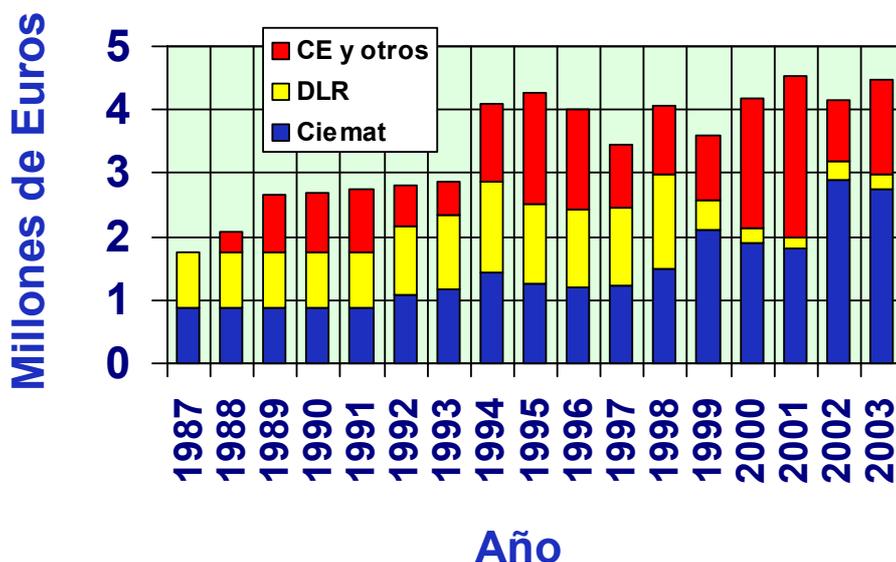


Figura 5 Evolución del presupuesto de gastos de la PSA y distribución por origen de la financiación

El presupuesto de la PSA alcanzó en el año 2003 los 4,96 millones de Euros (no se incluyen en este presupuesto los costes de personal de I+D). La contribución de CIEMAT se vio incrementada con el fin de acometer las actividades aprobadas para este año en el plan de mejora de infraestructuras de la PSA. Estas mejoras iniciadas en el año 2002 recogen importantes obras en edificios como el nuevo edificio de acogida de visitantes o el nuevo edificio de oficinas, la instalación de la nueva instalación meteorológica, la sustitución del actual horno solar, reparaciones en el campo DCS y las mejoras en los campos de helióstatos.

## Entorno de Colaboración

Como se ha referido con anterioridad la PSA mantiene desde el año 1987 un Convenio Hispano-Alemania de colaboración con el DLR, habitualmente conocido como el CHA. En la actualidad las relaciones y compromisos de colaboración científica se regulan a través del Anexo IV de dicho Convenio, que recoge el compromiso de mantener una delegación permanente de DLR en la PSA durante los años, 2003, 2004 y 2005. El año 2002 fue un año de transición que sirvió para fijar las nuevas condiciones de colaboración y el alcance de la misma. Durante el año 2003 se ha venido desarrollando este nuevo Anexo IV de manera muy satisfactoria para ambas partes.

Con todo, el entorno de colaboración en que se mueve la PSA es notablemente amplio. En el ámbito internacional, la PSA participa activamente en las Tareas I, II y III del programa SolarPACES de la Agencia Internacional de Energía, donde se intercambia información y se realizan tareas a costes compartidos con centros homólogos en varios países (EEUU, México, Brasil, Alemania, Francia, Reino Unido, Suiza, Comisión Europea, Sudáfrica, Israel, Rusia, Australia, Argelia y Egipto).

Durante este año 2003 se han dado los primeros pasos para establecer el 'Laboratorio Asociado Europeo de Energía Solar' (SolLAB). Este laboratorio virtual estaría constituido por los principales institutos europeos de investigación en energía solar concentrada, es decir: el IMP-CNRS de Odeillo (Francia), la división de energía solar del DLR (Alemania), el laboratorio de energías renovables del Instituto Tecnológico Federal de Zúrich (Suiza) y el propio CIEMAT. Es de esperar que el acuerdo se firme a principios del año 2004.

Dentro del Proyecto de Formación y Acceso se mantienen relaciones con más de 60 grupos y universidades de distintos países europeos a través del programa IHP (Improving Human Potential), al ser la PSA una de las instalaciones científicas europeas seleccionadas por la Dirección General de Investigación de la Comisión Europea. Se cuenta asimismo con un convenio para la gestión de becas conjuntas con la Universidad de Almería y acuerdos educacionales para recibir a estudiantes procedentes de universidades de toda Europa. Por otro lado, la PSA forma parte de la red europea EURO CARE para la formulación de proyectos que integren energía solar y tecnologías avanzadas de combustión.

En cuanto a Tecnología de Colectores Cilindro-parabólicos, se sigue manteniendo un buen entorno de colaboración, tanto mediante proyectos de ámbito nacional, como de ámbito europeo. Dentro de la lista de entidades con las que estamos colaborando en relación con esta tecnología, caben mencionar las Universidades de Sevilla, Málaga y Almería, así como centros europeos de investigación (DLR, ZSW y el Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems). En el ámbito empresarial, la lista de colaboradores se extiende tanto a empresas nacionales (ABENGOA, IBERDROLA Ingeniería Consultoría, Gamesa Energía e INITEC), como a empresas extranjeras (FLAGSOL, SBP y SIEMENS). Este entorno de colaboración se verá extendido de forma importante en el año 2004 con la participación de la PSA en el proyecto DISTOR, en el que colaboraremos con un total de 12 entidades europeas de reconocido prestigio, entre las que se encuentran: CNRS, DEFI Systemes, EPSILON Ingénierie, SGL Technologies GmbH, WIS y la Academia Búlgara de Ciencias.

En el ámbito de la Tecnología de Receptor Central, y dentro del contexto nacional se ha mantenido la colaboración en proyectos con las empresas SOLUCAR, IBERESE y SERLED, y universidades como la Universidad de Sevilla, Almería y UNED. Bajo el paraguas del V Programa Marco en su Programa de Energía y del Convenio Hispano Alemán, se ha colaborado intensamente con DLR en varios proyectos y con otras instituciones y empresas europeas como ORMAT (Israel), TUMA (Suiza), Heron (Holanda), FICHTNER (Alemania), STC (Dinamarca), Forth-Cperi (Grecia) y Saint Gobain Ceramics (Alemania).

Durante el año 2003, el Proyecto de Aplicaciones Químicas de la Radiación Solar ha mantenido el entorno de colaboración al importante nivel al que se había llegado en los años anteriores. Buena idea de ello la da el listado de las instituciones con las que se está desarrollando algún tipo de actividad formal. En efecto, a fecha de 31.12.2003 la lista de relaciones contractuales en vigor abarca todos los ámbitos posibles, desde el local (Univ. de Almería, DSM Deretil, Cajamar, Coexpal, Comunidad de Regantes Cuatro Vegas) pasando por el nacional (Grupo Abengoa, Ecosystem, Aragonesas Agro, Emuasa, Indoor Air Quality, Caucho-Metal Products, Fundación Inasmet, ICP-CSIC, el Hospital de San Carlos de Madrid y las Universidades Autónoma de Barcelona, Complutense, Alcalá y La Laguna,), el europeo (Weir-Entropie, Ao Sol, Hellenic Saltworks, Trailligaz, Janssen Pharmaceutica N.V., Ahlstrom Paper Group, IPM, Protection des Metaux, y las universidades ETH, NTUA, INETI, EPFL, Claude Bernard Lyon 1, Poitiers, L'Aquila, etc.) y el extra-comunitario donde se colabora contractualmente con instituciones de México, Argentina, Perú, Colombia, Venezuela, Marruecos, Egipto y Túnez.

## Instalaciones e Infraestructuras

### Descripción General de la PSA

La PSA está situada en el Sudeste de España en el Desierto de Tabernas a 37°05'27,8'' Latitud Norte y 2°21'19'' Longitud Oeste. Recibe una insolación directa anual por encima de los 1.900 kWh/(m<sup>2</sup>·año) y la temperatura media anual está en torno a los 17°C.

La capacidad que tiene la PSA de ofrecer a los investigadores una localización de características climáticas y de insolación similares a las de los países en vías de desarrollo de la franja ecuatorial (donde radica el mayor potencial de energía solar) pero con todas las ventajas propias de las grandes instalaciones científicas de los países europeos más avanzados, la convierten en un lugar privilegiado para la evaluación, la demostración y la transferencia de las tecnologías solares.

En la actualidad, las principales instalaciones de ensayos disponibles en la PSA son [SolarPACES, 1996]:

- Los sistemas de receptor central CESA-1 y SSPS-CRS de 7 y 2,7 MWt, respectivamente.
- El sistema de colectores cilindro-parabólicos SSPS-DCS de 1,2 MWt, que tiene asociado un sistema de almacenamiento térmico y una planta de desalación de agua.
- El lazo de ensayos DISS de 1,3 MWt, que constituye un excelente sistema experimental para la investigación del flujo bifásico y la generación directa de vapor para producción de electricidad.
- El lazo de ensayos HTF, dotado de un completo circuito de aceite que permite la evaluación de nuevos componentes para colectores cilindroparabólicos.

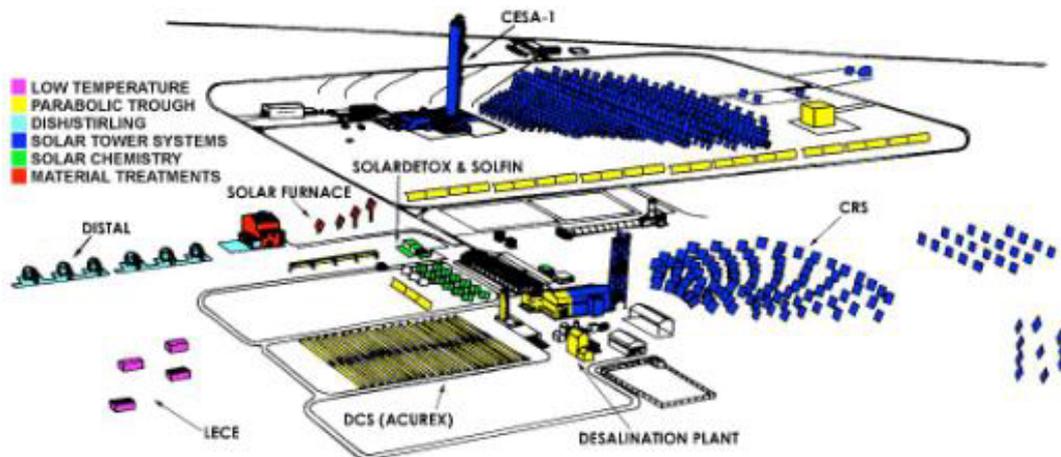


Figura 6 Ubicación de las principales instalaciones de ensayo de la PSA

- Una instalación con 6 sistemas disco-Stirling denominada DISTAL.
- Un horno solar de 60 kWt para procesos de tratamiento térmico de materiales.
- Una instalación múltiple para aplicaciones de destoxificación solar, compuesta de un lazo de colectores cilindroparabólicos con seguimiento en dos ejes y tres lazos de foto-reactores tipo CPC, para la realización de diferentes tipos de ensayos.
- La instalación SOLFIN (Solar Fine Chemical Synthesis) para la síntesis de productos de química fina,
- El Laboratorio de Ensayo Energético de Componentes de la Edificación (LECE).
- Una estación meteorológica.

## Instalaciones de Receptor Central: CESA-1 y CRS

La PSA cuenta con dos instalaciones excepcionales para el ensayo y validación de componentes y aplicaciones con tecnología de receptor central. Las instalaciones CRS y CESA-1 permiten abordar proyectos y validar tecnologías en el rango de los cientos de kilovatios a varios megavatios. Son por tanto dos laboratorios a intemperie especialmente acondicionados para escalar y cualificar sistemas en su fase previa a la etapa de demostración comercial.

### **LA INSTALACIÓN CESA-I DE 7 MW<sub>t</sub>**

El proyecto CESA-I fue promovido por el Ministerio de Industria y Energía de España e inaugurado en mayo de 1983 para demostrar la viabilidad de las plantas solares de receptor central y para permitir el desarrollo de la tecnología necesaria. En la actualidad CESA-I ya no produce electricidad, sino que se opera, con un alto grado de flexibilidad, como una instalación de ensayo de componentes y subsistemas como helióstatos, receptores solares, sistemas de almacenamiento térmico, turbinas de gas solarizadas, sistemas de control e instrumentación para la medida de altos flujos de radiación solar concentrada. También es utilizada para otras aplicaciones que requieran altas concentraciones fotónicas sobre superficies relativamente grandes, como es el caso de procesos químicos a alta temperatura, tratamiento superficial de materiales o experimentos astrofísicos.

La instalación capta la radiación solar directa por medio de un campo de 300 helióstatos, de 39,6 m<sup>2</sup> de superficie cada uno, distribuidos en un campo norte de 16 filas con

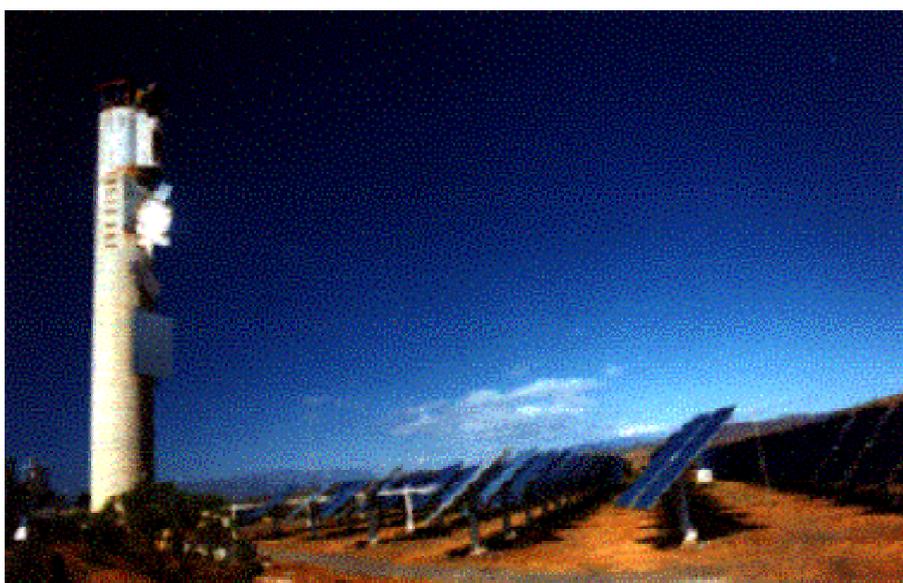


Figura 7 Vista lateral de la instalación CESA-I con las filas de helióstatos enfocando al nivel intermedio de ensayos (60 m.)

una extensión de 330 x 250 m. Los helióstatos tienen una reflectividad nominal promedio del 90%, el error de seguimiento solar en cada eje es de 1,2 mrad y la calidad de imagen en rayo reflejado de 3 mrad. La instalación CESA-I cuenta con la experiencia más extensa en helióstatos tipo vidrio-metal que hay en el mundo, disponiendo en su campo de unidades de primera generación fabricadas por SENER y CASA, así como unidades con facetas reflectantes de segunda generación de la empresa ASINEL y facetas y prototipos de tercera generación desarrollados por CIEMAT en colaboración con la empresa SOLUCAR. A pesar de sus más de 20 años de antigüedad, el campo de helióstatos se encuentra en un estado óptimo de funcionamiento al haberse mantenido con carácter estratégico un programa continuado de reposición de espejos y facetas y de reparación de componentes en los mecanismos de accionamiento. Al Norte del campo de helióstatos se ubican dos áreas adicionales que son utilizadas como plataforma de pruebas de nuevos prototipos de helióstatos, una situada a 380 m de la torre y la otra a 500 m de distancia. La máxima potencia térmica que proporciona el campo sobre la apertura del receptor es de 7 MW. A una irradiancia típica de diseño de 950 W/m<sup>2</sup>, se obtiene un flujo pico de 3,3 MW/m<sup>2</sup>. El 99% de la potencia se recoge en un círculo con diámetro de 4 m y el 90% de la misma en un círculo de 2,8 m.

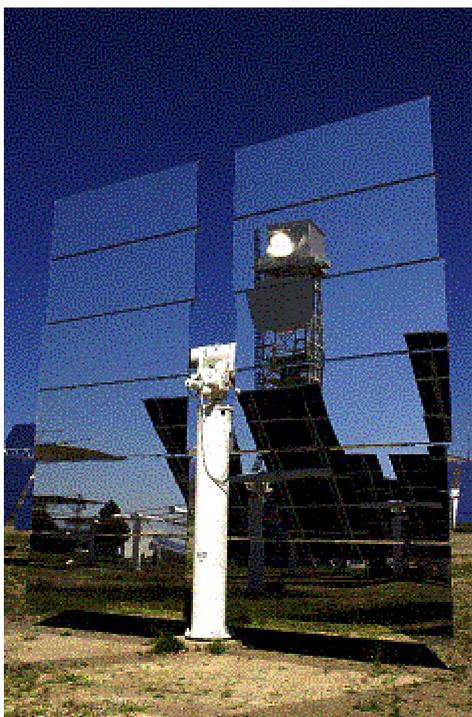
La torre es de hormigón y tiene una altura de 80 m, siendo capaz de soportar una carga de 100 toneladas. A lo largo de la torre hay tres niveles de ensayo:

- Una cavidad adaptada para su uso como horno solar y ensayo de materiales, situada a 45 m de altura, que ha sido utilizada con gran éxito en la reproducción de la rampa de calentamiento, durante su reentrada en la atmósfera, de las piezas del escudo cerámico de los transbordadores espaciales y también en el tratamiento superficial de aceros y otros compuestos metálicos.
- Una cavidad con un banco calorimétrico de ensayo de receptores volumétricos presurizados a 60 m. En la actualidad esta cavidad aloja la infraestructura del proyecto SOLGATE, que incluye tres receptores volumétricos con una potencial total incidente cercana a 1 MW y una turbina solarizada de 250 kW, a lo que se suma el correspondiente generador eléctrico, circuito de aire, sistema de rechazo de calor y escudo térmico.
- La instalación de ensayo de receptores volumétricos atmosféricos TSA de 2,5 MW en la parte superior de la torre, a la cota de 80 m.

La torre se completa con una grúa en la parte superior con 5 toneladas de capacidad y un elevador montacargas con capacidad para 1.000 kg. Por último para aquellos ensayos que requieran producción de electricidad, la instalación dispone de una turbina de ciclo Rankine de doble etapa y de 1,2 MW diseñada para operar a 520°C y 100 bar de presión del vapor sobrecalentado.

## **LA INSTALACIÓN SSPS-CRS DE 2,7 MW<sub>t</sub>**

La planta SSPS-CRS fue inaugurada como parte del proyecto SSPS (Small Solar Power Systems) de la Agencia Internacional de la Energía en septiembre de 1981. Originalmente era una planta de demostración para producción de electricidad y utilizaba un receptor refrigerado por sodio líquido que era además utilizado como medio de almacenamiento térmico. Actualmente, al igual que la planta CESA-I, es una instalación de ensayos dedicada fundamentalmente al ensayo de pequeños receptores solares en el rango de 200-350 kW de potencia térmica. El campo de helióstatos está formado por 91 unidades de Martin-Marietta de primera generación de 39,3 m<sup>2</sup> de superficie cada una. Existe un segundo campo con 20 helióstatos de 52 m<sup>2</sup> y 65 m<sup>2</sup> en la zona norte que puede también ser utilizado como apoyo, en este caso son helióstatos de segunda generación de MBB y Asinel. El campo de helióstatos CRS ha sido recientemente mejorado con la reposición de todas las facetas reflectantes, que en la actualidad son de estructura ligera y vidrio de bajo contenido en hierro. Como gran novedad, cabe reseñar que durante el año 2003, se ha llevado a cabo la conversión de todos sus helióstatos en unidades autónomas totalmente inteligentes, comunicadas por radio y alimentadas por energía fotovoltaica,



**Figura 8 Un heliostato del campo CRS con vista reflejada de la torre**

siguiendo el concepto desarrollado y patentado por investigadores de la PSA. En la actualidad la instalación CRS dispone del primer campo de heliostatos autónomos, que no precisa del uso de zanjas ni cableados, gracias al apoyo económico obtenido por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, en su Programa PROFIT.

La reflectividad nominal promedio del campo es del 90%, el error de seguimiento solar es de 1,2 mrad por eje y la calidad óptica en rayo reflejado es de 3 mrad. En condiciones típicas de irradiancia de 950 W/m<sup>2</sup>, la potencia térmica total del campo asciende a 2,7 MW y se obtiene un flujo pico de 2,5 MW/m<sup>2</sup>. El 99% de la potencia se recoge en un círculo con diámetro de 2,5 m y el 90% de la misma en un círculo de 1,8 m.

La torre de 43 m de altura es metálica y dispone de dos plataformas de ensayo. La primera plataforma ocupa dos niveles a 32 y 26 m de altura y es una zona diáfana preparada para acoger ensayos de nuevos receptores para aplicaciones químicas. La segunda se encuentra en la parte superior, a 43 m de altura, y alberga un recinto cerrado con puente grúa y un banco de ensayos

calorimétrico para la evaluación de pequeños receptores volumétricos a presión atmosférica.

La infraestructura de la torre se completa con una grúa con capacidad para 600 kg y un elevador de cremallera con capacidad para 1.000 kg.

El banco de ensayos consta de un circuito de aire de recirculación con ventilador axial y un calefactor eléctrico de 40 kW para controlar la temperatura del aire de retorno, así como instrumentación de medida de temperaturas, presión y caudal. El aire de salida del absorbedor es enfriado mediante el uso de un intercambiador de calor refrigerado por agua, la cual es usada como método indirecto para realizar el balance térmico. El banco calorimétrico viene siendo usado con éxito desde el año 1986, con las lógicas mejoras y actualizaciones, en la evaluación de todo tipo de absorbedores volumétricos metálicos y cerámicos.

Para la medida de flujo de radiación solar concentrada en ambas torres, se utilizan dos sistemas de medida Prohermes II (Programmable Heliostat and Receiver Measuring System II). Para ello, el haz de radiación solar concentrada incidente es interceptado por un blanco de características difusoras (lambertiano), situado en un plano paralelo e inmediatamente anterior al que contiene a la apertura del receptor, instante en el que un dispositivo CCD de alta



**Figura 9 Vista frontal del banco de ensayos de receptores volumétricos en la torre CRS, en el rango de 200-400 kW.**

resolución adquiere la correspondiente imagen.

Luego de un tratamiento exhaustivo de la imagen (sustracción del ruido electrónico de fondo, corrección de efectos aberrantes introducidos por el equipo de visión y rectificación geométrica), el valor en la escala de grises asociado a cada píxel experimenta una última transformación, denominada calibrado. Esta operación consiste en hallar experimentalmente una determinada ley o criterio que unívocamente asocie a cada valor dado de irradiancia solar ( $W/cm^2$ ) sobre un determinado lugar del blanco, un valor en la escala de grises del píxel asociado a esa misma posición obtenida previamente con la cámara. Una vez calibrado el mapa de píxeles, y conocida el área que estos representan individualmente sobre el blanco, puede integrarse la potencia total, así como realizar el cálculo del resto de las magnitudes de interés, tales como el pico o estadísticos de la distribución de irradiancia.

## Instalaciones con Concentradores de Foco Lineal: DCS, DISS, EURO-TROUGH y LS3

La PSA cuenta actualmente con diversas instalaciones de colectores solares cilindro parabólicos. Algunas de ellas, como es el caso de la instalación SSPS-DCS, fueron sistemas pioneros en Europa, mientras que otras instalaciones más modernas, como es el caso de la planta experimental DISS, son únicas en el mundo y colocan a la PSA en una posición privilegiada para la investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones para los colectores cilindro parabólicos. A continuación se explican, de forma resumida, las características principales de todas estas instalaciones.

### **LA PLANTA EXPERIMENTAL DISS**

Esta instalación fue montada y puesta en funcionamiento en el año 1998, con el fin de llevar a cabo experimentos relacionados con la generación directa de vapor a alta presión y temperatura (100 bar/400°C) en los tubos absorbentes de colectores cilindroparabólicos. La planta DISS es la única instalación existente actualmente en el mundo para el estudio bajo condiciones solares reales de todos aquellos procesos en los que se genere un flujo bifásico agua/vapor en colectores cilindroparabólicos. Resulta muy apropiada no solo para el estudio y desarrollo de esquemas de control para campos solares que funcionan con generación directa de vapor, sino también para el estudio y optimización de



Figura 10 Vista del campo solar de la planta DISS en funcionamiento

los procedimientos de operación que deben implementarse en este tipo de campos solares. Otras de las posibles aplicaciones de esta planta son: el estudio de los coeficientes de transferencia de calor en tubos horizontales por cuyo interior circula un flujo bifásico agua/vapor, y el ensayo de componentes para campos solares de colectores cilindro parabólicos con generación directa de vapor en sus tubos absorbedores.

La planta DISS consta de dos subsistemas: el Campo Solar con colectores cilindroparabólicos, y el Sistema de Potencia. En el campo solar, el agua de alimentación es precalentada, evaporada y convertida en vapor sobrecalentado conforme circula por los tubos absorbedores de una fila de colectores cilindro parabólicos de 650 m de longitud y 3.838 m<sup>2</sup> de superficie de captación solar. La instalación de dos nuevos colectores en el año 2003 ha permitido aumentar hasta 1 kg/s el caudal nominal de vapor sobrecalentado que puede producir la fila de colectores DISS.

El Sistema de Potencia de la planta DISS es el lugar donde el vapor sobrecalentado producido por el campo solar es condensado, procesado y utilizado de nuevo como agua de alimentación para el campo solar (funcionamiento en ciclo cerrado).

Esta instalación en su conjunto posee un alto grado de flexibilidad de operación, pudiendo trabajar en tres niveles diferentes de presión: 30, 60 y 100 bar, y con cualquiera de los tres procesos básicos de generación directa de vapor: Recirculación, Inyección y Un-Solo-Paso, o combinación de ellos. Además, está dotada de una completa gama de instrumentos que permiten una total monitorización del sistema.

La figura adjunta (Figura 11) muestra el esquema simplificado de la planta DISS. En ella se observa que el campo solar consta de una fila compuesta por 13 colectores solares cilindroparabólicos cuyo eje de rotación esta orientado en la dirección norte-sur. Los colectores están compuestos por módulos reflectantes cilindro parabólicos de 12 m de largo y 5,76 m de ancho. El campo solar consta de dos partes: la sección de precalentamiento/evaporación, y la sección de sobrecalentamiento. Al final de la sección de precalentamiento/evaporación existe una bomba de recirculación y un separador agua/vapor que aumentan la flexibilidad operativa del sistema. El Sistema de Potencia consta de separadores de agua/vapor, condensadores, sistema de dosificación química, precalentadores, desgasificador y bombas de agua.

Una de las características más importantes de la planta DISS es la posibilidad de medir el gradiente térmico en secciones transversales de los tubos absorbedores de los colectores solares cilindro parabólicos.

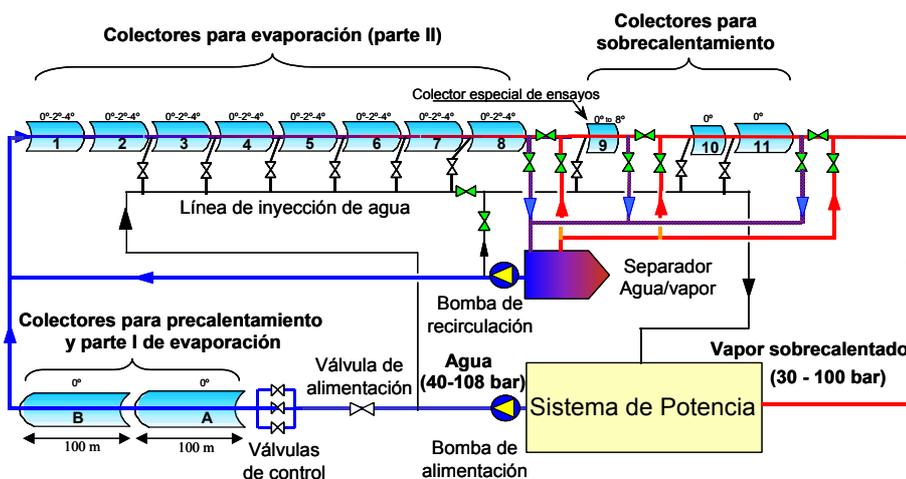


Figura 11 Esquema simplificado del lazo DISS existente en la PSA

### **EL LAZO DE ENSAYO LS-3 (HTF)**

El lazo de ensayo LS-3, también llamado lazo de ensayo HTF, fue instalado en el año 1997 y constituye una instalación idónea para evaluar, en condiciones reales de operación con energía solar, componentes para colectores cilindro parabólicos. Espejos, tubos absorbedores, sistemas de seguimiento solar, etc., pueden ser instalados y evaluados en esta instalación, que cuenta con los dispositivos de medida y monitorización adecuados para ello

La Instalación consta de un circuito cerrado de aceite térmico conectado a un colector solar formado por 4 módulos cilindro parabólicos del tipo LS-3, de 12 m de longitud y 5,7 m de anchura, con una superficie total de captación solar de 274 m<sup>2</sup>. El aceite térmico usado en esta instalación (Syltherm 800) tiene una temperatura máxima de trabajo de 420°C, y un punto de congelación de -40°C. El colector solar tiene su eje de rotación orientado en dirección Este-Oeste, lo que permite aumentar el número de horas al año en las que el ángulo de incidencia de la radiación solar es menor de 5°.

El circuito de aceite de esta instalación tiene una presión de trabajo máxima de 16 bar y está constituido por los siguientes elementos:

- Tanque de expansión para el aceite, de 1m<sup>3</sup> de capacidad, con sistema automático de inertización mediante nitrógeno.
- Tanque de drenaje del circuito de aceite
- Enfriador de aceite mediante flujo de aire, con un poder de enfriamiento máximo de 225 kW. Dispone de un variador de velocidad para controlar el caudal de aire.
- Bomba centrífuga de aceite, con un caudal de hasta 2,8 litros por segundo
- Calentador de aceite, de 40 kW, 3 x 380 V.

Dentro del lazo de ensayo HTF, y en paralelo con su colector solar, se encuentra instalado el primer prototipo de colector EUROROUGH. El diseño de colector EUROROUGH ha sido desarrollado por un consorcio europeo que con la ayuda financiera de la Comisión Europea ha diseñado, construido, montado en la PSA y evaluado bajo condiciones reales de operación un nuevo colector cilindro parabólico apto no solo para plantas termosolares de generación de electricidad, sino también para otras aplicaciones como la desalinización del agua de mar o la alimentación de grandes procesos industriales que consumen energía térmica dentro del rango 150°C – 425°C. Una vez concluido el proyecto EUROROUGH, los socios participantes en dicho proyecto han cedido este primer prototipo al CIEMAT para su operación y mantenimiento, pasando a formar parte de los sis-



Figura 12 Vista general del lazo LS-3

temas con colectores cilindro parabólicos que actualmente existen en la PSA. Con la instalación del colector EUROtrough en el lazo HTF, el área de captación de este sistema ha sido aumentada hasta los 685 m<sup>2</sup>.

## PLANTA SSPS-DCS CON SISTEMA DE DESALINIZACIÓN SOLAR

Esta instalación posee una potencia nominal de 1,2 MW<sub>t</sub>, y consta de cuatro subsistemas principales, tal y como se muestra en el esquema adjunto:

- Un campo solar compuesto por 40 colectores cilindro-parabólicos del modelo ACUREX 3001, agrupados en 10 filas paralelas, con 4 colectores conectados en serie dentro de cada fila. La superficie total de captación solar de este campo es de 2.672 m<sup>2</sup>, y el eje de giro de los colectores está orientado en la dirección este-oeste. El fluido utilizado por este campo de colectores es aceite sintético Santotherm 55, que posee una temperatura máxima de trabajo de 300°C. Los tubos absorbentes de los colectores solares son sin vacío y poseen un recubrimiento selectivo de cromo negro. Este campo solar tiene un rendimiento global del 50%, con una potencia pico de 1,3 MW<sub>t</sub> para una radiación solar directa de 950 W/m<sup>2</sup>. El suministro medio diario de energía térmica es de 6,5 MWh<sub>t</sub>.
- Un sistema de almacenamiento térmico consistente en un tanque termoclino de aceite, con un volumen interior de 115 m<sup>3</sup> y una capacidad de almacenamiento de 5 MWh<sub>t</sub>, para temperaturas de carga/descarga de 295/225°C. Está dotado de sistema antiincendios automático, válvulas automáticas de venteo y sistema de condensado para volátiles. Un enfriador de aceite refrigerado por agua permite el enfriamiento rápido del aceite para poder realizar ensayos de transitorios.
- Un sistema de generación de electricidad de 500 kW<sub>e</sub>, mediante un ciclo Rankine de agua/vapor. Este sistema está compuesto por: generador de vapor alimentado por el aceite caliente que suministra el campo solar y/o el tanque de almacenamiento; desgasificador; turbina de vapor; generador eléctrico y circuito de refrigeración mediante torres de evaporación.

El sistema de desalinización consiste en una planta de destilación multi-efecto con 14 etapas, denominada SOL-14, la cual está conectada al sistema de almacenamiento térmico descrito anteriormente. Para una producción nominal de 3 m<sup>3</sup>/h de destilado, el consumo de la planta es de 190 kW<sub>t</sub>, con un factor de rendimiento (número de kg de destilado producidos por cada 2.300 kJ de energía consumida) mayor de 9. La concentración salina del destilado se sitúa en torno a 50 ppm. El gradiente nominal de tempera-

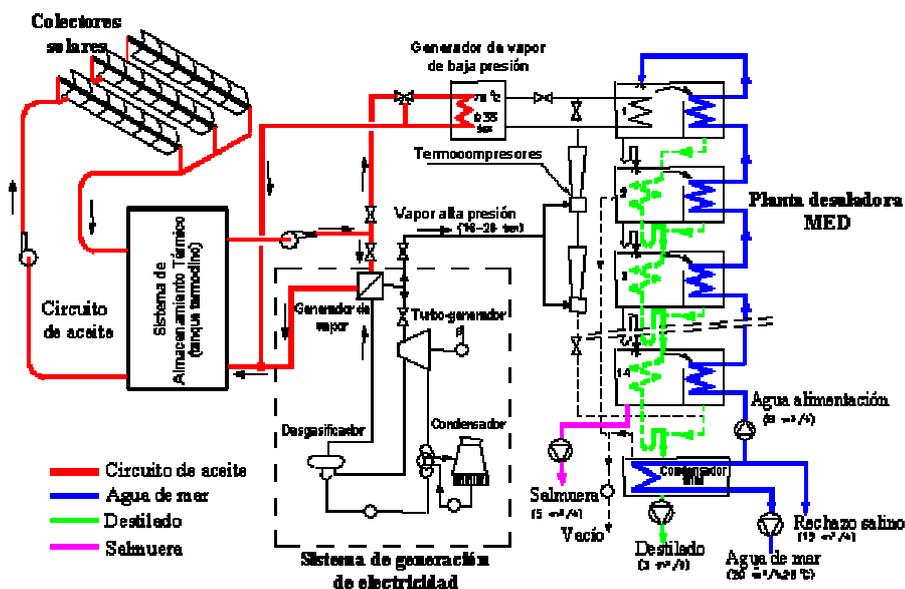
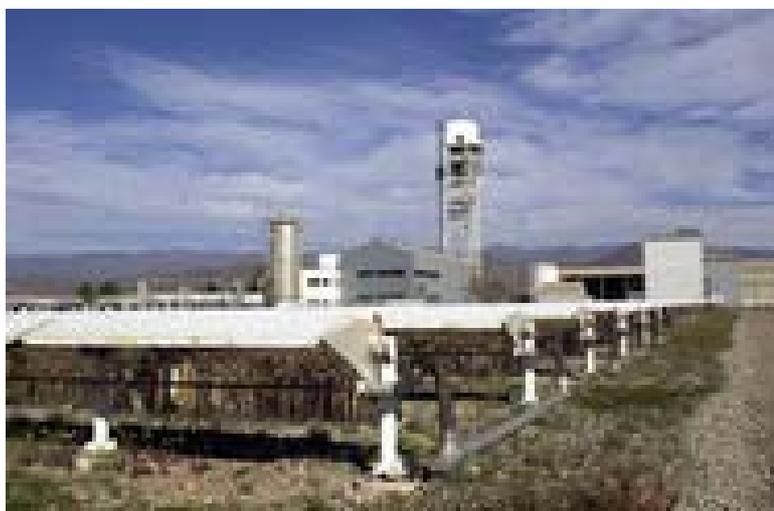


Figura 13 Esquema general de la planta SSPS-DCS

Capacidad:.....	3 m <sup>3</sup> /hora
Número de efectos:.....	14
Agua de entrada: .....	Agua de mar (35.000 ppm)
Producto: .....	Destilado ( $\leq 50$ ppm)
Factor de rechazo:.....	62%
Caudal: .....	8 m <sup>3</sup> /h (alimentación)
Consumo térmico:.....	63 kWh/m <sup>3</sup> (PR > 9)
Consumo eléctrico:.....	3 kWh/m <sup>3</sup>
Potencia solar: .....	1,2 MWp
Rendimiento: .....	50% (campo solar)
Superficie: .....	2762 m <sup>2</sup> de colectores
Tipo de colectores:.....	ACUREX 3001 (CCP)
Almacenamiento: .....	5 MWh (Therminol 55)
Temp. máx. (aceite):.....	300°C



**Figura 14** Especificaciones técnicas de la planta de Desalación Solar SOL-14 de la PSA y vista aérea de la misma: campo Acurex (primer plano), tanque de almacenamiento térmico (fondo izquierda) y planta MED (fondo derecha)

tura entre la primera y última etapas es de 40°C, con una temperatura de operación de 70°C en la primera etapa. El sistema de vacío está compuesto por dos hidroeyectores alimentados por agua de mar a 3 bar. Dicho sistema de vacío se utiliza para evacuar el aire de la unidad al comienzo de la operación y para compensar las pequeñas cantidades de aire y gases liberadas con el agua de alimentación, así como las pequeñas pérdidas que puedan producirse en las diferentes conexiones.

También se encuentra disponible en la instalación una bomba de calor por absorción de doble efecto (LiBr – H<sub>2</sub>O) que representa el primer prototipo real de un dispositivo de estas características para esta aplicación. El acoplamiento de dicha bomba permite aumentar el valor del factor de rendimiento de la planta MED hasta un valor de 20 gracias a la recuperación de las pérdidas de calor que se producen en el condensador final de la planta cuando ésta opera sin el acoplamiento de la citada bomba.

## Sistemas Disco-Stirling: DISTAL y EURODISH

### FUNDAMENTOS

Un sistema disco/Stirling consta de un espejo parabólico de gran diámetro con un motor de combustión externa tipo 'Stirling' emplazado en su área focal.

El espejo parabólico –disco- realiza seguimiento solar continuado, de manera que los rayos solares son reflejados en su plano focal, obteniéndose así un mapa de energía solar concentrada, de forma gaussiana y varias decenas de kW.

El motor Stirling es un motor de combustión externa que emplea el ciclo termodinámico del mismo nombre y que presenta dos ventajas que le hacen muy adecuado para esta aplicación:

- Es de combustión externa, es decir, el aporte energético puede realizarse mediante la luz solar recogida por el disco parabólico y concentrada en su zona focal.
- Es un ciclo de alto rendimiento termodinámico.

El motor Stirling lleva acoplado un alternador, de manera que dentro de un mismo bloque situado en el foco del disco concentrador se realiza la transformación de la energía luminosa en electricidad que se puede inyectar en la red eléctrica ó bien destinarla a consumo directo en alguna aplicación próxima al lugar de emplazamiento.

Los sistemas disco-Stirling tienen su aplicación más obvia en la producción de electricidad para autoconsumo en lugares aislados donde no llegue la red eléctrica, como ejemplos podemos citar: el bombeo de agua en pozos ó el suministro de electricidad a núcleos de viviendas rurales.

El rango óptimo de potencias para ser competitivo en el mercado energético estaría en el orden de unas decenas de kilovatios donde aspiraría a competir con sistemas ya comerciales como los fotovoltaicos o los generadores diesel.

Desde el comienzo de las actividades en 1992, tres generaciones de prototipos se han sido montadas y operadas rutinariamente en la PSA para su evaluación técnica: DISTAL I, DISTAL II y EuroDISH.

### DISTAL I

En operación desde 1992, esta instalación consistió inicialmente de 3 unidades de disco parabólico de 7,5 metros de diámetro capaces de recoger hasta 40 kW<sub>t</sub> de energía, con un motor Stirling SOLO V160 capaz de generar hasta 9 kW<sub>e</sub> situado en su zona focal.

El prototipo de concentrador se construyó aplicando la tecnología de membrana tensionada, la cual mantiene la forma parabólica mediante una pequeña bomba de vacío. Su reflectividad es del 94% y es capaz de concentrar la luz solar hasta 12.000 veces en el centro de

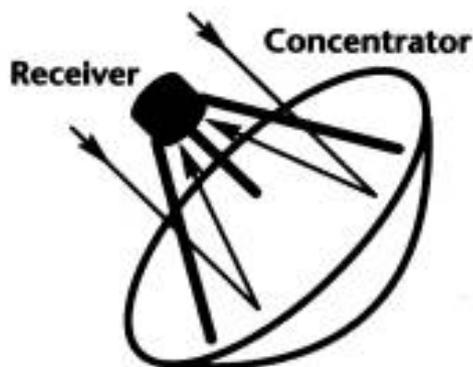


Figura 15 Esquema de funcionamiento de un disco parabólico con motor Stirling en el foco.



Figura 16 Un sistema DISTAL I en operación en la Plataforma Solar de Almería

su foco de 12 cm de diámetro. Su distancia focal es de 4,5 metros y el sistema de seguimiento es polar.

Dos unidades DISTAL I fueron desmanteladas en el año 2000 para ser reemplazadas por unidades EuroDISH de tercera generación.

## **DISTAL II**

Como primer intento por obtener un sistema de mejores prestaciones y coste por kW<sub>e</sub> más reducido, se llevó a cabo el proyecto DISTAL II.

Durante los años 1996 y 1997 fueron instalados y puestos en operación rutinaria tres nuevos discos basados en la tecnología de membrana tensionada.

Estos prototipos tienen un diámetro ligeramente mayor, 8,5 m, con lo que la energía térmica aportada al motor es de 50 kW<sub>t</sub>. Su distancia focal es de 4,1 m y el valor máximo de concentración es de 16.000 soles en el centro de su foco.



Figura 17 Unidad DISTAL II

El motor Stirling también ha evolucionado, tratándose ahora del modelo SOLO V161, de 10 kW<sub>e</sub>.

El sistema de seguimiento es ahora del tipo acimut-elevación, con lo que se consigue la operación automática en modo orto-ocaso.

## **EuroDISH**

El segundo y, por ahora, último intento para acercar esta tecnología al umbral de la rentabilidad económica ha sido el proyecto hispano-alemán 'EuroDISH'.

Se han diseñado y construido dos nuevos prototipos, en los cuales se ha pretendido actuar sobre los siguientes aspectos:

- Reducción del precio de los componentes mediante la identificación de elementos de uso estándar en la industria.
- Desarrollo de un nuevo sistema de fabricación para el disco concentrador. Se ha abandonado la tecnología de membrana tensionada y se ha utilizado un sistema de moldes y material 'composite'.
- Mejora del motor 'Stirling' SOLO V161, especialmente de aquellos componentes utilizados en la cavidad que recibe la energía solar concentrada.
- Desarrollo de un nuevo procedimiento optimizado para el montaje del sistema, usando nuevas herramientas especiales.
- Control y monitorización remotos a través del WWW.
- Ensayo de unidades precomerciales como sistemas de referencia.



Figura 18 Nuevo receptor de tubos para la cavidad absorbadora del motor Stirling



Figura 19 EuroDISH vista desde delante y detrás

## El Horno Solar

### DESCRIPCIÓN GENERAL Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los hornos solares alcanzan los más altos niveles energéticos que se pueden obtener con un sistema solar de concentración, habiéndose conseguido concentraciones por encima de los 10.000 soles.

Su campo de aplicación comprende principalmente los ensayos de materiales, tanto en condiciones ambientales como en atmósferas controladas o vacío, y experimentos de química solar mediante receptores asociados a reactores químicos.

Constan esencialmente de un heliostato plano que realiza seguimiento solar continuo, un espejo parabólico concentrador, un atenuador o persiana y la zona de ensayos situada en el foco del concentrador [Martínez y Rodríguez, 1998].

El espejo captador plano –heliostato- refleja los rayos solares paralelos y horizontales sobre el disco parabólico, el cual los vuelve a reflejar concentrándolos en su foco (área de ensayos). La cantidad de luz incidente se regula mediante el atenuador situado entre el concentrador y el heliostato. Bajo el foco se encuentra la mesa de ensayos que tiene movimiento en las tres dimensiones espaciales (Este-Oeste, Norte-Sur, arriba-abajo), y sirve para posicionar las probetas con gran exactitud en el foco.

### HELIÓSTATOS

Los heliostatos están formados por una superficie reflectiva compuesta por múltiples facetas planas –no concentradoras- que reflejan los rayos solares horizontales y paralelos al eje óptico del concentrador y hacen seguimiento continuo del disco solar.

El horno solar de la PSA consta de cuatro heliostatos dispuestos en dos niveles, cada uno de los cuales enfoca a una esquina del concentrador, de manera que se asegura la iluminación completa del concentrador durante el periodo operativo.

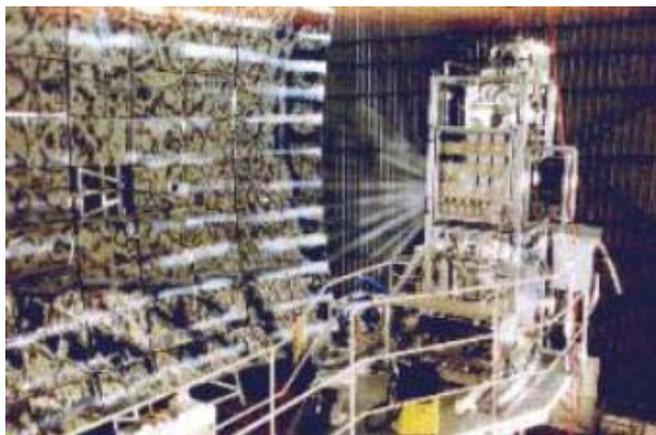
Los heliostatos constan de 16 facetas de tipo sandwich de 3,35 m<sup>2</sup>, lo que da un total de 53,58 m<sup>2</sup>. Cada una está compuesta por dos espejos con un 90% de reflectividad y van fijadas a un marco portante por 30 ventosas.

## **CONCENTRADOR**

El disco concentrador es el componente principal del horno solar. Concentra la luz incidente proveniente del helióstato, multiplicando la energía radiante en la zona focal. Sus propiedades ópticas afectan especialmente a la distribución de flujo en el foco.

Está compuesto por 89 facetas esféricas con un total de 98,5 m<sup>2</sup> de superficie y un 92% de reflectividad. Su distancia focal es de 7,45 m.

La superficie parabólica se consigue con el uso de facetas de curvatura esférica, distribuidas según cinco radios de curvatura distintos según su distancia al foco.



**Figura 20** Disco concentrador del Horno Solar (izquierda) y receptor en operación dentro de la zona focal (derecha).

## **ATENUADOR**

El atenuador consiste en un conjunto de lamas dispuestas horizontalmente que, mediante un movimiento giratorio sobre su eje, regulan la entrada de luz solar incidente en el concentrador. La energía total en el foco es proporcional a la radiación que pasa a través del atenuador.

Está compuesto por 30 lamas dispuestas en dos columnas de 15. En posición cerrado las lamas forman un ángulo de 55° con la horizontal y en abierto 0°.



**Figura 21** El foco y la mesa de ensayos, a la izquierda de la foto. A la derecha, el atenuador totalmente abierto permite el paso de los rayos procedentes de los helióstatos, situados en el exterior

## **MESA DE ENSAYOS**

Es un soporte móvil situado bajo el foco del concentrador. Tiene movimiento en tres ejes (X,Y,Z) perpendiculares entre si, y sirve para posicionar con gran precisión en el área focal las probetas a ensayar.

## **DISTRIBUCION DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN EL FOCO**

La distribución de la densidad de flujo en el foco es el elemento que caracteriza a un horno solar. Esta distribución suele tener geometría gaussiana y para su caracterización se emplea una cámara CCD conectada a un procesador de imágenes, y un blanco lambertiano. Las características del foco para el 100% de apertura y una radiación solar de 1000 W/m<sup>2</sup> son: Pico de flujo: 3000 kW/m<sup>2</sup>, potencia total: 58 kW, y diámetro del foco: 23 cm [Neumann, 1994].

## **MEJORA DE LAS INSTALACIONES**

Después de 12 años en funcionamiento, las facetas de los 4 helióstatos MBB estaban deterioradas por la corrosión, además de que había algunas facetas rotas para las cua-



Figura 22 Nuevo heliostato GM-140

les no se disponía de repuesto y las condiciones del horno iban empeorando de día en día, por lo que se decidió sustituir los cuatro heliostatos del horno por uno solo que, situado lo más próximo posible al concentrador, funcionara con ventaja sobre los cuatro anteriores, ya que se trata de una sola gran superficie reflexiva que da lugar a un solo foco y, por tanto, a una mayor concentración.

En el mes de julio fue terminado de instalar y puesto en marcha el **nuevo heliostato GM-140** que, situado a 28 m del atenuador, hace que se concentre en un solo foco toda la energía del horno, en lugar de los cuatro focos –uno por cada uno de los antiguos cuatro heliostatos– en que se concentraba anteriormente.

Este nuevo heliostato consta de 32 facetas planas de 3,22 m x 1,36 m, y un total de 140 m<sup>2</sup> de superficie, lo que constituye la mayor superficie reflexiva operativa actualmente en la PSA. Si bien aún no se ha medido, se espera un error óptico total del heliostato  $\sigma$  inferior a 2 mrad.

Para el montaje del heliostato se han aprovechado el pedestal y el cabezal del antiguo heliostato GM-100; la empresa Solucar ha diseñado y fabricado el nuevo brazo, las facetas y su estructura portante. Todo el cuadro de control así como el software de seguimiento se han hecho en la PSA.

Por otro lado ha sido una aspiración constante del Grupo de Materiales de la PSA el mejorar el factor de concentración del horno solar, ya que, aunque de una potencia considerable para este tipo de instalaciones, 60 KW, su concentración pico es de 3000 soles, lo que resulta insuficiente para algunos ensayos que demandan una gran cantidad de energía instantánea para alcanzar un gran gradiente térmico o una muy alta temperatura (2000°C), por lo que se decidió adquirir un concentrador parabólico del tipo de los usados en los sistemas disco/Stirling EuroDISH que fabrica la empresa alemana Mero GmbH.

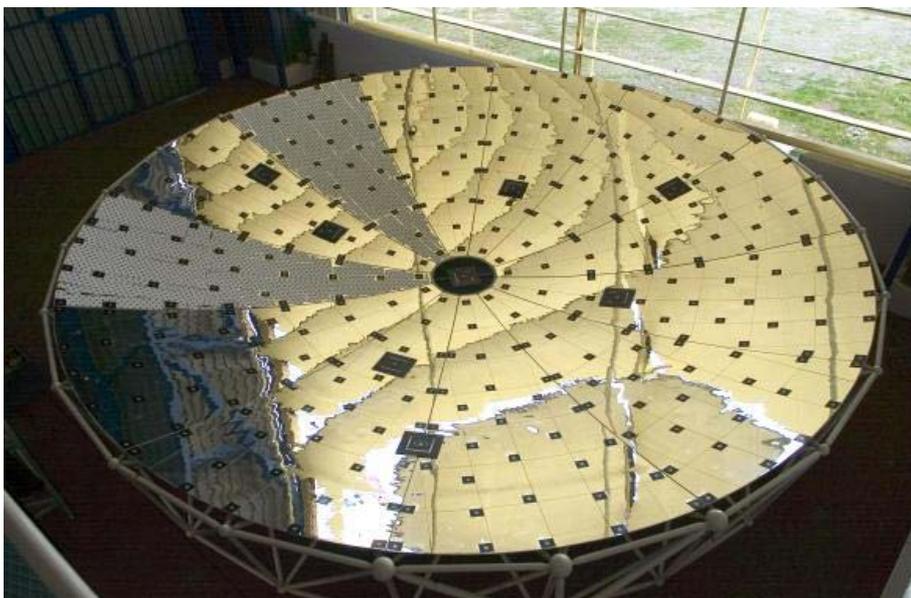


Figura 23 Nuevo concentrador parabólico EuroDISH

El **nuevo concentrador parabólico EuroDISH** está formado por 12 sectores (pétalos) de fibra de vidrio curvados parabólicamente y pegados entre sí con un pegamento de dos componentes y una tira de fibra de vidrio que da lugar a una superficie parabólica rígida y ligera. La cara frontal incluye la superficie reflexiva compuesta de láminas delgadas de espejo de 0,8 mm de espesor. Toda ella soportada por una estructura espacial en forma de anillo formada mediante tubos unidos entre sí por pequeñas esferas a modo de nudos.

Su superficie es de 56 m<sup>2</sup>, y, si bien aun no se ha podido medir el flujo de este nuevo concentrador, se esperan concentraciones por encima de los 6000 soles, suficientes para llevar a cabo ensayos de muy alta temperatura y grandes gradientes de subida que permitirán abordar ensayos hasta ahora fuera del alcance del horno.

El concentrador fue ensamblado en noviembre en la sala de ensayos del horno y se está diseñando una estructura portante móvil para instalarlo delante del actual concentrador, de forma que ambos discos puedan ser intercambiables para poderlos utilizar indistintamente según el tipo de ensayo a realizar.

Además se ha montado la torre portante del nuevo horno de eje vertical, en la fachada sur de la nave del horno. La torre tiene una altura total de 18 m; la base es de 5 m x 5 m, y a 15 m del suelo se ha instalado el atenuador de lamas horizontales. En el centro de la base de la torre se va a instalar un nuevo helióstato, ya fabricado, llamado HT-25 de 25 m<sup>2</sup> de superficie reflexiva; en la parte superior se montará el nuevo concentrador de eje vertical de 3,5 m de diámetro, y bajo éste y sobre el atenuador estará la mesa de ensayos.



**Figura 24 Torre para el nuevo horno solar de eje vertical**

## Instalaciones de Química Solar y Desalación

### **INSTALACIONES DETOX / SOLFIN PARA APLICACIONES DE FOTOQUÍMICA SOLAR**

Las primeras plantas piloto con reactores para descontaminación solar fueron desarrollados a principios de los 90 en la Plataforma Solar de Almería (con el apoyo de la UE). La configuración actual de la planta piloto para fotoquímica basada en colectores tipo CCP (Collector Cilindro Parabólico) está compuesta por 4 colectores solares (128 m<sup>2</sup>) del tipo cilindro-parabólico con seguimiento solar en dos ejes. El factor de concentración que se alcanza en ellos es de 10.5 soles. El colector solar utilizado, denominado "Helioman" consiste en una torreta sobre la cual se encuentra una estructura que soporta un total de 32 espejos en 4 parábolas paralelas totalizando un área de 32 m<sup>2</sup>. El caudal de trabajo puede ser variado desde 500 hasta 4000 L/h. Todas las tuberías, depósitos y accesorios son de HDPE (polietileno), material de gran resistencia a la mayoría de agentes químicos. El tubo absorbedor (vidrio borosilicatado de 56 mm. de diámetro y 2 mm. de espesor) tiene una longitud de 16 m. por módulo, lo que totaliza 64 m.

Posteriormente se han instalado otras plantas piloto basadas en CPCs (colectores cilindroparabólico compuestos). Estos colectores son capaces de aprovechar tanto la radiación difusa como la directa. Los reflectores CPC están hechos de aluminio anodizado. En la PSA hay instaladas 3 plantas empleando este tipo de colectores. La mayor consta de tres módulos cada uno con una superficie de 3 m<sup>2</sup> con una inclinación sobre la horizontal de 37°. Para la operación del sistema se dispone de un sistema de bomba-tanque-tuberías de interconexión. El volumen total del sistema es de aproximadamente 250 L y el del tubo absorbedor es de 108 L (volumen iluminado). Recientemente se ha concluido la instalación de un nuevo colector de 15 m<sup>2</sup> que aumentará el volumen hasta 300 L. Este colector es el modelo más avanzado de los desarrollados en los últimos años y se espera que diferentes plantas de tratamiento a desarrollar en varios proyectos estén basadas en él. Además, se dispone de 2 pequeños prototipos gemelos para realizar experiencias en paralelo. Cada reactor está constituido por tres módulos de ocho tubos de vidrio cada uno. Los tres módulos (3.08 m<sup>2</sup>) de cada reactor están montados en una plataforma fija inclinada 37° (latitud local). El volumen total del reactor es de 40 L, de los cuales 22 L es el volumen total irradiado y el resto formado por tuberías y tanque.

También se dispone de 3 sensores de medición de radiación ultravioleta solar, uno de directa con unidad de seguimiento solar y 2 de global en posición horizontal e inclinada 37° (el mismo ángulo que los CPCs) con respecto a la superficie terrestre. Todos los datos son enviados a un ordenador que los almacena para la posterior evaluación de los resultados.

A finales de 2003, y debido al cierre de las actividades en este tema, se ha desmantelado la instalación denominada SOLFIN (Solar Synthesis of Fine Chemicals).

El laboratorio de Química Solar de la PSA es un edificio de unos 75 m<sup>2</sup> diseñado para contener todos los dispositivos relacionados con un laboratorio de química convencional: mesas de trabajo, campana extractora de gases, almacén de productos químicos en pequeñas cantidades, central distribuidora de gases técnicos, sistema de tensión segura, sistemas de seguridad (extintores, ducha, lavaojos etc.), bancada para balanzas de precisión, sistema de ultrapurificación de agua, baño de ultrasonidos, baño termostático, centrífuga, sistema de destilación a vacío, así como muchos otros sistemas de uso normal en un laboratorio de química. Además, se dispone de los siguientes equipos analíticos, todos ellos relacionados con la Química Ambiental: Cromatógrafo de Líquidos (Bomba cuaternaria con detector de diodos e inyector automático), Cromatógrafo de Gases (FID y TCD) con Sistema de Purga y Trampa (análisis de volátiles disueltos en agua), Cromató-



**Figura 25 Vista general de las instalaciones para aplicaciones de Fotoquímica Solar basadas en colectores CPC con el nuevo colector en primer plano**

grafo iónico configurado para analizar aniones en isocrático, Cromatógrafo iónico configurado para analizar aniones y cationes en gradiente, Analizador de COT (con inyector automático), Espectrofotómetro UV-Visible, DQO, DBO. Todos estos sistemas están informatizados mediante una completa red de ordenadores. Además, en él se encuentra el único nodo instalado en Almería para medición de UVB/UVA/PAR de la Red Andaluza (14 estaciones).

### **BANCO DE ENSAYOS DE QUÍMICA SOLAR**

Este banco de ensayos, ubicado en las instalaciones del DER (Madrid), permite realizar ensayos a escala laboratorio para determinar la viabilidad de los procesos que más tarde se realizarán en las distintas instalaciones solares previamente mencionadas. La utilización de este banco de ensayos ha sido fundamental para determinar aspectos termodinámicos y cinéticos de los procesos estudiados. Básicamente, el sistema de laboratorio consta de un foto-reactor de pyrex que opera en recirculación y utiliza un simulador solar con lámpara de Xenón como fuente de luz (1000 W). Dicho sistema cuenta con un control automático de medida de temperatura, pH, concentración de oxígeno y CO<sub>2</sub> por medio de sondas. Además, las técnicas analíticas HPLC, GC, etc, disponibles permiten conocer con exactitud todos los parámetros de la reacción estudiada. Entre los distintos procesos que se están estudiando en la actualidad a escala laboratorio destacan los siguientes:

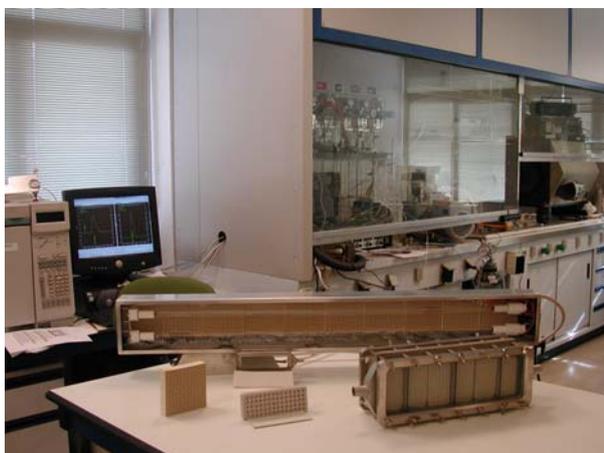


**Figura 26 Banco de ensayos del Proyecto de Química Solar**

- Viabilidad del sistema Fe<sup>+2</sup> - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con radiación solar concentrada para el tratamiento de efluentes.
- Viabilidad técnica de determinados procesos de almacenamiento fotocatalítico de la radiación solar, p. e. reducción foto-asistida de CO<sub>2</sub> mediante catalizadores de RuO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>.

### **LABORATORIO DE DETOXIFICACIÓN EN FASE GASEOSA**

El laboratorio de Detoxificación en Fase Gaseosa se encuentra situado en el edificio E42.P1.10 del Departamento de Energías Renovables en Madrid. Permite ensayar en condiciones controladas de concentración de contaminantes, presión, temperatura y flujos, tanto de gases como radiantes, cualquier Compuesto Orgánico Volátil (VOC) y determinar las eficiencias de destrucción. Como fuente de energía utiliza energía solar o lámparas UV, individualmente o en modo mixto, sobre distintos tipos de catalizadores y reactores. Para ello, se dispone de un sistema de alimentación y control másico de gases, banco de ensayos con radiación solar real situado en la cubierta del laboratorio, y banco



**Figura 27 Distintos tipos y configuraciones de reactores y catalizadores –planos, monolíticos, tubulares- ensayados en fase gaseosa**

de ensayos mediante simulador solar por lámpara de xenón. La instrumentación analítica asociada está constituida, básicamente por CG y CG-MS, asociado a un sistema de desorción térmica, más analizadores de SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en continuo.

## Otras Instalaciones

### PLATAFORMA DE ENSAYO DE COLECTORES SOLARES ESTÁTICOS

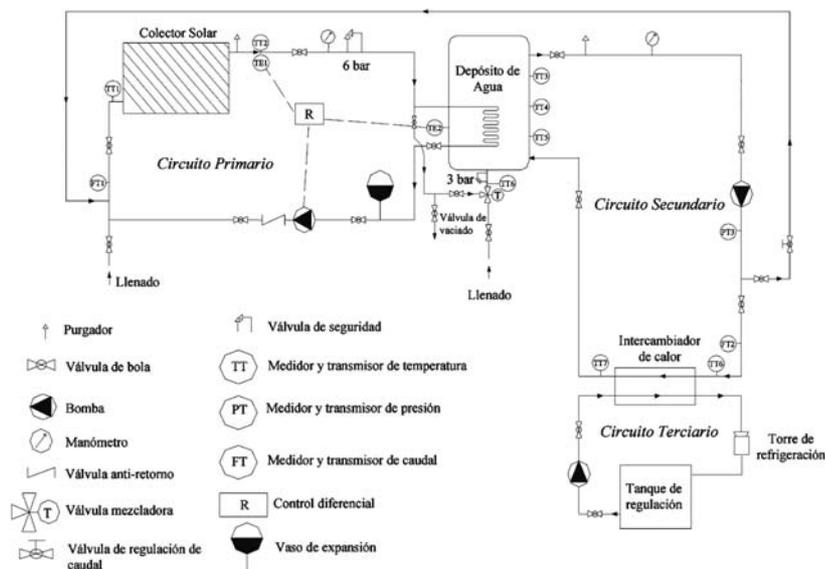


Figura 28 Esquema general de la plataforma de ensayo de colectores solares estáticos

Esta instalación fue construida durante el año 2002 con objeto de ofrecer servicios adicionales a la comunidad científica investigadora, entre los que destaca la posibilidad de poder llevar a cabo la caracterización energética de colectores solares estáticos, con un énfasis especial en su posible aplicación en procesos de desalación solar.

La instalación cuenta con tres circuitos hidráulicos independientes. En el circuito primario el fluido (agua o mezcla de agua con anticongelante) es calentado a su paso a través del colector solar entregando la energía adquirida al agua depositada en un tanque de almacenamiento. En el circuito secundario, el agua procedente del tanque es bombeada hacia un intercambiador de calor con objeto de transferir su energía al circuito terciario. Este intercambiador de calor simularía la introducción de agua caliente en la primera celda de una planta de destilación multi-efecto. Finalmente, el agua que circula por el circuito terciario es impulsada hacia una torre de refrigeración donde la energía adquirida procedente del circuito secundario es disipada hacia el ambiente.



Figura 29 Vista de la plataforma de ensayo de colectores solares estáticos

## **ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA**

La estación meteorológica de la Plataforma Solar de Almería, se encuentra ubicada en estas instalaciones. Si bien originariamente se encontraba en la zona sureste, actualmente se está trasladando a la zona suroeste, más alejada de las influencias de las reflexiones de dispositivos cercanos. Esta estación ha estado tomando medidas de la radiación solar recibida en este emplazamiento, así como de numerosas variables meteorológicas, desde 1988. Entre las variables registrados cabe destacar: la radiación global, directa y difusa, la temperatura ambiente a 2 y 10 m, la velocidad de viento a 2 y 10 m, la dirección de viento a 10 m, la humedad relativa a 2 y 10 m la presión atmosférica y la precipitación acumulada. Si bien durante el periodo 1988-1998, se ha registrado el valor medio, máximo y mínimo de cada canal durante 5 minutos, desde 1999 se procedió a registrar el valor de cada canal cada dos segundos.



Figura 30 Nueva Estación Meteorológica en la PSA

## **LABORATORIO DE ENSAYOS ENERGÉTICOS PARA COMPONENTES DE LA EDIFICACIÓN (LECE)**

El Laboratorio de Ensayos Energéticos para Componentes de la Edificación (LECE) es otra de las instalaciones que se encuentran en la PSA. Este laboratorio está integrado y gestionado directamente por programa de I+D Arquitectura Bioclimática del Departamento de Energías Renovables de CIEMAT y forma parte de la red de interés económico PASLINK EEIG que integra a laboratorios europeos con las mismas características. El Laboratorio consta de cuatro células de ensayo con instrumentación completa para el ensayo de componentes convencionales y solares pasivos del edificio, y además hace uso de las infraestructuras y excelentes condiciones de la PSA para aplicaciones solares.

El objeto de la instalación LECE es contribuir a la mejora de conocimiento sobre la calidad energética de elementos de la edificación llevando a cabo experimentos para determinar sus propiedades térmicas de cerramientos tales como el coeficiente global de transferencia de calor, el factor de ganancia solar o los tiempos de respuesta del sistema. Además se desarrollan otro tipo de ensayos entre los que deben citarse, por su importancia respecto a las condiciones climáticas en España, los referentes a fenómenos de ventilación. El conocimiento de esas propiedades sirve para mejorar el diseño de edificios con vistas a aumentar su ahorro energético sin pérdida de confort y para predecir el comportamiento térmico de los mismos.



**Figura 31 Vistas del LECE: Células, edificios referencia y chimenea solar**

Las actividades llevadas a cabo en LECE se pueden clasificar en:

- Apoyo experimental a la elaboración de normas y reglamentaciones.
- Actividades experimentales propias del programa I+D sobre Arquitectura Bioclimática de CIEMAT.
- Colaboración y servicio a los fabricantes de materiales y componentes para la edificación.

## Proyectos de I+D

### Introducción

La actividad de I+D en la PSA ha estado estructurada durante el año 2003 según el esquema de la Figura 32, con tres Proyectos CIEMAT claramente focalizados en aspectos y aplicaciones de la tecnología solar de concentración, y un cuarto Proyecto, complementario a los otros tres, dedicado a dar a conocer nuestras actividades y actuar de catalizador de posibles nuevas colaboraciones mediante el acceso al uso de nuestras instalaciones por parte de grupos de investigación procedentes de otras instituciones.

En tecnología de receptor central, el año 2003 ha servido para llevar a cabo las campañas de ensayo de dos sistemas de receptores volumétricos refrigerados por aire, SOLAIR y SOLGATE, que permiten afirmar que la tecnología de aire atmosférico y presurizado se encuentra ya cualificada a escala de planta piloto, en el rango de unos pocos megavatios.

La PSA ha reforzado también su actividad en el desarrollo y ensayo de nuevos conceptos de helióstatos. En concreto se ha completado la validación de un nuevo prototipo de 120 m<sup>2</sup> para la futura planta Sanlúcar Solar y se ha reconvertido todo el campo CRS al concepto de 'campo de helióstatos autónomos' gracias al proyecto PCHA. Asimismo, se han iniciado nuevos proyectos en este campo: MEGAHELIO, SPACE-CIL y Concentrador Solar Monocéntrico, todos ellos con financiación nacional y orientados a la exploración de ideas novedosas para la reducción de costes.

En lo referente a la tecnología de colectores cilindro parabólicos, la actividad durante el año 2003 ha estado basada fundamentalmente en el proyecto europeo INDITEP. Este proyecto constituye la lógica continuación técnica del proyecto DISS, en el cual se de-

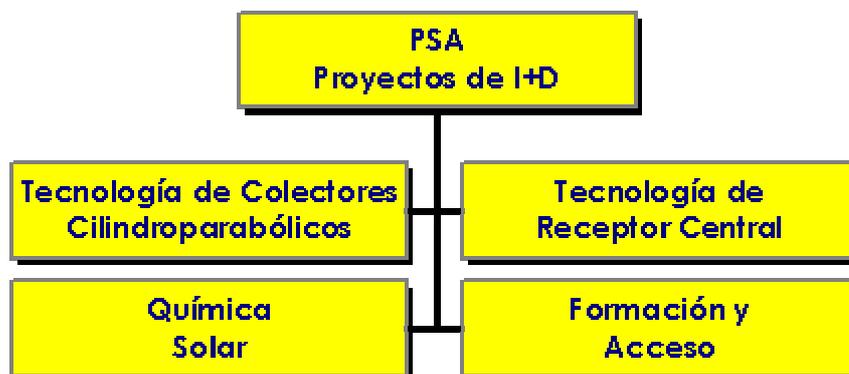


Figura 32 Proyectos que configuran la actividad de I+D en la PSA

mostró la viabilidad técnica del proceso de Generación Directa de Vapor (GDV) en colectores cilindro parabólicos. El siguiente paso lógico, objetivo del INDITEP, es la optimización del proceso y de sus componentes esenciales, así como acometer el diseño de detalle de una primera central eléctrica termosolar comercial que funcione con generación directa de vapor en el campo solar.

En el año 2003, las actividades de PSA-CIEMAT han estado principalmente centradas en tres temas:

1. La participación en la ingeniería de detalle de una planta GDV de 5 Mwe.
2. La mejora del campo solar de la planta DISS existente en la PSA para aumentar la producción de vapor sobrecalentado hasta 1 kg/s.
3. El desarrollo de nuevos recubrimientos selectivos mediante la técnica 'Solgel'.

La mejora del campo DISS ha constituido un gran esfuerzo de montaje, puesta a punto y caracterización. Una vez finalizado el montaje de los dos nuevos colectores en el mes de julio, se llevaron a cabo las pruebas de presión a 180 bar y se procedió a la instalación del aislamiento térmico. Las primeras pruebas de funcionamiento de los nuevos colectores tuvieron lugar en el mes de octubre. En la actualidad el sistema se encuentra completamente operativo.

Por otro lado, el proyecto PREDINCER, de ámbito nacional, cuenta con la financiación parcial del Ministerio de Ciencia y Tecnología. Dentro de este proyecto el CIEMAT colabora con Grupos de Investigación de las Universidades de Almería y Sevilla, para desarrollar y evaluar nuevos algoritmos de control predictivo para procesos con incertidumbres acotadas, aplicables a campos solares con colectores cilindro parabólicos.

Dentro de este proyecto, y en relación con el análisis y desarrollo de técnicas de modelado e identificación, se han empezado a realizar este año análisis de estructuras de modelos lineales y se está estudiando la acotación de las incertidumbres en el caso concreto de la planta DISS de la PSA para tener este aspecto en cuenta desde el punto de vista de control en los distintos modos de operación de dicha planta.

En cuanto al Proyecto de Química Solar, durante este año se ha consolidado el proceso de ampliación del ámbito de actividad, pasando del anterior, básicamente circunscrito a aplicaciones fotoquímicas a otro mucho mayor en el que se pretenden abordar también problemáticas de mucho mayor calado e interés a escala global.

El comienzo de los proyectos AQUASOL, CADOX y SOLWATER (conjuntamente con el proyecto gemelo AQUACAT), todos ellos coordinados desde la PSA es, a la vez que un importante reto para la capacidad de gestión y liderazgo del grupo de Química Solar, una notable oportunidad de desplazar el núcleo de las actividades del Proyecto desde las aplicaciones de degradación fotocatalítica de contaminantes (en fases acuosa y gaseosa) hacia temas diversos pero complementarios, fundamentalmente centrados en la problemática del agua: degradación de contaminantes, potabilización de agua y desalación de agua de mar, todo ello mediante procesos basados en la energía solar.

Todos los recientes informes publicados por diversos organismos de la Naciones Unidas coinciden en señalar a la problemática del agua como uno de los temas que van a resultar más importantes y trascendentes durante, al menos, las primeras décadas del presente siglo, debido a su impacto sobre un sector muy importante de la población mundial. La fuerte sinergia que existe entre la radiación solar y las aplicaciones asociadas a procesos del agua permiten prever una importante actividad en este campo, sostenida durante los próximos años.

Las actividades de I+D en la PSA se ven complementadas con un Proyecto de Formación y Acceso que gira fundamentalmente sobre la catalogación que la PSA tiene como Gran Instalación Científica por parte del programa IHP (Improving Human Potential) de la Comisión Europea. Gracias a dicho proyecto, un total de 60 grupos de investigación europeos han tenido acceso a las instalaciones de la PSA en el periodo 2000-2003.

El estado general de actividad de I+D en la PSA durante el año 2003 ha sido altamente satisfactorio, con una clara consolidación de las líneas de trabajo en receptores y concentradores solares, almacenamiento térmico, desalación, detoxificación de efluentes y la aparición de nuevas actividades en producción de hidrógeno solar por vía termoquímica.

Esta situación permite vislumbrar un entorno estable de trabajo, unos proyectos consolidados y unos objetivos claros, con compromisos que en algunos casos marcan un horizonte de actividad en I+D hasta el año 2006.

Dentro del contexto nacional la PSA viene manteniendo una estrecha colaboración con la mayoría de las empresas relacionadas con la concentración solar para aplicaciones eléctricas, térmicas y químicas y con universidades como la Universidad de Sevilla, Almería y UNED.

La PSA dispone de unos recursos humanos e infraestructuras únicos en tecnología de concentración solar, que hacen que cualquier desarrollo o proyecto de planta termosolar en España cuente con la participación de CIEMAT.

En el ámbito internacional, cabe reseñar la participación en las Tareas I, II y III del programa SolarPACES de la Agencia Internacional de la Energía, donde se intercambia información y se realizan tareas a costes compartidos con centros homólogos en EEUU, Alemania, Suiza, Australia, Rusia, Israel, Francia, etc. En la actualidad se trata de la única red de expertos en tecnología y sistemas termosolares de concentración. Bajo el paraguas del V Programa Marco en su Programa de Energía y del Convenio Hispano-Alemán, se colabora intensamente con el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) con el que se mantiene una tradicional participación en proyectos conjuntos.

## Tecnología de Receptor Central

Los sistemas de torre o de tecnología de receptor central (TRC) consisten en un gran campo de helióstatos o espejos que siguen la posición del Sol en todo momento (elevación y acimut) y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre. Al tratarse de un foco fijo, se considera una óptica fuera del eje, por lo que su análisis y optimización optico-energética es más complejo. Los órdenes de concentración solar son de 200 a 1000 y las potencias unitarias de 10 a 50 MW, menores que en las plantas de concentradores cilindro-parabólicos. Pueden utilizar una gran variedad de fluidos térmicos, como vapor saturado, vapor sobrecalentado, sales fundidas, aire atmosférico y aire presurizado, con rangos de temperaturas de operación entre los 300°C y los 1000°C. Se trata de una tecnología en la que la PSA cuenta con una larga tradición investigadora ya que posee dos instalaciones absolutamente privilegiadas como son las plantas CESA-I y CRS con bancos de ensayos muy flexibles para el ensayo y validación de componentes y subsistemas.

Por los altos flujos de radiación incidente (típicamente entre 300 y 1.000 kW/m<sup>2</sup>), permiten trabajar a altas temperaturas e integrarse en ciclos más eficientes de forma escalonada pasando desde ciclos Rankine con vapor de agua sobrecalentado hasta su integración en ciclos Brayton con turbinas de gas, admiten fácilmente el funcionamiento híbrido en una gran variedad de opciones y tienen el potencial de generar electricidad con altos factores de capacidad mediante el uso de almacenamiento térmico, pudiéndose plantear ya en la actualidad sistemas superando las 4.500 h equivalentes al año.

Los sistemas de receptor central, después de la fase de escalación y demostración del concepto, se encuentran hoy en día en puertas de comenzar su primera etapa de explotación comercial. Hasta hoy, se han ensayado más de 10 instalaciones experimentales de receptor central en el mundo. Generalmente se trata de pequeños sistemas de 0,5 a 10 MW, y la mayoría operados en los años ochenta. Aquella experiencia sirvió para de-

mostrar la viabilidad técnica del concepto y su capacidad para operar con grandes sistemas de almacenamiento térmico. La experiencia más extensa ha tenido lugar en varios proyectos desarrollados en la Plataforma Solar de Almería y en las plantas Solar One y Solar Two en Barstow (California). Los distintos proyectos de desarrollo tecnológico que han tenido lugar desde entonces han permitido ir mejorando componentes y procedimientos, de modo que hoy en día las predicciones establecen valores de eficiencia del sistema, conversión de solar a electricidad, del 23% en punto de diseño y del 20% anual. A pesar de todo, el gran reto pendiente para los sistemas de receptor central es la puesta en marcha de una primera generación de plantas comerciales operando en régimen de despacho a red bajo condiciones de mercado. Las tres tecnologías que están preparando su primeras plantas comerciales están basadas en el uso de sales fundidas, vapor saturado y receptor volumétrico refrigerado por aire.

El elevado coste de capital aún constituye un obstáculo hacia el pleno aprovechamiento de su potencial a nivel comercial [Romero, Buck y Pacheco, 2002]. Las primeras aplicaciones comerciales que están a punto de ver la luz, todavía presentan costes por potencia instalada de 3.000 Euro/kW y costes de la electricidad producida en el entorno de 0,18 a 0,20 Euro/kWh. Una reducción del coste de la tecnología resulta, por lo tanto, esencial para la extensión del número de aplicaciones comerciales y potenciales emplazamientos. Consciente de este problema, la PSA mantiene con carácter permanente una línea o programa de I+D en TRC centrada en el desarrollo tecnológico de componentes y sistemas con el fin de reducir costes y mejorar la eficiencia de los mismos.

El objetivo que se pretende alcanzar en esta línea de I+D es el facilitar la penetración en el mercado de los sistemas termosolares de receptor central. Este objetivo general se estructura en los siguientes objetivos particulares:

- Mejorar su rentabilidad global, mediante una reducción del coste y un aumento del rendimiento y la durabilidad de sus componentes, especialmente de aquéllos que tienen un mayor peso en el coste total de la planta (campo de helióstatos, receptor y control), así como la simplificación de la O+M asociada.
- Mejorar la integración de los sistemas de receptor central mediante el desarrollo de componentes avanzados que permitan abordar esquemas de producción más eficientes, tanto en sistemas de generación eléctrica como en procesos industriales.
- Facilitar el desarrollo y la consolidación de una industria propia, mediante la transferencia de tecnología, la elaboración de estudios de mercado apropiados y la definición de actuaciones tendentes a eliminar las barreras no tecnológicas que dificultan la penetración de esta tecnología.

La consecución de los objetivos anteriores se conseguirá mediante una estrategia basada en tres elementos esenciales:

- Consolidación tecnológica y reducción de costes.
- Desarrollo de componentes y conceptos de integración avanzados.
- Transferencia de tecnología y potenciación de la viabilidad.

La actividad de investigación llevada a cabo por el grupo de TRC en la PSA durante el año 2003 se ha nucleado en torno a los siguientes proyectos, financiados todos ellos en convocatorias públicas de I+D:

4. Proyecto: "PS10: 10 MW Solar Thermal Power Plant for Southern Spain"; Ref. NNE5-1999-00356. Convocatoria: 1999/C 77/13. Entidad financiadora: CEC- DG RTD (Programa ENERGIE). Investigador principal: Rafael Osuna (SOLUCAR). Entidades participantes: CIEMAT, SOLUCAR (E), DLR, Fichtner (Alemania). Periodo: Julio 2001/Julio 2004.
5. Proyecto: "Megahelio - Sistema de Seguimiento de Helióstato de Gran Superficie Reflectante para Planta Termo-Solar" Ref. FIT-120102-2002-19. Convocatoria PROFIT-2003, Ministerio de Ciencia y Tecnología. Investigador Principal: Juan En-

- rile (SOLUCAR). Entidades participantes: CIEMAT y SOLUCAR (Enero 2003/Abril 2004).
6. Proyecto: "Space-Cil Heliostato Cilíndrico para Plantas Termosolares". Ref. FIT-120100-2003-62. Convocatoria PROFIT-2003, Ministerio de Ciencia y Tecnología. Investigador Principal: Valerio Fernández (SOLUCAR). Entidades participantes: CIEMAT y SOLUCAR (Enero 2003/Abril 2004).
  7. Proyecto: "PCHA: Primer campo de helióstatos autónomos-Fase II"; Ref. FIT-120100-2003-54. Convocatoria PROFIT-2003, Ministerio de Ciencia y Tecnología. Investigador Principal: Ginés García (CIEMAT). Entidades participantes: CIEMAT (Enero/Diciembre 2003).
  8. Proyecto: "El Concentrador Solar Monocentrico: Búsqueda de una Alternativa Modular y Competitiva". Ref. FIT -120100-2003-47. Convocatoria PROFIT-2003, Ministerio de Ciencia y Tecnología. Investigador Principal: Marcelino Sánchez (CIEMAT). Entidades participantes: CIEMAT (Enero/Diciembre 2003).
  9. Proyecto: "SOLAIR: Advanced solar volumetric air receiver for commercial solar tower power plants"; Ref. NNE5-1999-10012 Convocatoria: 1999/C 77/13. Entidad financiadora: CEC- DG RTD (Programa ENERGIE). Entidades participantes: CIEMAT, SOLUCAR, IBERESE (E), STC (DK), DLR (D) y FORTH/CEPRI (GR). Investigador principal: Rafael Osuna (SOLUCAR). Periodo: Febrero 2000/Junio 2004.
  10. Proyecto: "SOLGATE: Solar hybrid gas turbine electric power system"; Ref. ENK5-2000-00333. Convocatoria: EC- DG RTD (Programa ENERGIE). Entidades participantes: ORMAT (IL), INABENSA, CIEMAT (E), DLR (Alemania), Heron (Holanda) y TUMA (CH). Coordinador: C. Sugarmen (ORMAT). Periodo: Enero 2001/Septiembre 2003.
  11. Proyecto: "HST: Hocheffiziente Solarturm-Technologie -Tecnología de torre solar de alta eficiencia"; Ref. Z II 6 (D) -46040 - 1/3.3. Convocatoria: BMU-Ministerio de Medio Ambiente Alemán-2001 y Kreditanstalt für Wiederaufbau-KfW. Entidades participantes: CIEMAT (E), DLR, KAM, G+H, Isolite (D). Coordinador: R. Buck (DLR). Periodo (Enero 2002/Septiembre 2004).
  12. Proyecto: "Desarrollo de Sistemas y Herramientas de Control para Plantas Termosolares". Convenio específico de colaboración CIEMAT-Universidad de Almería. Investigador principal: Manuel Romero (CIEMAT) y Manuel Berenguel (UAL). Duración: Nov. 2002/Oct. 2005.

Proyecto: SOLPRO - Proceso para la Integración de Energía Térmica Solar y de Combustible Biomásico en Planta de Generación Eléctrica de Alta Eficiencia. Ref. FIT-120100-2003-57. Convocatoria PROFIT-2003, Ministerio de Ciencia y Tecnología. Investigador Principal: Valerio Fernández (SOLUCAR). Entidades participantes: CIEMAT y SOLUCAR (Enero/Diciembre 2003).

Estos proyectos se pueden agrupar en tres grandes líneas de actuación

- a) Desarrollo de componentes:
  - Receptores solares
  - Helióstatos
  - Control
- b) Estudios de viabilidad y proyectos de demostración
- c) Desarrollo de software y herramientas de medida y ensayo

## **EL PROYECTO PS10**

El proyecto PS10 constituye hoy por hoy la única iniciativa, con perspectivas de éxito, para el diseño y construcción de una planta de producción eléctrica usando un sistema solar de receptor central. Desde las instalaciones pioneras en las décadas de los 70 y 80, no ha llegado a cuajar ningún nuevo proyecto de gran envergadura con una central solar termoeléctrica de estas características, a pesar de existir varios intentos en España, dentro de los proyectos GAST, SOLGAS, COLON SOLAR y Solar Tres. El proyecto PS10, iniciado en el año 1999, ha tenido un largo recorrido hasta nuestros días y despierta nume-

rosas expectativas dentro de la comunidad solar, al ser la etapa necesaria previa a la implantación comercial de estas tecnologías de una manera auto-sostenida. Para la PSA, el proyecto PS10 resulta de una enorme importancia pues es la referencia obligada que permite focalizar la investigación y el desarrollo en tecnologías de receptor central y canalizar una vía de realimentación entre el sector industrial, en este caso la empresa SOLUCAR, y un organismo público de investigación como CIEMAT, sirviendo para definir estrategias conjuntas en el desarrollo de helióstatos, concentradores avanzados, receptores solares, códigos y herramientas de software, así como almacenamiento térmico; siendo estos temas los generadores de diversos proyectos que han venido siendo financiados por el Programa PROFIT del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

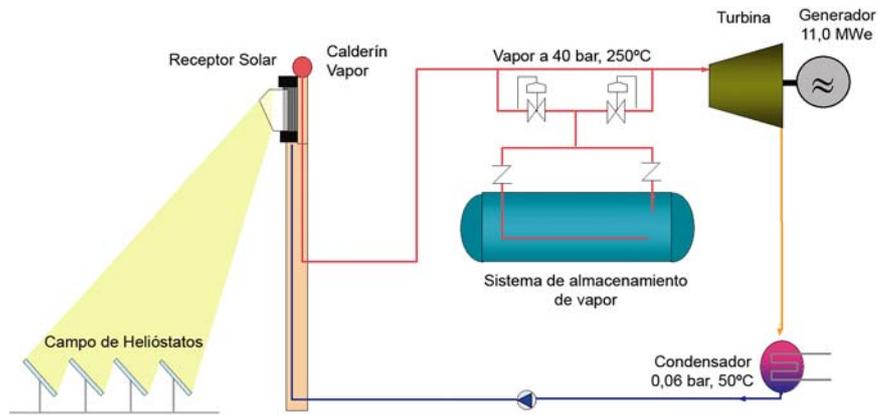
El objetivo principal del proyecto PS10 (Planta Solar 10), también conocida como Sanlúcar Solar, es el diseño, construcción y operación comercial de una planta solar termoelectrica con sistema de torre y campo de helióstatos y una potencia nominal de 10 MW. Esta planta será instalada en el municipio de Sanlúcar la Mayor, en la provincia de Sevilla. La planta está siendo promovida por Abengoa, a través de la compañía de explotación Sanlúcar Solar, siendo la coordinadora del proyecto la empresa SOLUCAR. El proyecto ha recibido una subvención de cinco millones de Euros de la Comisión Europea y dos millones de Euros de la Junta de Andalucía. En el proyecto europeo participan también CIEMAT, DLR y Fichtner Solar como socios.

El proyecto, en sus orígenes, se basaba en el esquema Phoebus que utiliza aire a presión atmosférica como fluido térmico y un receptor solar volumétrico. Durante el año 2003, el proyecto requirió una revisión completa en sus aspectos técnicos. Los requisitos de partida fijados por la entidad promotora al comienzo del proyecto, 3.000 €/kW y una producción anual de 24 GWh, resultaban difíciles de alcanzar con la tecnología de aire, para una primera planta comercial de pequeño tamaño. En base a estas limitaciones, se ha modificado el esquema básico de la planta que ahora utiliza un receptor solar de vapor saturado (Figura 33). El sistema hace uso de un campo de helióstatos de vidrio-metal (helióstato Sanlúcar-120), un receptor de cavidad de vapor saturado, un almacenamiento térmico en vapor y una turbina también de vapor saturado.

El sistema utilizará un total de 624 helióstatos (de 121 m<sup>2</sup> cada uno) desarrollados por la compañía SOLUCAR y una torre de 90 m de altura. El receptor solar seleccionado es de cavidad para reducir las pérdidas por radiación y convección, de modo que se consiga una eficiencia térmica en el mismo del 92%. El panel absorbente será de tubos verticales independientes y flexible para absorber las expansiones térmicas y las deformaciones mecánicas sin sufrir roturas ni fugas (Figura 34). El receptor produce vapor saturado a 40 bar y 250°C, y alimenta a un calderín que sirve para incrementar la inercia térmica del sistema. El vapor es entonces enviado a la turbina donde expande para producir trabajo y electricidad. A la salida del turbogenerador es enviado a un condensador refrigerado por agua, trabajando a una presión de 0,06 bar. La salida del condensador es precalentada con las extracciones de la turbina a 0,8 y 16 bar. La salida del primer precalentador es enviada al desaerador alimentado con vapor procedente de otra extracción de la turbina. Un separador de humedad se introduce entre los cuerpos de alta y baja presión de la turbina para incrementar el título de vapor en las últimas etapas de expansión.

Con todos estos procedimientos, se consigue un bloque de potencia trabajando con vapor saturado a 250°C y con una conversión nominal a electricidad del 30,7%. La eficiencia térmica del sistema en punto de diseño se estima del 21,7% y en valor promedio anual en el 16,3%. En este sentido, el reto de buscar una la tecnología más simple y económica, mejorando los valores de eficiencia ha sido conseguido.

El tercer y último precalentador es alimentado con vapor procedente directamente del receptor. De este modo se incrementa la temperatura del agua hasta 245°C. Una vez mezclada con el agua retornada del calderín, se consigue el agua a 247°C que entra en el receptor. El receptor de vapor se purga en modo continuo para evitar cualquier acumulación de precipitados de sales en la parte baja del evaporador. Para periodos de



Descripción General	
Emplazamiento	Sanlúcar Mayor (Sevilla) Lat 37,4, Lon 6,23
Potencia Nominal	11,02 MWe
Altura de la Torre	90 m
Tecnología del Receptor	Vapor saturado
Geometría del Receptor	Cavidad 180°, 4 paneles 5 m x 12 m
Helióstatos	624@ 121m <sup>2</sup>
Tecnología de Almacenamiento Térmico	Agua/Vapor
Capacidad de Almacenamiento Térmico	15MWh, 50 min @ 50 % CN
Ciclo de Vapor	40 bar 250°C, 2 presiones
Generación de Electricidad	6,3 kV, 50 Hz → 66 kV, 50 Hz
Superficie	60 Ha
Producción Anual de Energía Eléctrica	24,2 GWh
Rango nominal de Operación	
Eficiencia óptica	77,0%   67,5 MW → 51,9 MW
Eficiencia del Receptor y Transferencia de Calor	92,0%   51,9 MW → 47,7 MW
Potencia Térmica a Almacenamiento	11,9 MW
Potencia Térmica a Turbina	35,8 MW
Eficiencia Potencia Térmica → Potencia eléctrica	30,7%   35,8 MW → 11,0 MW
Eficiencia total a carga nominal	21,7%
Balance Energético Anual	
Eficiencia Óptica Media Anual	64,0%   148,63 GWh (útiles) → 95,12 GWh
Eficiencia del Receptor y Transferencia de Calor, Media Anual	90,2%   95,12 GWh → 85,80 GWh
Eficiencia operacional (Arranques/Paradas)	92,0%   85,80 GWh → 78,94 GWh
Eficiencia Media Anual Energía Térmica → Eléctrica	30,6%   78,94 GWh → 24,2 GWh
Eficiencia Anual Total	16,3%

Figura 33 Diagrama de flujo y descripción general de la Planta PS10 con receptor solar de vapor saturado.

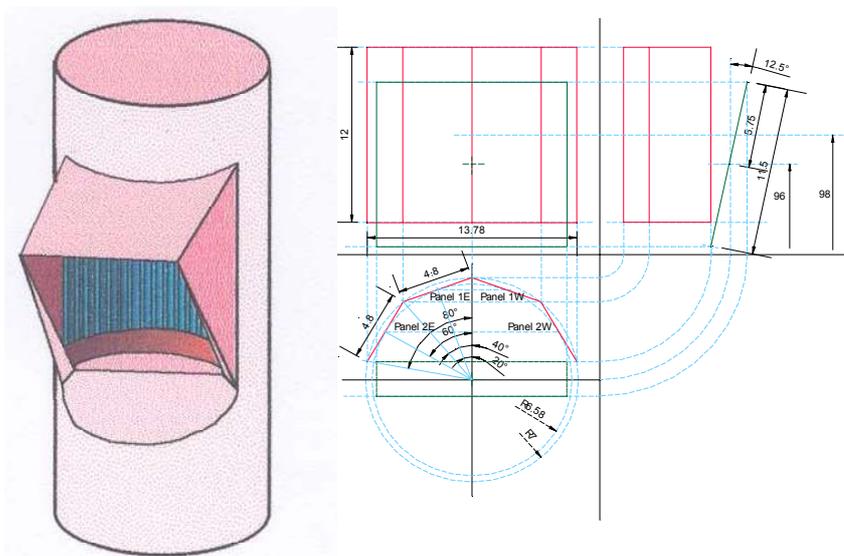


Figura 34 Diseño del receptor de cavidad con vapor saturado.

nubes o transitorios solares, la planta incorpora un sistema de almacenamiento de 15 MWh en vapor saturado, que permite 50 minutos de operación a un 50% de carga en la turbina.

La PSA ha colaborado con SOLUCAR en la redefinición del proyecto durante el año 2003, fundamentalmente en la revisión del nuevo receptor solar diseñado por la empresa TECHNICAL, en la definición de un sistema de medida de flujo directa en el interior de la cavidad, en la validación del procedimiento de optimización del campo de helióstatos (mediante una comparativa entre los códigos SOLVER y STC), y en la evaluación del helióstato Sanlúcar-120. El helióstato se caracteriza por su forma rectangular apaisada (9575 x 12925 mm), con un total de 28 facetas de 3,21-m-x-1,35-m, ubicadas en 7 filas y cuatro columnas. Los ensayos ópticos realizados en la PSA en agosto de 2003 verificaron una calidad de imagen de 2,1 mrad en rayo reflejado, aunque con un grado elevado de elipticidad, en las horas no-centrales del día (Figura 35).

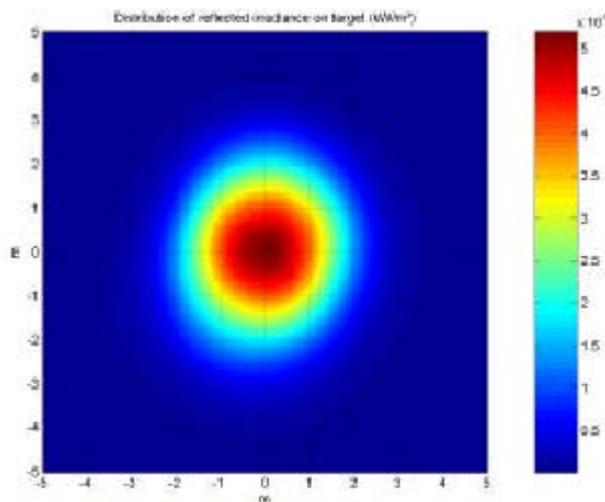


Figura 35 Proyección del Sol sobre el blanco CESA-1 por el helióstato Sanlúcar 120 (Día 01/08/2003; Hora 12:30 UT)

El cambio de tecnología de aire a vapor saturado fue presentado a la CE en 2003 y aceptado, lo que dio lugar a una modificación del contrato, que recoge ahora en su anexo técnico el nuevo esquema.

### **DESARROLLO DE HELIÓSTATOS (PROYECTOS MEGAHELIO Y SPACE-CIL):**

El helióstato Sanlúcar-120 representa la referencia más madura y comercial en la actualidad. Las estimaciones de SOLUCAR cifran su coste por debajo de los 180€/m<sup>2</sup> para una producción de unas mil unidades (150€/m<sup>2</sup> con mejoras en el mecanismo de accionamiento actual). Este objetivo tiene, no obstante, que verse refrendado durante la ejecución del proyecto PS10.

La PSA ha desarrollado durante el año 2003 dos proyectos financiados por fondos PROFIT, también en colaboración con la empresa SOLUCAR, con el fin de abordar nuevas alternativas que permitan alcanzar mejoras sucesivas en los costes de producción. Fruto de esa colaboración surgen los diseño Megahelio y Space-Cil. El objetivo del proyecto Megahelio era desarrollar un nuevo prototipo de seguidor de helióstato con una superficie útil en torno a los 200 m<sup>2</sup> para plantas termosolares, que consiga mejorar hasta en un 30% el coste de referencia del helióstato Sanlúcar-120. El prototipo Megahelio se caracteriza por su gran relación anchura/altura.

La configuración óptima técnico – económica en cuanto a distribución de espejos es la observada en la Figura 36. En total, tenemos 48 espejos de 3220 mm x 1355 mm, lo que nos da un área reflectante total de 209,43 m<sup>2</sup>. Esta es la superficie reflectante neta, pero la superficie total expuesta al viento es mayor, unos 215 m<sup>2</sup>. En la estructura portante destaca la viga metálica en celosía horizontal (de color azul) de casi 26 metros de longitud. Otro aspecto novedoso del diseño es el apoyo en dos pedestales, uno de ellos fijo y el otro con desplazamiento sobre un raíl en forma de media luna. Si bien el diseño de Megahelio consigue precios objetivo estimados, por debajo de los 180€/m<sup>2</sup>, con un potencial de reducción de más de un 30% sobre este precio de referencia, estos objetivos también parecen alcanzables por el helióstato Sanlúcar-120, en base a posibles mejoras

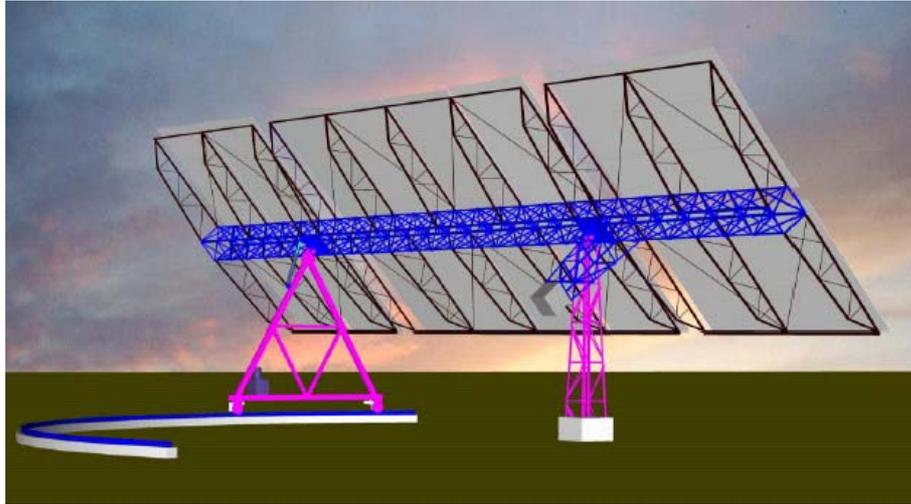


Figura 36 Representación artística del heliostato de 200 m<sup>2</sup> Megahelio (Diseño de SOLUCAR)

en su mecanismo de accionamiento. Por ese motivo, se ha optado por no continuar con la fase de construcción y ensayo de un prototipo.

El heliostato Space-Cil surge con una estrategia distinta. En este caso se trata de conseguir el abaratamiento, mediante un heliostato cilíndrico que se fundamenta en las aparentes ventajas que este sistema ofrece frente al de conformado y canteo esférico actual. Sin duda la principal aportación de esta novedad es la que hace referencia a la simplificación de las tareas de operación de las plantas o centrales que los incorporan, uno de los aspectos más complicados en el aprovechamiento de la energía solar térmica de alta temperatura. En la actualidad todos los conceptos de heliostatos convencionales utilizan curvaturas parabólicas o esféricas, tanto en las facetas, como en el canteo de éstas. Sin embargo, en la práctica, con un campo de heliostatos ya no se apunta a un solo lugar sobre el receptor, los algoritmos de control básicamente dispersan estratégicamente la radiación que previamente ha sido costosamente concentrada por cada heliostato. Este hecho esencialmente contradictorio, y de éxito cuestionable, ha llevado a reflexionar sobre la conveniencia de revisar los parámetros de diseño del heliostato, de forma que la distribución individual de irradiancia sobre el receptor solar estuviese en sintonía con lo que se demanda después al conjunto de todos los heliostatos que constituyen el campo, de forma que las estrategias de control del apunte sean minimizadas o incluso suprimidas. Para ello se ha propuesto un cambio conceptual en el diseño del heliostato. Este cambio conceptual es integral, ya que afecta a la óptica, al mecanismo de apunte y a la orientación de su emplazamiento dentro del campo de heliostatos. El flujo que proporcionan los heliostatos cilíndricos se redistribuye directamente a lo largo de la superficie vertical enfrentada. Se pueden eliminar así las estrategias de apunte, pudiéndose operar la planta durante todo el año bajo la misma filosofía de control.

El concepto de heliostato cilíndrico ha sido objeto de una propuesta de patente formulada por CIEMAT en el año 2003 (P200401270). El desarrollo del concepto se ha hecho dentro de un proyecto PROFIT, junto con la empresa SOLUCAR. El heliostato propuesto consiste (Figura 37) en una superficie reflec-

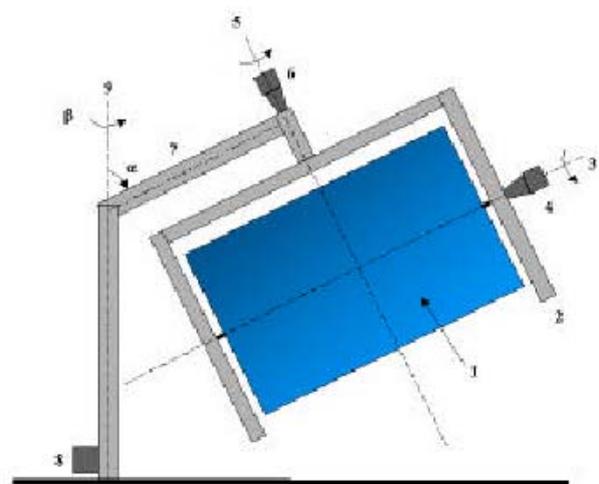


Figura 37 Heliostato cilíndrico de línea focal confinada

tante cilíndrica o cilindroparabólica(1), capaz de girar en torno a dos ejes ortogonales denominados principal (3) y secundario (5) mediante sendos mecanismos de accionamiento (4) y (6) gobernados por un sistema de control (8). El eje principal es paralelo al eje recto de la superficie reflectante cilíndrica. El montaje mecánico que permita el movimiento de la superficie reseñada ha de ser capaz de garantizar la orientación del eje secundario (5) según una dirección bien definida; esto se logra mediante a) la orientación  $\alpha$  del brazo (7) respecto al eje cenital (9), y b) mediante el giro  $\beta$  de todo el conjunto en torno dicho eje cenital.

Basado en el concepto anterior, la empresa SOLUCAR realizó la ingeniería de detalle de un prototipo con 22 m<sup>2</sup> de superficie y una altura de 7 m. El acopio de materiales y la construcción se completó a finales de 2003 y la instalación en la PSA y su posterior ensayo están previstos para el año 2004.

### **PRIMER CAMPO DE HELIÓSTATOS AUTÓNOMOS (PCHA):**

Uno de los objetivos perseguidos en los últimos años en la PSA es la evaluación de la viabilidad técnico-económica de la utilización de unidades autónomas inteligentes. Estos helióstatos constan de un sistema autónomo de alimentación para el sistema de control y los actuadores de seguimiento solar, mediante el uso de paneles fotovoltaicos integrados en el helióstato, y de un sistema de comunicación sin hilos, para el gobierno del campo de helióstatos, tanto durante las operaciones de emergencia y seguridad, como durante la operación rutinaria del mismo. Dicho concepto de autonomía ha sido objeto de una patente por parte de la PSA, con la patente de invención número P9901275.

El concepto de autonomía implica que este helióstato, equipado con un control local especialmente diseñado, puede funcionar sin la asistencia de ningún otro dispositivo externo, pudiendo, por sí mismo, acometer las funciones de cálculo y guiado de sus ejes, manteniendo el foco controlado, así como velar por su propia integridad y seguridad. Podrá realizar sus funciones de forma aislada o, como será lo habitual, como componente de un campo de helióstatos en plantas de Torre Central. La principal característica del helióstato autónomo es que éste puede ser instalado en cualquier lugar sin requerimientos de infraestructuras eléctricas, cableado y/o canalizaciones. Con el empleo de energía fotovoltaica para alimentar de forma independiente a cada helióstato y el empleo de las comunicaciones sin hilos, realizadas por radio en canales comerciales, el concepto de autonomía cobra su mayor significado introduciendo una novedad importante, que puede ser aplicada con éxito en los campos de helióstatos de las futuras Plantas Solares de Torre Central, en un intento, entre otros, de abaratar los costes de obra civil mediante la eliminación del entramado de canalizaciones y cableados de fuerza, señal y comunicaciones.

<ul style="list-style-type: none"><li>- Helióstato totalmente autónomo</li><li>- Superficie de espejo: 40m<sup>2</sup></li><li>- Panel FV de 55Wp y 12 Vcc</li><li>- Batería de 60Ah y 12 Vcc</li><li>- 2 Motores de 70 W y 12 Vcc</li><li>- 2 Velocidades:    AZ:R=8,5°min, L=3,4°min                           EL:R=10,5°min, L=4,2°min</li><li>- Consumo diario: 50 Wh mínimo</li><li>- Días de autonomía: 12 máximo</li><li>- Radio-modem 430 Mhz, 9 canales, 38 Kbs</li><li>- Interruptor magnético de viento</li><li>- 2 codific. incrementales de 20000 bits</li><li>- Resolución angular : 0,3 mRad (Az y El)</li><li>- Precisión del algoritmo astornóm.: 0,5 min</li></ul>	
--	--

Figura 38 Características técnicas más relevantes del helióstato PCHA

Tras diversas pruebas con prototipos y miniseries de heliostatos, desde el año 1995, un equipo de investigadores de la PSA viene desarrollando un ambicioso proyecto como es el transformar todo el campo CRS, con un total de 92 heliostatos, en un campo autónomo controlado enteramente por radio, lo que constituye sin duda un hito mundial. El proyecto, iniciado en el año 2002, con un coste total de 650.000 €, se encuentra subvencionado parcialmente por el Programa PROFIT del Ministerio de Ciencia y Tecnología. El proyecto PCHA (Primer Campo de Heliostatos Autónomos), estructura su actividad en tres fases o hitos perfectamente diferenciados. La fase primera, desarrollada durante el año 2002, contempló las tareas de diseño electrónico e informático, junto con la fabricación de prototipos y una validación de los diseños. Asimismo durante el año 2002 se inició el acopio de buena parte de los materiales y equipos necesarios para el montaje de los controles locales en el campo a realizar en el año 2003. En la segunda fase, desarrollada durante el año 2003, se procedió a la fabricación y montaje de un heliostato pre-series así como a su posterior clonación en 92 unidades mediante la ayuda de asistencias externas. La tercera y última fase del proyecto está desarrollándose en el año 2004, habiéndose realizado ya la configuración y la puesta en marcha completa del campo.

En el mes de marzo de 2003 tuvo lugar el montaje y puesta en marcha del heliostato pre-series como paso previo a la fabricación y montaje del campo completo compuesto por 92 unidades. Cabe destacar el bajo consumo eléctrico diario, 52Wh, que le asegura el funcionamiento durante periodos nublados de hasta 12 días de duración. El montaje del campo comenzó en octubre de 2003 y finalizó en diciembre de 2003, llegándose a poner en marcha en ese momento 22 unidades.

### **PROYECTO : EL CONCENTRADOR SOLAR MONOCÉNTRICO:**

El objetivo de este proyecto, financiado con fondos PROFIT, es diseñar y optimizar un concentrador solar monocéntrico cuyo receptor es móvil y cuyo concentrador es fijo, partiendo del concepto de una esfera hasta encontrar su configuración óptima y comparar el sistema con los sistemas solares convencionales de receptor fijo y concentrador móvil. Se trata de un proyecto innovador que busca una concepción radicalmente distinta a los concentradores habituales de receptor central. Estos diseños pueden adaptarse a cualquier orografía, sin coste adicional y presentan la novedad de que en este caso el campo de espejos es estático, por lo que el elemento móvil único es el receptor solar, lo que obviamente implica una importante reducción en los costes asociados a seguimiento solar. Se trata pues de evaluar si es posible producir electricidad con un sistema modular y sencillo a un precio competitivo.

CIEMAT ha llevado a cabo, durante el año 2003, la fase de diseño óptico y optimización del sistema, adaptando para ello el software propio SCT (Solar Concentration Toolbox) desarrollado en entorno Matlab®. La configuración óptima para una superficie total espejada de 1.000 m<sup>2</sup> y una latitud de 37.4 grados, como es el caso de Sevilla, ha sido un concentrador con tres zonas de curvaturas diferentes, inclinado 28 grados Sur y con un receptor cilíndrico de 5.5 m de longitud, suspendido a una altura de 10 m. Los costes estimados por kWh producido al año son similares a los de otras tecnologías de concentración solar (comparación realizada con datos del proyecto PS10, y con estimación de costes realizada por Solucar Solar para el prototipo optimizado), ya que aunque se reducen drásticamente las partes móviles, también la energía captada por m<sup>2</sup> de reflector es mucho menor. Sin embargo, el aprovechamiento del terreno es hasta 3.5 veces mejor que sistemas convencionales y el coste de la inversión inicial es reducido, dado su carácter modular, lo que minimiza el riesgo. Además, los flujos de radiación obtenidos sobre el receptor son mayores que sus equivalentes en otros receptores lineales, lo que hace previsible que las pérdidas térmicas sean menores.

El objetivo final del proyecto es diseñar y construir una instalación piloto que permita demostrar la viabilidad técnico-económica de la generación eléctrica termosolar mediante módulos autónomos con potencias unitarias en el rango de 100 a 500 kWe. La concepción modular ofrece extraordinarias perspectivas frente a las vías de desarrollo

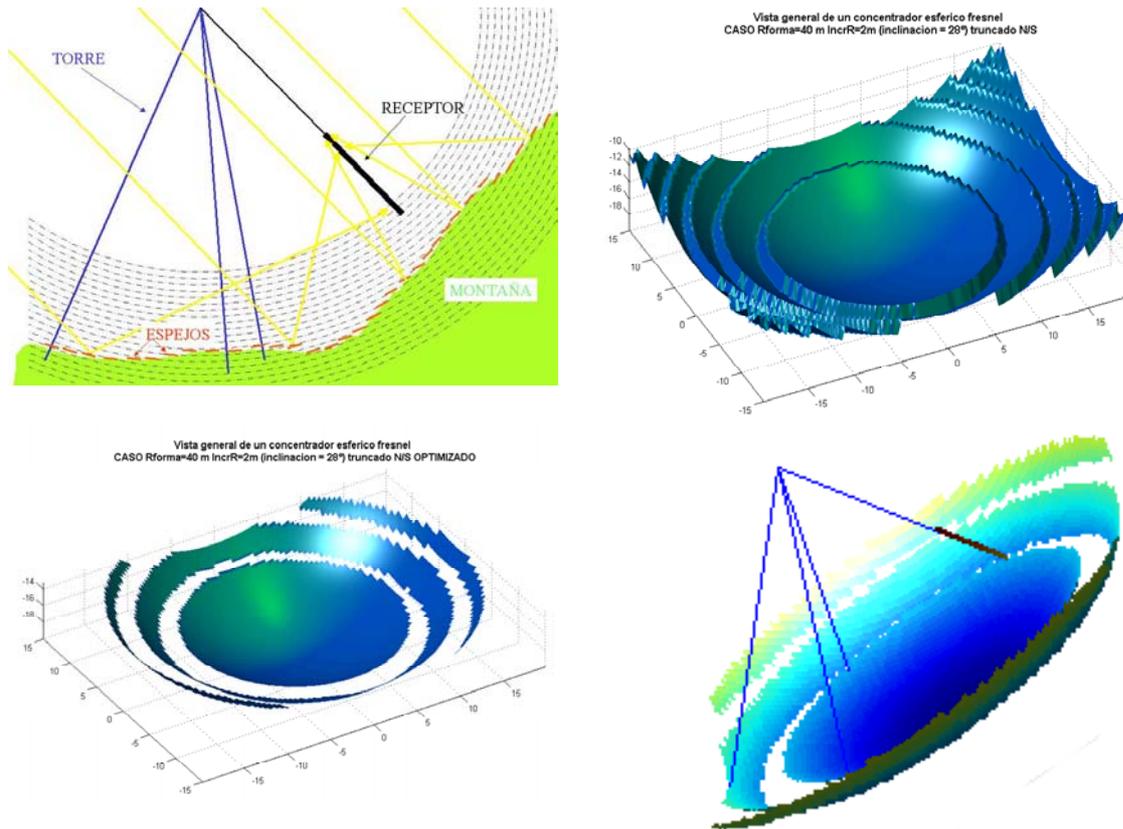


Figura 39 Esquema de funcionamiento de un concentrador solar monocéntrico y representación de la estructura optimizada.

acometidas hasta ahora en este campo, que no han conseguido avanzar suficientemente en el camino de la comercialización. Tiene por tanto un carácter totalmente estratégico para el sector, ya que en caso de alcanzarse los resultados previstos en los estudios previos supondría una alternativa viable para la generación eléctrica termosolar comercial y económicamente rentable.

## EL PROYECTO SOLAIR

El receptor constituye el auténtico núcleo de cualquier sistema de torre de potencia, siendo el elemento que mayor complejidad tecnológica encierra, por la necesidad de absorber la radiación incidente con las menores pérdidas y en unas condiciones de flujo concentrado muy exigentes. Dentro de las distintas opciones de fluidos térmicos y configuraciones de intercambio de calor, la PSA ha venido centrando sus investigaciones desde el año 1986, en el desarrollo de los receptores solares volumétricos refrigerados por aire. Los receptores volumétricos están específicamente concebidos para optimizar el intercambio de calor con aire como fluido térmico, siendo el absorbedor iluminado una matriz o medio poroso (malla metálica o monolito cerámico), a través del cual fluye el gas de refrigeración.

El proyecto SOLAIR tiene por objeto el conseguir un receptor volumétrico de aire con absorbedor cerámico de SiC capaz de producir aire caliente a 700°C, mediante el uso de un concepto modular y fácilmente escalable a grandes plantas. El uso de una matriz cerámica permite además mejorar la durabilidad del absorbedor, y su diseño en copas modulares permite eliminar las inestabilidades fluidodinámicas encontradas en diseños anteriores. Por último se incorpora un nuevo sistema de recirculación de aire, que permite alcanzar relaciones de recirculación próximas al 70%. El proyecto SOLAIR es un proyecto Europeo con financiación de la CE y con participación de CIEMAT, SOLUCAR e IBERESE (E), Heliotech (DK), DLR (D) y CPERI (GR). CIEMAT tiene un papel muy activo en este proyecto, liderando los ensayos y evaluación de los prototipos, realizando el análisis y optimi-



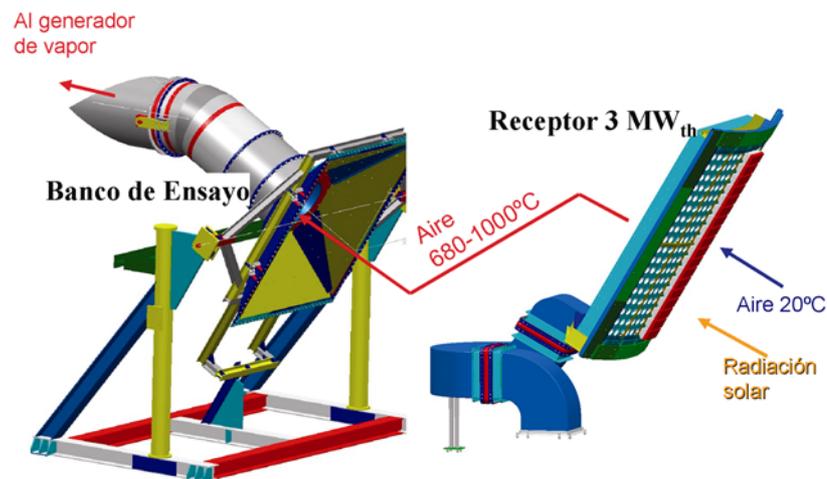
**Figura 40 Retirada del receptor TSA de absorbedor metálico en marzo de 2003 (Izquierda) y vista frontal del nuevo receptor Solair-3000 en la torre CESA-I.**

zación del sistema de recirculación de aire caliente mediante el uso de códigos de dinámica de fluidos como FLUENT®, seleccionando la geometría de los cabezales del material cerámico y realizando el análisis termomecánico de la estructura con el código ANSYS®.

El proyecto SOLAIR inició su andadura en el año 2000, y los años 2000 y 2001 sirvieron para seleccionar el material cerámico más adecuado, cualificarlo mecánica y térmicamente en el horno solar que DLR posee en Colonia, y diseñar y fabricar los primeros prototipos de copas cerámicas. Durante el año 2002, se ensayó con éxito un prototipo de 200 kW instalado en la PSA, quedando demostrada la viabilidad del concepto.

Durante el año 2003, se finalizó la construcción y montaje en la PSA del prototipo de 3 MW. El nuevo receptor fue colocado en el banco de ensayos TSA, para lo cual en marzo de 2003 se procedió a la retirada del receptor metálico por parte del propio personal de operación y mantenimiento de la PSA. El trabajo de adaptación del banco de ensayos al nuevo receptor fue intenso en toda la primera mitad de 2003, requiriendo importantes modificaciones en la estructura soporte y modificaciones en la sala de control para adaptar el software de control del campo de helióstatos y el sistema de adquisición de datos.

A partir de octubre se comenzó la campaña de ensayos sistemáticos a baja temperatura, a 600 y 650°C. Los ensayos a finales de 2003 todavía no habían permitido alcanzar las condiciones nominales de operación, por lo que el proyecto cuenta con una prórroga



**Figura 41 Despiece del banco de ensayos SOLAIR-3000 con representación del flujo y radiación solar de entrada**

de la CE hasta julio de 2004, con el fin de completar su evaluación. Los ensayos tuvieron que ser interrumpidos en varios periodos debido a roturas parciales o desprendimientos en algunas copas cerámicas del absorbedor de SiC. Los incidentes pudieron ser explicados por un deficiente pegado de algunas de las partidas de conjuntos copa/absorbedor.

El rasgo más peculiar del diseño del receptor Solair-3000, es su total modularidad. Su configuración modular ha sido concebida de forma que el módulo en fase de ensayo, de 3 MW, sería replicado decenas de veces para componer un cluster en el receptor de una planta comercial. En este sentido, una cualificación técnica y operacional del actual módulo, reduciría enormemente el riesgo de escalación a grandes potencias. La empresa KAM de Munich (Alemania), ha manifestado públicamente su interés en el concepto SOLAIR, para su aplicación en futuros proyectos de plantas solares termoeléctricas.

### **LOS PROYECTOS SOLGATE Y HST**

El receptor SOLAIR se encuentra abierto a la atmósfera y por tanto produce aire caliente a presión atmosférica. En este caso la utilización tipo pretendida es la integración en un ciclo Rankine de vapor sobrecalentado mediante el intercambio de calor en un generador de vapor. Frente a esta opción, existe una segunda línea de investigación más a largo plazo en la que lo que se pretende es integrar el receptor solar dentro de un ciclo Brayton con turbina de gas, mediante el uso de receptores volumétricos presurizados. Esta alternativa tiene como principal objetivo la formulación de plantas solares híbridas con turbina de gas. Las plantas termosolares híbridas presentan un potencial importante de reducción de costes de hasta un 30% frente a las plantas solares puras.

Un gran paso adelante en esta línea de investigación viene representada por el proyecto SOLGATE. El proyecto SOLGATE constituye la primera iniciativa con éxito en la conexión de un receptor solar volumétrico presurizado con una turbina de combustión. SOLGATE, cuenta con financiación de la CE y además de DLR y CIEMAT, son también participantes en el mismo las empresas ORMAT (IL), SOLUCAR (E) y TUMA (CH).

El sistema incluye la combinación de una turbina de 250 kW con un cluster de receptores de 1 MW, formado por tres módulos conectados en serie. La turbina OST3 suministrada por ORMAT ha sido adaptada para poder recibir el aire precalentado en el receptor solar, de modo que puede operar en modo híbrido (solar-fósil) o en modo sólo-fósil. Los tres módulos de receptor solar permiten alcanzar los 1000°C. El primero de los módulos (de baja temperatura) está formado por 16 tubos metálicos directamente irradiados in conectados en paralelo, con el fin de reducir costes. Los otros dos módulos utilizan una configuración de cavidad con ventana de cuarzo y absorbedor volumétrico.

Los primeros ensayos solares del sistema SOLGATE tuvieron lugar en la PSA en diciembre de 2002. En una primera fase, en el periodo hasta marzo de 2003, los ensayos se realizaron con un receptor de alta temperatura con absorbedor metálico. En estas condiciones, la máxima temperatura de operación fue 800°C. Posteriormente este módulo fue sustituido por un módulo con absorbedor de espuma cerámica reticulada de SiC para trabajar a 1000°C, y por tanto aumentar el porcentaje de participación solar. Para obtener la mencionada temperatura fue necesario incorporar unas toberas con aire frío para refrigerar la parte exterior de la ventana. Una vez instalados estos nuevos componentes, se reiniciaron los ensayos en junio de 2003. La máxima temperatura alcanzada fue de 960°C. Para estas condiciones de máxima temperatura, el rendimiento del receptor se infirió indirectamente basándose en las medidas de flujo de radiación. La eficiencia térmica del receptor solar fue de 68-79%. La pérdida de carga fue de 120 mbar en el receptor. Estos cumplían con las expectativas de diseño. La fracción solar alcanzó un 70% a 960°C, tal y como se muestra en la Figura 42.

Durante esta segunda campaña de ensayos, la turbina presentó fallos de funcionamiento y hubo de ser desmontada para reparación y mantenimiento fuera de la PSA. Esta previsto volver a instalar la turbina y continuar ensayos solares a alta temperatura (1100°C), a partir de mayo de 2004. Una vez que el proyecto SOLGATE ha finalizado, la

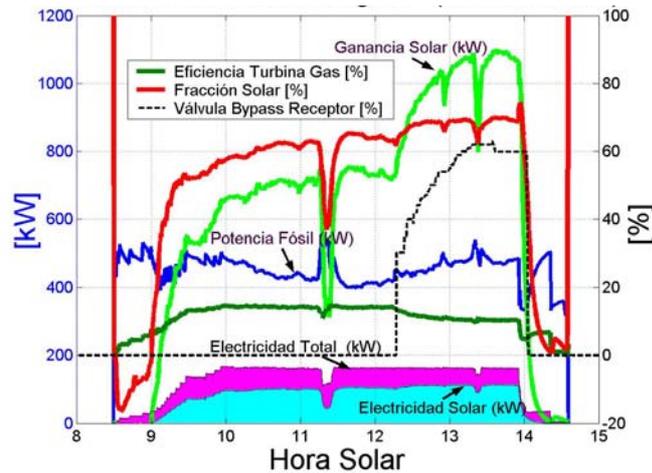


Figura 42 Resultados de operación del sistema SOLGATE para el día 8 de agosto de 2003 (Temperatura máxima alcanzada de 960°C).

nueva campaña de ensayos, con un nuevo receptor cerámico, está amparada por el proyecto HST (Hocheffiziente Solarturm-Technologie -Tecnología de torre solar de alta eficiencia), financiado por el BMU Alemán. CIEMAT participa en dicho proyecto, coordinado por DLR, cuyo comienzo tuvo lugar en enero de 2002, y su finalización está prevista para septiembre de 2004.

### **DESARROLLO DE SISTEMAS DE CONTROL AVANZADO (UAL)**

Con la Universidad de Almería (UAL), se mantiene una fructífera línea en el desarrollo de sistemas de control en base al convenio de cooperación científica firmado en el año 2002. Amparado por este convenio, se ha desarrollado un importante trabajo de cooperación con el grupo de investigación en Automática, Electrónica y Robótica de la Universidad de Almería. Este convenio incluye el desarrollo de un nuevo sistema de control en tiempo real de campos de helióstatos a implementar en los campos CESA-1 y CRS de la PSA y la integración de entornos de control, adquisición y evaluación de resultados en ensayos de receptores solares en campos de torre.

En el primero de los objetivos, desarrollo de un Sistema de Control de Campos de Helióstatos, se ha avanzado significativamente en la elaboración de sendos sistemas de control, para los campos CESA y CRS. Debido a que el sistema de comunicaciones del campo CRS está siendo reconvertido en la actualidad, se ha retrasado su desarrollo debido a las diferencias conceptuales en el sistema de Control Central de Campos de Helióstatos Autónomos y los tradicionales (tipo CESA-I). Es de resaltar que para el desarrollo del software de dichos Sistemas de Control se están utilizando tecnologías que no sólo ofrecen una solución local al problema del control de los campos de helióstatos de PSA, sino que son soluciones escalables y adaptables a Plantas Termosolares de Torre comerciales. En concreto se están utilizando tecnologías de objetos distribuidos estandarizadas, en las que el determinismo temporal en el comportamiento de los componentes software esté garantizado mediante la utilización de Sistemas Operativos de Tiempo Real (SOTR). En el ámbito de este proyecto, se está utilizando CORBA® sobre el SOTR LynxOS® para el desarrollo de los sistemas de control de sendos campos de helióstatos.

En cuanto a la integración de entornos de control, adquisición y evaluación de resultados en ensayos de receptores solares en campos de Torre, esta tarea, pese a tener planificada para el 2003 solamente su último trimestre, ha registrado trabajo durante todo el año. Se han logrado dos objetivos fundamentales para la consecución de próximos paquetes de trabajo:

- Diseño y desarrollo de un Sistema de Control para el Bloque Receptor, Almacenamiento y Circuito de Aire basado en LabView®. Dicho sistema estará perfectamente integrado con el Sistema de Control del Campo de Helióstatos, así como con otros com-

putadores de la red telemática de CIEMAT (en la subred de PSA y en la subred de CIEMAT-Moncloa, con el fin de proporcionar un entorno de análisis en tiempo real de los experimentos realizados en PSA. Este entorno ha sido ya utilizado satisfactoriamente en las últimas campañas de ensayos del proyecto SOLAIR.

- Está en un muy avanzado el estado de desarrollo de un modelo dinámico para el Sistema Receptor/Almacenamiento/Circuito de aire. Al igual que para el modelo dinámico de Hornos Solares está siendo desarrollado con tecnologías de modelado orientado a objetos mediante las herramientas Dymola/Modelica®. El desarrollo de este tipo de modelos es obligado para la obtención de algoritmos de control optimizados para la instalación. En la Figura 43 aparece una imagen de dicho modelo en el que se pueden apreciar los distintos componentes de la planta de potencia (receptor solar, tanque de almacenamiento, intercambiador de calor, bomba de agua, etc.).

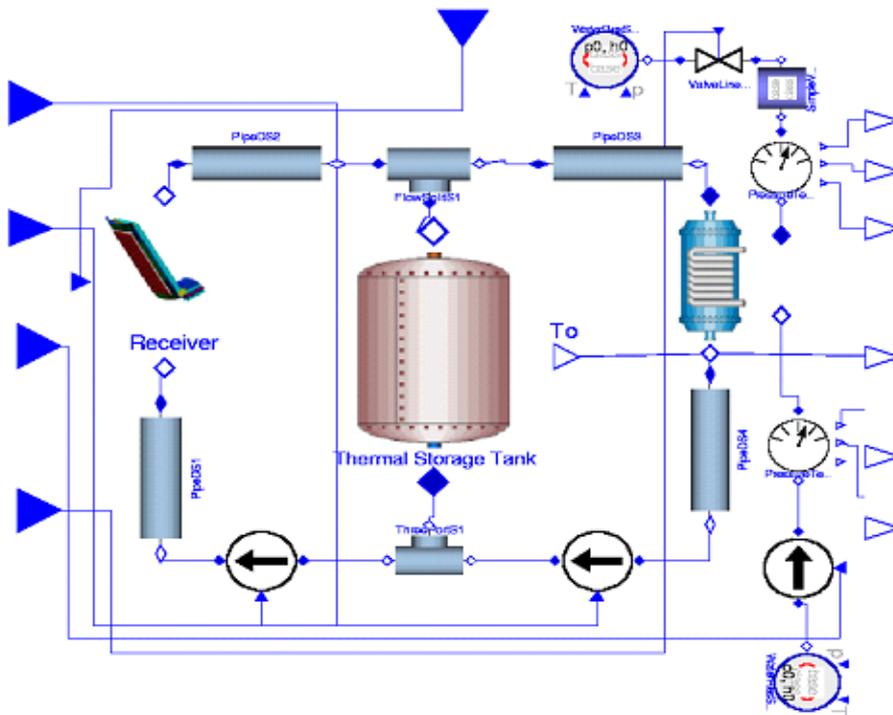
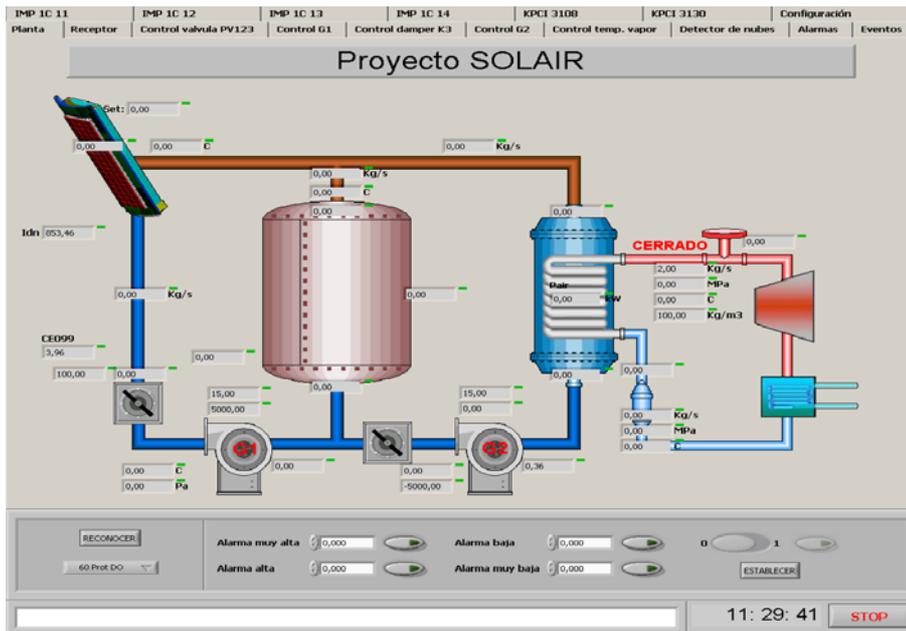


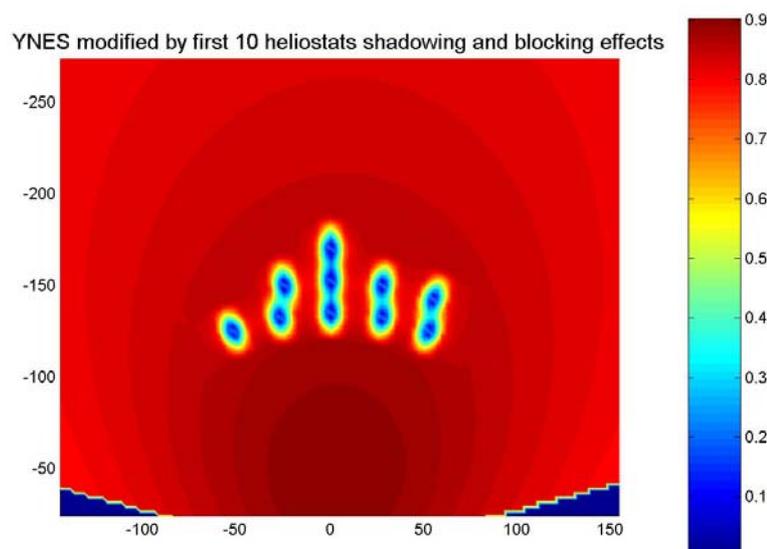
Figura 43 Entorno gráfico desarrollado en Labview® para el nuevo sistema de control de la instalación SOLAIR (arriba) y modelo dinámico mediante Dymola/Modelica® (abajo)

## **OTRAS ACTIVIDADES (SOFTWARE Y SISTEMAS DE MEDIDA)**

Como complemento a las actividades directamente relacionadas con la ejecución de los proyectos antes mencionados, la PSA, como gran instalación de ensayo y caracterización de los sistemas de receptor central, ha seguido dedicando una parte de sus esfuerzos a la mejora y el desarrollo de nuevas herramientas informáticas de diseño y evaluación, y a los sistemas de medida de flujo de radiación solar concentrada.

Dentro de las herramientas de software, se ha continuado trabajando en la mejora de módulos correspondientes a los códigos FIAT-LUX y SCT. En el caso particular de FIAT-LUX, código desarrollado en la PSA para la caracterización y simulación óptica de concentradores solares, se ha dedicado un esfuerzo especial a la utilización de algoritmos genéticos para la parametrización óptima de las fuentes de errores que definen la óptica real de un heliostato. El procedimiento implementado ha permitido demostrar la aplicabilidad de algoritmos genéticos para la aproximación del modelo de la óptica real de un heliostato, permitiendo una predicción fiable de la irradiancia sobre la apertura del receptor solar. De modo análogo se ha ensayado el uso de algoritmos genéticos para la generación de "layouts" optimizados de campos de heliostatos. Un estudio comparativo realizado con SCT en colaboración con la Escuela Politécnica Federal de Lausana (Suiza), ha demostrado su viabilidad.

Durante el año 2003 se ha desarrollado también un nuevo procedimiento para la optimización de campos de heliostatos mediante un factor estándar denominado YNES (Yearly Normalized Energy Surface). Mediante este factor se pueden generar mapas de eficiencia anual del terreno disponible. El procedimiento propuesto, establece una primera etapa en la que se genera un YNES del terreno con aquellos factores como coseno, atenuación atmosférica y el factor de interceptación, que son independientes de la geometría y de la posición del heliostato. Posteriormente se va actualizando el YNES mediante la incorporación de heliostatos que por iteraciones van generando "moléculas" con mapas energéticos que incluyen el efecto de sombras y bloqueos. Mediante el mencionado procedimiento se han obtenido empaquetamientos superiores a los producidos por los métodos convencionales basados en distribuciones en tresbolillo radial, para eficiencias equivalentes. La técnica de optimización de la distribución de heliostatos basada en YNES permite una gran flexibilidad y la generación de "layouts" para terrenos complejos o con restricciones geométricas. Su validación ha sido realizada para el campo PS10 mediante una comparativa con los procedimientos utilizados por SOLUCAR con su código SOLVER.



**Figura 44** Ejemplo de un YNES después de ser modificado con la distribución de los primeros 10 heliostatos. Las manchas azules representan las sombras y bloqueos generados. Las coordenadas están expresadas en m con la torre en (0,0).

La medida de la potencia solar incidente en la apertura del receptor es otro de los temas en permanente mejora dentro de la PSA. Hay muchos factores que afectan la medida de esta magnitud y que hacen que la exactitud deba ser mejorada. Esta incertidumbre se propaga al diseño de la planta solar final y consecuentemente a su precio. Es por este motivo por el que es necesario analizar las diferentes causas que distorsionan la medida de la potencia incidente con el objeto de reducir significativamente su incertidumbre. La definición de un procedimiento de calibrado para los sensores (calorímetros) utilizados en medidas de radiación solar muy concentrada, así como el diseño de un nuevo calorímetro que mitigue las deficiencias de los ya existentes son los principales objetivos de un nuevo proyecto denominado MEPSOCON: "Medida de la potencia solar concentrada en plantas eléctricas de receptor central". El proyecto MEPSOCON está financiado por el Programa Nacional de I+D a través de su Programa de Diseño y Producción Industrial, teniendo su fecha de comienzo el 1 de diciembre de 2003 y su finalización el 30 de noviembre de 2006. MEPSOCON y el desarrollo de radiómetros y calorímetros es objeto de una colaboración con el Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México, entre cuyos objetivos destaca el diseñar, construir y caracterizar un calorímetro de cavidad para la medición de flujos radiativos concentrados en sistemas de concentración solar.

### **NUEVO ESQUEMA DE PLANTA (PROYECTO SOLPRO)**

SOLPRO es un proyecto que inicia el desarrollo de un nuevo concepto de generación solar termoeléctrica de corto plazo, basado en una integración optimizada de componentes tecnológicos básicamente probados. El contenido del mismo se concreta en la puesta en funcionamiento, de una central solar termoeléctrica conectada a red de 1.5 MW de potencia, y ubicada en la propia PSA. El proyecto toma provecho de incorporar gran parte de las infraestructuras ya existentes en el campo CESA-1 de la Plataforma Solar de Almería. El proyecto está siendo financiado por el Programa PROFIT del Ministerio de Ciencia y Tecnología y en el año 2003 se ha llevado a cabo el análisis comparativo de varias soluciones de integración solar basadas en el uso de receptores de vapor, receptor volumétrico de aire o combinaciones de ambos. El esquema seleccionado consta de un receptor de aire trabajando a temperaturas máximas de 450°C, por lo que el rendimiento aumenta y la durabilidad está garantizada, con el apoyo de un receptor de vapor saturado y una caldera de biomasa para los transitorios. Este concepto contribuye a reducir el riesgo tecnológico actual asociado a los receptores volumétricos trabajando a temperaturas de aire por encima de 700°C y a la vez incorpora las ventajas en cuanto a alto rendimiento y riesgo acotado de un receptor de vapor saturado a 250°C, en base a la experiencia que se está teniendo ya dentro del proyecto PS10. El proyecto SOLPRO tiene puentes entre el proyecto PS10 y la tecnología de receptores volumétricos.

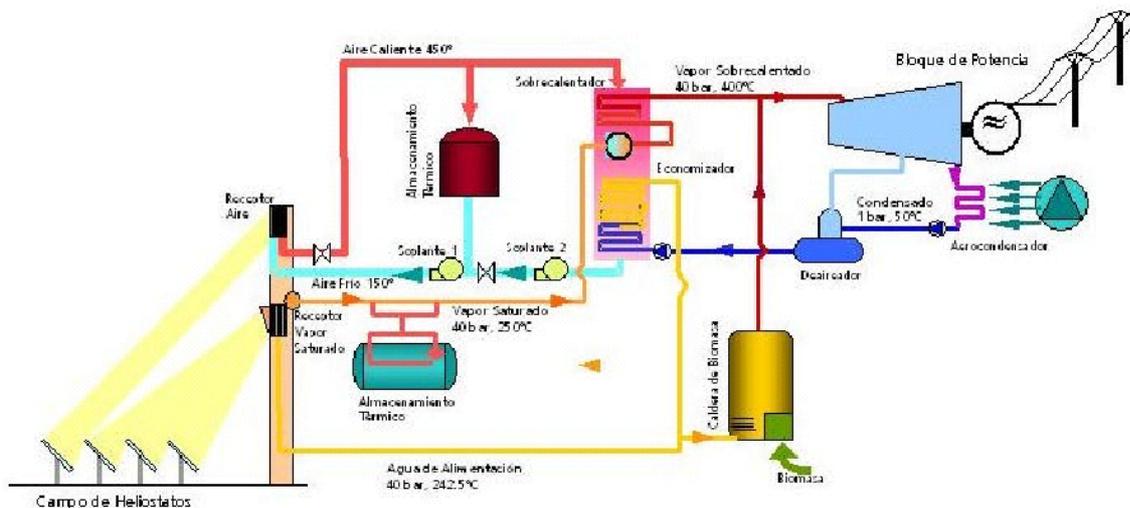


Figura 45 Esquema de la planta SOLPRO de 1,5 MW propuesta para la PSA.

En base a los resultados del estudio de viabilidad, se ha planteado una propuesta a PROFIT para el año 2004 que conllevaría la realización de la ingeniería de detalle de la planta, y que está pendiente de resolución.

## Tecnología de colectores cilíndroparabólicos

Los colectores cilindro parabólicos (CCP) son captadores solares de concentración con foco lineal, que convierten la radiación solar directa en energía térmica y que resultan idóneos para trabajar dentro del rango de temperaturas 150°C-400°C. Gracias a la concentración de la radiación solar directa que incide sobre el plano de apertura del captador, se consigue de forma eficiente elevar la temperatura del fluido de trabajo hasta valores del orden de los 425°C, pudiendo alimentar procesos industriales dentro del rango de la media temperatura. Estos niveles de temperatura convierten al CCP en un captador ideal para acoplarlo a una gran diversidad de procesos industriales.

Un CCP está compuesto, básicamente, por un espejo cilindro parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor colocado en la línea focal de la parábola. Esta radiación concentrada provoca que el fluido que circula por el interior del tubo se caliente, transformando así la radiación solar en energía térmica en forma de calor sensible del fluido [Zarza, 2001]. La figura adjunta muestra una fotografía de un CCP e ilustra su modo de funcionamiento.

En relación con la tecnología de los colectores solares cilindro parabólicos, la PSA está desarrollando un completo programa de I+D cuyo objetivo final es el desarrollo de una nueva generación de plantas termosolares para generar electricidad con colectores solares cilindro parabólicos. Este desarrollo se basa en tres puntos principales:

1. Desarrollo e implementación de componentes mejorados para colectores solares cilindro-parabólicos (nuevos tubos absorbedores y espejos, diseños estructurales más ligeros, nuevos sistemas de seguimiento solar, etc.).
2. Desarrollo de la tecnología de *generación directa de vapor (GDV)*, con el fin de eliminar el aceite térmico que actualmente se emplea en las plantas solares con colectores cilindro parabólicos como medio de transferencia de calor entre el campo de colectores solares y el proceso industrial que alimenta térmicamente.
3. Optimización global del diseño de central eléctrica termosolar (CET), de modo que se mejore el acoplamiento entre el sistema solar y el bloque de potencia.

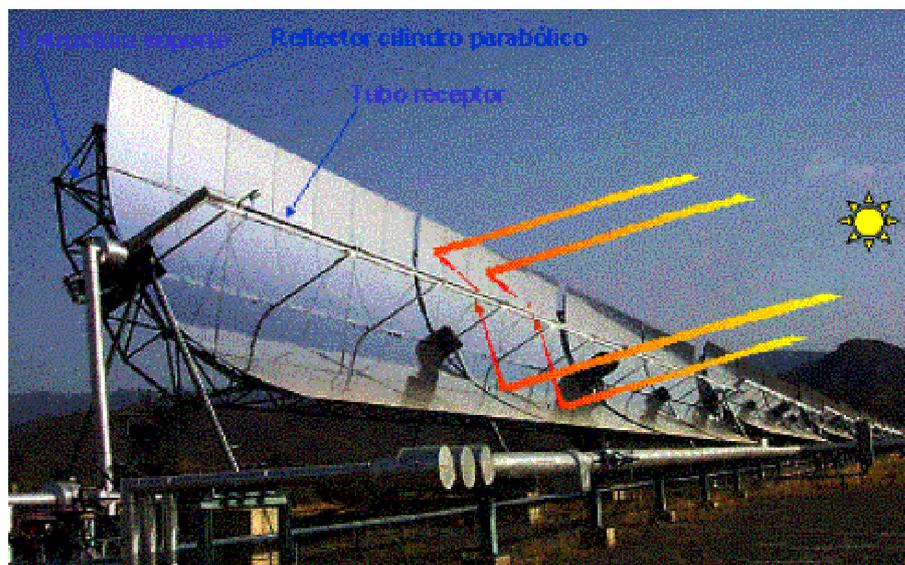


Figura 46 Principio de funcionamiento de un colector cilindroparabólico

Dada la complejidad y el alcance de cada uno de estos tres puntos, las actividades desarrolladas por la PSA en relación con los colectores cilindro parabólicos están agrupadas en diversos proyectos que cuentan, cada uno de ellos, con su propio grupo de socios, presupuesto y planificación. El resultado final perseguido por este conjunto de proyectos es el aumento de la competitividad de los sistemas solares con colectores cilindro parabólicos, lo que favorecerá la implantación comercial de esta tecnología. En el caso de la generación de electricidad, se persigue una reducción del 26% en el coste de la electricidad producida con centrales eléctricas termosolares que usen colectores cilindro parabólicos. Adicionalmente, las actividades llevadas a cabo en relación con la obtención de nuevos espejos y recubrimiento ópticos proporcionan una serie de interesantes subproductos, como por ejemplo: espejos selectivos para energía fotovoltaica, recubrimientos anti-difusivos, vidrios coloreados para la edificación, etc.

Dentro de las actividades llevadas a cabo en la PSA durante el año 2003 en relación con los colectores cilindro parabólicos, ocupan un lugar destacado las relacionadas con la generación directa de vapor a alta presión y temperatura dentro de los propios tubos absorbedores de los colectores. Esta nueva tecnología, conocida mediante las siglas GDV (Generación Directa de Vapor), sigue mostrándose como una opción muy interesante para abaratar el coste de la energía térmica suministrada mediante colectores cilindro parabólicos, ya que permite prescindir del aceite térmico y del intercambiador de calor aceite/agua utilizado actualmente en este tipo de instalaciones.

Por último, también hay que poner de manifiesto que tanto los componentes mejorados que se están desarrollando en la PSA para colectores cilindro parabólicos, como la generación directa de vapor, podrán ser aplicadas no solamente para la generación de electricidad, sino para cualquier otra aplicación industrial térmica de la energía solar en el rango de la media temperatura (150°C – 400°C).

Las actividades desarrolladas por la PSA en el año 2003 dentro del Programa de I+D dedicado a la Tecnología de Colectores Cilindro Parabólicos han estado principalmente relacionadas con tres proyectos: *INDITEP*, *DISS* y *PREDINCER*. De estos tres proyectos, el *INDITEP* es el que ha acaparado la mayor parte de los recursos y de los trabajos llevados a cabo, debido a la importante participación que posee la PSA en dicho proyecto. Con el fin de abrir nuevos proyectos que aseguren la continuidad de las líneas de trabajo definidas dentro de este Programa de I+D, en el año 2003 también hemos dedicado un gran esfuerzo a la preparación y gestación de nuevos proyectos. A continuación se describen los resultados más relevantes conseguidos en el año 2003 por la PSA en relación con los proyectos *INDITEP*, *DISS* y *PREDINCER*. Al final también se exponen brevemente las actividades llevadas a cabo en relación con otros proyectos y la elaboración de propuestas para nuevos proyectos presentadas en el 2003 a instancias tanto nacionales como europeas.

### **PROYECTO INDITEP**

El proyecto *INDITEP* comenzó oficialmente el día 1 de julio de 2002 y tiene una duración de 36 meses. Cuenta con la ayuda financiera de la Comisión Europea (contrato nº ENK5-CT-2001-00540) y las actividades planificadas dentro del proyecto *INDITEP* constituyen la lógica continuación técnica de las actividades llevadas a cabo dentro del proyecto *DISS*. Una vez que la viabilidad técnica del proceso de Generación Directa de Vapor (GDV) en colectores cilindro parabólicos fue demostrada en el proyecto *DISS*, el próximo paso lógico debe ser la optimización del proceso y de sus componentes esenciales, a la vez que se puede acometer el diseño de detalle de una primera central eléctrica termosolar comercial que funcione con generación directa de vapor en el campo solar.

Hay cuatro objetivos básicos dentro del proyecto *INDITEP*:

1. Diseño de detalle de una primera planta GDV comercial de 5 MWe.
2. Optimización y desarrollos avanzados de componentes para hacer la tecnología GDV más competitiva (separadores agua/vapor compactos y económicos, almacenamiento térmico para GDV, etc.).
3. Caracterización bajo condiciones solares reales de los componentes más importantes para campos solares GDV.
4. Estudio socio-económico de la tecnología GDV.

La mayor parte de los socios del proyecto INDITEP (IBERDROLA, ABENGOA, CIEMAT, DLR, Flabeg Solar, GAMESA, INITEC, SIEMENS y ZSW) participaron también en el proyecto DISS, lo que asegura una perfecta continuidad y enlace entre sus actividades. La participación del CIEMAT en el proyecto INDITEP se centra en las siguientes actividades:

- Participación en la ingeniería de detalle de la planta GDV de 5 MWe
- Mejorar el campo solar de la planta DISS existente en la PSA para aumentar la producción de vapor hasta 1 kg/s
- Operar y mantener la planta DISS con el fin de elaborar procedimientos de operación y mantenimiento para plantas GDV comerciales, así como para evaluar nuevos separadores agua/vapor, sistemas de almacenamiento térmico y nuevos reflectores.
- Mejorar el sistema de regulación y control del campo solar de la planta DISS de la PSA.
- Realizar un análisis del estrés que se ha producido en los tubos absorbentes de los colectores DISS después de más de 4000 horas de operación.
- Desarrollar nuevos recubrimientos selectivos capaces de soportar temperaturas de hasta 550 °C.

En el año 2003, las actividades del CIEMAT-PSA han estado principalmente centradas en tres temas:

1. Participación en la ingeniería de detalle de una planta GDV de 5 MWe
2. La mejora del campo solar de la planta DISS existente en la PSA para aumentar la producción de vapor sobrecalentado hasta 1 kg/s.
3. Desarrollo de nuevos recubrimientos selectivos mediante la técnica Solgel

A continuación se describen las actividades llevadas a cabo por la PSA en relación a cada uno de estos tres temas.

### Ingeniería de Detalle de una Planta GDV de 5 MWe

En este tema, la PSA ha realizado el diseño conceptual del campo solar para la planta, de acuerdo con los requerimientos del bloque de potencia diseñado por INITEC y de la turbina seleccionada por los socios del proyecto para la planta. La figura siguiente muestra el esquema del campo solar diseñado por el CIEMAT, que está compuesto por siete filas de colectores, con 10 colectores ET-100 conectados en serie dentro de cada fila. Los ocho primeros colectores de cada fila se dedican a precalentar y evaporar el

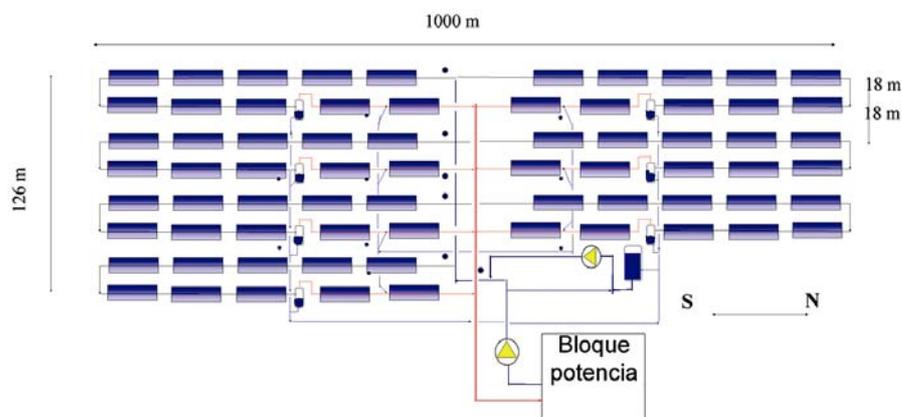


Figura 47 Esquema simplificado del campo solar diseñado por el CIEMAT para la planta INDITEP

agua de alimentación, mientras que los dos últimos se dedican al sobrecalentamiento del vapor. Un separador agua/vapor instalado al final del tramo de evaporación de cada fila asegura que el tramo de sobrecalentamiento es alimentado solo con vapor saturado. Por otro lado, se dispone de un inyector de agua a la entrada del último colector de cada fila, con el fin de conseguir un buen control de la temperatura del vapor sobrecalentado suministrado por cada fila.

Todos los separadores agua/vapor conectados en las diversas filas drenan a un depósito final de agua de recirculación. Una bomba de recirculación envía a la entrada del campo solar el agua acumulada en este depósito. Para evitar la posibilidad de que se produzca cavitación en la aspiración de la bomba de recirculación, el agua de recirculación se enfría un poco mediante la mezcla de una pequeña cantidad de agua fría suministrada por la bomba principal del campo solar.

La Tabla 1 proporciona los parámetros principales del colector ET-100 considerado para el diseño, mientras que la Tabla 2 resume los parámetros considerados para el punto de diseño y los parámetros de temperatura, presión y caudal que satisface el campo solar diseñado.

**Tabla 1 Datos del colector ET-II**

Ancho de apertura (m)	5.76
Longitud total del colector (m)	98.5
Longitud total de cada modulo (m)	12.27
Número de módulos	8
Diámetro exterior del tubo absorbedor (m)	0.07
Diámetro interior del tubo absorbedor (m)	0.055
Longitud de cada tubería de interconexión (m)	4
Codos de 90° en cada interconexión	8
Área de apertura de espejos (m <sup>2</sup> )	548.35
Eficacia óptica pico	0.765
Factor de ensuciamiento	0.97
Área de paso del absorbedor (m <sup>2</sup> )	2.40xE-03
Altura de grano del tubo absorbedor (m)	4.0xE-05
Rugosidad relativa del tubo absorbedor	7.23xE-04

La PSA también ha simulado el comportamiento anual del campo solar diseñado, calculando la producción de vapor sobrecalentado que tiene lugar en cada momento en función de los datos medioambientales (radiación solar directa y temperatura ambiente).

Para llevar a cabo el diseño y la simulación del campo solar de la planta INDITEP se han desarrollado diversas herramientas de software, como la hoja de cálculo en EXCEL "Dimensionado Planta-DSG" (González, 2003), que permite el pre-dimensionado (en condiciones nominales) de campos solares con colectores cilindro parabólicos que trabajen con la tecnología de generación directa de vapor y con los modelos de colector LS-3 o EUROtrough. También se ha creado un programa en FORTRAN, llamado "Simcampo.for", que permite simular el comportamiento de un campo de colectores solares cilindro parabólicos del tipo EUROtrough, con orientación Norte-Sur y con Generación Directa de Vapor. Este programa permite determinar, entre otros factores, la Potencia Térmica generada en el campo solar a lo largo de un año, o los caudales de vapor suministrados por el campo solar en cualquier momento a lo largo del año.

**Tabla 2 Datos del punto de diseño y parámetros nominales de temperatura, presión y caudal**

Radiación solar directa	875 W/m <sup>2</sup>
Día y hora solar para el punto de diseño	21 de junio; 12:00h
Temp. ambiente	20 °C
Ángulo de incidencia considerado	13.7°
Temperatura del agua a la salida del BOP	127.7 °C
Temperatura media del agua a la entrada de cada fila de colectores	115 °C
Temperatura del vapor a la entrada BOP	400 °C
Temperatura media del vapor a la salida de cada fila de colectores	410 °C
Caudal nominal de vapor demandado por el BOP	7.22 kg/s
Factor de sobre-dimensionamiento	1.15
Caudal de vapor entregado por el campo solar en el punto de diseño en verano	8.3 kg/s
Presión media del agua de alimentación a cada fila de colectores	81 bar
Presión media del vapor a la salida de cada fila de colectores	71 bar
Presión del vapor a la entrada BOP	65 bar

El dimensionamiento del campo solar ha sido completado con el diseño del esquema de control requerido para asegurar una buena operación del mismo y la estabilidad de la presión y temperatura del vapor sobrecalentado suministrado. El trabajo llevado a cabo en el 2003 por la PSA relacionado con la ingeniería de detalle de la planta INDITEP se completará en el año 2004 con la elaboración de las especificaciones de toda la instrumentación necesaria, así como los procedimientos de operación para el arranque y parada del campo solar.

### **Mejora de la Planta DISS Existente en la PSA:**

Otra fracción importante de la participación de la PSA en el proyecto INDITEP durante el año 2003 ha estado dedicada a la mejora del campo solar de la planta experimental DISS con el fin de aumentar hasta 1 kg/s el caudal nominal de vapor a 100 bar/395°C. Para ello se ha aumentado el área de captación de la fila de colectores que compone el campo solar de la planta DISS. Dos colectores ET-100 han sido conectados en serie con la fila de 11 colectores instalada durante el proyecto DISS en el año 1998, de este modo se ha aumentado en 1096 m<sup>2</sup> el área de captación de dicha fila. La figura 3 muestra el esquema simplificado del campo solar de la planta DISS después de la instalación de los dos nuevos colectores.

Como se aprecia en la Figura 48, los dos nuevos colectores han sido instalados en serie y conectados a la entrada de la fila de colectores que se instaló en 1998. En la Figura 49 se muestra una vista de las estructuras de los módulos concentradores de los dos nuevos colectores ET-100 durante los trabajos de montaje, y en la Figura 50 se muestra como ha quedado la interconexión en forma de "U" de los dos nuevos colectores instalados en el 2003 con la fila de colectores instalada en el año 1998.

Una vez finalizado el montaje de los dos nuevos colectores en el mes de julio, se llevaron a cabo las pruebas de presión a 180 bar y se procedió a la instalación del aislamiento térmico. Las primeras pruebas de funcionamiento de los nuevos colectores tuvieron lugar en el mes de octubre de 2003. En la actualidad el sistema se encuentra completamente operativo.

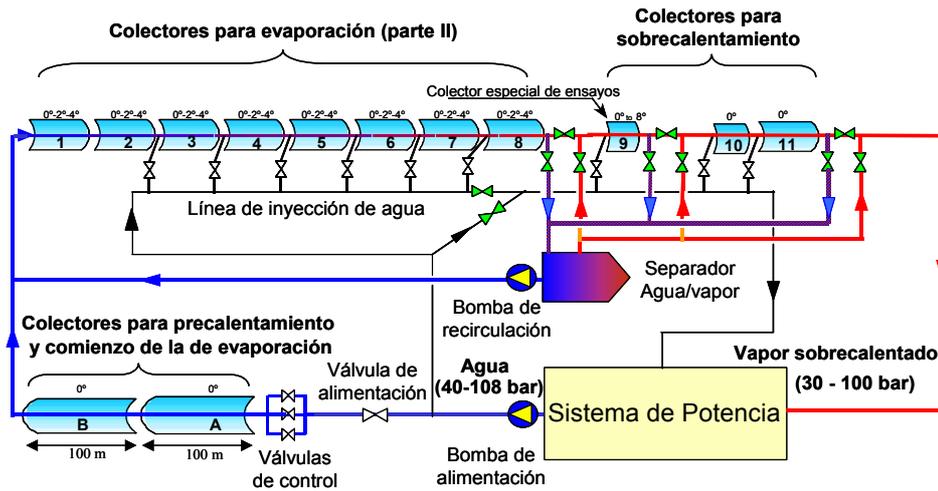


Figura 48 Esquema del campo solar de la planta DISS tras la mejora del campo solar.



Figura 49 vista de las estructuras metálicas de los dos nuevos colectores instalados en la planta DISS.



Figura 50 Vista de la interconexión en "U" de los dos nuevos colectores con la fila instalada en 1998.

Simultáneamente con el montaje de los dos nuevos colectores, el DLR llevó a cabo la instalación de uno de los dos separadores compactos agua/vapor que está previsto evaluar dentro del proyecto INDITEP.

Además del montaje de los dos nuevos colectores, la PSA ha llevado a cabo la fabricación de sus controles locales de seguimiento solar, así como la elaboración de todas las especificaciones técnicas para el montaje de la instrumentación asociada. Otro de los trabajos llevados a cabo por la PSA en relación con los dos nuevos colectores ha sido la modificación del sistema de adquisición de datos y regulación de la planta DISS con el fin de incluir la instrumentación nueva e introducir los nuevos colectores en las pantallas gráficas del sistema.

### Desarrollo de Nuevos Recubrimientos Mediante la Técnica Solgel:

Siguiendo con la línea de trabajo iniciada hace ya más de siete años por el CIEMAT en relación con el desarrollo de nuevos recubrimientos mediante la técnica Solgel, la PSA ha seguido trabajando durante el segundo semestre del año 2003 en la obtención de recubrimientos antirreflectantes para vidrios y de recubrimientos selectivos para tubos absorbedores. Durante el primer semestre, los trabajos de investigación se vieron ralentizados por quedar fuera de servicio el laboratorio usado para esta actividad, ya que se sustituyó todo el mobiliario y se adquirieron algunos instrumentos nuevos.

La actividad desarrollada en el 2003 con relación al Solgel se ha centrado en dos campos: a) recubrimientos antirreflectantes para vidrio, y b) recubrimientos selectivos para absorbedores solares. A continuación se enumeran los logros alcanzados en estos dos campos.

Recubrimientos antirreflectantes para vidrio: Durante este periodo se ha procedido a la optimización de las películas antirreflectantes de sílice porosa sobre vidrio borosilicato, material empleado en la fabricación de la cubierta de vidrio que protege los tubos absorbedores usados en los colectores cilindro parabólicos. Se ha observado experimentalmente que las propiedades antirreflectantes mejoran cuando, entre el vidrio y la capa porosa de sílice, se introduce una película de sílice densa (ver Figura 51). La transmitancia solar (AM1.5) del vidrio borosilicato empleado en las pruebas (0.923) aumenta hasta 0.953 con la capa de sílice porosa y a 0.959 con las dos capas de sílice.

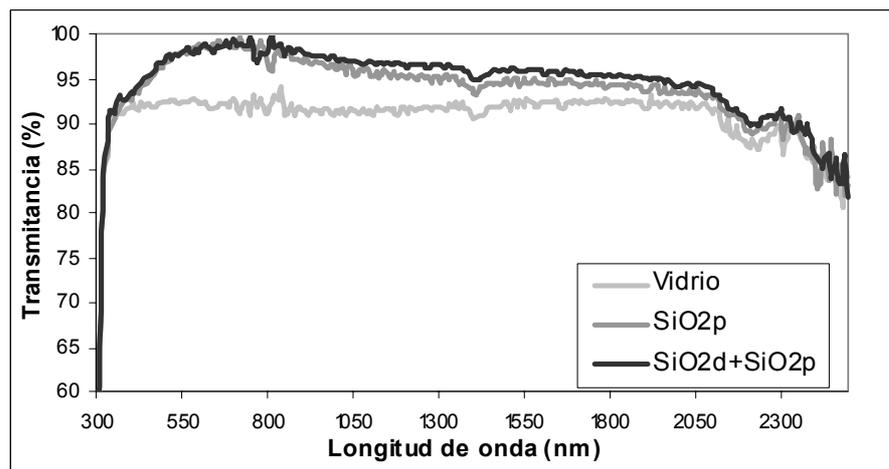


Figura 51 Transmitancias solares del vidrio borosilicato sin recubrir, con la capa porosa de sílice, y con una capa de sílice densa y otra porosa.

Las pruebas realizadas por la empresa alemana Schott a una muestra del recubrimiento antirreflectante desarrollado por la PSA han puesto de manifiesto unas excelentes propiedades mecánicas y ópticas del recubrimiento, permitiendo su uso a intemperie. La transmitancia medida ha sido de 95.85.

Por otro lado, se ha resuelto el problema de la adsorción de vapor de agua por los silanoles (Si-OH) del recubrimiento antirreflectante de sílice porosa, mediante la introducción de la muestra en una solución de alquilalcóxidos. Éstos sustituyen el radical -OH del silanol, evitando la adsorción de agua y confiriendo un claro comportamiento hidrófobo al recubrimiento. No obstante, durante el año 2004 se trabajará para mejorar el comportamiento a largo plazo del recubrimiento antirreflectante desarrollado, ya que sus propiedades ópticas podrían verse un poco mermadas a largo plazo, de modo que la transmisividad podría pasar de 95,85 a 94.

Recubrimientos selectivos para absorbedores solares: Dentro del proyecto INDITEP se está trabajando en la obtención de un recubrimiento selectivo estable en contacto con aire a 550°C, junto con el empleo de acero al carbono como material base del tubo absorbedor metálico. Estos requerimientos han obligado a introducir cambios importantes en el absorbente selectivo desarrollado por la PSA para tubos metálicos de acero inoxidable y temperaturas de 450°C.

El recubrimiento selectivo que está desarrollando el CIEMAT dentro del proyecto INDITEP se compone de dos capas de cermet de alúmina/platino, con diferente contenido del metal sobre una fina película reflectora de platino metálico. Se utilizan diferentes barreras protectoras y/o antidifusoras entre las capas, así como un recubrimiento antirreflectante.

El aumento de la temperatura de operación implica la necesidad de densificar las películas producidas por solgel a temperaturas de 550-600°C para evitar que continúe el proceso de densificación del absorbente durante la operación del colector, con la consiguiente reducción de espesor de las capas y el cambio de las propiedades ópticas del recubrimiento. Por otro lado, el aumento de la temperatura provocará una mayor difusión entre capas, por lo que se necesitan barreras anti-difusoras más densas y de mejores prestaciones.

La generación directa de vapor requiere la utilización de acero al carbono como material del tubo absorbedor. El acero al carbono presenta una baja estabilidad química y térmica, por lo que el material debe ser protegido con algún tipo de recubrimiento que permita la deposición de las películas de solgel y los tratamientos térmicos de densificación. No es posible la utilización de películas protectoras de sílice densa como en el acero inoxidable o el aluminio debido a que se produce una fuerte oxidación del sustrato a temperaturas tan bajas como 200°C. Para solucionar este problema se están empleando películas de níquel-tungsteno depositadas por electrolisis, que muestran una elevada estabilidad térmica y permiten su densificación a temperaturas superiores a 500°C.

A finales del año 2003 se empezaron a preparar muestras del absorbente completo sobre sustrato de acero al carbono para evaluar su estabilidad térmica a 550°C en aire. Las películas individuales se han sinterizado a 600°C en aire durante treinta minutos para conseguir una mayor densificación. Las propiedades ópticas de los recubrimientos selectivos obtenidos hasta el momento son: absorptividad = 0.94 y emisividad<sub>400c</sub> = 0.14.

## **PROYECTO DISS**

La finalidad principal del proyecto DISS es el desarrollo de la tecnología de generación directa de vapor (conocida con las siglas GDV), mediante la cual se produce vapor a alta presión y temperatura en los propios tubos absorbedores de los colectores cilindro parabólicos, lo que permite eliminar el aceite utilizado tradicionalmente en las plantas solares con colectores cilindro parabólicos como fluido de trabajo en los colectores solares. El proyecto DISS comenzó en su primera fase en enero de 1996 y terminó en noviembre de 1998 con la puesta en marcha de la que hoy en día es la única planta experimental a escala real que permite investigar el proceso GDV bajo condiciones solares reales. Dicha planta experimental, conocida como planta DISS de la PSA, fue operada durante la segunda fase del proyecto (diciembre 1998 – diciembre 2001) para conseguir datos

experimentales que permitieran clarificar las incertidumbres técnicas que conllevaba la generación directa de vapor.

Aunque el contrato firmado para la fase 2 del proyecto DISS por la Comisión Europea y los socios del proyecto (CIEMAT, Abengoa, DLR, ENDESA, IBERDROLA, Flabeg Solar Internacional y ZSW) finalizó oficialmente en diciembre del año 2001, el CIEMAT ha continuado su actividad en este proyecto durante los años siguientes, con un doble objetivo: a) seguir evaluando los datos experimentales obtenidos durante la fase 2 del proyecto, y b) completar los resultados obtenidos durante la segunda fase del proyecto con experimentos adicionales a los llevados a cabo hasta ese momento.

En el año 2003 se ha terminado el estudio de los gradientes térmicos en los tubos absorbedores de los colectores DISS, publicándose los resultados en la Tesis Doctoral que bajo el Título "Generación Directa de Vapor con Colectores Solares Cilindro Parabólicos. Proyecto DISS" fue defendida en la E.S.I.I. de Sevilla, en Noviembre de 2003. Para llevar a cabo dicho estudio se han considerado tres zonas diferentes en la fila de colectores cuando trabajan con generación directa de vapor:

- a) Zona de precalentamiento del agua
- b) Zona de evaporación, y
- c) Zona de sobrecalentamiento de vapor.

Puesto que tanto en la zona de precalentamiento como en la de sobrecalentamiento existe un flujo monofásico de agua o vapor, según la zona, el estudio de los gradientes térmicos en ambas zonas ha seguido una metodología similar. Las conclusiones principales que se han obtenido para estas dos zonas son las siguientes [Zarza, 2003]:

- Todas las diferencias circunferenciales máximas de temperatura medidas en los tubos absorbedores han sido muy inferiores al valor de 70°C adoptado como límite para garantizar la durabilidad de los tubos absorbedores.
- El gradiente térmico y la tensión máxima medidas en las peores condiciones de trabajo que se han encontrado en las zonas de precalentamiento y sobrecalentamiento son bastante inferiores al
- valor máximo admitido para 10 MPa por el código ANSI/ASME B31.1, 1983. En concreto, la máxima tensión obtenida en la zona de precalentamiento ha sido de  $8 \cdot 10^7$  N/mm<sup>2</sup>, mientras que en la zona de sobrecalentamiento ha sido de  $11 \cdot 10^7$  N/mm<sup>2</sup>, que equivalen a un 47% y un 67% del valor máximo admitido de acuerdo con el criterio de Von-Mises. Por consiguiente, está garantizada la integridad del tubo absorbedor metálico. En la Figura 52 se muestra la evolución de los perfiles de temperatura circunferenciales y del gradiente térmico en el caso más desfavorable encontrado en la zona de precalentamiento de agua, que corresponde a un ensayo que había sido realizado el día 29 de mayo de 2002.

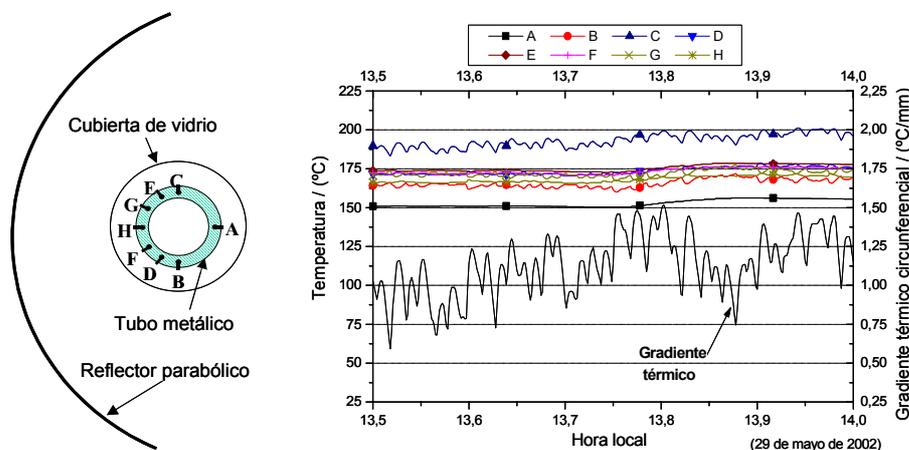


Figura 52 Perfil de temperatura y gradiente térmico en el caso más desfavorable encontrado para la zona de precalentamiento de agua.

- El modo de operación en Un-solo-paso es desaconsejable para plantas GDV comerciales, debido a la alta fatiga que se produce en la internase entre las zonas de evaporación y sobrecalentamiento

En lo que se refiere a la zona de evaporación, los más de 900 datos experimentales evaluados han puesto de manifiesto que los gradientes térmicos en esta zona son también muy inferiores al máximo admitido para asegurar la integridad de los tubos absorbedores. Se ha constatado que en la práctica no se dan simultáneamente las condiciones más desfavorables de operación que desde un punto de vista teórico se habían supuesto en los estudios teóricos llevados a cabo antes del proyecto DISS. Así, por ejemplo, se ha comprobado que no pueden darse simultáneamente un bajo ángulo de giro del eje del colector y una alta irradiancia solar directa.

El estudio llevado a cabo en el año 2003 también ha puesto de manifiesto cuales son los caudales de agua de alimentación que provocan la estratificación de la fase líquida dentro de la zona de evaporación, en función de la presión de trabajo. Estos caudales mínimos son: 0,8 kg/s para 10 MPa; 0,55 para 6 MPa y 0,4 para 3 MPa. También se ha observado que el segmento más crítico dentro de la zona de evaporación es el comprendido dentro del siguiente rango del título de vapor:  $0,3 \leq x \leq 0,5$ . Esto quiere decir que la estratificación, si aparece, siempre comienza dentro de este segmento de la zona de evaporación.

Otra conclusión importante obtenida del estudio llevado a cabo es que cuando hay estratificación de la fase líquida dentro de la zona de evaporación, las diferencias circunferenciales máximas de temperatura crecen de forma importante con la presión de trabajo, a igualdad del resto de parámetros operacionales.

En la Figura 53 se muestra la evolución típica de las diferencias circunferenciales máximas de temperatura en los tubos absorbedores dentro de la zona de evaporación de la fila de colectores DISS, en función del título de vapor del flujo bifásico. La tendencia mostrada por los valores representados en la Figura 53 tiene una gran similitud desde el punto de vista cualitativo, con la obtenida en el proyecto GUDE (Goebel, Hennecke, 1997)(Köhler, Herbst y Kastner, 1996).

El estudio llevado a cabo en el 2003 también ha puesto de manifiesto una serie de fenómenos interesantes que no se conocían con anterioridad. Estos fenómenos son los siguientes:

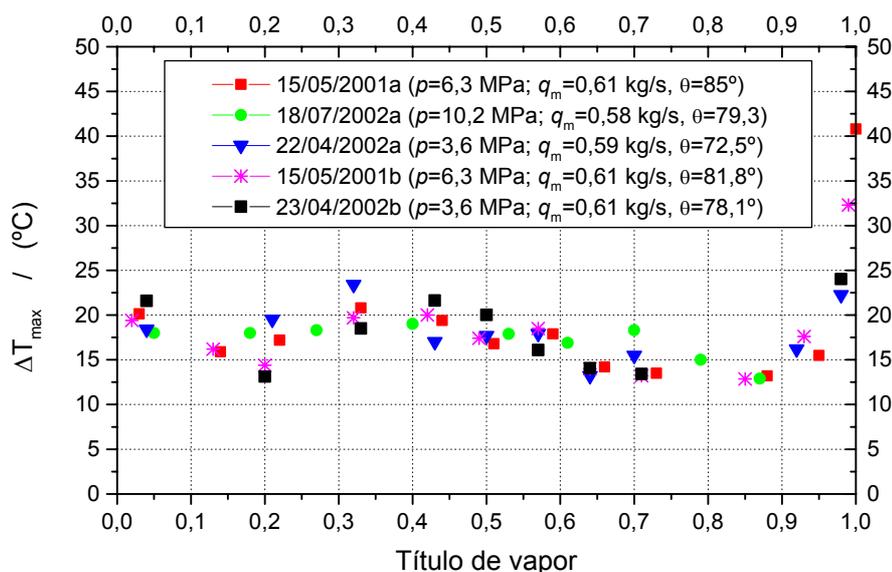
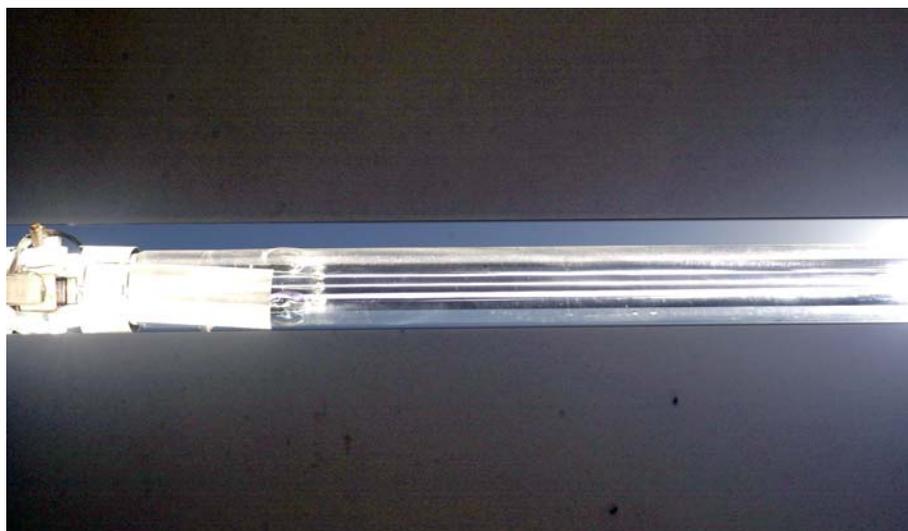


Figura 53 Valores medidos de la diferencia circunferencial máxima de temperatura en los tubos absorbedores de la zona de evaporación, en función del título de vapor.

- El perfil de flujo de radiación solar concentrada que incide sobre el tubo absorbedor es muy irregular y presenta líneas de alto flujo que pueden incluso detectarse visualmente. La intensidad y posición de dichas líneas cambia rápidamente, en función de la posición relativa del Sol y del colector. Aunque aún no está claro el origen de dichas líneas de alto flujo, parece que pueden deberse a un cúmulo de factores (error en el conformado de los espejos parabólicos, tolerancias del montaje, etc.) Figura 54 muestra una imagen de un tubo absorbedor de los colectores DISS cuando se encuentra en operación, pudiéndose apreciar la existencia de las líneas de alto flujo mencionadas.



**Figura 54 Líneas de alto flujo sobre los tubos absorbedores DISS.**

- También se ha comprobado que las separaciones entre módulos adyacentes dentro de un colector y entre las filas verticales de espejos dentro de un mismo módulo cilindro parabólico provocan zonas sombreadas sobre el tubo absorbedor, de modo que si en dicha zona se encuentran termopares que miden la temperatura del tubo metálico absorbedor, la temperatura que proporcionan dichos termopares es sensiblemente inferior a la que realmente existe cuando no se produce dicha sombra. Esto conlleva a tener que estudiar con detalle el emplazamiento de los termopares que se instalen en los tubos absorbedores de colectores cilindro parabólicos. (Zarza, Sánchez, 2002).

En el año 2003 también se llevó a cabo una comparación entre los valores experimentales medidos en la PSA para el coeficiente superficial de transferencia de calor por convección en la zona de evaporación de los colectores DISS con los predichos por las correlaciones que cuentan con un mayor respaldo en la actualidad: Kandlikar (1990), Goebel (1998), Chen (1996), Shah (1976) y Gungor&Winterton (1986). La conclusión de dicha comparación es que el cálculo de dicho coeficiente superficial de transferencia de calor es muy sensible frente a pequeñas variaciones en las medidas de temperatura a partir de las cuales se calcula, ya que una variación de 1°C en dichas temperaturas puede producir variaciones incluso superiores al 50% en el valor del coeficiente de transferencia de calor obtenido. Puesto que es imposible asegurar que las medidas de temperatura proporcionadas por los termopares instalados en los tubos absorbedores DISS están exenta de un error del orden de 1°C, los valores de temperatura medidos por dichos termopares no pueden ser usados para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior de los tubos absorbedores de la zona de evaporación. La Figura 55 muestra la comparación entre los valores obtenidos con los datos experimentales del proyecto DISS y los obtenidos para esas mismas condiciones de trabajo por la correlación de Goebel (1998).

Durante la primera mitad del año 2003 también se continuó trabajando en el estudio de la mejora de la transferencia de calor en la cara interna de los tubos absorbedores de

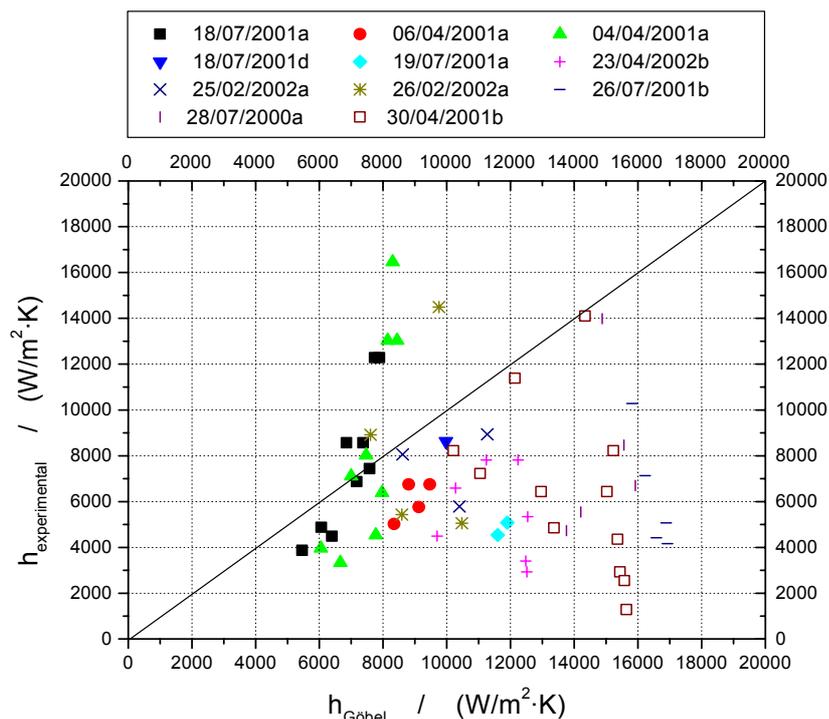


Figura 55 Comparación de la correlación de Goebel (1998) con los valores experimentales del coeficiente superficial de transferencia de calor por convección obtenidos a partir de los datos experimentales DISS

colectores cilindro parabólicos trabajando con generación directa de vapor. Este trabajo dio como resultado la finalización de la tesis doctoral “Mejora de la transferencia de calor en flujo horizontal bifásico. Aplicación a colectores solares cilindro-parabólicos”, presentada en el mes de junio en la de la Facultad de C.C. Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, a través del Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Con la presentación de esta tesis se ha culminado una de las líneas de investigación iniciadas durante el proyecto DISS por el CIEMAT-PSA.

### PROYECTO PREDINCER

El proyecto PREDINCER es un proyecto coordinado de I+D de ámbito nacional, que cuenta con la financiación parcial del Ministerio de Ciencia y Tecnología. Dentro de este proyecto el CIEMAT colabora con Grupos de Investigación de las Universidades de Almería y Sevilla, para desarrollar y evaluar nuevos algoritmos de control predictivo para procesos con incertidumbres acotadas, aplicables a campos solares con colectores cilindro parabólicos. Este proyecto comenzó en Septiembre de 2002 y cuenta con una duración de 36 meses.

Durante el año 2003, y en relación con el análisis y desarrollo de técnicas de modelado e identificación, se han empezado a realizar análisis de estructuras de modelos lineales y se está estudiando la acotación de las incertidumbres en el caso concreto de la planta DISS de la PSA para tener este aspecto en cuenta desde el punto de vista de control en los distintos modos de operación de dicha planta. Para este sistema se comenzó obteniendo modelos lineales de bajo orden y se ha procedido al análisis de los datos experimentales disponibles del sistema. Después de realizar unos primeros análisis de los datos, se ha planteado realizar una serie de ensayos específicos en el sistema que nos permita obtener datos con suficiente riqueza dinámica. Estos ensayos se llevarán a cabo en el año 2004.

Se ha trabajado también en la mejora de un simulador dinámico de la planta DISS que fue desarrollado cuando se hicieron los primeros estudios teóricos del sistema. La disponi-

bilidad de este simulador nos va a permitir realizar el modelado y simulación de los diseños que se realicen para este sistema de estructuras de control predictivo con incertidumbres acotadas.

Como fruto de la colaboración de investigadores de este Grupo con los de otros Grupos que componen el proyecto coordinado, se han obtenido los siguientes resultados, tanto en el ámbito de la colaboración en este proyecto como de colaboraciones previas:

- L. Valenzuela, E. Zarza, M. Berenguel, E.F. Camacho. Feedforward control for a once through solar boiler. *IEEE Control System Magazine*, 2003, en prensa.
- L. Valenzuela, E. Zarza, M. Berenguel, E.F. Camacho. Control concepts for direct steam generation process in parabolic troughs. *ISES Solar World Congress*, Göteborg, Suecia, Junio 2003.
- L. Valenzuela, M. Berenguel, E. Zarza, E.F. Camacho. Control schemes for direct steam generation in parabolic solar collectors under recirculation operation mode. Enviado a *Solar Energy* para su posible publicación, 2003.

### **OTRAS ACTIVIDADES EN EL AÑO 2003:**

Además de las actividades llevadas a cabo en relación con los proyectos: INDITEP, DISS y PREDINCER, la PSA ha realizado otras actividades en el año 2003 relativas a la tecnología de colectores solares cilindro parabólicos.

Se ha dedicado un esfuerzo importante a la preparación y planificación de nuevos proyectos que permitan continuar con las líneas principales de trabajo definidas por la PSA en el campo de los colectores cilindro parabólicos. Como consecuencia de esta actividad, la PSA ha participado en dos propuestas presentadas a la Comisión Europea en el 2003 dentro de la primera convocatoria del VI Programa Marco. Estas dos propuestas han sido las siguientes:

- DISTOR: que tiene por finalidad el desarrollo de un sistema de almacenamiento térmico apto para plantas solares con generación directa de vapor. Esta propuesta ha estado coordinada por el DLR y cuenta con una amplia lista de socios: DLR, SGC, FSOL (D), CNRS, EPSILON, DEFI (F), CIEMAT, INASMET, SISCALOR, IBERINCO, SOLUCAR (E), Weizmann Institute (IL) y la Academia Búlgara de Ciencia (BUL). Esta propuesta fue aprobada y la actividad del proyecto comenzará a principios del año 2004, con una duración de 42 meses.
- NEW-AGE-PV: que tiene por finalidad el desarrollo de procedimientos e instalaciones para ensayos de envejecimiento acelerado de módulos fotovoltaicos. La propuesta fue coordinada por el Fraunhofer ISE (D), contando con los siguientes socios: CIEMAT (E), PSE, Solon. Isovolt (D), National Testing and Research Institute (S) y la Universidad de Lovaina (A). Esta propuesta no logró pasar la fase de evaluación.

También se presentaron en diciembre de 2003 dos propuestas de proyecto de ámbito Nacional. Una de ellas ha sido presentada en colaboración con Grupos de Investigación de las Universidades de Málaga y Sevilla (Proyecto GEDIVES), para el desarrollo de herramientas de diseño y simulación para campos solares cilindro parabólicos con generación directa de vapor. La segunda propuesta de proyecto a nivel nacional fue presentada al Programa PROFIT en colaboración con diversas industrias españolas y la Universidad de las Islas Baleares, para el desarrollo de dos nuevos diseños de colectores de foco lineal aptos para integración en edificios o en procesos industriales de pequeño o mediano consumo de energía térmica dentro del rango 125°C – 300°C. Estos dos nuevos desarrollos de colector solar encajan con los intereses de la Agencia Internacional de la Energía y su recién creada Tarea 33/4 SHIP (*Solar Heat for Industrial Processes*) en la cual participamos.

En el año 2003 hemos participado también en diversas reuniones del proyecto Andasol, ya que estamos involucrados en dicho proyecto. No obstante, nuestra contribución a

este proyecto ha sido aún modesta porque la principal contribución de la PSA en Andasol tendrá lugar durante las fases de instalación y puesta en marcha de la planta.

Asimismo, a principios del año 2003 se realizaron los informes finales relativos a la participación del CIEMAT-PSA en el proyecto europeo "EUROtrough-II", finalizado en Diciembre de 2002. Por último, en el año 2003 también hemos continuado, dentro de las limitaciones inherentes al reducido número de personas que componen el Programa de cilindro parabólicos, dando apoyo a las empresas españolas interesadas en el campo de los colectores cilindro parabólicos

## Química Solar

### **INTRODUCCIÓN**

Durante el año 2003, el CIEMAT ha llevado a cabo una evaluación externa de sus distintas líneas de actividad, denominadas hasta ese momento como "Proyectos CIEMAT", por parte de destacados científicos con reconocido prestigio internacional en los campos de actividad relacionados. Como consecuencia de dicha evaluación, durante el segundo semestre de 2003, el CIEMAT ha ido perfilando y concretando una importante reorganización de su actividad que, en el caso del Proyecto "Aplicaciones Químicas de la Radiación Solar", implicará una serie de importantes cambios a partir del 1 de enero de 2004.

El primero de estos cambios es que, a partir del año 2004, el "Proyecto" de "Aplicaciones Químicas de la Radiación Solar" pasará a ser un "Programa" denominado "Aplicaciones Medioambientales de la Energía Solar y Caracterización de la Radiación Solar". El término "Programa" implica unas características de áreas de actividad más amplias que las que anteriormente tenían los "Proyectos". La razón de este cambio hay que buscarla en el carácter fundamentalmente ambiental que tienen las distintas iniciativas que el Proyecto de Química Solar ha estado desarrollando durante estos últimos años.

Estos cambios no suponen, sin embargo, el abandono o modificación de las líneas de actividad que se han ido desarrollando durante estos últimos años en la PSA y que, en todos los casos, han estado focalizadas en el desarrollo tanto científico como tecnológico de diferentes procesos químicos o fotoquímicos a partir del uso primario de la radiación solar. Se pretende, por el contrario, mantener y potenciar todas estas actividades pero reforzándolas con otras que se complementan de forma notable. Esto va a permitir un crecimiento de la actividad del grupo, a la vez que alcanzar una masa crítica suficiente que permita su consolidación como grupo de referencia a escala mundial en el desarrollo de tecnologías solares y su aplicación a procesos concretos.

Es el caso, por ejemplo, de los procesos asociados al uso de la radiación solar para abordar diversas problemáticas del agua. La importante experiencia acumulada en el campo de la fotocatalisis solar para la detoxificación de aguas ha resultado muy útil para promover otro tipo de iniciativas, en principio totalmente diferentes, como es la desalación solar de agua de mar. Más recientemente, el grupo de Química Solar ha dado también el paso de abordar procesos de desinfección de agua potable, con aplicación fundamental en entornos rurales aislados de países en vías de desarrollo.

En todos estos casos, la problemática medioambiental relacionada con el agua es muy clara, existiendo una importante sensibilización ciudadana asociada. Todos los organismos internacionales reconocen ya que la escasez y/o falta de agua es uno de los principales retos a los que se va a enfrentar la Humanidad en el Siglo XXI. Todo ello conlleva el que las oportunidades y posibilidades que hay actualmente y que, con toda seguridad, habrá en un futuro para el desarrollo de tecnologías medioambientalmente benignas y que ofrezcan soluciones efectivas, sean muy importantes.

Otro campo importante de actividad es y seguirá siendo el tratamiento de gases por vía fotocatalítica, proceso del que ya existen algunos equipos comerciales, aunque utilizando luz generada mediante lámparas eléctricas. Durante el año 2003 se ha podido constatar el interés creciente de determinadas empresas españolas por las posibilidades que ofrece la tecnología solar para la eliminación de olores y contaminantes gaseosos en general.

Sin embargo, la consecuencia más notable de la reorganización del CIEMAT anteriormente descrita la ha constituido la incorporación del grupo dedicado a la medida y caracterización de la radiación solar a partir del tratamiento de imágenes de satélite, anteriormente ubicado dentro del "Proyecto" CIEMAT de "Evaluación de Recursos de Energías Renovables". Las posibilidades y potencialidades que esta incorporación supone a la totalidad del grupo son muy importantes dada, por una parte, la relevancia que la caracterización del recurso solar tiene de por sí y, por otra, el elevado interés que posee el análisis y modelización de la radiación solar disponible para intervalos espectrales específicos, como es el caso de la radiación ultravioleta en procesos fotocatalíticos.

En el apartado de líneas que se cierran se debe indicar, que con la finalización del año 2003, han concluido también las actividades de "Síntesis Solar de Compuestos de Química Fina" (*Fine Chemical Synthesis*). Esta actividad se había estado desarrollando desde mediados de los años 90 gracias a una estrecha colaboración con nuestros colegas del DLR-PSA y a partir del 2004 dicha actividad cesará en espera de nuevos proyectos y oportunidades.

Muchos y muy destacados han sido los hitos conseguidos dentro del año 2003. Sin embargo, si hubiera que destacar alguno habría que citar dos como los más relevantes. El primero sería el comienzo de las obras de la instalación de la primera planta comercial de detoxificación solar que se instala en el mundo para el tratamiento del agua de lavado procedente del reciclado de envases de productos fitosanitarios; este proyecto está promovido por la empresa Albaida Recursos Naturales y Medioambiente y se basa en los desarrollos científicos y tecnológicos realizados en la Plataforma Solar de Almería durante los últimos años. El segundo de los hitos es el comienzo del proyecto "*Solar Thermochemical Application for CO<sub>2</sub>-Free Production of Syngas + H<sub>2</sub> from Heavy Crude Oil*", promovido y financiado por Petróleos de Venezuela S.A., para la producción solar de hidrógeno y gas de síntesis a partir de residuos de petróleo pesado. Con un presupuesto inicial cercano a los 7 millones US\$ en su primera fase, esta iniciativa supone una apuesta muy seria hacia el desarrollo de los "combustibles solares".

Finalmente, entre los resultados más destacables obtenidos en el año 2003 cabe destacar también la conclusión satisfactoria de una tesis doctoral dentro del grupo de Química Solar, un total de 15 publicaciones con en revistas internacionales con censor e índice de impacto científico, 1 patente internacional, la publicación de 3 libros (uno de ellos en Editorial Internacional), de 2 capítulos de libros (Editorial Internacional) y 21 Comunicaciones a Congresos (13 de ellas orales y casi todos Internacionales). Esta amplia e intensa actividad científica, sostenida durante los últimos años, ha motivado que el grupo de Química Solar cuente actualmente con un elevado prestigio y su labor se encuentre reconocida internacionalmente [Blanco y Malato, 2003a]. En las siguientes secciones se describen de forma resumida los principales proyectos y actividades desarrollados durante 2003.

1. Procesos de detoxificación solar de efluentes líquidos
2. Procesos de detoxificación solar en fase gaseosa
3. Procesos de desinfección solar de agua potable
4. Procesos de desalinización solar de agua de mar
5. Acceso a la PSA como Gran Instalación Europea. Actividades relacionadas con Química Solar
6. Otros procesos medioambientales de Química Solar

## 1) PROCESOS DE DETOXIFICACIÓN SOLAR DE EFLUENTES LÍQUIDOS

### Diseño y Optimización de una Planta Piloto de Tratamiento Integrado de Residuos de Envases Fitosanitarios para su Reciclaje

El proyecto (denominado TREN-AGRO) es financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Convocatoria de Proyectos de I+D, BOE 8 de marzo de 2000, Proyecto PPQ2000-0126-P4-05) y ha comenzado en Noviembre de 2001. En este proyecto la Plataforma Solar participa conjuntamente con el Dep. Química Analítica de la Univ. de Almería (coordinador), Aragonesas Agro S.A., Cooperativa de Exportadores de Frutas y Hortalizas de la Provincia de Almería y Dep. Ingeniería Química de la Universidad de Alcalá.

El trabajo que se propone pretende desarrollar un proceso de para el tratamiento de los residuos de envases de fitosanitarios que permita su reciclado y otras aplicaciones en la industria del plástico. El proceso constará de dos pasos fundamentales de varias operaciones cada uno (i) directamente sobre los envases; triturado, lavado, secado y compactado que para inertizar adecuadamente los residuos y (ii) sobre las aguas de lavado; tratamiento físico-químico de las misma (AOPs, tratamiento de oxidación avanzada) que elimine totalmente los componentes tóxicos como son los plaguicidas y sus productos de transformación presentes.

Durante 2003 se ha demostrado que, tanto la fotocatalisis con  $\text{TiO}_2$  y como con foto-Fenton, son tratamientos viables para depurar y detoxificar aguas contaminadas con plaguicidas (Figura 56). El proceso de foto-Fenton se ha mostrado más eficiente que el de  $\text{TiO}_2$ , no solo para la degradación de los plaguicidas, sino también para la mineralización del TOC y la reducción de la toxicidad [Agüera y col., 2003; Cáceres y col, 2003]. Los productos de degradación identificados mediante GC-MS, GC-AED y LC-MS durante ambos tratamientos fotocatalíticos son similares. Los métodos de extracción en fase sólida (SPE) aplicados han resultado muy útiles para la obtención de cromatogramas más "limpios" en GC-AED y GC-MS. Con ello no se ha perdido información de interés y al mismo tiempo, se ha evitado el uso de extracción líquido-líquido (LLE). Procedimiento de preparación de muestras que la mayoría de las veces resulta muy tedioso, caro y medioambientalmente dañino (uso de disolventes).

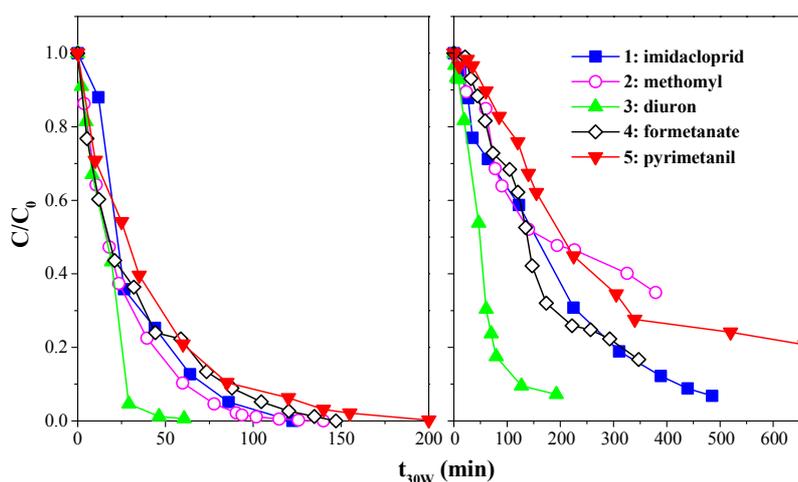


Figura 56 Degradación (izquierda) y mineralización (derecha) de varios plaguicidas a  $C_0 = 50 \text{ mg/L}$  utilizando  $\text{TiO}_2$  (200 mg/L).

El uso combinado de la detección en GC de AED/MS ha demostrado ser una de las alternativas más poderosas para la identificación y cuantificación de compuestos desconocidos. En concreto, GC-AED ha demostrado ser una herramienta muy útil en la identificación y cuantificación de los PDs de tratamientos fotocatalíticos, gracias a la calibración mediante compuestos independientes.

Mediante el uso de LC-MS, con las interfases de ionización a presión atmosférica (API) se aporta información rápida y detallada sobre la aparición y la evolución de los PDs formados durante los tratamientos de aguas. La utilización de LC-ES-MS en modo positivo ha permitido evidenciar la ruta de degradación de plaguicidas en procesos fotocatalíticos. El uso del analizador de trampa de iones (IT) ha resultado ser una buena herramienta en términos de número de PDs detectados y la capacidad de confirmación de estructuras utilizando los espectros de masas de los iones producto, gracias a su capacidad de trabajar en tandem, MS-MS. Además, LC-MS/MS genera espectros de masa no afectados por el ruido de fondo de la señal. La evaluación de los PDs utilizando LC-ES-MS mediante inyección directa ha evitado procedimientos de preparación de muestras (como LLE y SPE). Esta inyección directa evita la pérdida de analitos de interés, siempre y cuando la concentración de los mismos permita su detección sin necesidad de pre-concentración.

Los PDs o las mezclas de éstos que se generan durante los procesos de degradación fotocatalíticos pueden ser más tóxicos que sus componentes originales. No se ha observado una correlación clara entre los resultados obtenidos de los bioensayos de toxicidad y del TOC en los dos AOPs aplicados. Que el TOC sea un parámetro que no puede correlacionarse fácilmente con la toxicidad, es debido posiblemente a la diferente velocidad de formación de los PDs y, por tanto, a su concentración relativa en cada momento. Por lo tanto, demuestra claramente la necesidad de realizar baterías de bioensayos para poder obtener resultados concluyentes (Figura 57). Se ha demostrado que el diseño de una planta de tratamiento fotocatalítico requiere inexcusable la experimentación en planta piloto y no solo a escala laboratorio, ya que éstos pueden dar lugar a resultados difícilmente extrapolables y con sus consiguientes problemas de escalado. Esto es debido también a que cada caso tiene un comportamiento diferente y esto hace más necesario, si cabe, el uso de plantas piloto para obtener parámetros de diseño. Los costes de tratamiento no sólo son función de la velocidad de degradación. La cantidad y tipo de catalizador, el uso de oxidantes, el ajuste de pH antes del tratamiento y después, etc., tienen una importancia relevante en el cálculo de costes. Esto es una razón más para considerar a la fotocatálisis como un tratamiento de aguas que exige el estudio detallado de cada caso para diseñar la planta de tratamiento necesaria [Malato y col., 2003b-d].

Plaguicida	Bioensayo	$t_{30w, TOX}$ min		$C_{T_2, TOX}$ $m^3 m^{-2} year^{-1}$	
		$TiO_2$	Photo-Fenton	$TiO_2$	Photo-Fenton
	<i>Daphnia Magna</i>	297	133	6.4	14.3
Methomyl	<i>Vibrio Fishcheri</i>	355	146	5.4	13.0
	<i>Selenastrum Capricornotum</i>	86	109	22	17
	<i>Daphnia Magna</i>	108	1.1	18	1780
Diuron	<i>Selenastrum Capricornotum</i>	52	51.	37	37

Figura 57 Capacidad de tratamiento mediante los dos métodos fotocatalíticos ensayados (corregida con la UV media disponible) para alcanzar  $EC_{50}$  con dos de los plaguicidas ensayados.

## RECOGIDA Y RECICLADO MEDIOAMBIENTAL DE ENVASES PLÁSTICOS DE PRODUCTOS FITOSANITARIOS MEDIANTE FOTOCATÁLISIS SOLAR

Este proyecto está enfocado a problemas originados por la agricultura intensiva en invernadero, un sector que está creciendo exponencialmente en los últimos años en la Cuenca Mediterránea. Actualmente existen más de 200,000 Ha de invernaderos, la mayoría de ellos en países de la UE. Este tipo de agricultura necesita Hasta 200 veces más de plaguicidas que la agricultura convencional (Figura 58). Los problemas medioambientales son uno de los mayores inconvenientes de este sector económico para su desarrollo. Uno de estos problemas es el vertido incontrolado de envases (de plástico) usados de fitosanitarios, que suelen contener pequeñas cantidades de los mismos. Esto origina un serio peligro de contaminación de suelos y aguas subterráneas. La solución es la recogida selectiva de estos envases para su reciclado. Pero, antes de su reciclado el plástico debe ser lavado y el agua utilizada para ello quedará contaminada con los plaguicidas. Esta agua debe ser tratada antes de su vertido. Por tanto, el desarrollo de un proceso limpio y sencillo para tratar esta agua en el mismo lugar donde se produce es necesario. Actualmente no existe esta tecnología [Blanco, 2003 f; Malato y col., 2003i]. Por ello, la empresa ALBAIDA, con la colaboración del CIEMAT, presentó un proyecto "Environmentally Collection and Recycling of Pesticide Plastic Bottles using Advance Oxidation Process driven by Solar Energy" al programa Europeo LIFE-ENVIRONMENT que ha sido aprobado y comenzó su ejecución en Octubre de 2001. En estos momentos, se está empezando a construir la planta final que debe estar operativa en la primavera de 2004.

La parcela donde se va a ubicar la Planta de tratamiento de envases fitosanitarios se encuentra en el T.M. de La Mojonera, y tiene una superficie total de 12.915 m<sup>2</sup>. La Planta contará con un almacén de 280 m<sup>2</sup> de recepción y tratamiento de los envases plásticos que vayan llegando; y también con una zona donde se instalará un campo solar. A este campo solar se destinará el agua que resulte de la unidad de lavado de envases, tras haber arrastrado en su totalidad los restos orgánicos existentes en los envases. Es aquí donde se llevará a cabo el proceso de Fotocatálisis Solar para la degradación de contaminantes. También se habituaría un espacio de unos 15 m<sup>2</sup> como oficina y otro de unos 25 m<sup>2</sup> para la instalación de un laboratorio. Según van llegando a la Planta los camiones que transporten los envases, se dirigirán a un muelle de descarga, donde se colocará una tolva de recepción y por donde irán entrando los envases al almacén mediante una cinta transportadora. Esta será de aproximadamente 2 x 0,4 m<sup>2</sup>. Se podría estimar un rendimiento de la cinta transportadora de 500 envases/hora.

El proceso de reciclado de estos envases plásticos, debe incluir un primer proceso de trituración y posterior lavado industrial de dicho triturado lo que va a producir agua contaminada, con compuestos altamente tóxicos y persistentes a una concentración de algunos cientos de mg/L de Carbono Orgánico Total. Una vez triturados, los envases pasa-

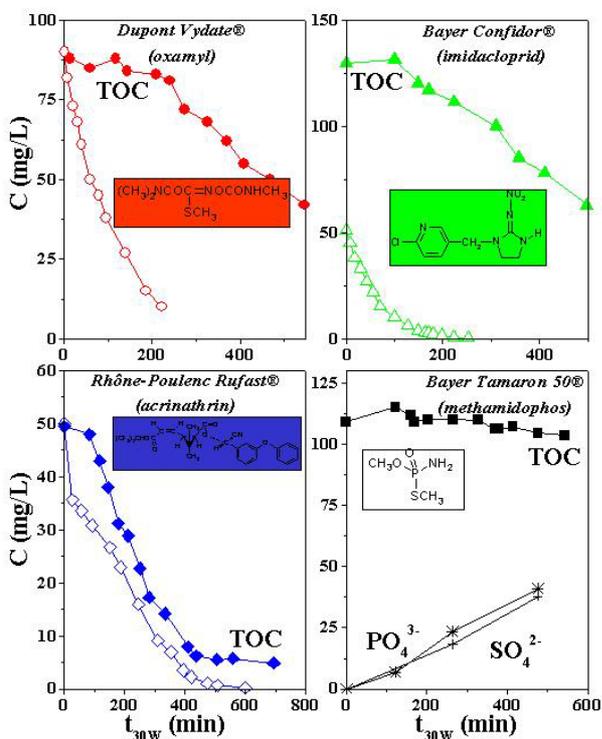


Figura 58 Degradación fotocatalítica de cuatro plaguicidas comerciales de uso habitual en agricultura bajo plástico.

rían a balsas de lavado. Serían tres las balsas, colocadas en serie y tendrían unas dimensiones idénticas. Es de gran importancia el hecho de llevar a cabo bien la selección de envases, ya que lo normal es que se desechen cualquier tipo de envases que un agricultor ya ha dado por gastado, o simplemente no va a volver a utilizar. Concretamente en esta Planta de tratamiento solo se van a gestionar los envases de plástico, luego habrá que detectar si existen, entre los envases que lleguen a la Planta para ser tratados, envases de otros materiales (vidrio, acero, etc.) o simplemente que se trate de envases que aún siendo de plástico no contengan en su interior productos fitosanitarios, sino que sean botellas vacías de detergentes u otros productos que se utilizan en el sector agrícola y no son considerados como productos tóxicos y peligrosos.

Estos envases que no vayan a ser tratados en la Planta habrá que darles un tratamiento específico; esto es, depositarlos según vayan apareciendo en un contenedor designado para este fin, y posteriormente enviarlos a un gestor autorizado. Es aquí donde se procedería a la separación del plástico y del agua de lavado. El agua de lavado saldría de cada una de las balsas, a ras de suelo, e iría a un tanque de almacenamiento. Este agua contendrá en disolución los restos orgánicos que pudiera haber en esos envases de fitosanitarios que han sido tratados, y por tanto se considerará un producto tóxico y peligroso. Como el agua debe ser reciclada y usada de forma continua, los contaminantes deben ser tratados (Figura 59). Antes de entrar en el campo solar, este

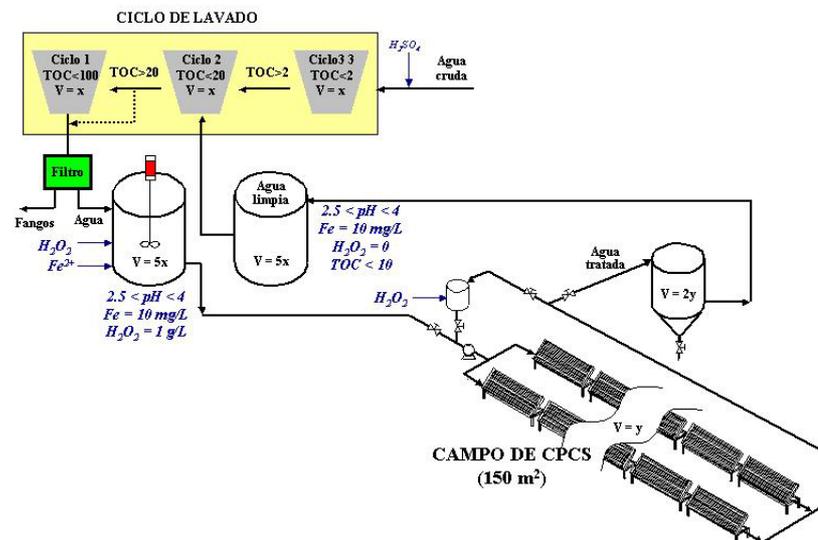


Figura 59 Esquema conceptual de la planta de lavado de envases y tratamiento de agua mediante fotocatalísis.

agua contaminada será tratada física y químicamente. El agua contendrá restos sólidos, los cuales se eliminarán mediante un tamiz de gruesos y después pasará a otro tanque donde se añadirán los reactivos, necesarios para poder llevar a cabo la reacción fotocatalítica. Tras la preparación de la muestra entrará en el campo solar que estaría compuesto por varios fotoreactores colocados en serie, por los que el agua irá avanzando de uno a otro (Figura 60). Cuando el agua sale del campo solar tendrá que comprobarse si en el proceso han disminuido considerablemente las concentraciones de COT existentes en el agua de tratamiento; ya que de no ser así se produciría un retorno de esta agua al campo solar, para que vuelva a sufrir el proceso de detoxificación solar que tiene lugar en los colectores solares. Cuando se considera que la medida de COT es la apropiada, se procede a la reutilización del agua, entrando de nuevo a la unidad de lavado del almacén de tratamiento de envases. Una vez que el agua haya circulado por el proceso unas cuatro o cinco veces, se podrá retirar y verter a una balsa de almacenamiento, para una posterior reutilización, no sin antes hacerla pasar por un filtro de carbón activo que se utilizará para retener, en el caso de que alguna sustancia se resistiera en el proceso solar.



Figura 60 Imagen parcial de la planta durante el montaje del campo de colectores.

### **Tratamiento de Aguas Conteniendo Contaminantes Orgánicos Persistentes Mediante Combinación de Procesos de Oxidación Avanzada y Biológicos**

Desde la primera Directiva Europea en 1975, se ha progresado en la lucha contra las fuentes de contaminación de las aguas europeas. Sin embargo, ha sido necesario revisar y mejorar continuamente la normativa de la CE referente a esta cuestión. Como ejemplo, se puede citar la elaboración (decisión nº 2455/2001/EC del Parlamento Europeo de 20 de noviembre de 2001) de una lista de Sustancias Tóxicas Prioritarias (PHS) en el campo de la política del agua y como mejora a la Directiva Marco del Agua (conocida como WFD) 2000/60/EC. La salud humana está amenazada por altas concentraciones de plaguicidas, metales pesados, hidrocarburos, hidrocarburos clorados, etc., disueltas en agua cuyas fuentes son normalmente aguas industriales de desecho que contienen PHS a concentraciones bajas-medias (<500 mg/L). También en este contexto la Directiva Europea 96/61/EC demanda el desarrollo de tecnologías y prácticas de gestión específicas para sectores industriales con el objeto de minimizar la contaminación y aumentar la reutilización del agua. Debido a la falta de tecnologías de tratamiento disponibles "in situ", una gran cantidad de actividades industriales incluidas en el Anexo I de la Directiva 96/61/EC no tratan adecuadamente esas aguas residuales. Como consecuencia, tecnologías de tratamiento simples y de bajo coste son muy necesarias. Debido a esta razón la Plataforma Solar de Almería solicitó el proyecto CADOX "A coupled advanced oxidation-biological process for recycling of industrial wastewater containing persistent organic contaminants", (<http://www.psa.es/webeng/projects/cadox/index.html>), a la UE (UE-DG Research; Energy, Environment and Sustainable Development; Sustainable Management and Quality of Water) dirigido a desarrollar una adecuada tecnología que pudiera satisfacer esta demanda. Esta propuesta fue favorablemente evaluada y los trabajos comenzaron en Febrero de 2003; siendo coordinador el CIEMAT y contando con distintos participantes europeos (ECOSYSTEM-España, AOSOL-Portugal, Universitat Autònoma de Barcelona-España, INETI-Portugal, TRAILIGAZ-Francia, Janssen Pharmaceutica-Bélgica, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne-Suiza y DSM-Deretil-España). La tecnología CADOX ha sido básicamente enfocada a plaguicidas y disolventes clorados no biodegradables (NBCS), considerados como PHS por la CE. En paralelo, se solicitó y consiguió el Proyecto "Tratamiento combinado Fotocatálisis-Ozonización para la detoxificación de aguas. Diseño de una instalación solar." Conjuntamente con la Universidad Autónoma de Barcelona y financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Convocatoria de Proyectos de

I+D, Orden de 11 de enero de 2002, del Ministerio de Ciencia y Tecnología, Proyecto PPQ2002-04060-C02-02) y que ha comenzado en Diciembre de 2002. Este proyecto pretende complementar y ampliar parte de las tareas incluidas en el Proyecto CADOX.

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) se caracterizan por la generación de radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), especie altamente oxidante, y aunque es ampliamente reconocido el elevado potencial de los POAs para el tratamiento de aguas conteniendo contaminantes persistentes, es también conocido que los costes de operación de éstos para la oxidación completa de compuestos orgánicos tóxicos son elevados, si se comparan con los de los tratamientos biológicos. En todo caso, su uso como etapa de pre-tratamiento para aumentar la biodegradabilidad de esas aguas puede estar justificada si el biotratamiento es capaz de degradar los intermedios resultantes del POA.

En la integración de diferentes tecnologías, que han sido desarrolladas separadamente para tratar este tipo de aguas residuales [Blanco y col., 2003d; Fernández y col., 2003c; Rodríguez y col., 2003], radica la principal innovación del Proyecto CADOX (Figura 61).

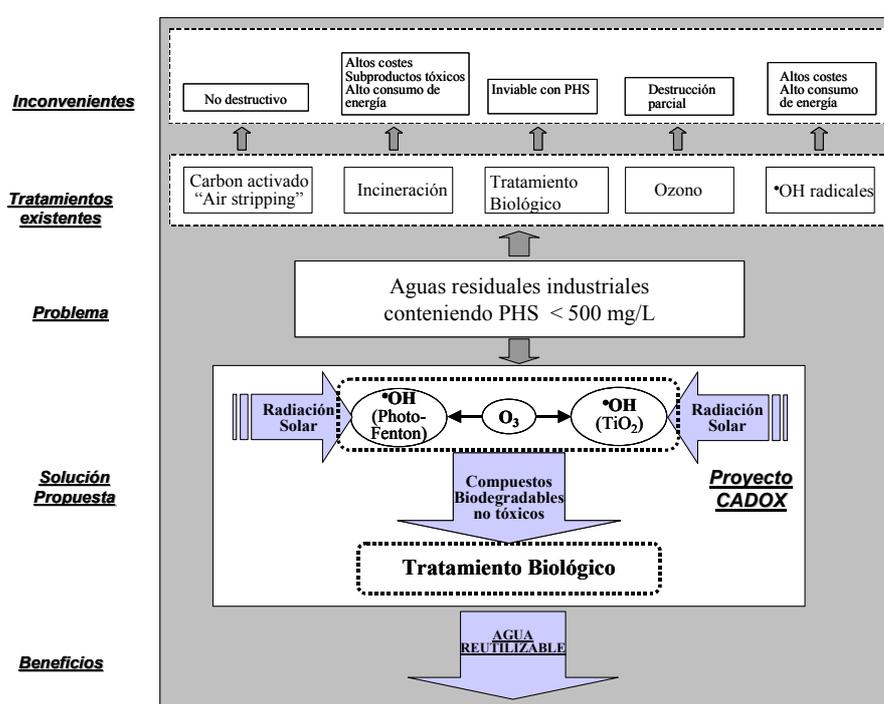


Figura 61 Aspectos innovadores del proyecto CADOX y resumen esquemático de las tecnologías alternativas.

El objetivo del Proyecto CADOX es el desarrollo hasta niveles comerciales de una tecnología basada en los POAs y en los Procesos de Tratamiento Biológico para el tratamiento de aguas residuales industriales contaminadas con compuestos orgánicos persistentes, con el objetivo fundamental de conseguir su reuso. Para el desarrollo de cada uno de los procesos, está previsto el logro de los siguientes objetivos científico-tecnológicos. Los objetivos científicos son:

1. Demostrar que el acoplamiento de los POAs (fotocatálisis mediante  $\text{TiO}_2$ , foto-Fenton y ozono) y el tratamiento biológico es un procedimiento apropiado para la descontaminación de aguas residuales que contengan 7 plaguicidas de solubilidad media-alta considerados como PHS por la UE (Alaclor, Atracina, Clorfenvinfos, Diuron, Isoproturon, Lindano y Pentaclorofenol). El mismo objetivo con disolventes clorados no biodegradables (NBCS) considerados como PHS por la UE (dicloroetano, diclorometano y triclorometano (cloroformo)). Si la UE, en la categoría de PHS, incluye otros plaguicidas de solubilidad media-alta o NBCS, el Proyecto CADOX los incorporará como compuestos objetivo automáticamente.

2. Definición de la mejor combinación de POAs en el acoplamiento para optimizar el tratamiento.
3. Desarrollo de nuevos colectores solares para llevar a cabo procesos fotocatalíticos con  $\text{TiO}_2$  y Foto-Fenton.
4. Construcción y ensayo de 2 pequeños prototipos para combinar las tecnologías anteriormente mencionadas.

Los objetivos tecnológicos están considerados el foco y la principal innovación de este proyecto:

1. La construcción y ensayo de una planta de demostración para el tratamiento de plaguicidas y NBCS basados en los resultados obtenidos en los 2 prototipos.
2. El diseño conceptual y evaluación económica de una planta de tratamiento a escala industrial.
3. Análisis detallado de la aplicabilidad de esta tecnología en fuentes europeas de PHS a baja-media concentración (<500 mg/L).

Este Proyecto pretende demostrar que mediante este procedimiento los costes de tratamiento de aguas conteniendo contaminantes persistentes se pueden reducir drásticamente [Farré y col., 2003; Malato y col., 2003a, 2003f-h; Maldonado y col, 2003a, 2003b].

## 2) PROCESOS DE DETOXIFICACIÓN SOLAR EN FASE GASEOSA

- Se ha concluido con buenas expectativas de posteriores desarrollos el proyecto: Destrucción fotocatalítica de especies precursoras y generadoras de malos olores en instalaciones de saneamiento de aguas residuales (Proyecto MCYT- PROFIT).
- Continúan desarrollándose los proyectos:
- Eliminación de contaminantes orgánicos persistentes en efluentes gaseosos mediante foto-oxidación avanzada (FOTOCOP Proyecto MCYT).
- Desarrollo y evaluación de un sistema de tratamiento fotocatalítico para la desodorización y desinfección del aire interior de edificios (Proyecto CAM).

## DESTRUCCIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS EN AIRE

### Eliminación de $\text{H}_2\text{S}$

El proyecto "Destrucción fotocatalítica de especies precursoras y generadoras de malos olores en instalaciones de saneamiento de aguas residuales" (Proyecto financiado por el MCYT- PROFIT: FIT-140100-2001-158 y 2002-84) finalizó formalmente en diciembre de 2002, con una pequeña prolongación durante el primer trimestre de este año. Este proyecto, desarrollado conjuntamente entre el Departamento de Energías Renovables del CIEMAT, el ICP-CSIC y la empresa Aguas de Murcia S.A., ha demostrado la viabilidad de la fotocatalisis para la destrucción de ácido sulfhídrico.

En la Figura 62 se puede observar como partiendo de una concentración de 27 ppm

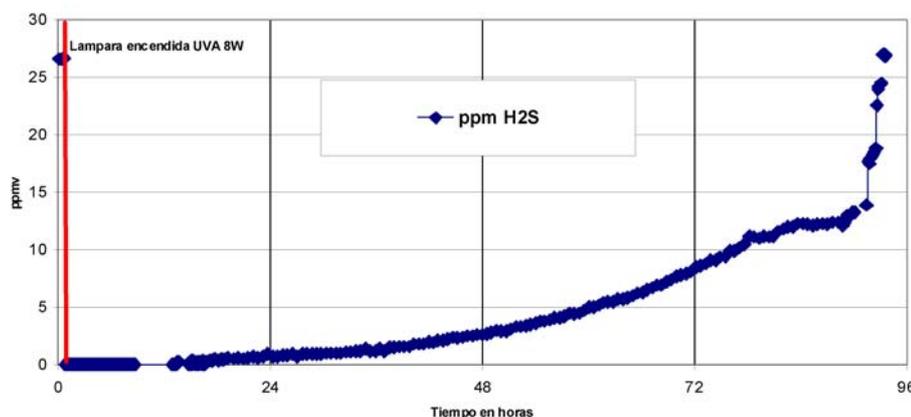


Figura 62 Destrucción de 27 ppm<sub>v</sub> de  $\text{H}_2\text{S}$  y su evolución en el tiempo.

de H<sub>2</sub>S, inmediatamente después de aplicar fotones mediante el encendido de una lámpara de 8W en condiciones controladas de laboratorio, se alcanza la destrucción total del compuesto en la primeras 24 horas. Este nivel de destrucción va disminuyendo progresivamente en relación con el envenenamiento del catalizador debido a la formación de sulfatos en su superficie, que van obstruyendo los centros activos hasta la total desactivación del catalizador en unos días. Este proceso resulta reversible mediante lavados sucesivos con agua destilada lo que permite planteamientos optimistas en el uso de la fotocatalisis para la eliminación de H<sub>2</sub>S en plantas de tratamiento de aguas.

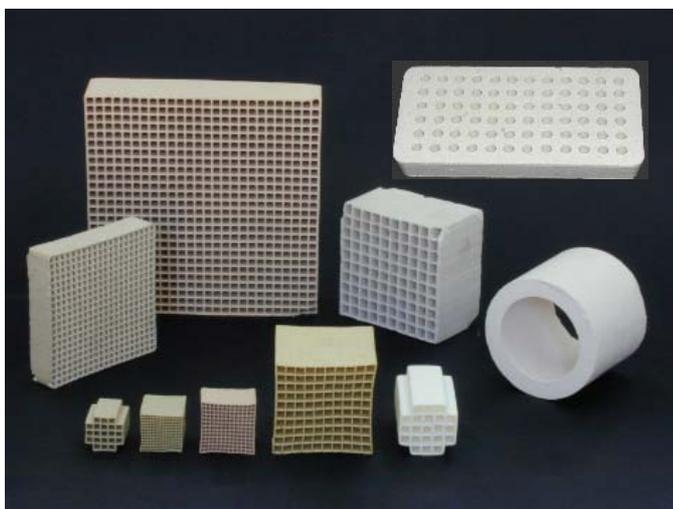
### Tratamiento Fotocatalítico de Dioxinas y Furanos

Durante el año 2003 se ha continuado el proyecto "Eliminación de contaminantes orgánicos persistentes en efluentes gaseosos mediante foto-oxidación avanzada" (FOTOCOP), financiado por el Ministerio Español de Ciencia y Tecnología.

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo, construcción y ensayo en condiciones de planta piloto de un primer prototipo de reactor fotocatalítico, que por si solo o asociado a un sistema de adsorción convencional, pueda permitir la destrucción de los compuestos orgánicos persistentes (COPs) existentes en los gases de salida de sistemas de incineración de residuos como son dioxinas y furanos.

Para alcanzar este objetivo, se han preparado y caracterizado distintos catalizadores monolitos y soportes impregnados con dióxido de titanio por diferentes técnicas – impregnación, solgel, spray , determinándose a escala de laboratorio la actividad de los diferentes soportes.

De los resultados obtenidos, los catalizadores másicos han presentado las mejores eficiencias. Con respecto a las otras técnicas, los catalizadores másicos contienen una gran cantidad de TiO<sub>2</sub> incorporado. Sin embargo, gran parte de este TiO<sub>2</sub> no resulta fotoactivo al encontrarse oculto a la luz en la masa del soporte. Cabe destacar de igual manera la mayor área superficial BET y porosidad que dichos monolitos presentan en relación con los catalizadores impregnados o tratados por solgel. Este fenómeno es consecuencia de



Catalizadores	Métodos de preparación	TiO <sub>2</sub> (wt%)	BET Area superficial (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	Volumen de poro (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )
Soporte	Extrusión	0	88	0.74
"Masico"	Extrusión	44.5	98	0.70
"Impregnado"	Washcoated	2.3	84	0.62
"Sol-Gel"	Sol gel - dip coating	4.5	82	0.61

Figura 63 Soportes de catalizadores conformados como monolitos, placas y láminas cerámicas para su ensayo fotocatalítico preparados por el ICP-CSIC

la interpenetración de las partículas de TiO<sub>2</sub> entre las fibras de silicato magnésico en la fase de preparación másica. Por el contrario, en los monolitos impregnados o tratados por solgel (dip coating) el área superficial es menor debido al taponamiento de poros por las partículas de TiO<sub>2</sub> depositadas en la superficie del soporte. Ver tabla en Figura 63.

La mayor actividad del monolito tratado por solgel en comparación con el impregnado puede ser una consecuencia tanto de la mayor cantidad como del más pequeño tamaño de particular de TiO<sub>2</sub> presentes en estos fotocatalizadores.

Otra tarea que se ha puesto a punto en este tiempo ha sido el desarrollo de la metodología para la toma de muestra y análisis de dioxinas y furanos antes y después del tratamiento fotocatalítico. Para ello, se ha diseñado y desarrollado el sistema de captación. Se ha optimizado el sistema de extracción y purificación de muestras. Se ha optimizado el sistema de detección, así como la cuantificación mediante dilución isotópica.

A partir de un primer prototipo de fotorreactor de bajo coste, se espera realizar en el próximo año en condiciones de radiación solar real, ensayos sobre planta piloto con emisiones controladas.

## DESODORIZACIÓN Y DESINFECCIÓN DE AIRE INTERIOR

En el proyecto "Desarrollo y evaluación de un sistema de tratamiento fotocatalítico para la desodorización y desinfección de aire interior de edificios" financiado por el Gobierno Regional de la Comunidad de Madrid (CAM), se ha continuado evaluando las concentraciones de COVs existentes en ambientes hospitalarios así como la carga microbiana: saprofitos o patógenos. Ver Figura 64.

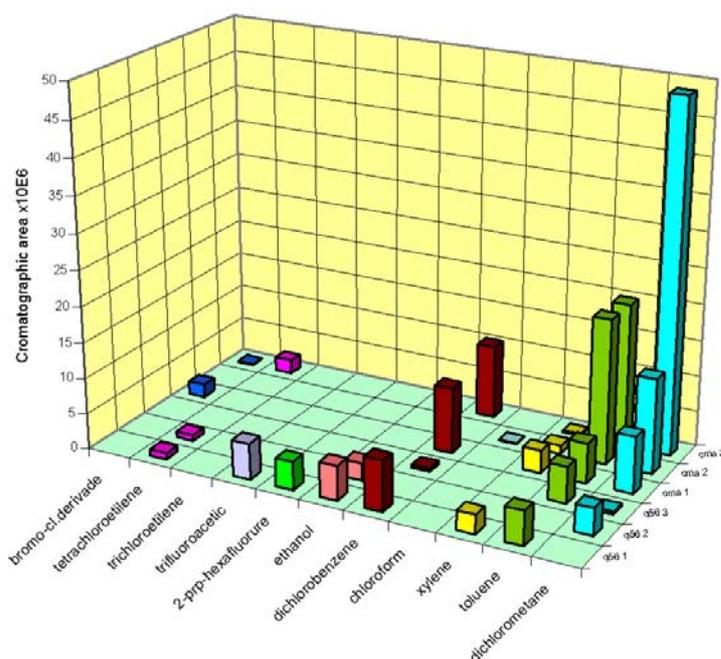


Figura 64 VOCs detectados en diferentes ambientes hospitalarios.

Al igual que en el proyecto anterior, se ha prestado especial atención a la eficiencia que presentan distintos soportes y catalizadores –másicos, solgel e impregnación en el tratamiento de VOCs. Se ha desarrollado y ensayado un reactor modular utilizando mezclas de dos componentes. En ellas, los catalizadores másicos han resultado más eficientes por las causas justificadas más arriba. Ver Figura 65 Una importante tarea será comprobar su eficiencia en el tratamiento de colonias cuyos resultados puedan ser extrapolados a colonias de patógenos.

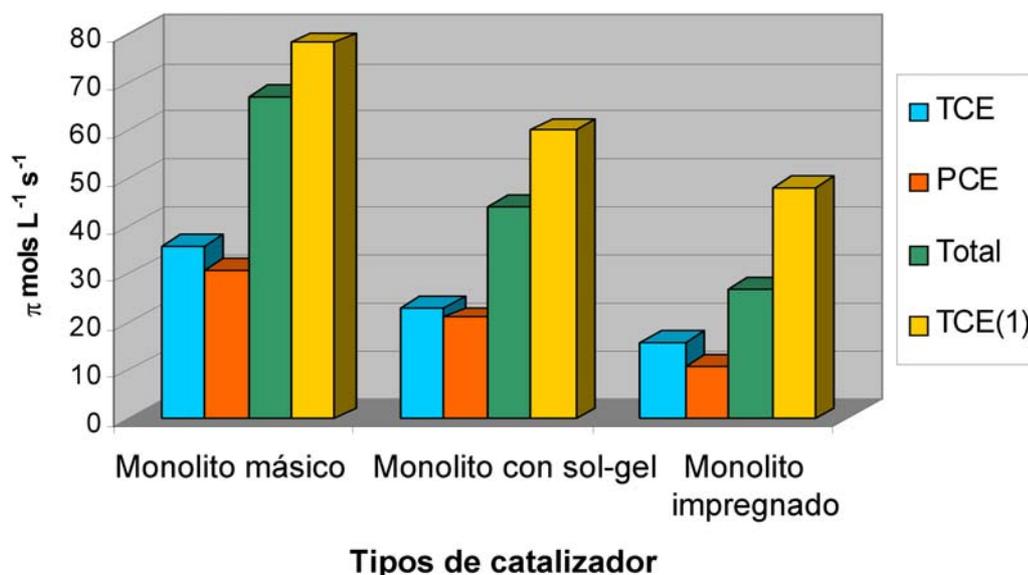


Figura 65 Respuesta de fotodegradación en mezcla de dos compuestos.

### 3) PROCESOS DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA POTABLE

La desinfección de agua es un proceso decisivo para el desarrollo de la población. Es importante destacar que la carencia de agua potable en una gran cantidad de países es uno de los problemas más importantes del planeta. Esta realidad es la causa de propagación de enfermedades a través del agua en muchas regiones del planeta, que suelen coincidir con las de menor desarrollo social y económico. Esto da lugar a un problema sanitario que debe solucionarse con tecnologías eficaces y económicamente viables. Los métodos que tradicionalmente se han empleado para la desinfección de agua son la floculación química, la filtración en medio granular y la cloración. Los basados en la filtración con membrana son muy caros, lo cual impide su uso generalizado para tratar grandes cantidades de agua. La desinfección con métodos basados en la adición de cloro (cloración) es la más utilizada. Para ello se emplea cloro en forma gaseosa o disuelto en forma de hipoclorito, que actúa eficazmente contra virus y bacterias. Sin embargo, estos métodos generan subproductos altamente tóxicos, como son los trihalometanos y otros compuestos cancerígenos. Además, trazas de otros halógenos presentes en los aditivos de cloro pueden formar subproductos también tóxicos y los residuos de cloro presentes en las aguas tratadas entrañan un problema adicional de estos métodos. Inconvenientes añadidos a éstos son los riesgos que conllevan la producción, el almacenamiento y transporte así como el manejo del cloro para los operarios de las plantas de tratamiento y para el medioambiente. Por ello, desde hace unos 20 años hasta la actualidad, se han venido desarrollando nuevas tecnologías de desinfección, entre las que cabe destacar la radiación UV (254 nm) y la ozonización.

Desde principios del siglo XX se conoce el poder bactericida de la radiación ultravioleta (UV, longitud de onda de 254 nm). Pero sólo recientemente se ha empezado a utilizar como herramienta eficaz en la desinfección, evitando la generación de subproductos de desinfección dañinos. Sin embargo, su carencia de poder oxidante y la imposibilidad de funcionar con luz natural, encarecen este proceso de desinfección. Además, los problemas de operación junto con su elevado coste de operación y mantenimiento frente a la desinfección con cloro, hacen que este tipo de tratamiento no tenga un crecimiento notable dentro de los métodos de potabilización de aguas. Por otro lado, el tratamiento con ozono resulta muy interesante por su alta capacidad de oxidación. En la actualidad, el Reino Unido ha adoptado esta tecnología para desinfectar agua potable a pesar del elevado coste de producción del ozono, y se está implantando en cada vez más en los países desarrollados dado que presenta mejor eficiencia que el uso de radiación UV. Sin embargo, el ozono tiende a fugarse del agua y no puede almacenarse, por lo que las plan-

tas de tratamiento por ozonización son potencialmente peligrosas. El ozono, además, puede generar iones bromato (tóxicos) en aguas ricas en bromuro. Esto unido a su selectividad oxidativa, complican su uso como tecnología de tratamiento de agua.

En el ámbito de los procesos de oxidación avanzada, se encuentra la fotocatalisis en fase heterogénea mediante el uso de un catalizador ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ , etc.) que, bajo el efecto de una radiación suficientemente energética y en presencia de agua es capaz de generar radicales hidroxilo. Este tipo de procesos se conocen y se han investigado desde 1976. Su aplicabilidad al tratamiento de aguas que contienen agentes contaminantes en disolución ha sido probada para una gran cantidad de tipos de sustancias orgánicas: fenoles, compuestos halogenados, pesticidas, colorantes, etc., así como para microorganismos. Por ello, la utilización de este tipo de fotocatalizador es objeto de investigación en el campo de la desinfección. Normalmente, dentro de la desinfección de agua potable, es un hecho la presencia simultánea de microorganismos y de compuestos orgánicos en el medio, lo cual hace que la fotocatalisis sea más efectiva debido a la formación de radicales de estos compuestos que también tienen poder bactericida [Blanco, 2003b, 2003c; Fernández 2003a, 2003b; McLoughlin y col 2003a, 2003b].

El problema de carencia de agua y el progresivo aumento de la demanda de la misma, hacen cada vez más importante el desarrollo de tecnologías que sean eficientes y respetuosas con el medio ambiente. Por ello, es necesario desarrollar métodos competitivos que constituyan una alternativa clara a los ya existentes. Por esta razón, en la PSA trabaja desde noviembre de 2002 en el proyecto llamado "Cost effective solar photocatalytic technology to water decontamination and disinfection in rural areas of developing countries" (SOLWATER)", contrato nº: ICA4-CT-2002-10001, concedido por la UE (EU-DG Research, Confirming the International Role of Community Research for Development). En este proyecto el Grupo de Química Solar de la PSA es coordinador y cuenta con participantes europeos (ECOSYSTEM-España, AOSOL-Portugal, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID-España, NATIONAL TECHNICAL UNIV. OF ATHENS-Grecia, ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE-Suiza) y suramericanos (INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA, COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA-Argentina, UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA-Perú, TINEP-México). Adicionalmente, y vinculado conceptualmente al proyecto SOLWATER, el grupo de Química Solar participa en otro proyecto europeo, denominado "Detoxification of waters for their recycling and potabilisation by solar photocatalysis in semi-arid countries" (AQUACAT, ICA3-CT2002-10016) coordinado por la Universidad de Lyon-1.

El objetivo principal de ambos proyectos es común, que consiste en el desarrollo de un sistema solar autónomo para la desinfección y degradación de razas de contaminantes orgánicos de agua potable en localizaciones remotas sin utilizar aditivos químicos. El sistema final realizará el tratamiento de agua basado en procesos fotocatalíticos activados mediante energía solar. Finalmente se obtendrán dos prototipos de reactor. Uno basado en la generación de radicales hidroxilo mediante  $\text{TiO}_2$  inmovilizado sobre una matriz inerte. El otro está fundamentado en la producción de oxígeno singlete a partir de un fotosensibilizador fijado sobre una matriz polimérica. Los prototipos obtenidos en el marco del proyecto SOLWATER son de aplicación en áreas aisladas de países de Sudamérica, de tres localizaciones muy diferentes: Argentina, Perú y México. Y los del AQUACAT serán finalmente probados en comunidades de países de la cuenca mediterránea como Egipto, Marruecos, Grecia y Túnez.

Para lograr dicho objetivo, el grupo de Química Solar ha demostrado la degradación fotocatalítica mediante  $\text{TiO}_2$  soportado sobre papel de Ahlstrom® [Guillard y col, 2003<sup>a</sup>, 2003<sup>b</sup>] de un contaminante orgánico modelo, el ácido gálico (Figura 66, izq.), y la inactivación por fotocatalisis de la bacteria E. Coli (Figura 66, der.) haciendo uso de los reactores solares (CPC) existentes en las instalaciones de Química Solar.

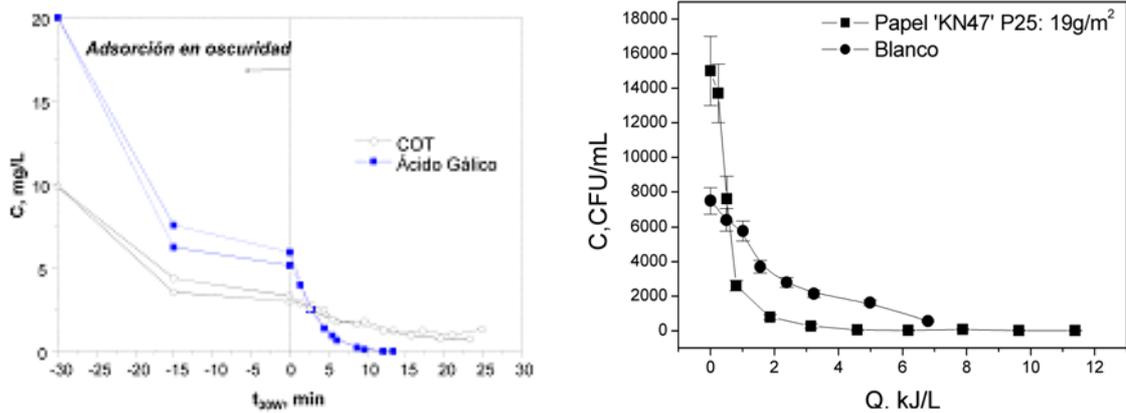


Figura 66 Izqda: Degradación fotocatalítica de ácido gálico con  $\text{TiO}_2$  depositado sobre papel de Ahlstrom tipo NW-10 ( $C_0= 20 \text{ mg/L}$ ). Dcha: Desactivación de E. Coli con  $\text{TiO}_2$  depositado sobre papel de Ahlstrom tipo KN-47 ( $C_0= 10^4 \text{ CFU/mL}$ ). Ambos realizados en un reactor solar basado en el colector tipo CPC.

Adicionalmente, y para obtener los prototipos de desinfección, se ha desarrollado el diseño del primer prototipo de reactor basado en la fotocatalisis mediante  $\text{TiO}_2$  soportado (Figura 67, izda.). Dicho reactor permite disponer los fotocatalizadores de dos formas diferentes, una es la concéntrica con el propio tubo de vidrio del reactor (Figura 67, dcha.) y otra es una lámina plana y fina dispuesta verticalmente dentro del tubo del reactor. Estos reactores serán construidos y evaluados a lo largo de la fase experimental del proyecto que tiene lugar en el año 2004.

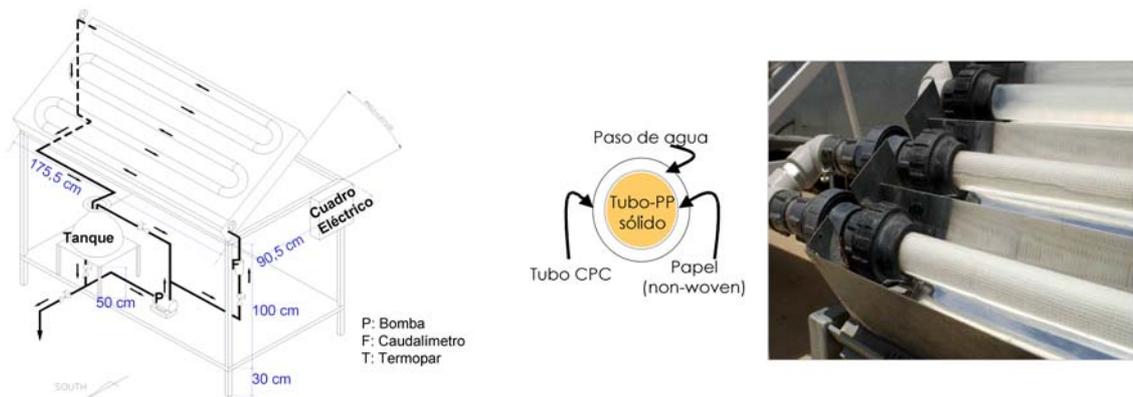


Figura 67 Foto-reactor de desinfección mediante fotocatalisis solar (Izquierda). Disposición concéntrica de papel de Ahlstrom con  $\text{TiO}_2$  (derecha)

#### 4) PROCESOS DE DESALINIZACIÓN SOLAR DE AGUA DE MAR

En la actualidad, dentro del Área de Química Solar de la PSA, se están desarrollando dos proyectos de investigación en el campo de la desalación de agua de mar con energía solar, uno de ámbito europeo (Proyecto AQUASOL: Enhanced Zero Discharge Seawater Desalination using Hybrid Solar Technology) y otro de ámbito nacional (Proyecto SOLARDESAL: Tecnología Híbrida de Desalinización Avanzada Solar-Gas basada en Colectores Solares Estáticos).

Las entidades participantes en el proyecto SOLARDESAL son: CIEMAT (coordinador), Universidad de la Laguna, INABENSA y ECOSYSTEM. La duración de este proyecto es de tres años, situándose su inicio en noviembre de 2001.

Las entidades integrantes del Proyecto AQUASOL son: CIEMAT (coordinador), INABENSA (España), Ao Sol Energias Renováveis (Portugal), INETI (Portugal), National Tech-

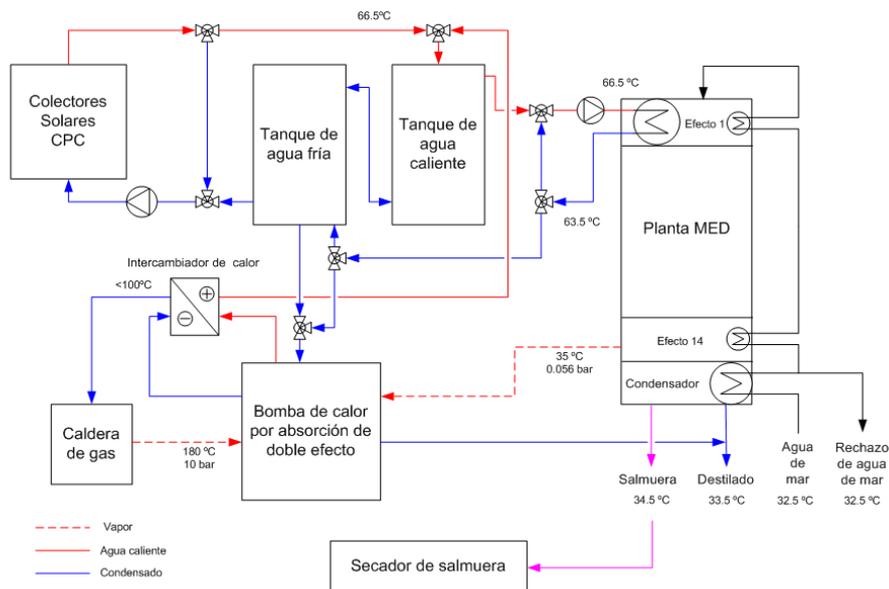
nical University of Athens (Grecia) Cajamar (España), Hellenic Saltworks (Grecia), Comunidad de Regantes Las Cuatro Vegas de Almería (España) y Weir-Entropie (Francia). La duración de este proyecto es de cuatro años, dividiéndose en dos fases: una primera fase de investigación, con una duración de dos años y medio; y una segunda fase de demostración, con una duración de un año y medio. El comienzo formal del proyecto ha sido en marzo de 2002.

El objetivo común de ambos proyectos es el desarrollo de una tecnología híbrida solar/gas de desalación de agua de mar basada en el proceso de destilación multi-efecto (MED) que cumpla al mismo tiempo los principios de eficiencia energética, bajo coste y vertido nulo.

En particular, el Proyecto AQUASOL está enfocado en el desarrollo tecnológico de tres aspectos fundamentales:

1. Incorporación de una fuente de suministro energético híbrido solar/gas basada en colectores solares parabólicos compuestos (CPC) de alta eficiencia y bajo coste.
2. Desarrollo de una bomba de calor de absorción de doble efecto (LiBr/H<sub>2</sub>O) optimizada para su acoplamiento al proceso MED que permita reducir a la mitad el consumo energético necesario.
3. Reducción a cero de cualquier tipo de vertido del proceso de destilación mediante la recuperación de la sal procedente de la salmuera.

La Figura 68 muestra la configuración escogida para la interconexión de los diferentes subsistemas que constituyen el sistema de desalación a implementar dentro del Proyecto AQUASOL. Durante el año 2003 se ha finalizado el diseño de dichos subsistemas (bomba de calor por absorción de doble efecto, campo de colectores solares de tipo CPC, tanques de almacenamiento térmico, caldera de gas y secador solar).



**Figura 68 Configuración final del sistema de desalación a implementar dentro del Proyecto AQUASOL**

El primer efecto de la planta MED será alimentado directamente con agua caliente a 66,5°C procedente del tanque de almacenamiento, el cual es a su vez alimentado o bien por el campo de colectores solares, o bien por la bomba de calor de absorción de doble efecto. La operación a esos niveles de temperatura presenta dos claras ventajas: en primer lugar se reduce considerablemente el peligro de formación de incrustaciones en los intercambiadores de calor de la planta de destilación, reduciendo el consumo de aditivos químicos; en segundo lugar, la eficiencia energética de los colectores solares estáticos aumenta cuanto menor es la diferencia entre la temperatura del fluido y la tem-

peratura ambiente. La conexión en serie de dos tanques de almacenamiento permite mejorar la controlabilidad del sistema, así como la diferencia de temperatura necesaria para una operación eficiente de la bomba de calor.

Debido a la limitación en la temperatura máxima que puede obtenerse con colectores solares CPC estándar, la única posibilidad de funcionamiento de la bomba de calor de doble efecto es utilizando vapor a alta presión (180°C, 10 bar) procedente de la caldera de gas. Por lo tanto, el factor de rendimiento de la planta (kg destilado producido / 2300 kJ energía aportada al proceso) oscilará entre un valor de 10 (modo sólo-solar) y un valor de 20 (modo sólo-gas). Está prevista dentro del proyecto la investigación de modos de funcionamiento híbrido en los que la bomba de calor pueda funcionar a carga parcial (20%-100%) en combinación con un aporte complementario del campo solar [Alarcón y col., 2003] [Blanco y col., 2003e].

El campo solar estará constituido por 252 colectores solares estáticos (CPC Ao Sol 1.12x) con una superficie total de 500 m<sup>2</sup> aproximadamente. Los colectores se dispondrán en cuatro filas de 63 colectores. En cada una de estas filas se tendrán grupos de tres colectores conectados en paralelo, y estos a su vez conectados en serie con otro grupo de tres colectores. Estas agrupaciones de seis colectores se conectarán finalmente en paralelo a la conducción general de cada fila. La inclinación de colector será 35° y la orientación sur.

El secador solar avanzado tendrá como objetivo el aumentar la concentración de la salmuera hasta alcanzar el punto de saturación del carbonato cálcico (16°Be, escala Baumé). Dicho secador consistirá en seis canales de evaporación con una sección de precalentamiento de aire a la entrada, los cuales convergen hacia una chimenea solar situada en el centro que tiene como objeto promover la evacuación del aire en los canales por convección. Con el fin de poder llevar a cabo una primera evaluación del comportamiento de los materiales a utilizar en la construcción del prototipo final, se han implementado en las instalaciones de INETI y de la National Technical University of Athens (NTUA) dos pequeños prototipos dotados de un único canal (Ver Figura 69).



Imagen por cortesía de INETI



Imagen por cortesía NTUA

Figura 69 Diseño de secador avanzado (izquierda) y prototipo de un solo canal (derecha)

## **5) ACCESO A LA PSA COMO GRAN INSTALACIÓN EUROPEA.** **ACTIVIDADES RELACIONADAS CON QUÍMICA SOLAR**

El Proyecto de la Unión Europea "Trans-national Access to Plataforma Solar de Almería: the European Solar Thermal Test Centre" del Programa IMPROVING HUMAN POTENTIAL se inició el 1 de Febrero de 2000 y se ha extendido hasta finales de 2003. Este proyecto consiste en poner a disposición, de diferentes grupos de investigación europeos, la Plataforma Solar de Almería para la realización de ensayos relacionados con la Energía Solar, con el asesoramiento y colaboración del personal científico de la PSA. En este proyecto la fotoquímica solar es una de las áreas más exitosa, con elevada producción científica [Gernjak y col, 2003a-e; Kositzki y col, 2003a-c; Mailhot y col., 2003; Malato y col.,

2003e]habiéndose ampliado en 2003 la actividad al incorporarse las actividades en desalación de agua de mar y que ha permitido al grupo de Química Solar el convertirse en un referente en Europa. De hecho, durante el año 2003 se ha recibido a 15 grupos distribuidos en 9 periodos de ensayos (4 en Detox, 2 en Solfin y 3 en Desalación), actividad muy similar a la que se produjo durante el año 2001. Los ensayos realizados durante el año 2003 en detoxificación fotocatalítica, encaminados fundamentalmente a la descontaminación de aguas, fueron:

- University of Calabria / University of Palermo (Italia). Tratamiento fotocatalítico de efluentes conteniendo antibióticos y separación del catalizador con membranas. En hospitales y en quirófanos una gran variedad de sustancias se utiliza para diagnosis y desinfección. Después de su uso, muchas de ellas se vierten con las aguas residuales. De la misma forma, se vierten también estos compuestos durante su uso en veterinaria, ganadería y acuicultura. Un compuesto muy típico es la tetraciclina y sobre él se han realiza multitud de ensayos con el objetivo de degradarlo mediante fotocatalisis con  $TiO_2$ . Además, se ha ensayado el acoplamiento de este tratamiento con un proceso de separación del catalizador basado en membranas (Figura 70).

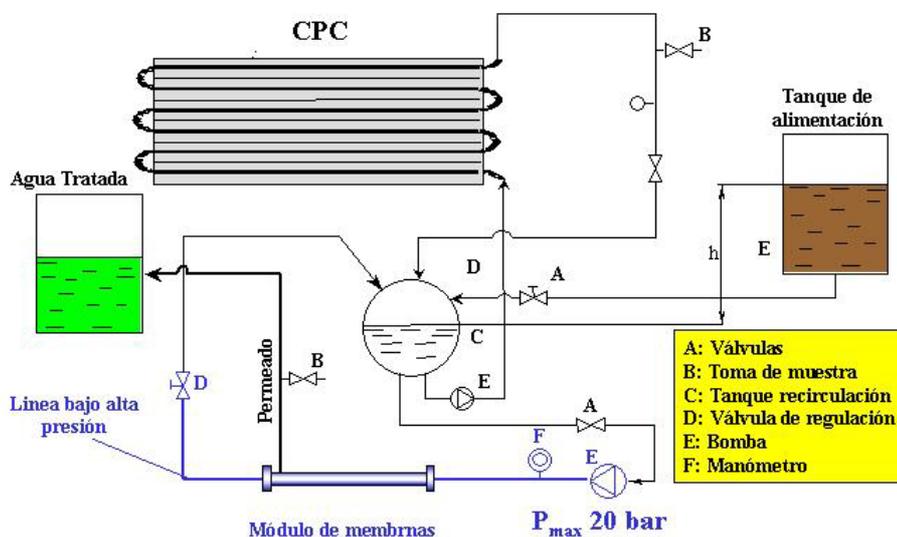


Figura 70 Esquema conceptual de sistema de membrana acoplado a fotoreactor CPC

- J. Heyrovský Institut of Physical Chemistry, Academy of Sciences of the Czech Republic (Czech Republic)/ Laboratoire de Photochimie Moléculaire et Macromoléculaire, UMR CNRS Université Blaise Pascal n°6505 (France). *Estudio de eficiencia de fotocatalizador formado por Fe(III) y Q-TiO<sub>2</sub>*. Utilización de acu-complejos de Fe(III) combinados con  $TiO_2$  (anatasa nanocristalina) para la eliminación de monuron (plaguicida). Se ha observado una sinergia clara entre ambos sistemas fotocatalíticos durante los ensayos realizados en la planta piloto de CPCs de la PSA, compara con la utilización aislada de Fe(III),  $TiO_2$  (P-25) y Q- $TiO_2$ .
- UMR 6503 CNRS "Catalysis and Organic Chemistry", University of Poitiers (France)/ Environmental Biotechnology Laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (Suiza). *Degradación de compuestos modelo mediante Photo-Fenton en catalizadores soportados de Fe/C y Fe/Nafion/C*. Catalizadores de Fe soportados en carbono o embebidos en finas laminas de Nafion adheridas también a carbono han sido ensayados para degradar Naranja II (colorante) y ácido gálico. Los resultados se han comparado con los obtenidos mediante foto-Fenton en disolución homogénea. Esto puede suponer una gran ventaja para el proceso de foto-Fenton ya que no es necesario reducir el pH del agua al estar el Fe soportado, ya que éste es activo a pH neutro.

- Pharmaceutical Chemistry & Medical Physics Department of The Royal College of Surgeons/ Civil, Structural & Environmental Engineering Department of The University of Dublin (Ireland). *Desinfección fotocatalítica a pequeña escala de agua conteniendo agentes patógenos y su posible aplicación en países en vías de desarrollo*. Comparación del proceso SODIS (Solar Disinfection) y la Fotocatálisis Solar para la degradación de 2-propanol y malation (plaguicida), así como la inactivación de *E. Coli*. Se han ensayado la eficiencia de botellas de vidrio borosilicatado y PET rellenas con plástico flexible con TiO<sub>2</sub> adherido y se ha demostrado que son un 20%-25% más efectivas que el proceso SODIS para la inactivación de *E. Coli*. Esta técnica puede ser de gran interés para su aplicación en el Tercer Mundo [Duffy y col., 2003; McLoughlin O.A. y col, 2003c]. Además se ha probado la eficiencia de diferentes colectores CPC para la misma aplicación. 1x10<sup>6</sup>CFU/ml de *E. Coli* (K-12) se han desactivado en 60 minutos (Figura 71).

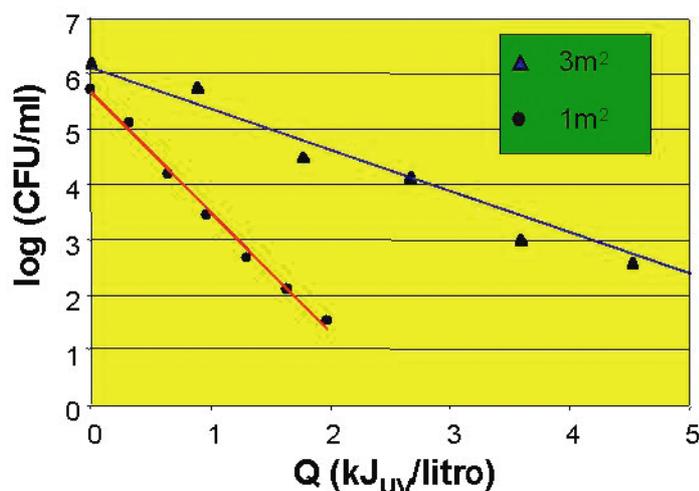


Figura 71 Inactivación de *E.coli* (log(CFU/ml)) en función de la UV solar acumulada en CPCs con 1 y 3 m<sup>2</sup> de superficie captadora..

Los ensayos realizados durante el año 2003 en la instalación SOLFIN, encaminados básicamente a la síntesis de compuestos usando como fuente de radiación la luz solar, fueron los siguientes:

- Faculty of Chemistry, Nicolaus Copernicus University, Torun, Polonia. *Influencia de la radiación UV sobre biomateriales derivados del colágeno*. Se examinó la influencia de la radiación UV sobre las propiedades de nuevos materiales derivados de polímeros sintéticos y naturales. Para ello, dichos materiales se expusieron tanto a la irradiación solar como a radiaciones procedentes de fuentes de luz artificial comparándose ambos resultados mediante espectroscopia UV-VIS y FTIR. Se demostró cómo la radiación solar UV causa cambios en la conformación de la molécula de colágeno (principal componente de la piel) así como en polímeros materiales derivados del mismo (Figura 72).

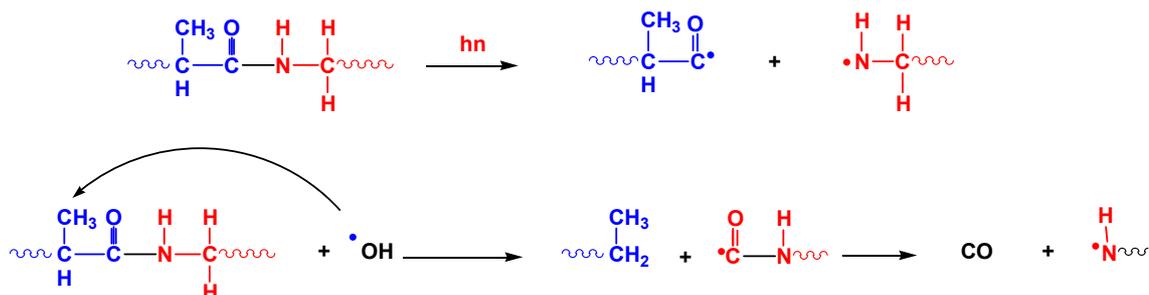


Figura 72 Posibles mecanismos de transformación del colágeno inducida por la radiación Solar.

- Dipartimento di Chimica dell'Università di Ferrara / ICCOM CNR, Florencia, Italia. *Activación Fotoquímica de hidruros de metales de transición.* Se realizaron diversos ensayos con el fin de comprobar si diversos compuestos organometálicos tales como [(triphos)RuH<sub>2</sub>(L)] (L = CO, RCN, PR<sub>3</sub>, AsR<sub>3</sub>, etc) sometidos a radiación solar eran susceptibles de sufrir la fotoeliminación de la molécula de H<sub>2</sub> dando lugar a fragmentos que podrían reaccionar con diversas sustancias orgánicas. También se estudió la influencia de la radiación solar sobre la reactividad de complejos alenilidénicos de Re, tales como [Re{C=C=CPh<sub>2</sub>}CO<sub>2</sub>(triphos)]Otf.

También durante el año 2003 se han llevado a cabo actividades en desalación dentro del programa europeo "Mejora del Potencial Humano de Investigación" (IHP).

- Dpto. de Mecánica y Aeronáutica de la Universidad de Roma "La Sapienza" (Italia). Realización de ensayos sobre el prototipo de colector solar Ao Sol CPC 1.5x con objeto de poder obtener un modelo de simulación de este colector en TRNSYS;
- Dpto. de Suministro Energético de la Universidad de Rousse/SIKA, empresa privada (Bulgaria). Instalación y evaluación de un prototipo de colector cuya principal novedad es la incorporación de un líquido absorbedor desarrollado conjuntamente por dicha universidad y la empresa búlgara;
- Dpto. de Ingeniería Metalúrgica y Minera de la Universidad Técnica Nacional de Atenas (Grecia). Estudio de la operación de la planta de destilación multi-efecto instalada en la PSA e implementó un código en Visual Basic para simular su comportamiento en estado estacionario.

## 6) OTROS PROCESOS MEDIOAMBIENTALES DE QUÍMICA SOLAR

### **Funcionalización Selectiva Catalizada de Acetilenos Terminales mediante Compuestos de Coordinación en Medio Acuoso.**

La catálisis en medio homogéneo posee una serie de desventajas que podrían ser solventadas si dicha catálisis homogénea se realizara en dos fases (acuosa/orgánica). De este modo, el hecho de que el catalizador esté disuelto en agua y los productos de la reacción disueltos en la fase orgánica o insolubles en agua hace que sean fácil de separar y que se pueda recuperar fácilmente el catalizador para su posterior utilización.

Para poder desarrollar y estudiar esta idea se solicitó un proyecto al Ministerio Español de Ciencia y Tecnología (P2000-1301) el cual fue concedido y comenzó en diciembre de 2000. Los grupos participantes en dicho proyecto son la Plataforma Solar de Almería, la Universidad de Almería (coordinador), DLR-PSA y el Departamento de Química Orgánica de la Universidad de La Laguna.

Uno de los objetivos de este proyecto es la síntesis y caracterización de nuevos ligandos solubles en agua, así como de nuevos complejos alenilideno y carbeno de rutenio solubles en agua que actúen como catalizadores óptimos en sistemas de dos fases. Otro objetivo propuesto fue el uso de la radiación solar como fuente de energía en reacciones sintéticas [Mañas, 2003; Richter y col., 2003; Saoud y col., 2003]. Para ello se desarrollaron nuevos fotorreactores solares para poder llevar a cabo dichas reacciones sintéticas y donde todos los parámetros (temperatura, radiación, etc) estuviesen controlados de modo que el sistema fuese selectivo, económico y ecológico.

Un ejemplo de los procesos llevados a cabo ha sido la transesterificación catalizada mediante complejos de coordinación de Ru(II) de vinil éteres sustituidos solubles en agua para formar compuestos orgánicos, acetales y aldehídos (Figura 73). También se desarrolló un sistema que permite la síntesis fotoquímica de diversos compuestos inorgánicos, tales como los derivados de ácido fosfórico, usando como fuente de energía la radiación solar. Por último se ha estudiado como influye la radiación UV-Vis procedente de la luz solar en la síntesis de compuestos organometálicos que contienen ligandos tiopurinas, tales como [RuH(PPh<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(8-MTT-κ<sup>2</sup>N7O6)], cis-[Ru(PPh<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(8-MTT-κ<sup>2</sup>N7O6)<sub>2</sub>], etc.

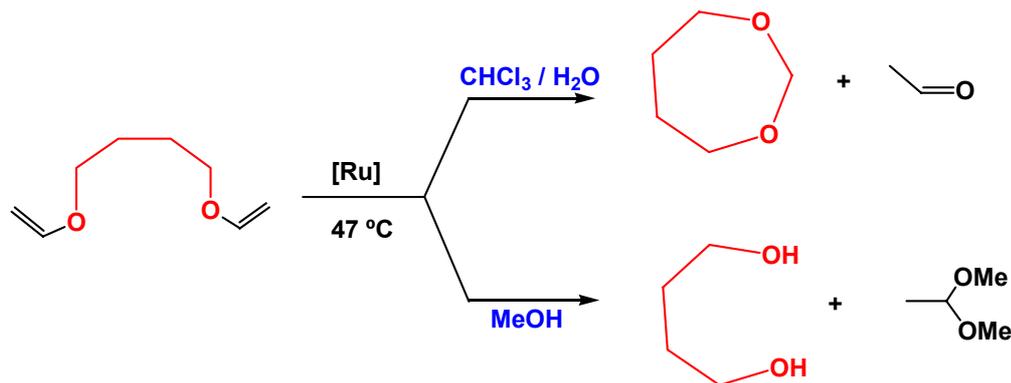


Figura 73 Transformación catalítica selectiva de 1,4-vinil éter-butenediol en medio monofásico ( MeOH) y bifásico (CHCl<sub>3</sub>/ H<sub>2</sub>O) bajo condiciones suaves.

## Procesos de Almacenamiento de la Energía Solar con Impacto Medioambiental

En los últimos años se han realizado diversos esfuerzos a nivel internacional dirigidos al almacenamiento de la energía solar mediante procesos foto-asistidos. Por ejemplo, la creciente preocupación medioambiental relativa a las emisiones de CO<sub>2</sub> antropogénico que están originando el efecto invernadero han estimulado una investigación sistemática dirigida a la reducción de CO<sub>2</sub> para producir combustibles. En este sentido, la aplicación de la tecnología fotocatalítica para promover selectivamente la reducción de CO<sub>2</sub> representa una vía muy interesante para el desarrollo de sistemas sostenibles de producción de compuestos químicos orgánicos, combustibles y materiales. Estos procesos evitarían el uso de combustibles fósiles convencionales y, como consecuencia, la adición de más CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Los primeros resultados obtenidos con materiales disponibles comercialmente, tales como TiO<sub>2</sub> P-25 o preparados en el laboratorio mediante dopado de este material con óxidos metálicos han dado lugar a resultados muy esperanzadores.

Se ha demostrado que la modificación del catalizador mediante el dopado con óxido de rutenio da lugar a una mejora importante de la eficiencia neta de conversión de la energía solar en energía almacenable químicamente. Los productos formados serían CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>-CO-CH<sub>3</sub> y CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>OH, principalmente (Figura 74). Puesto que estos productos podrían utilizarse como combustibles, la reducción de CO<sub>2</sub> utilizando este tipo de procesos convierte esta vía como una de las más interesantes para la conversión de la energía solar. Se han logrado rendimientos de conversión de energía solar en energía química próximos al 5%, valor bastante aceptable si se considera que la eficiencia neta de conversión en sistemas reales no alcanza valores superiores al 12-13%.

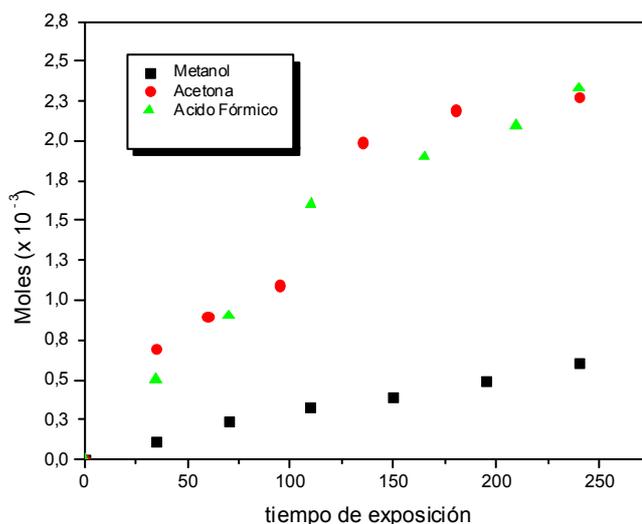


Figura 74 Formación de metanol, acetona y ácido fórmico durante el proceso de reducción de CO<sub>2</sub>. Condiciones experimentales: 100 ml/min CO<sub>2</sub>; pH = 1; TiO<sub>2</sub>-Ru (0.1%)

## Producción de H<sub>2</sub> y Gas de Síntesis a Partir de Residuos de Petróleo Pesado mediante Proceso Termoquímico Solar sin Generación de CO<sub>2</sub>

A finales del año 2002 quedó firmado un acuerdo de colaboración entre el CIEMAT, el SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH (Suiza) y PETROLEOS DE VENEZUELA-INTEVEP (Venezuela) para desarrollar el proyecto: "Solar Thermochemical Application for CO<sub>2</sub>-Free Production of Syngas + H<sub>2</sub> from Heavy Crude Oil".

Este proyecto, que comenzó a principios de 2003, tiene una duración prevista de 5 años y un presupuesto total estimado de 6,9 millones de US\$. Su objetivo es el desarrollo de una tecnología solar que, basándose en sistemas de torre con receptor central y con irradiación solar directa, permitan obtener gas de síntesis de alta calidad y/o hidrógeno a partir de residuos de petróleo pesado mediante un proceso termoquímico de gasificación a alta temperatura.

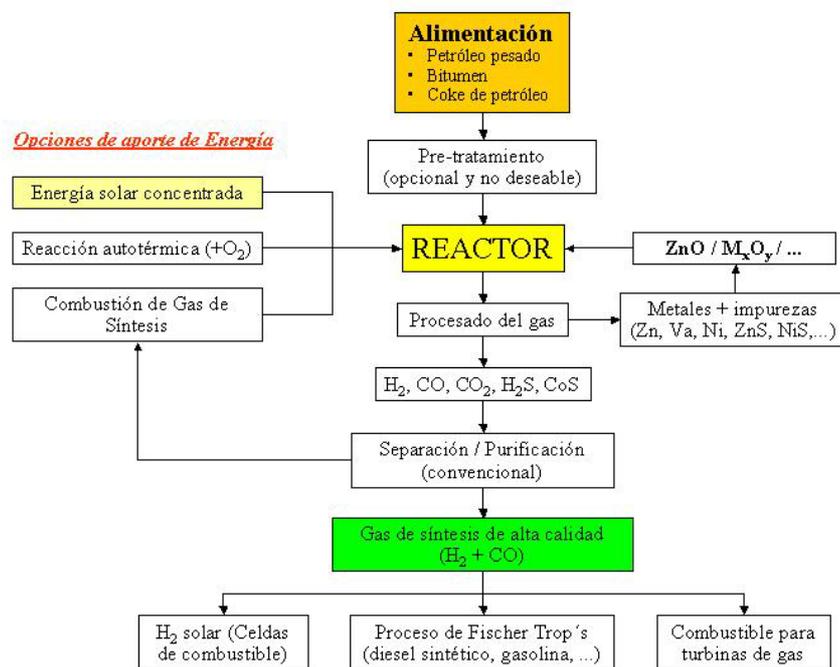


Figura 75 Diagrama conceptual del proceso que se pretende desarrollar tecnológicamente

La primera fase del proyecto se está desarrollando, fundamentalmente, en el ETH-Zurich donde se han obtenido resultados muy prometedores en el simulador solar existente. En base a estas experiencias, se ha comenzado a diseñar el reactor donde se llevará a cabo el proceso, en una primera fase a nivel de 5 kW y, posteriormente, se escalará hasta los 500 kW para demostrar el concepto en las instalaciones de la PSA. La fase final del proyecto incluirá el análisis de la viabilidad de la tecnología a una escala comercial en torno a los 200 MW térmicos. El proceso ha sido ya protegido mediante la presentación de la correspondiente patente en la Oficina de Patentes de Estados Unidos [Domingo y col., 2003].

Durante el año 2003, el CIEMAT ha centrado sus esfuerzos en el estudio de dos aspectos esenciales de la ingeniería del proceso: el análisis del comportamiento fluidodinámico del reactor solar que está siendo diseñado por el ETH (Figura 76) para lo cual se ha utilizado el código FLUENT (Figura 77) y, en segundo lugar, la optimización de la estrategia de la concentración del flujo solar para el diseño de la planta piloto de 500 kW a ensayar en la PSA.

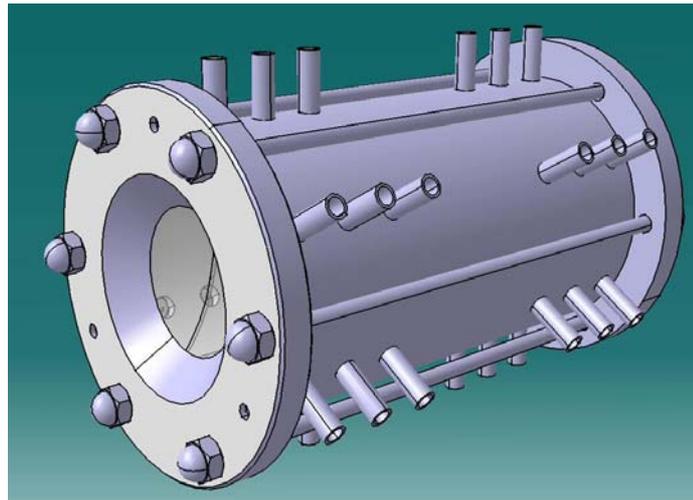
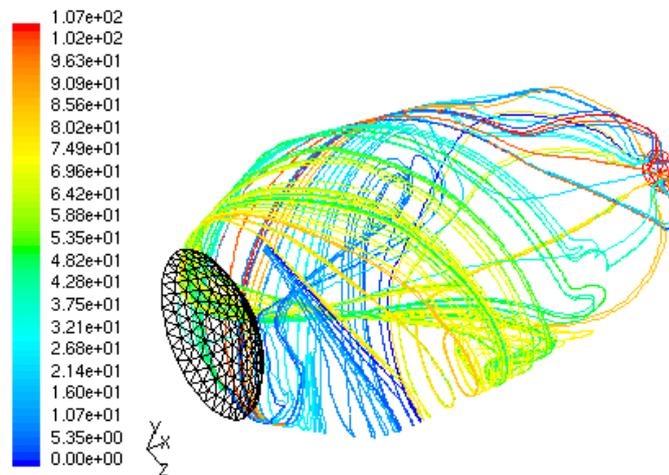


Imagen cortesía de ETH (Zurich, Suiza)

**Figura 76** Vista del reactor experimental diseñado para la primera fase del proyecto (5 kW).



**Figura 77** Modelización del flujo de partículas en el interior del reactor mediante el uso del código "FLUENT". Condiciones de análisis: Flujo por inyector = 2 Ln/min =  $4.0833 \times 10^{-5}$  kg/s; Flujo total = 12 Ln/min; Tiempo de residencia teórico medio = 4.72 s. Inyectores = 1A, 2A,3A,4A,5A,6A; Inyección tangencial ( $\alpha=0, \beta=90$ )

## Formación y Acceso

Los objetivos de este proyecto se pueden encuadrar dentro de las actividades prioritarias del propio CIEMAT. Con la **participación en programas de acceso** se contribuye a la diseminación entre la comunidad científica internacional de las posibles aplicaciones de la energía solar térmica, fomentando de esa forma el que un cada vez mayor número de grupos de investigación dediquen tiempo y recursos a explorar esta opción.

De esa manera, con los resultados obtenidos se favorece la penetración de las energías renovables en general, y de la solar térmica en particular, en las estructuras industriales y económicas de la sociedad, lo cual se define como uno de los objetivos fundamentales del Departamento de Energías Renovables.

Otro objetivo, no menos importante, de la participación de la PSA en programas de acceso a grandes instalaciones es que se contribuye a la optimización del uso de las

mismas en la PSA, al aprovecharse de manera rentable tiempos muertos en los que dichas infraestructuras de investigación no son utilizadas por ninguno de los otros proyectos.

Dichos programas de acceso tienen normalmente como argumento la movilidad transnacional de investigadores así como su formación, insistiendo especialmente en el colectivo de jóvenes investigadores como beneficiarios dentro de los mismos. Este es también el principio que rige el **programa propio de formación de la Plataforma Solar de Almería**. Por medio de este programa se viene admitiendo cada año a alrededor de una treintena de estudiantes de distintas nacionalidades contribuyendo de esa forma a que se transmita a nuevas generaciones de titulados el conocimiento acumulado en la Plataforma Solar de Almería acerca de la tecnología solar térmica durante veinte años de realización de experiencias.

Por último, se asumen las siguientes funciones con relación a la PSA como 'gran instalación científica de carácter internacional':

- Elaboración de propuestas en respuesta a convocatorias ó acciones que conciernan al centro como gran instalación científica.
- Gestión de la calidad en los servicios de carácter técnico ó científico. Incluyéndose tanto los que se prestan a los usuarios o clientes externos como los servicios del centro a los propios proyectos del CIEMAT.
- Actividades de divulgación.

### **ACTIVIDADES DENTRO DEL PROGRAMA 'MEJORA DEL POTENCIAL HUMANO DE INVESTIGACIÓN'**

El programa de 'Mejora del Potencial Humano de Investigación' (IHP) es una actividad concertada con la Dirección General para la Ciencia, la Investigación y el Desarrollo Tecnológico' (DG-RTD) de la Comisión Europea.

El objetivo principal de este programa es dar a la comunidad científica europea la posibilidad de utilizar cualquier gran infraestructura de investigación, sea cual sea el país donde esta se encuentre.

Dado que uno de los objetivos del CIEMAT en general, y de la PSA en particular, es contribuir a la diseminación del conocimiento acerca de las posibles aplicaciones de la energía solar térmica, este programa constituye una excelente herramienta para tal fin.

Por ello, la PSA viene participando de manera prácticamente ininterrumpida en los sucesivos programas que, genéricamente, podemos llamar de 'acceso a grandes instalaciones' y que han sido promovidos por la DG-XII desde 1990 en sucesivos programas marco de investigación y desarrollo tecnológico.

La vinculación con el programa IHP es por dos años, desde marzo del 2002 hasta febrero del 2004, siendo ocho las instalaciones de la PSA que se ofrecen para acceso y 18 el número total de grupos de investigación que serían recibidos al cabo de los dos años.

Como primera actividad del año, el comité de expertos independientes que realiza la selección anual de usuarios se reunió en CIEMAT-Moncloa el 11 de febrero de 2003, seleccionando a los 18 grupos de investigación de otros países europeos para otorgarles libre acceso a las instalaciones de ensayo de la PSA durante el año.

Posteriormente se invitó a todos los grupos seleccionados a una primera reunión en la PSA con objeto de presentarles el programa IHP y las instalaciones de ensayo. Esta reunión tuvo lugar el 10 de marzo.

### **LA RED DE INFRAESTRUCTURAS CIENTÍFICAS 'EUROCARE'**

En su afán por avanzar hacia la unificación de esfuerzos y la optimización de los recursos que se destinan a la investigación, la Comisión Europea promueve una serie de redes de infraestructuras de investigación, agrupándolas por afinidad temática.

Así, la PSA forma parte de la red 'EuroCARE', constituida por aquellos centros que se dedican a temas energéticos.

Además de la PSA, son miembros de 'EuroCARE':

- Universidad de Gales-Cardiff (coordinador-Reino Unido)
- ENEL Produzione (Italia)
- International Flame Research Foundation (Holanda)
- Federation of Aerothermodynamics and Propulsion Studies (Francia)
- Institute des Materiaux et Procedes (Francia).

Esta es también una actividad dentro del programa horizontal IHP y, dentro de ella, las tareas se estructuran en torno a tres paneles de estudio:

- Primero: Técnicas de medida y diagnóstico en procesos a alta temperatura.
- Segundo: Futuros requerimientos para la investigación.
- Tercero: Formación industrial en el contexto de las grandes instalaciones.



Figura 78  
www.euro-energy.net

Las reuniones se celebran con carácter semestral, este año por razones de diversa índole se han celebrado las dos reuniones en Velsen Noord (Holanda), en los meses de febrero y junio.

La red dispone de una página 'web' donde dar difusión a los contenidos de dichos paneles de estudio y a las oportunidades relacionadas con los programas de acceso desarrollados por cada uno de los socios. Dicha página se encuentra en [www.euro-energy.net](http://www.euro-energy.net).

Ya de cara al 6FP, el objetivo de 'EuroCARE' es ampliar sus actividades, incorporando nuevos socios y profundizando en la colaboración sobre la base de temas comunes de investigación.

## **ACTIVIDADES DE FORMACIÓN**

Los programas de acceso de la Comisión Europea DG-XII tienen normalmente como argumento la movilidad transnacional de investigadores así como su formación, insistiendo especialmente en el colectivo de jóvenes investigadores como beneficiarios dentro de los mismos.

Este es también el principio que rige el **programa propio de formación de la Plataforma Solar de Almería**. Por medio de este programa se viene admitiendo cada año a alrede-



Figura 79 Reunión de Usuarios IHP en la PSA

dor de una treintena de estudiantes de distintas nacionalidades contribuyendo de esa forma a que se transmita a nuevas generaciones de titulados el conocimiento acumulado en la Plataforma Solar de Almería acerca de la tecnología solar térmica durante veinte años de realización de experiencias.

Como objetivo dentro de este proyecto se propone continuar con esta actividad, incluso reforzándola si ello fuese posible. Las actividades de formación se reconocen también como prioritarias dentro del CIEMAT.

Las actividades relacionadas con el **programa de formación** han consistido en:

- Gestión del programa de becas asociado al convenio anual con la Universidad de Almería (UAL).
- Gestión de los acuerdos asociados a las becas 'Leonardo da Vinci'.
- Gestión de diversos acuerdos específicos de colaboración educativa con otras entidades para aceptar becarios en la PSA.

De cara al año 2004 se espera renovar el convenio con la UAL para gestionar el programa propio de becas y también continuar la actividad del programa 'Leonardo da Vinci' para la aceptación de estudiantes extranjeros.

### **ENSAYOS EN EL HORNO SOLAR**

Durante el 2003, el horno solar se ha dedicado principalmente a la realización de ensayos de materiales incluidos en el programa Mejora del Potencial Humano (IHP) del V Programa Marco de la Unión Europea, además han continuado los ensayos dentro de las líneas de investigación propias que el grupo de materiales de la PSA está llevando a cabo.

El grupo de materiales de la PSA, en colaboración con investigadores del departamento de Materiales Cerámicos del Instituto de Investigación para la Industria Eléctrica ARI de Bucarest (Rumania) de una parte, y con investigadores del Centro Austríaco de Investigación ARC Seibersdorf en asociación con la Universidad Técnica de Riga (RTU) de otra, ha llevado a cabo ensayos a distintas probetas en la MiniVac (Mini cámara de Vacío) en atmósferas controladas de argón para el Instituto ARI de Bucarest y en atmósferas de nitrógeno para ARC Seibersdorf, tanto en el plano horizontal como en el vertical. Además existen una línea de investigación propia basada en tratamientos térmicos de

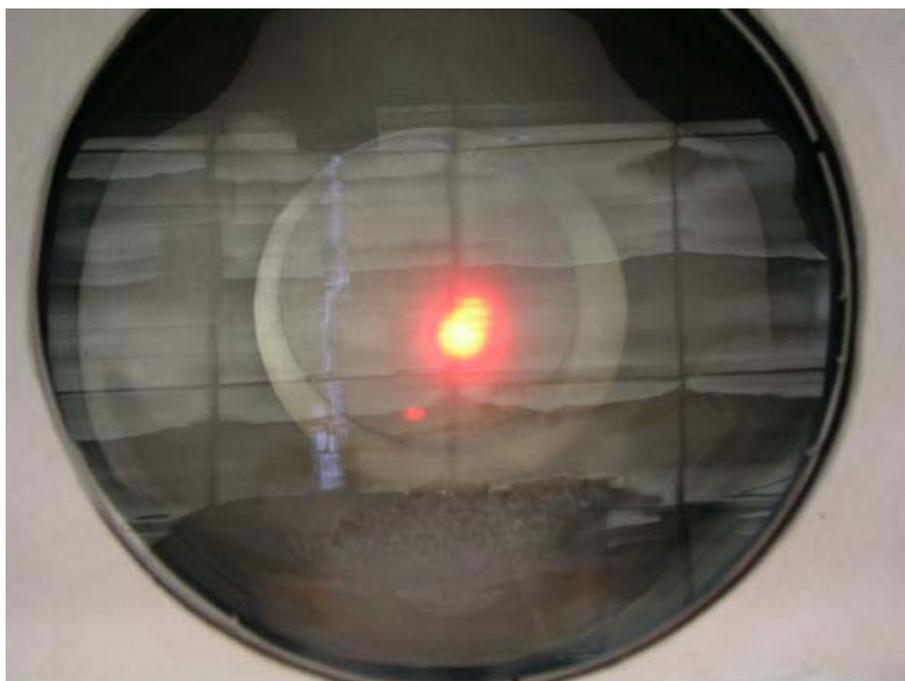


Figura 80 Crisol de ensayos en la MiniVac

probetas de acero pulvimetalúrgico, la espumación de probetas de aluminio y el sinterizado de mazos de alambre de cobre.

El **Instituto ARI de Bucarest** estudia el efecto del contenido de circonia (+CaO o +MgO) en la temperatura, tiempos de sinterización, densidad y resistencia mecánica de composites de alúmina-circonia. Estos materiales son presinterizados en un horno eléctrico a diferentes temperaturas y después son expuestos en el horno solar a temperaturas próximas a los 2000 °C; posteriormente los resultados obtenidos se comparan con los conseguidos en condiciones similares en un horno eléctrico convencional.

Las muy altas temperaturas que se alcanzan en el horno solar lo convierten en una herramienta idónea para el sinterizado de los estos composites, ya que dan lugar a una sinterización más completa.

Para las altas temperaturas previstas hubo que usar termopares tipo C (5%W-Re / 26%W-Re), cuyo rango máximo alcanza los 2200 °C y crisoles de wolframio y molibdeno.

El principal problema que presentaron los ensayos estuvo relacionado con la fuerte reacción que se producía en la MiniVac entre los distintos materiales de su interior, lo que provocaba la emisión de gran cantidad de humo que evitaba que gran parte de la energía del foco alcanzase las probetas, por lo que no pudieron alcanzarse los 2000 °C objetivo de los ensayos. Para las siguientes campañas está previsto adquirir varillas soporte, y chapas aislantes de wolframio y molibdeno de forma que se evite el uso de otros materiales aislantes como el grafito, la alúmina porosa o la tela de zirconia que pueden reaccionar con el molibdeno de la funda del termopar.

Los ensayos llevados a cabo por el **Centro de Investigación ARC Seibersdorf** de Austria en colaboración con la **Universidad Técnica de Riga** están dirigidos al desarrollo de materiales nanoestructurales –materiales con tamaño de grano inferior a 100 nm-. La fabricación de estos materiales incluye las siguientes etapas: preparación del nanopolvo, su desaglomeración y pasivación, densificación y sinterizado. Todas estas etapas son críticas para la preparación de materiales nanoestructurales.

Los nanopolvos de los que se obtienen los nanomateriales son altamente reactivos, por lo que los métodos tradicionales de compactación (sinterizado, presión en caliente, sinterizado por presión de gas o presión isostática en caliente) dan lugar a un gran crecimiento del grano, produciendo un material con una estructura de grano gruesa. Es necesario llevar a cabo tratamientos térmicos de alta energía y tiempo reducido para desarrollar este tipo de materiales, por lo que el horno solar, dadas sus características, es la instalación más adecuada para estos tratamientos.

Junto con el Instituto de Química Inorgánica de Riga, ARC Seibersdorf estudia las posibilidades de uso de varios métodos alternativos de sinterización para el desarrollo de materiales nanoestructurales de diferentes tipos, así como comparar las posibilidades de estos métodos con los métodos tradicionales de sinterización.



**Figura 81 Espejo inclinado y MiniVac durante un ensayo**

Como compuestos básicos para la investigación, se usan polvos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiCN}$ ,  $\text{Cu}$  y  $\text{Si}_3\text{N}_4$  con diferentes aditivos de sinterización.

La campaña de ensayos coincidió con la puesta en marcha del nuevo helióstato GM-140 que ha sustituido a los cuatro helióstatos MBB anteriores, por lo que solo unos pocos ensayos pudieron realizarse y han quedado pendientes para una próxima campaña los ensayos previstos en 2003.

El **Grupo de Materiales de la PSA** está involucrado en diferentes líneas de investigación basadas en la aplicación de la energía solar concentrada a procesos pulvimetalúrgicos. Las condiciones particulares del sinterizado de partículas metálicas, que debe realizarse a altas temperaturas y en atmósferas controladas o en vacío, pueden obtenerse en los Hornos Solares ya que estas instalaciones están diseñadas para alcanzar concentraciones energéticas y temperaturas muy elevadas, admitiendo el uso de cámaras de vacío con sistemas de preparación de gases.

En este sentido se han establecido colaboraciones con distintas Universidades para avanzar en la aplicación de la energía solar concentrada a este tipo de procesos, incidiendo particularmente en las ventajas que ofrecen los Hornos Solares frente a los hornos convencionales, ya que la aplicación de esta energía térmica renovable a procesos de tratamiento térmico, además de no precisar transformación alguna, permite proporcionar de manera controlada altas densidades de flujo energético con un amplio espectro de longitudes de onda, alcanzándose velocidades muy altas de irradiación y temperaturas de hasta  $3500^\circ\text{C}$ .

Actualmente existen tres líneas de investigación abiertas: *Sinterizado de cobre en Hornos Solares* en colaboración con el Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad de Sevilla, y *Estudio estructural de aceros pulvimetalúrgicos tras su tratamiento térmico en Hornos Solares* y *Obtención de espumas de aluminio mediante energía solar concentrada*, ambas en colaboración con el Departamento de Ingeniería de Materiales de la E.T.S. de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid.

A lo largo del año 2003 en el Horno Solar se han llevado a cabo diferentes campañas de ensayos para cada una de estas líneas de trabajo, obteniéndose resultados satisfactorios y demostrándose en todos los casos la viabilidad de los procesos.

## Referencias Documentación

- [1] Agüera A., Fernández-Alba A.R., Piedra L., Mézcua M., Hernando D., Malato S., Cáceres J.. Use of Chemical and Biological techniques in the Evaluation of Pesticide degradation by Solar Photocatalytic processes. 7th Int. Conf. Solar Energy Storage and Applied Photochemistry 4th Int. Workshop on Environmental Photochemistry. Luxor, Egypt, February 23 – 28, 2003. Libro de Resúmenes, Póster 6. 2003.
- [2] Alarcón D.; Blanco J.; Malato S.; Maldonado M.I.; Sánchez B. Solar thermal seawater distillation activities at the Plataforma Solar de Almería: Increasing the thermo-economic process efficiency. Proceedings of the 4th European Congress in Chemical Engineering. Septiembre 21-25, 2003. Granada, 2003.
- [3] Ballestrín J., S. Ulmer, A. Morales, A. Barnes, L.W. Langley, M. Rodríguez (2003) "Systematic error in the measurement of very high solar irradiance", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 80, 375–381.
- [4] Blanco Gálvez J., Malato Rodríguez S. Solar Detoxification. UNESCO Publishing, France. ISBN 92-3-103916-4. 190 pag. 2003a.
- [5] Blanco J. "Energía solar y tecnologías del agua". En "Seminario internacional sobre tecnologías económicas para la descontaminación y desinfección de agua" of the "X Seminario Peruano de Energía Solar", Cusco, Nov. 17 – 22, 2003. Comunicación oral, 2003b.
- [6] Blanco J. "Energía solar y tecnologías del agua". Taller Internacional "Nuevas tecnologías para la desinfección y descontaminación del agua" organizado por IPEN, Lima, Nov. 14, 2003. Comunicación oral. 2003c.
- [7] Blanco J. Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes en agua". Editorial CIEMAT. ISBN: 84-7834-442-X. 277 pag. 2003f.
- [8] Blanco J., Malato S., Alfonso Vidal, Ana I. Cardona, D. Alarcón, Julia Cáceres, Manuel I. Maldonado. Applied Studies in Solar Photocatalytic Detoxification: an Overview. *ISES Solar World Congress 2003*, Göteborg, Sweden, 14-19 June 2003. Libro de Resúmenes, Comunicación oral, 05-42. 2003d.
- [9] Blanco J.; Hublitz A.; Alarcón D.; Sánchez B.; Malato S. Techno-economical comparison of different solar-assisted heat supply systems for a seawater multi-effect distillation unit. *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2003*. 14-19 junio 2003. Göteborg, Sweden. 2003e.
- [10] Cáceres J., Malato S., Fernández-Alba A.R. Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar. Editorial CIEMAT, Madrid, ISBN 84-7834-436-5. 336 páginas. 2003.
- [11] Chen, J.C. Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Liquids in Convective Flow. *Ind. Eng. Chem. Process Design and Develop*, Vol. 5, N° 3, 1966: pp. 322-339.

- [12] Domingo Rodríguez P., Morales A. (PDVSA-INTEVEP), Blanco, J. Romero, M. (CIEMAT), Steinfeld, A. (ETH). Process for the conversion of heavy crude oils and petroleum coke to syngas and hydrogen using an external source of radiation. Registro No. 60/508,064 de la Oficina de patentes de los Estados Unidos (01-10-2003).
- [13] Duffy E.F., F. Al Touati, S.C. Kehoe, O.A. McLoughlin, L.W. Gill, W. Gernjak, I. Oller, M.I. Maldonado, S. Malato, J. Cassidy, R.H. Reed, K.G. McGuigan. A novel TiO<sub>2</sub>-assisted solar photocatalytic batch-process disinfection reactor for the treatment of biological and chemical contaminants in domestic drinking water in developing countries. Presentado a *Solar Energy*. 2003.
- [14] Farré M.J., Maria Isabel Franch, Sixto Malato, José Antonio Ayllón, José Peral and Xavier Domènech. Degradation of some biorecalcitrant pesticides by Homogeneous and Heterogeneous Photocatalytic Ozonation. Presentado a *Chemosphere*. 2003.
- [15] Fernández J. (2003). "Análisis estadístico de la reflectividad de un campo de helióstatos. Aplicación al campo de helióstatos CRS de la Plataforma Solar de Almería". Informes Técnicos CIEMAT- 1023. Sept. 2003. Ed. CIEMAT. ISSN: 1135-9420.
- [16] Fernández P. "Procesos de Fotocatálisis Solar para la Detoxificación y Descontaminación de Aguas". Taller Internacional "nuevas tecnologías para la desinfección y descontaminación del agua" organised by IPEN, Lima, Nov. 14, 2003. Comunicación oral, 2003a.
- [17] Fernández P. "Procesos de Fotocatálisis Solar para la Detoxificación y Descontaminación de Aguas". En "Seminario internacional sobre tecnologías económicas para la descontaminación y desinfección de agua" of the "X Seminario Peruano de Energía Solar", Cusco, Nov. 17 – 22, 2003. Comunicación oral, 2003b.
- [18] Fernández-Ibáñez P., Blanco, J. Malato, S. de las Nieves F.J., Application of the colloidal stability of TiO<sub>2</sub> particles for recovery and reuse in solar photocatalysis. *Wat. Res.*, 37, 3180-3188, 2003c.
- [19] García G., "First Autonomous Heliostats Field, PCHA project", *Proceedings of Solar-Paces Tasks Meetings*, Göteborg, Sweden, June 17, 2003. Eds. M. Romero, A. Steinfeld y V. Quaschnig. Pub. CIEMAT. ISBN: 84-7834-455-1.
- [20] García G., A. Egea. M. Romero, "First Autonomous Heliostat field. PCHA project", *ISES Solar World Congress 2003*, 14-19 junio 2003 Göteborg, Suecia. ISBN: 91-631-4740-8.
- [21] Gernjak W., Axel Mentler, Raquel Rodríguez, María Fürhacker, Sixto Malato. Photo-Fenton treatment of a pesticide mixture simulating real wastewater and 4-nonylphenol. In: *The Improving Human Potential Programme. Research Results at Plataforma Solar de Almería within the Year 2002 Access Campaign*. CIEMAT, ISBN 84-7834-446-2. pp. 43-50, 2003a.
- [22] Gernjak W., Fürhacker, M., Maldonado, M.I., Oller, I., Yebra L. y Malato S., Systematic investigation of the photo-fenton method at pilot plant scale. 3rd Scientific Meeting of the Spanish Society of Chromatography and Related Techniques. *3rd Waste Water Cluster (WWC) European Workshop*. Almería, 19-21 noviembre 2003. Libro de Resúmenes, OP-12. 2003b.
- [23] Gernjak W., M.I. Maldonado, S. Malato, J. Cáceres, T. Krutzler, A. Glaser and R. Bauer. Degradation of polyphenolic content of Olive Mill Wastewater (OMW) by solar photocatalysis. *IWA 3rd Conference on Oxidation Technologies for Water and Wastewater Treatment*, Goslar 18- 22 mayo 2003. A. Vogelpohl (Ed.), pp. 879-884. 2003c.
- [24] Gernjak W., M.I. Maldonado, S. Malato, J. Cáceres, T. Krutzler, A. Glaser and R. Bauer. Pilot-Plant treatment of Olive Mill Wastewater (OMW) by solar photocatalysis and solar photo-Fenton method. Presentado, *Solar Energy*. 2003d.

- [25] Gernjak W., Krutzler, T. Glaser, A. Malato, S. Cáceres, J. Bauer, R. Fernández-Alba, A. R., Photo-Fenton treatment of water containing natural phenolic pollutants. *Chemosphere*, 50, 71-78, 2003e.
- [26] Goebel, O. Wärmeübergang in Absorberrohren von Parabolrinnen-Solarkraftwerken. Stuttgart, *VDI-Fortschrittsberichte*, Sección 6 (Energietechnik), N°. 402. ISBN: 3-18-340206-8.
- [27] Goebel, O.; Hennecke, K. Investigation of thermohydraulics in a parabolic trough absorber tube with direct steam generation (DSG). In Becker, M. and Böhmer, M. eds. *Proceedings of 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies* celebrado en Colonia (Alemania) del 7 al 11 de octubre de 1996. C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 1997: pp. 787-814. ISBN 3-7880-7616-X.
- [28] González, L. "Manual de "Dimensionado Planta-DSG". Herramienta para el diseño de plantas de colectores solares cilindro parabólicos con Generación Directa de Vapor". Informe técnico INDITEP-SC-SF-01. Plataforma Solar de Almería, mayo 2003.
- [29] Guillard Ch., J. Disdier, Ch. Monnet, J. Dussaud, S. Malato, J. Blanco, M. I. Maldonado, J.M. Herrmann. Solar efficiency of a new deposited titania photocatalyst: chlorophenol, pesticide and dye removal applications. *Appl. Catal. B: Environ.*, 46, 319-332. 2003a.
- [30] Guillard Ch., Jean Disdier, Jean-Marie Herrmann, Christine Monnet, Joseph Dussaud, Sixto Malato and Julian Blanco. Solar efficiency of a photocatalytic nonwoven: dye removal applications. In: *The Improving Human Potential Programme. Research Results at Plataforma Solar de Almería within the Year 2002 Access Campaign*. CIEMAT, ISBN 84-7834-446-2. pp. 59-66, 2003b.
- [31] Gungor, K.E.; Winterton, R.H.S. A General Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 29, No. 3, 1986: pp. 351-358.
- [32] Hoffschmidt B., Téllez F., Valverde A., Fernández J., Fernández V. (2003), "Performance evaluation of the 200-kWth HiTRec-II Open Volumetric Air Receiver". *Int. J. of Solar Energy Engineering* 25, 87-94.
- [33] Kandlikar, S.G. A General Correlation for Saturated Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer Inside Horizontal and Vertical Tubes. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, 1990, pp: 219-228
- [34] Koehler, W.; Herbst, O.; Kastner, W. Thermal design of solar absorber tubes with direct steam generation. In Becker, M. and Böhmer, M. eds. *Proceedings of 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies* celebrado en Colonia (Alemania) del 7 al 11 de octubre de 1996. C.F. Müller Verlag, Heidelberg, Alemania 1997: pp. 767-786. ISBN 3-7880-7616-X.
- [35] Kositzi M., A. Antoniadis, I. Poullos, I. Kiridis, S. Malato. Solar photocatalytic treatment of simulated dyestuff effluents. In: *The Improving Human Potential Programme. Research Results at Plataforma Solar de Almería within the Year 2002 Access Campaign*. CIEMAT, ISBN 84-7834-446-2. pp. 67-74, 2003a.
- [36] Kositzi M., A. Antoniadis, I. Poullos, I. Kiridis, S. Malato. Solar Photocatalytic Treatment of Simulated Dyestuff Effluents. Submitted, *Solar Energy*. 2003b.
- [37] Kositzi M., Poullos, I., Malato, S., Cáceres, J. y Campos, A., Solar Photocatalytic Treatment of Synthetic Municipal Wastewater. *Water research*, in press, 2003c.
- [38] Mailhot G., J.Cáceres, S. Malato and M. Bolte. Fe(III) solar light induced degradation of Diethylphthalate (DEP) in aqueous solution. In: *The Improving Human Potential Programme. Research Results at Plataforma Solar de Almería within the Year 2002 Access Campaign*. CIEMAT, ISBN 84-7834-446-2. pp. 35-42, 2003.

- [39] Malato Rodríguez S., Blanco Gálvez, J., Fernández Ibáñez, P., Alarcón Padilla, D., Colares Pereira, M., Farinha Mendes, J. y Correia de Oliveira, J., Engineering of Solar Photocatalytic Collectors. Presentado, *Solar Energy*. 2003a.
- [40] Malato S., A. Agüera. Detoxification of pesticides in water using solar photocatalysis. In: Pesticide decontamination and detoxification. ACS Symposium Series 863. Jay J. Gan, Peter C. Zhu, Steven D. Aust, Ann T. Lemley (eds.). *Am. Chem. Soc.*, Washington D.C., USA. ISBN-0-8412-3847-2. pp. 113-126, 2003b.
- [41] Malato S., Albanis T., Piedra L., Agüera A., Hernando D., Amadeo Fernández-Alba. LC-MS and LC-MS/MS strategies for the evaluation of pesticide intermediates formed by degradative processes. photo-Fenton degradation of diuron. In: Liquid Chromatography/mass Spectrometry, MS/MS and Time-of-flight MS. ACS Symposium Series 850. I. Ferrer and E.M. Thurman (eds.). *Am. Chem. Soc.*, Washington DC, USA. ISBN 0-8412-3825-1. pp. 66-95. 2003c.
- [42] Malato S., Cáceres J., Fernández-Alba A. R., Piedra L., Hernando M. D., Agüera A., Vial J.. Photocatalytic treatment of diuron by solar photocatalysis: evaluation of main intermediates and toxicity. *Env. Sci. Technol.*, 37, 2516-2524, 2003d.
- [43] Malato S., Blanco, J. Campos, A. Cáceres, J. Guillard, C. Herrmann J.M. y Fernández-Alba, A.R., Effect of operating parameters on the testing of new industrial titania catalysts at solar pilot plant scale. *Appl. Catal. B: Environ.*, 42, 349-357. 2003e.
- [44] Malato S., J. Blanco, A. Vidal, D. Alarcón, J. Cáceres, M. I. Maldonado. Photocatalysis in Plataforma Solar de Almería: applied studies in environmental detoxification. *7th Int. Conf. Solar Energy Storage and Applied Photochemistry 4th Int. Workshop on Environmental Photochemistry*. Luxor, Egipto, 23 – 28 febrero 2003. Libro de Resúmenes, Presentación oral. 2003f.
- [45] Malato S., J. Blanco, M. I. Maldonado, I. Oller, W. Gernjak, D. Alarcón, P. Fernández. Solar advanced oxidation processes applied to wastewater treatment. A step forward: CADOX project. III reunión de la Sociedad Española de Cromatografía y Técnicas Afines. 3rd Waste Water Cluster (WWC) European Workshop. Almería. 19-21 noviembre 2003. Libro de Resúmenes, IL-7. 2003g.
- [46] Malato S., Maldonado, M. I., Blanco, J., Cáceres, J., Gernjak, W. y Alarcón, D.C., Photocatalytic water treatment: practical applications with solar energy. *IWA 3rd Conference on Oxidation Technologies for Water and Wastewater Treatment*, Goslar 18- 22 mayo 2003. A. Vogelpohl (Ed.), pp. 221-226. 2003h.
- [47] Malato S., J. Blanco, A. Vidal, D. Alarcón, M. I. Maldonado, J. Cáceres, W. Gernjak. Applied studies in solar photocatalytic detoxification: an overview. *Solar Energy*, 75, 329-336, 2003i.
- [48] Maldonado M. I., I. Oller, S. Malato, W. Gernjak, J. Blanco, D. Alarcón, P. Fernández. A coupled advanced oxidation-biological process for recycling of industrial wastewater containing persistent organic contaminants. Results of photo-Fenton preliminary experiments. *III reunión de la Sociedad Española de Cromatografía y Técnicas Afines. 3rd Waste Water Cluster (WWC) European Workshop*. Almería. 19-21 noviembre 2003 Libro de Resúmenes, p-56. 2003a.
- [49] Maldonado Rubio M.I., S. Malato Rodríguez, J. Blanco Gálvez, D. Alarcón Padilla, W. Gernjak, Wastewater treatment by solar photocatalysis: an overview. I Jornadas Ibéricas de Fotoquímica. Santiago de Compostela, 18-20 septiembre 2003. Libro de Resúmenes. Comunicación C-24, pag. 58. 2003b.
- [50] Mañas S. Estudio de la Reactividad de Fósforo Blanco y Metales de Transición. Tesis Doctoral. 2003.

- [51] McLoughlin O.A., P. Fernandez, W.Gernjak, S.Malato, L.W.Gill. Feasibility of solar disinfection of water using low cost compound parabolic collectors. *III reunión de la Sociedad Española de Cromatografía y Técnicas Afines. 3rd Waste Water Cluster (WWC) European Workshop*. Almería, 19-21 noviembre 2003. Book of Abstracts, P-60. 2003a.
- [52] McLoughlin O.A., P. Fernandez, W.Gernjak, S.Malato, L.W.Gill. Photocatalytic Disinfection of Water Using Low Cost Compound Parabolic Collectors. Presentado, *Solar Energy*. 2003b.
- [53] McLoughlin O.A., S.C.Kehoe, K.G.McGuigan, E.F. Duffy, F. Al Touati, W.Gernjak, I. Oller, S.Malato, L.W. Gill. Solar Disinfection of Contaminated Water: a Comparison of Three Small-Scale Reactors. Presentado, *Solar Energy*. 2003c,
- [54] Monterreal R. and Gimenez A. (2003). "Search for a Real Model of Heliostat Optics Using Genetic Algorithms". *Proc. ISES Solar World Congress*, Göteborg, Suecia, junio 2003. ISBN: 91-631-4740-8
- [55] Monterreal R., "The solar diameter as a calibration source for a proper CCD camera image scale", *Proceedings of SolarPaces Tasks Meetings*, Göteborg, Suecia, junio 17,2003. Eds. M. Romero, A. Steinfeld y V. Quaschnig. CIEMAT. ISBN: 84-7834-455-1.
- [56] Palero S., Romero M., Estrada C., Castillo J.L. (2003), "Experimental investigation in small scale volumetric solar receivers to study the mass flow instability and its comparison to theoretical models". *Proc. ISES Solar World Congress*, Göteborg, Suecia, junio 2003. ISBN: 91-631-4740-8
- [57] Richter C., A. Romerosa, S. Mañas, M. Peruzzini, S. Malato. Photochemical Oxidation of P4 to Obtain phosphorus Derivates. *7th Int. Conf. Solar Energy Storage and Applied Photochemistry 4th Int. Workshop on Environmental Photochemistry*. Luxor, Egypt, February 23 – 28, 2003. Libro de Resúmenes, Poster 67. 2003.
- [58] Rodríguez M., Sixto Malato, Jaime Giménez, David Curcó, Cesar Pulgarin and Santiago Espulgas. Mineralization of phenol by means of solar photo-Fenton treatment: influence of different types of reactors. *4th European Congress of Chemical Engineering*. Granada, 21-25 septiembre 2003. Libro de Resúmenes, 4, P-4.3-081. 2003.
- [59] Romero M. (2003). "Hybrid CSP systems as an intermediate step from fossil fuels to solar". *Proceedings of International Forum for Technology on Heavy and Extra-Heavy Crude Oils. 21st Century Vision*. Oct. 09-11, Puerto la Cruz (Venezuela). Ed. PDVSA. Oct. 2003.
- [60] Romero M., "Task I working group", *Proceedings of SolarPaces Tasks Meetings*, Göteborg, Suecia, 17 junio 2003. Eds. M. Romero, A. Steinfeld and V. Quaschnig. Pub. CIEMAT. ISBN: 84-7834-455-1.
- [61] Romero M., Buck R., Pacheco J.E. (2002), "An Update on Solar Central Receiver Systems, Projects, and Technologies.", *Int. J. Solar Energy Eng.*, Vol. 124, pp. 98-108.
- [62] Romero M., Zarza E. (2003). "Desarrollo tecnológico e implantación de las centrales eléctricas termosolares en España". *Energía*. 168, 60-66.
- [63] Sánchez M., Romero M. (2003), "Optimisation of heliostat field layout in central receiver systems based in yearly normalized energy surfaces". *Proc. ISES Solar World Congress*, Göteborg, Suecia, junio 2003. ISBN: 91-631-4740-8
- [64] Sánchez, B. Candal, R. Cardona, A. Ávila, P. Rebollar, M., "Photocatalytic oxidation of chlorinated hydrocarbons with TiO<sub>2</sub> on magnesium silicate monoliths". *18th North American Catalysis Society Meeting*. 1-6 junio 2003. Cancún, México.
- [65] Saoud M., Romerosa, A., Mañas Carpio, S., Gonsalvi, L., y Maurizio Peruzzini. *Eur. J. Inorg. Chem*, 2003, 1614-1619. 2003.

- [66] Shah, M. A new correlation for heat transfer during boiling flow through pipes. *Transactions of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. (ASHRAE), Vol. 82, 1976: pp. 66-86.
- [67] Sugarmen C., Ring A., Buck R., Heller P., Schwarzbözl P., Tellez F., Marcos M. J., Enrile J., Solar-Hybrid Gas Turbine Power Plants – Test Results and Market Perspective. *Proc. ISES Solar World Congress, Göteborg, Suecia, junio 2003*. ISBN: 91-631-4740-8
- [68] Téllez F. (2003), "Thermal performance evaluation of the 200kWth Solair Volumetric Solar Receiver". *Informes técnicos CIEMAT-1024*. Ed. CIEMAT. Madrid. Sept. 2003. ISSN: 1135-9420.
- [69] Valenzuela, L., Berenguel, M., Zarza, E., Camacho, E.F., Control schemes for direct steam generation in parabolic solar collectors under recirculation operation mode. *Presentado a Solar Energy, 2003*.
- [70] Valenzuela, L., Zarza, E., Berenguel, M., Camacho, E.F., Control concepts for direct steam generation process in parabolic troughs. *ISES Solar World Congress, Göteborg, Suecia, June 2003*.
- [71] Valenzuela, L., Zarza, E., Berenguel, M., Camacho, E.F., Feedforward control for a once through solar boiler. *IEEE Control System Magazine, 2003, in printing*.
- [72] Valera P., A. Esteban, M. Carrillo, R. Osuna, P. Menna, R. Gambi, P. Helm, M. Grottke, M. Geyer, F. Dobón, J. Monedero, A. Lugo, M. Romero, F. Chenlo, M. Alonso, M. Sánchez, J. Artigas, A. Fresneda (2003) "SOLAR ENERGY: Comparative analysis of solar technologies for electricity production". *Proceedings World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC-3, Osaka, Japón, May 11-18, 2003*
- [73] Zarza, E. "Generación Directa de Vapor con Colectores Solares Cilindr Parabólicos. Proyecto DISS". Tesis Doctoral presentada en la E.S.I.I. de Sevilla. Noviembre de 2003.
- [74] Zarza, E.; Sánchez, R. Influencia de la posición que ocupan las Secciones Transversales de Ensayos (S.T.E.) de los colectores DISS con respecto a los espejos reflectores. *Informe técnico DISS-SC-SF-31*. Almería, Plataforma Solar de Almería, noviembre, 2002.

## Lista de Acrónimos

AIE	Agencia Internacional de la Energía
ASME	American Society of Mechanical Engineers (USA)
ANSI	American National Standards Institute (USA)
API	ionización a presión atmosférica
ARC	Centro Austríaco de Investigación Seibersdorf
ARI	Instituto de Investigación para la Industria Eléctrica de Bucarest (Rumania)
ASINEL	Asociación para la Investigación Eléctrica
BOE	Boletín Oficial del Estado (Official State Bulletin) (E)
BMU	German Ministry of the Environment
BOP	Balance of Plant
CASA	Construcciones Aeronáuticas S.A.
CCD	charge-coupled device
CCP	colectores cilindro parabólicos
CE	Comisión Europea
CESA-1	Central Eléctrico Solar Almería-1
CET	central eléctrica termosolar
CFU	Unidades formadoras de colonias
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas
CPC	colector parabólico compuesto
CRS	Sistema de Receptor Central
DCS	Sistema de colectores distribuidos
DER	Dpto. de Energías Renovables (CIEMAT)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (D)
DBO	demanda biológica de oxígeno
DEAHP	BOMBA de absorción de calor de doble efecto
DQO	demanda química de oxígeno
ETH	Instituto Federal de Tecnología Zurich (CH)

FID	detector de ionización por llama
FTIR	espectroscopía infrarrojo de transformación Fourier
GC-AED	cromatografía de gases con detector de emisiones atómicas
GC-MS	cromatografía de gases acoplado a masas
GDV	generación directa de vapor
HDPE	polietileno de alta densidad
HPLC	cromatografía líquida de alta resolución
HTF	fluido de transferencia de calor
ICP-CSIC	Instituto de Catálisis y Petroleoquímica – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (E)
IHP	Mejora del Potencial Humano de Investigación
INETI	Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (P)
IT	trampa de iones
LC-ESI-MS	cromatografía de líquidos acoplado espectrometría de masas con sonda electrospray
LC-GC	cromatografía de líquidos, cromatografía de gases
LC-MS	cromatografía de líquidos acoplado a espectrometría de masas
LLE	extracción líquido-líquido
MBB	Messerschmitt Bolkow-Blohm (D)
MCYT	Ministerio de Ciencia y Tecnología
MED	destilación multi-efecto
NBCS	disolventes clorados no biodegradables
NTUA	National Technical Univ. of Athens
PD	producto de degradación
PET	polietilentereftalato
PHS	sustancias tóxicas prioritarias
POA	procesos de oxidación avanzada
Prohermes II	Programmable Heliostat and Receiver Measuring System II
PSA	Plataforma Solar de Almería
PTC	colector cilindroparabólico
RC	Receptor Central
RTU	Universidad Técnica de Riga
SENER	Empresa de Ingeniería SENER
SHIP	Solar Heat for Industrial Processes (Tarea 33/4 de la AIE)
SODIS	Solar Disinfection
SOLUCAR	Solúcar Energía S.A.
SPE	extracción en fase sólida
TCD	detector de conductividad térmica
TOC	carbono orgánico total
TSA	Programa Tecnológico de Receptor Solar de Aire

WFD            Directiva Marco del Agua 2000/60/EC  
ZSW            Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (D)



**PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA**

Carretera de Senés s/n

P.O. Box 22

04200 TABERNAS (Almería), Spain

Teléfono: +34 950 387900

Fax: +34 950 365300

e-mail: [info@psa.es](mailto:info@psa.es)

web: [www.psa.es](http://www.psa.es)